

## مقایسه تولید انرژی گرمایی از زیست توده چوبی

سعید مهدوی

- دانشیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فرآورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران  
پست الکترونیک: smahdavi@rifr-ac.ir

تاریخ دریافت: فروردین ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: مهر ۱۳۹۸

### چکیده

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مثل زیست توده روز به روز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا کشورها متوجه می‌شوند که تولید انرژی از این طریق راه حلی برای انجام تعهدات بین‌المللی‌شان در راستای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن می‌باشد. در سیستم‌های تبدیل انرژی از زیست توده به علت نیازهای انرژی تمامی فرایندها، سوخت‌هایی با ارزش گرمایی نسبتاً بالا از نظر کارایی و بازده مطلوب‌تر هستند. در سیستم‌های تبدیل گرمایی، زیست توده با ارزش گرمایی بیشتر و ترکیب مناسب، مطلوب‌تر است. در این تحقیق، ۱۰ زیست توده چوبی به منظور تولید انرژی گرمایی ارزیابی شد. ویژگی‌های مورد بررسی این زیست توده‌ها برای ارزیابی شامل درصد رطوبت، خاکستر، مواد فرار، عناصر (کربن، هیدروژن، نیتروژن، گوگرد و اکسیژن) و ارزش گرمایی بودند. ارزش گرمایی زیست توده بر اساس دو روش محاسبه‌ای و اندازه‌گیری مستقیم به ترتیب با استفاده از مقدار عناصر و بمب کالری متری تعیین شد. نتایج نشان داد زیست توده کاج تهران دارای درصد گوگرد بیشتری نسبت به بقیه است که در فرایند تولید انرژی گرمایی از نظر زیست محیطی یک مورد نامطلوب محسوب می‌شود. زیست توده پرتقال تامسون دارای کمترین نسبت کربن ثابت به مواد فرار بوده و برای فرایند گازی‌سازی مناسب‌تر است. بیشترین و کمترین ارزش گرمایی به ترتیب برای زیست توده حاصل از صنوبر دلتوئیدس و سیب تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: زیست توده، مقدار رطوبت، خاکستر، مواد فرار، کربن ثابت، ارزش حرارتی.

### مقدمه

امروزه به دلیل نیاز به کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، توجه بازار جهانی به مصرف سوخت‌های پاک به‌ویژه زیست توده معطوف گردیده است (Dahiya, 2014). زیست توده شامل کلیه موادی در طبیعت می‌شود که در گذشته نزدیک جاندار بوده، از موجودات زنده به عمل آمده و یا زائادات، ضایعات و یا فضولات آنها می‌باشد. زیست توده بر پایه کربن است و از مخلوط مولکول‌های آلی شامل هیدروژن، معمولاً اکسیژن و اغلب نیتروژن و مقدار کمی از دیگر اتم‌ها مانند فلزات قلیایی، فلزات

قلیایی خاکی و فلزات سنگین تشکیل شده است. استفاده از زیست توده به‌عنوان یک منبع انرژی نه تنها به دلایل اقتصادی بلکه به دلیل توسعه اقتصادی و زیست محیطی نیز جذاب است و از سویی آن را عامل تسریع در رسیدن به توسعه پایدار می‌دانند (Demirbas, 2010 & Kazemi, 2014).

در سال ۲۰۱۰ میزان متوسط مصرف انرژی در سراسر جهان ۱۵ تا ۱۷ تراوات<sup>۱</sup> بود که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۲۵ - ۲۷ تراوات برسد (Demirbas, 2010). اگرچه تلاش‌های زیادی در راستای کاهش مصرف سوخت‌های

1- Terawatt

مقدار فراوان وجود دارد و نیروی برق و سوخت‌های فسیلی کم است، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Shabani kia, 2010 & Paasen et al., 2006).

زیست‌توده‌ها به دلیل تنوع زیستی<sup>۳</sup> در خواص خود به‌طور قابل توجهی متفاوت هستند. از این‌رو ارزیابی کیفیت زیست‌توده برای تصمیم‌گیری در مورد امکان‌پذیر بودن آن برای تبدیل، مناسب‌ترین نوع تبدیل و نیاز به پردازش بیشتر ضروریست (Seifert, 2013). براساس یک مطالعه، می‌توان حداقل ۱۴٪ از انرژی موردنیاز کشور را از زیست‌توده تأمین نمود. طبق این بررسی، زائدات جنگلی و کشاورزی، فضولات دامی و زباله‌های شهری به ترتیب بیشترین قابلیت را در میان زیست‌توده در ایران دارند (Adl et al., 2000).

از جمله پارامترهای مهم برای استفاده از زیست‌توده برای تولید انرژی، اندازه ذرات و جرم مخصوص، مقدار خاکستر، مقدار رطوبت، مقدار مواد استخراجی، مواد فرار<sup>۴</sup>، مقدار عناصر (کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن) و مقدار ترکیب‌های شیمیایی (سلولز، همی‌سلولز و لیگنین) هستند (Stahl et al., 2004). به‌منظور یکسان‌سازی اندازه و دانسیته زیست‌توده، فشرده‌سازی آن به شکل حبه<sup>۵</sup> (با قطر ۵ تا ۱۰ میلی‌متر و طول ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر) یا به شکل قالبی<sup>۶</sup> (با قطر ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر) با کمک حرارت توسط پرس انجام می‌شود. قیمت حبه‌های سوختی تهیه شده از زیست‌توده چوبی در سال ۲۰۱۸ میلادی به ازای هر تن، ۱۸۰ دلار یعنی برای تولید هر گیگاژول انرژی حدود ۱۰ دلار بوده است (Strauss, 2018). در حال حاضر چند شرکت داخلی اقدام به صدور این حبه‌ها به اروپا نموده‌اند.

به دلیل انرژی لازم برای تبخیر آب موجود در زیست‌توده، رطوبت موجب کاهش ارزش گرمایی آن شده که براساس سن، منطقه و فصل متغیر است و برای چوب‌های سوزنی‌برگ در مقایسه با پهن‌برگ بیشتر است. در صورتی که رطوبت زیست‌توده زیاد باشد به کمک فشرده کردن آن می‌توان

فسیلی در قرن حاضر به‌منظور کاهش گازهای گلخانه‌ای انجام شده است، اما در حال حاضر هنوز هم حدود ۸۵٪ انرژی مورد نیاز جهان توسط این سوخت‌ها تأمین می‌شود. تقاضا برای انرژی و مشکلات زیست‌محیطی مرتبط با آن از نگرانی‌های فزاینده عصر حاضر است. با وجود سهم ۵۰ درصدی زیست‌توده نسبت به سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، سهم استفاده از آن برای تأمین انرژی جهان فقط ۱٪ است. تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ زیست‌توده تقریباً ۳۸٪ از سوخت مصرفی جهان و ۱۷٪ از برق جهان را تأمین کند. اگر از زیست‌توده با کارآیی بیشتری تولید انرژی و فناوری‌های نوین تبدیل آن استفاده شود، می‌تواند دامنه و تنوع قابل توجهی از سوخت‌ها را در مقیاس‌های کوچک و بزرگ تأمین نماید (Demirbas, 2004).

منابع زیست‌توده با فناوری‌های مختلف تولید انرژی، به‌صورت‌های مختلف انرژی مثل برق، حرارت و سوخت (به کمک سوخت‌های زیستی مایع<sup>۱</sup> و گازی) استفاده می‌شود. کاهش آلودگی‌ها و افزایش بهره‌وری از جمله اهداف اصلی در تولید انرژی هستند. استفاده از زیست‌توده، تولید دی‌اکسید گوگرد (SO<sub>2</sub>)، اکسیدهای نیتروژن (NOX) و سایر آلاینده‌های هوا را نسبت به سوخت‌های فسیلی کاهش می‌دهد (Rafaj & Amann, 2018).

بازده تولید انرژی در نیروگاه‌هایی که فقط از زیست‌توده استفاده می‌کنند حدود ۲۰ درصد است. برای بهبود این بازدهی، در دستگاه مبدل گاز، با گرم کردن زیست‌توده جامد و تجزیه آن، گاز قابل اشتعال تولید می‌کنند. برای تولید برق در چرخه ترکیبی، از توربین‌های گازی و بخار<sup>۲</sup> به‌صورت ترکیبی استفاده می‌شود که بازده این سیستم را می‌توان تا ۶۰ درصد افزایش داد. در آمریکای شمالی حدود ۷۰ درصد از کارخانه‌های صنایع چوب و کاغذ، انرژی مورد نیاز خود را با این روش از زائدات چوبی تأمین نموده و هیچ نیازی به برق شبکه یا سوخت‌های فسیلی ندارند. این سیستم در مناطق دوردست، جایی که زیست‌توده به

4- Volatile components  
5- Pellet  
6- Briquettes

1- Biofuel  
2- Combined Heat and Power (CHP)  
3- Biological variation

(Banz, 2010). ارزش حرارتی لیگنین ۲۳ MJ/Kg و مواد استخراجی ۳۰ MJ/Kg است که برای چوب سوزنی‌برگان به دلیل مقدار بیشتر این دو ماده بالاتر است (Novaes et al., 2010 & Sykes et al., 2008). ارتباط بین مقدار لیگنین و ارزش حرارتی زیست‌توده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود. لازم به یادآوری است که این محاسبه برای زیست‌توده عاری از مواد استخراجی و خاکستر است (Demirbas, 2010).

$$\text{HHV} = 16/8218 + (\text{درصد لیگنین}) \cdot 0/0889 \quad \text{رابطه (۱):}$$

چهار عنصر اصلی کربن، هیدروژن، نیتروژن و اکسیژن در همه زیست‌توده‌ها وجود دارند. به دلیل ارزش گرمایی بیشتر در فرایندهای احتراق و گازی‌سازی، مقدار کربن زیاد در زیست‌توده به‌عنوان یک مزیت مطرح است. معمولاً برای محاسبه عنصر اکسیژن، مجموع مقدار سایر عناصر از عدد ۱۰۰ طبق رابطه (۲) کسر می‌شود.

$$\text{رابطه (۲): (کربن + درصد نیتروژن + درصد سولفور + درصد هیدروژن + درصد خاکستر) - ۱۰۰ = درصد اکسیژن}$$

مجموع درصد‌های رطوبت، مواد فرار و خاکستر از عدد صد طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Stahl, et al., 2006).

$$\text{رابطه (۳): (درصد رطوبت + درصد خاکستر + درصد مواد فرار) - ۱۰۰ = کربن ثابت}$$

ارزش گرمایی خالص<sup>۴</sup> عبارت است از: مقدار انرژی گرمایی تولید شده توسط زیست‌توده مرطوب. تفاوت در این دو ارزش، گرمای نهان آب زیست‌توده است. مقدار ارزش گرمایی ناخالص برای چوب بین ۱۷ تا ۱۹ مگاژول بر کیلوگرم و برای زائدات کشاورزی بین ۱۵ تا ۱۷ مگاژول بر کیلوگرم گزارش شده است. مقدار تفاوت بین ارزش گرمایی

رطوبت آن را تا ۲۰ درصد کاهش داد (Wondifraw, 2010). ارزش گرمایی با افزایش دانسیته زیست‌توده به صورت خطی افزایش می‌یابد و برای فرایندهای احتراق و گازی‌سازی افزایش دانسیته زیست‌توده تا حد ممکن، مطلوب است (Munalula & Meincken, 2009). ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های زیست‌توده برای سوزاندن، با توجه به گونه چوبی و زادگاه آن تفاوت‌های زیادی دارد

زیاد بودن درصد خاکستر زیست‌توده به‌عنوان یک پارامتر منفی در تولید انرژی گرمایی مطرح است. برخلاف چوب، زائدات غیرچوبی به دلیل استفاده از کودهای شیمیایی برای رشد بهتر گیاه، باعث کاهش دمای ذوب خاکستر<sup>۱</sup> تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود. این موضوع موجب چسبیدن خاکستر ذوب شده و افزایش خطر مسدود شدن راکتور می‌شود (Seifert, 2013).

کربن ثابت<sup>۲</sup> شامل باقیمانده جامد قابل سوختن یک ماده پس از خارج شدن مواد فرار آن می‌باشد. این ویژگی با کسر

هر چه نسبت کربن به هیدروژن (C/H) کمتر باشد (در چوب بین ۷۰ تا ۹۰ درصد) مقدار مواد فرار در زیست‌توده بیشتر است. با آزاد شدن انرژی گرمایی، عناصر کربن، هیدروژن، اکسیژن به صورت CO<sub>2</sub> و بخار آب از زیست‌توده آزاد می‌شوند. ارزش گرمایی ناخالص<sup>۳</sup> عبارت است از مقدار انرژی که توسط زیست‌توده عاری از رطوبت تولید می‌شود.

3- High Heating Value (HHV)  
4- Low Heating Value (LHV)

1- Melting point  
2- Fixed carbon

محاسباتی و اندازه‌گیری شده تا ۱۰٪ گزارش شده است. Jain (۲۰۰۷) برای محاسبه ارزش گرمایی ناخالص با استفاده از خاکستر، رابطه (۴) را پیشنهاد کرد.

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 19/24 - (0/22 \times \text{مقدار خاکستر}) \quad \text{رابطه (۴)}$$

برای اندازه‌گیری مستقیم این ارزش، از دستگاه بمب کالری متر استفاده می‌شود. برای محاسبه ارزش حرارتی ناخالص با استفاده از درصد عناصر، از رابطه (۵) که یک روش غیرمستقیم یا محاسباتی<sup>۱</sup> است و فقط برای محاسبه ارزش گرمایی ناخالص زیست‌توده ارائه شده است، می‌توان استفاده کرد (Boundy et al., 2011).

رابطه (۵):

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

با دانستن مقدار رطوبت زیست‌توده سلولزی می‌توان با استفاده از رابطه (۶)، مقدار ارزش گرمایی خالص را محاسبه نمود.

$$\text{LHVE} = \text{HHVE} (1 - M) - 2/447 M \quad \text{رابطه (۶)}$$

صنوبر نیگرا، صنوبر اوروامریکن، صنوبر دلتوئیدس ارقام ۶۹/۵۵ و ۶۷/۵۹، کاج تهران، اکالیپتوس کامادولنسیس و سیب از نقاط مختلف کشور تهیه و جمع‌آوری شدند. پس از اندازه‌گیری رطوبت اولیه نمونه‌ها، عملیات خرد کردن نمونه‌ها توسط یک خردکن از نوع پالمن<sup>۲</sup> و بعد تراشه کردن آنها توسط یک دستگاه تراشه‌ساز از نوع پالمن<sup>۳</sup> انجام شد. تراشه‌های تهیه شده توسط یک آسیاب چکشی<sup>۴</sup> به آرد چوب تبدیل شدند و بعد ذرات عبور کرده از الک ۴۰ مش و باقیمانده روی الک مش ۶۰ (R60/P40) به عنوان نمونه‌های آزمون<sup>۵</sup> تهیه گردیدند. سپس نمونه‌های آزمون در شرایط محیطی قرار گرفته تا هواخشک شده و به رطوبت تعادل با محیط برسند و رطوبت نهایی آنها دوباره اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر بر زیست‌توده در تولید انرژی گرمایی، از روش‌های آزمون زیر با ۳ تکرار استفاده شد.

بازده تولید انرژی از زیست‌توده در صورتی قابل قبول خواهد بود که نوع و آماده‌سازی زیست‌توده به نحو مناسبی انتخاب شود. پیش‌تیمار زیست‌توده شامل کلیه عملیات مکانیکی و یا شیمیایی مثل غربال، شستشو، استخراج با حلال یا واکنش با اسید نیز می‌تواند تأثیر بسزایی بر بازده و کیفیت تولید انرژی از آن داشته باشد (Stephen, 2010).

هدف از این بررسی، تعیین و مقایسه عوامل مؤثر بر تولید انرژی از ۱۰ نوع زیست‌توده چوبی و مقایسه نتایج به دست آمده از دو روش تعیین ارزش گرمایی برای به‌کارگیری در مبدل‌های حرارتی است.

## مواد و روش‌ها

سرشاخه و زائادات حاصل از هرس ۱۰ زیست‌توده چوبی شامل زائادات حاصل از هرس بید، کیوی، پرتقال تامسون،

4- Laboratory hammer mill  
5-Test piece

1- High Heating Value Estimated (HHVE)  
2- Pallmann chipper  
3- Pallmann flaker

توسط Boundy و همکاران (۲۰۱۱) محاسبه شد. 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 گردید. به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری ویژگی‌های مورد بررسی، از آزمون تجزیه واریانس استفاده شد. 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 گرمایی زائادات به ترتیب از آزمون  $t$  و رگرسیون استفاده شد.

### نتایج

نتایج مربوط به اندازه‌گیری رطوبت اولیه و رطوبت پس از هواخشک کردن زیست‌توده چوبی در جدول ۱ آورده شده است. میزان رطوبت اولیه در برخی از زائادات حاصل از هرس مثل اکالیپتوس نسبتاً زیاد است که پس از خشک کردن توسط یک خشک‌کن آزمایشگاهی برای انجام آزمون تا حد نسبتاً زیادی کاهش یافته است (جدول ۱).

-اندازه‌گیری رطوبت: طبق استاندارد ASTM E871-82 (۲۰۰۶) با توزین نمونه قبل و بعد از قرار گرفتن در آون 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: 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 به‌عنوان 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 E775-15 ASTM- (۲۰۱۵) پس از شستشوی دستگاه بمب کالری متری مدل PARR 1261 و بعد تیتراسیون مایع شستشو اندازه‌گیری شد.

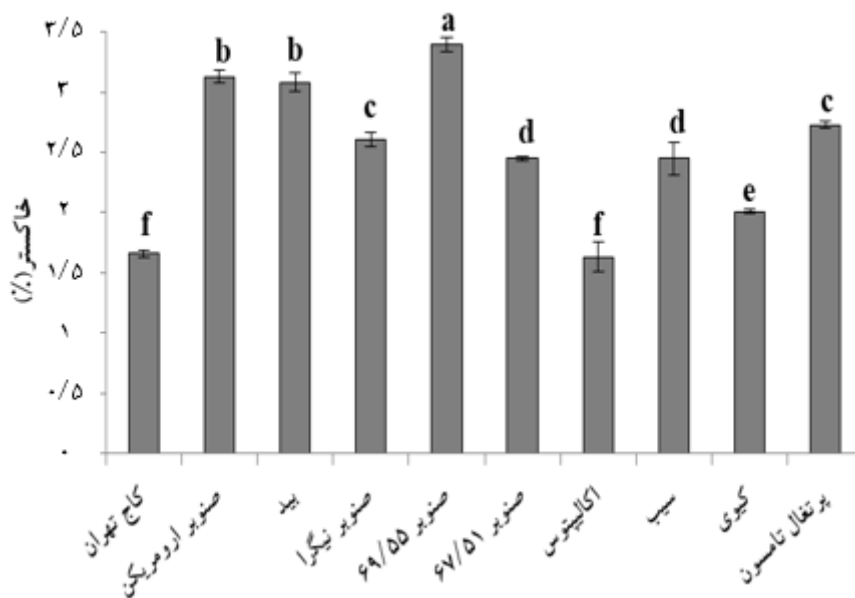
-اندازه‌گیری اکسیژن: طبق فرمول (۱) ارائه شده

جدول ۱- محل نمونه برداری و درصد رطوبت زیست‌توده چوبی

نوع زیست‌توده	محل نمونه برداری	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نمونه آزمونی (%)
کاج تهران ( <i>P. eldarica</i> )	مرکز تحقیقات البرز- کرج	۴۲	۱/۷۱
بید ( <i>S. alba</i> )	مرکز تحقیقات البرز- کرج	۴۰/۷	۱/۵۰
صنوبر اورامریکن ( <i>P. euromericana</i> )	مرکز تحقیقات البرز- کرج	۴۰/۸	۱/۸۷
صنوبر نیگرا ( <i>P. nigra</i> )	مرکز تحقیقات چمستان- مازندران	۴۰/۹	۱/۱۴
صنوبر دلتوئیدس ( <i>P. deltoides</i> ) کلن ۶۹/۵۵	مرکز تحقیقات چمستان- مازندران	۳۰/۴	۲/۰۹
صنوبر دلتوئیدس ( <i>P. deltoides</i> ) کلن ۶۷/۵۱	مرکز تحقیقات چمستان- مازندران	۳۹/۷	۰/۸۵
اکالیپتوس ( <i>E. camaldulensis</i> )	مرکز تحقیقات چمستان- مازندران	۵۷/۹	۱/۸۵
سیب ( <i>M. domestica</i> )	ایستگاه تحقیقات آبسرد- دماوند	۴۱/۴	۲/۷۷
کیوی ( <i>A. diadelicosa</i> )	مؤسسه تحقیقات مرکبات- گیلان	۴۵/۹	۱/۵۹
پرتقال تامسون ( <i>C. sinensis</i> )	مؤسسه تحقیقات مرکبات- گیلان	۳۴/۹	۱/۹۵

ارومریکن و بید (گروه b) دارای خاکستر قابل توجهی نسبت به سایر زیست توده‌ها می‌باشند. انحراف از معیار مربوط به ۳ تکرار اندازه‌گیری خاکستر به شکل نوار خطا بر روی هر ستون مشخص شده است.

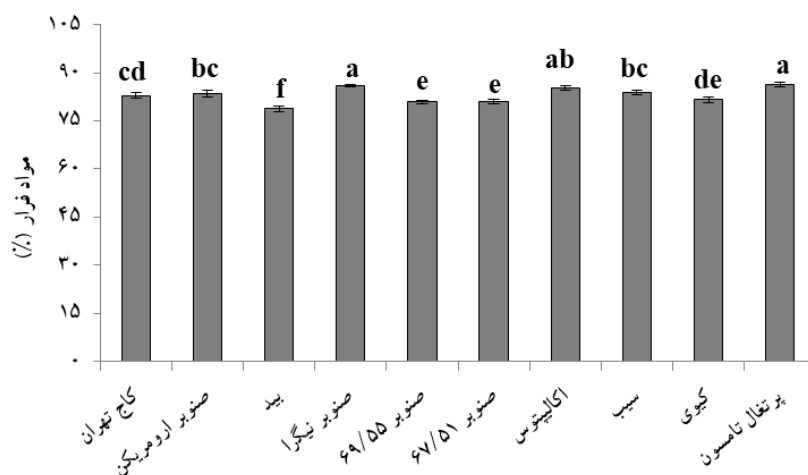
شکل ۱ میانگین خاکستر ۱۰ نمونه مورد بررسی را پس از قرار گرفتن در دمای ۵۸۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، به ترتیب صنوبر دلتوئیدس رقم ۶۹/۵۵ (گروه a) و بعد صنوبر دورگه



شکل ۱- مقایسه میانگین خاکستر زیست توده‌های چوبی و گروه‌بندی آماری

۹۵٪ در شکل ۲ قابل مشاهده است. میانگین مواد فرار حاصل از ۳ تکرار در زائدات چوبی پرتقال تامسون و نیز صنوبر نیگرا حداکثر (گروه a) و بید حداقل (گروه f) می‌باشد.

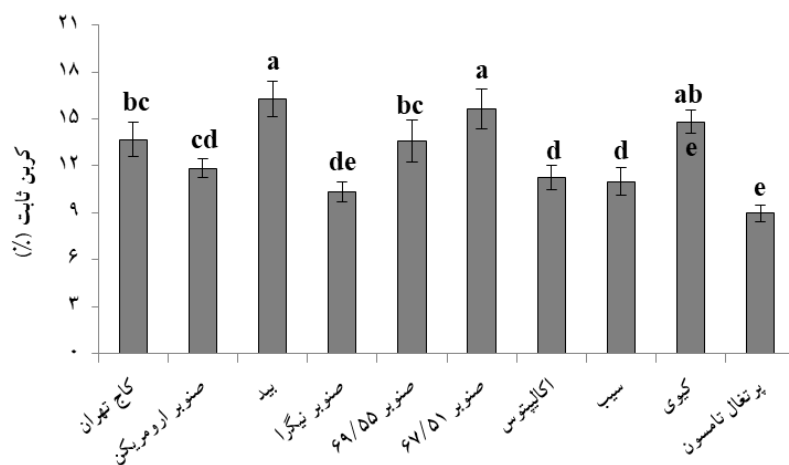
پس از قرار دادن نمونه‌ها در داخل کوره با دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس، مواد فرار آنها تعیین شد. مقایسه میانگین مواد فرار زیست توده‌ها و گروه‌بندی آماری آنها با سطح اعتماد



شکل ۲- مقایسه میانگین مواد فرار زیست توده‌های چوبی و گروه‌بندی آماری

این نظر زیست توده بید و صنوبر دلتوئیدس رقم ۶۷/۵۱ دارای حداکثر مقدار کربن ثابت (گروه a) و پرتقال تامسون حداقل مقدار کربن ثابت (گروه e) را داراست.

برای تعیین مقدار کربن ثابت ۱۰ زیست توده چوبی با استفاده از مقدار رطوبت، خاکستر و مواد فرار از رابطه (۳) استفاده شد. شکل ۳ گروه بندی آماری کربن ثابت ۱۰ زیست توده چوبی را با سطح اعتماد ۹۵٪ نشان می دهد. از



شکل ۳- مقایسه میانگین کربن ثابت زیست توده های چوبی و گروه بندی آماری

حرارتی ناخالص محاسباتی با استفاده از میانگین درصد عناصر تعیین شده در جدول ۲ طبق رابطه (۵) محاسبه شد. سپس ارزش گرمایی خالص محاسباتی نیز با استفاده از رابطه (۶) محاسبه گردید.

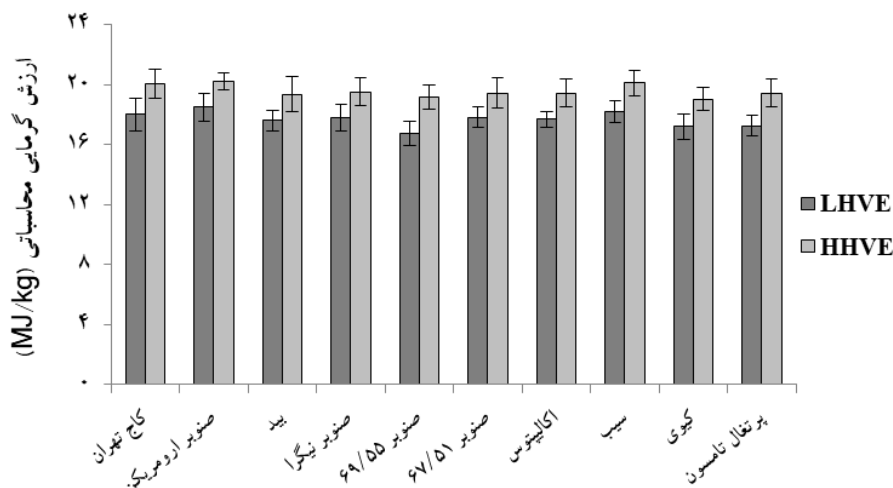
تجزیه و تحلیل آماری نتایج اندازه گیری عناصر نشان داد که بین میانگین ۵ عنصر مربوط به ۱۰ زیست توده چوبی اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد وجود دارد. میانگین این عناصر در جدول ۲ آورده شده است. ارزش

جدول ۲- میانگین درصد عناصر ۱۰ زیست توده چوبی

عناصر زیست توده	کربن (%)	هیدروژن (%)	نیتروژن (%)	اکسیژن (%)	گوگرد (%)
کاج تهران	۴۶/۶۹	۶/۵	۰/۳۴	۴۱/۹۳	۲/۸۸
صنوبر اروامریکن	۴۶/۶۴	۶/۷۴	۰/۳۳	۴۱/۵۹	۱/۵۲
بید	۴۵/۳۶	۶/۵۴	۰/۴۶	۴۳/۰۵	۱/۵۱
صنوبر نیگرا	۴۵/۸۱	۶/۵۶	۰/۴۳	۴۳/۳۳	۱/۲۶
صنوبر ۶۹/۵۵	۴۵/۳۷	۶/۴۲	۰/۶۶	۴۳/۰۳	۱/۱۲
صنوبر ۶۷/۵۱	۴۶/۱	۶/۴۱	۰/۳۵	۴۳/۴۳	۱/۲۶
اکالیپتوس	۴۶/۶۳	۶/۶۰	۰/۳۵	۴۴/۳۳	۱/۴۶
سیب	۴۶/۲۷	۶/۸۴	۰/۷۹	۴۲/۲۳	۱/۴۲
کیوی	۴۵/۳۵	۶/۳۵	۰/۸۴	۴۳/۲۳	۱/۲۱
پرتقال تامسون	۴۵/۲۱	۶/۶۸	۰/۴۶	۴۳/۵۴	۱/۳۸

میانگین ارزش گرمایی محاسباتی ۱۰ زیست توده مورد بررسی اختلاف معنی داری وجود ندارد.

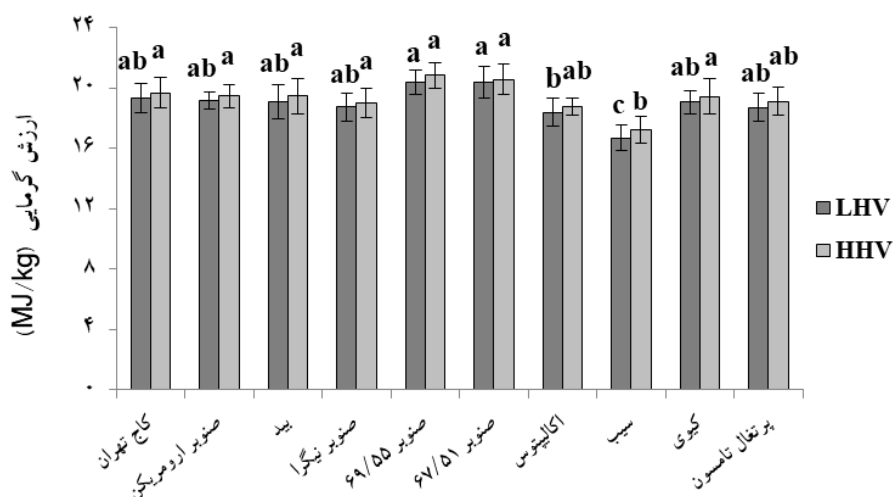
در شکل ۴ مقایسه‌ای بین میانگین نتایج به دست آمده ارزش گرمایی به روش محاسباتی (با استفاده از عناصر) نشان داده شده است. آزمون تجزیه واریانس نشان داد که بین



شکل ۴- مقایسه میانگین ارزش گرمایی محاسباتی زیست توده‌های چوبی

آماري معنی داری در سطح اعتماد ۵ درصد وجود دارد که با گروه بندی میانگین‌ها به روش دانکن بیشترین و کمترین ارزش گرمایی به ترتیب برای زائادات هرس صنوبر دلتوئیدس (گروه a) و سیب (گروه b و c) تعیین شده است.

مقایسه بین میانگین نتایج به دست آمده حاصل از اندازه‌گیری مستقیم ارزش گرمایی توسط بمب کالری متر (HHV) در شکل ۵ نشان داده شده است. آزمون تجزیه واریانس نشان داد بین میانگین ارزش گرمایی ناخالص و خالص محاسباتی ۱۰ زیست توده مورد بررسی، اختلاف



شکل ۵- مقایسه میانگین ارزش گرمایی اندازه‌گیری شده زیست توده‌های چوبی



به طوری که با افزایش دانسیته حجمی زیست توده به روش فشرده سازی، می توان مقدار آن را تا ۱/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب افزایش داد. با تبدیل ذرات زیست توده به شکل حبه<sup>۱</sup> یا بریکت<sup>۲</sup> نیز می توان بهره وری مبدل های گرمایی را به طور قابل ملاحظه ای افزایش داد (Sugumaran & Seshadri, 2009).

### خاکستر

در مقایسه انجام شده بین خاکستر نمونه ها، بیشترین درصد خاکستر مربوط به صنوبر دلتوئیدس رقم ۶۹/۵۵ می باشد و به عکس برای کاج تهران و اکالیپتوس کامادولنسیس درصد خاکستر کمترین مقدار است. Llorente Fernandez و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر منفی خاکستر به جای مانده از زیست توده پس از سوختن را به دلیل تجمع در سطوح انتقال حرارت دیگ بخار، مشکلات تمیز کردن و حتی از کار افتادن قسمت های مکانیکی مبدل های گرمایی بسیار با اهمیت می دانند. از آنجایی که سوزاندن زیست توده معمولاً به صورت تلفیقی با سایر سوخت ها توصیه می شود، آگاهی از درصد خاکستر زیست توده این امکان را می دهد که واکنش های خاکستر در سیستم چند سوختی<sup>۳</sup> قابل پیش بینی شود. کیفیت خاک، کوددهی و شرایط آب و هوایی بر مقادیر کلسیم، پتاسیم، سدیم، کلر و فسفر خاکستر زیست توده تأثیر قابل توجهی دارند. براساس گروه بندی انجام شده توسط Toscano و Corinaldesi (۲۰۱۰)، ۷ زیست توده مورد بررسی در گروه اول (A<sub>3</sub>) یعنی مقدار خاکستر بین ۰ تا ۳ درصد قرار می گیرند که از این نظر نسبت به زیست توده های غیر چوبی مزیت دارند و ۳ زیست توده در گروه دوم (A<sub>6</sub>) یعنی مقدار خاکستر بین ۳ تا ۶ درصد قرار می گیرند. از سوی دیگر، به دلیل زیاد بودن نقطه ذوب<sup>۴</sup> زیست توده های چوبی (بیش از ۱۳۰۰°C)، سوزاندن این مواد در مبدل های گرمایی مشکلاتی را از نظر کاهش ظرفیت انتقال حرارت، خوردگی قطعات فلزی و تخلیه

مقایسه داده های ارزش گرمایی خالص به دست آمده با دو روش محاسباتی و مستقیم توسط آزمون t نشان داد که بین دو روش اختلاف معنی داری وجود ندارد ( $P \geq 0.05$ ) اما ضریب همبستگی بین نتایج به دست آمده از دو روش محاسباتی و مستقیم نسبتاً کم است ( $R^2 = 0.19$ ).

### بحث

افزایش قابل توجه قیمت سوخت های فسیلی در کشور، استفاده از زیست توده سلولزی را در برخی از نقاط دوردست کشور و کارخانه های تولیدکننده زائدات سلولزی توجیه پذیر کرده است. مقادیر قابل توجهی از زائدات سلولزی دفن یا سوزانده می شود، از این رو ارزیابی ویژگی های این منابع تجدیدپذیر می تواند برای تولید انرژی مطرح باشد. ویژگی های اساسی زیست توده شامل رطوبت، خاکستر، عناصر متشکله، اندازه ذرات و دانسیته، مواد فرار، کربن ثابت و ارزش گرمایی برای طراحی و بهره وری مبدل های گرمایی اهمیت زیادی دارد که در این راستا ویژگی های ۱۰ زیست توده چوبی به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفت.

### رطوبت و اندازه ذرات

مقدار رطوبت زیست توده در مناطق مختلف و مدت زمان پس از برداشت محصول، متفاوت است. رطوبت به عنوان یکی از مهمترین عوامل، به طور مستقیم مقدار کلی انرژی قابل استحصال سوخت را کاهش می دهد، بنابراین بازده تولید انرژی نیز کاهش می یابد (Adekugbe, 2012). میانگین رطوبت اولیه در زیست توده های مورد بررسی در حدود ۴۶ درصد است که با استفاده از هواخشک کردن و بعد فشرده سازی و عدلبندی، افزایش بازده تولید انرژی و قابلیت نگهداری این زیست توده ها بهبود خواهد یافت. افزایش رطوبت ماده سلولزی موجب اختلاف بیشتر بین ارزش گرمایی خالص و ناخالص می شود (Boundy, 2011).

3- Multi fuel  
4- Melting point

1- Granule  
2- Granule

از نظر آلودگی هوا، مقدار گوگرد و نیتروژن زیست توده که معمولاً به صورت گازهای  $\text{NO}_x$  و  $\text{SO}_2$  آزاد می‌شوند از محل خروج گازها در مولدهای انرژی اهمیت دارد که البته با استفاده از فیلترهای جاذب این نوع گازها، می‌توان مقدار این آلاینده‌ها را کاهش داد. درصد گوگرد زیست توده کاج تهران به طور قابل توجهی نسبت به سایر گونه‌های مورد بررسی بیشتر می‌باشد که به عنوان یک عامل منفی در افزایش آلاینده‌گی حاصل از سوزاندن آن مطرح است. *Álvarez* و همکاران (۲۰۱۸) نیز مقدار گوگرد زیست توده حاصل از کاج سنگی<sup>۲</sup> را نسبت به گونه‌های بید، صنوبر و بلوط به ویژه در پوست آن بیشتر گزارش کرده‌اند. مقدار گوگرد تعیین شده برای ۱۰ زیست توده مورد بررسی نسبت به سایر منابع بیشتر است که نشان دهنده آلودگی هوا و بازگشت گوگرد به صورت باران اسیدی به خاک می‌باشد.

#### ارزش گرمایی

سوخت‌های با ارزش گرمایی بیشتر به علت کارایی و بازده انرژی بهتر در همه مبدل‌های گرمایی مطلوب‌ترند. *LHV* در طراحی مبدل‌های گرمایی ساده و *HHV* در طراحی واحدهای احتراق پیشرفته که دارای مبرد ثانویه یا سوم هستند، اهمیت دارد. تجزیه واریانس میانگین دو ارزش گرمایی نشان داد که به غیر از زیست توده سیب، بین میانگین ۹ زیست توده دیگر اختلاف معنی داری در سطح اعتماد ۹۵٪ وجود ندارد. به طور کلی میانگین نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری ارزش گرمایی ۱۰ زیست توده در مقایسه با نتایج *Álvarez* و همکاران (۲۰۱۸) و نیز *Poskrobko* و همکاران (۲۰۱۶) کمی بیشتر است که از جمله علت‌های آن می‌توان به درصد پوست بیشتر در زائدات هرس این درختان اشاره کرد. اختلاف بین نتایج بررسی عوامل مؤثر بر زیست توده‌های سلولزی مختلف می‌تواند به دلایل تفاوت در زمان برداشت، منطقه جغرافیایی، میزان کوددهی، مدت زمان نگهداری و

زود هنگام کوره ایجاد نمی‌کند ( *Toscano & Corinaldesi, 2010* ).

#### مواد فرار و کربن ثابت

مقدار انرژی حاصل از سوخت‌های جامد به مقدار مواد فرار و کربن ثابت آنها بستگی دارد. گونه‌هایی که دارای مواد فرار بالا هستند، در فرایند گازی‌سازی<sup>۱</sup> مطلوب‌تر می‌باشند. مقدار میانگین مواد فرار در چوب نسبت به زیست توده کشاورزی حدود ۸٪ بیشتر است (*Stahl, et al., 2006*). مقدار کربن ثابت شامل باقیمانده زیست توده سوزانده شده (به جز خاکستر و رطوبت) در دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس در غیاب هوا به مدت چند دقیقه می‌باشد. صنوبر نیگرا و پرتقال تامسون دارای درصد کربن ثابت بیشتری هستند، یعنی آنها در طی فرایند گازی‌سازی و سوختن زغال بیشتری تولید می‌کنند. نسبت کربن ثابت به مواد فرار در زیست توده می‌تواند به عنوان شاخصی برای زیست توده‌ای که سوزانده شده و بعد فرایند گازی‌سازی یا اکسید شدن را سپری می‌کند، مطرح باشد (*Karlen, 2014*). بر این اساس، زیست توده بید و صنوبر ۶۷/۵۱ به ترتیب بیشترین شاخص را دارند، در حالی که زیست توده پرتقال تامسون دارای کمترین شاخص نسبت به بقیه بوده و برای فرایند گازی‌سازی مناسب‌تر است. مقایسه داده‌های به دست آمده با سایر مراجع، نشان دهنده مشابهت نتایج با صنوبر دلتوئیدس (*Karlen, 2014*) و کاج (*Saeed et al., 2016*) می‌باشد. همچنین مقدار مواد فرار و کربن ثابت اندازه‌گیری شده زیست توده بید از نتایج سایر محققان (*Karlen, 2014*) به ترتیب ۸ درصد کمتر و ۶ درصد بیشتر است که می‌تواند به علت تفاوت گونه مورد بررسی باشد.

#### عناصر

برای تولید انرژی از زیست توده، مقدار زیادتر کربن و هیدروژن ارجح‌تر و به عکس مقدار کمتر نیتروژن و گوگرد مناسب‌تر است. استفاده از کودهای شیمیایی می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه مقدار نیتروژن و گوگرد زیست توده شود که احتمالاً در زیست توده سیب و کیوی به همین دلیل است.

میزان پوست، برگ و چوب باشد (Jones, 2014).

#### نتیجه گیری

- با انجام عملیات فشرده سازی زیست توده سلولزی و یا تبدیل به شکل حبه یا بریکت، می توان انرژی مورد نیاز واحدهای صنعتی مرتبط و یا مناطق دوردست روستایی را فراهم نمود.

- با توجه به درصد کمتر خاکستر، رقم ۶۷/۵۱ صنوبر دلتوئیدس نسبت به رقم ۶۹/۵۵ ارجحیت دارد و ۷ زیست توده مورد بررسی در گروه اول یعنی خاکستر بین ۰ تا ۳ درصد قرار گرفته که از این نظر نسبت به زائدات کشاورزی برتری دارند.

- با توجه به درصد مواد فرار، زیست توده های پرتقال تامسون، صنوبر نیگرا و اکالیپتوس کامادولنسیس به منظور تولید انرژی به روش گازی سازی نسبت به بقیه زیست توده ها در اولویت هستند.

- مقدار گوگرد و تا حدودی نیتروژن اندازه گیری شده برای ۱۰ زیست توده نسبت به سایر منابع بیشتر است که نشان دهنده استفاده زیاد کودهای شیمیایی و نیز آلودگی هوا در ایران می باشد. مقدار قابل توجه گوگرد در زیست توده کاج تهران، عاملی محدودکننده از نظر آلودگی محیط زیست و نیز خورندگی مبدل های گرمایی است.

- نمونه های حاصل از هرس مورد بررسی به غیر از زیست توده سیب از ارزش گرمایی نسبتاً مناسبی در مقایسه با زیست توده های سلولزی برخوردار بوده که با کاهش رطوبت آنها می توان بهره وری مناسبی برای مبدل های گرمایی فراهم کرد.

#### منابع مورد استفاده

- Tree Species for Biomass Energy Production in Northwest Spain, Forests, 9, 160, 15p.
- Anonymus, Bioenergy Association of New Zealand (BANZ), 2010. Wood Fuel Classification Guidelines, Version 5, New Zealand, 31p.
- 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>.
- Bioenergy Association of New Zealand (BANZ), 2010. Wood Fuel Classification Guidelines, Version 5, New Zealand, 31p.
- Dahiya, A., 2014. Bio-Energy, First edition, Biomass to Biofuel, Academic Press, Elsevier, 670 p.
- Demirbas, A., 2010. Biorefineries for biomass upgrading facility, Springer-verlag, Germany.
- Demirbas, A., 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. Progress Energy Combust. Sci. 30:219-230.
- Hamid, S., 2018. Stoichiometry of the Photocatalytic Fuel Production by the Reformation of Aqueous Acetic Acid, M.Sc. thesis, Natural resources faculty, Gottfried Wilhelm Leibniz University, Hannover.
- Hiltunen, M., Barisic, V. and Coda Zabetta, E., 2008. Combustion of different types of biomass in CFB boilers, 16th European conference, Valencia, Spain, 6p.
- Jain, A.K., 2007. Correlation models for predicting heating value through biomass characteristics, Journal of Agricultural Engineering, 34(3): 12-25.
- Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles, Jr., T.R. and Miles, T.R., 1998. Combustion properties of biomass, Fuel Processing Technology 54: 17-46.
- Jones, J.M., Lea-Langton, A.R., Ma, L., Pourkashanian, M. and Williams, A., 2014. Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels, 109p.
- Karlen, D.L., 2014. Cellulosic energy cropping systems, John Wiley & Sons, Ltd, 400p.
- 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.
- 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.
- 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.
- Novaes E, Kirst M, Chiang V., Winter-Sederoff H. and Adegugbe, A., 2012. Determination of heating value of five economic tree residues as fuel for biomass heating system, Nature and Science, 10(10): 26-29.
- Adl. M., Alighardashi, A. and Lari, H., 2000. New energy lab plan and workshop, Research report of the department of renewable energy research of the power research institute, 82 p.
- Álvarez-Álvarez, P., Pizarro, C., Barrio-Anta, M., Cámara-Obregón, A., Luis María Bueno, J., Álvarez, A., Gutiérrez, I. and Burslem, D., 2018. Evaluation of

- bioenergy conference, 13 October: 126-137.
- 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.
  - Stahl, R., Henrich, E., Gehrmann, H.J., Vodegel, S. and Koch, M., 2004. Definition of a standard biomass, *Integrated Project Sustainable energy systems*, 14 p.
  - 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.
  - Sugumaran, P. and Seshadri, S., 2009. Evaluation of selected biomass for charcoal production, *Journal of scientific & Industrial Research*, 68: 719-723.
  - Sykes R, Kodrzycki B, Tuskan G, Foutz K. and Davis M., 2008. Within tree variability of lignin composition in populus wood science and technology. *Wood Science and Technology*, 42:649–661.
  - Toscano, G. and Corinaldesi, F., 2010. Ash fusibility characteristics of some biomass feedstocks and examination of the effects of inorganic additives, *J. of Ag. Eng. - Riv. di Ing. Agr.*, 2: 13-19.
  - 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.
  - Sederoff R., 2010. Lignin and biomass: a negative correlation for wood formation and lignin content in trees. *Plant Physiology*, 154: 555–561.
  - 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.
  - 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.
  - Poskrobko, S., Krol, D. and Borsukiewicz, A., 2016. Gasification of waste wood biomass, *Drewno*, 59(197):241-248.
  - Rafaj, P., Amann, M., 2018. Decomposing Air Pollutant Emissions in Asia: Determinants and Projections, *Energies journal*, 11(5):1299-1313.
  - Rosendahl, L., 2013. Biomass combustion science, technology, Woodhead Publishing Limited, 315 p.
  - Saeed, M.A., Andrews, G.E. and Phylaktou, H.N., 2016. Global kinetics of the rate of volatile release from biomasses in comparison to coal. *Fuel*, 181. pp. 347-357.
  - Seifert, T., 2013. Bioenergy from Wood, Sustainable Production in the Tropics, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 269p.
  - Shabani kia, A., Booghlan Dashti, B. and Mohammadnejad Sigaroodi, J., 2010. Investigation of energy production from wood and agricultural waste using gasification technology, *The first Iranian*

## Comparison of thermal energy production from different wood biomass

S. Mahdavi

-Associate prof., Wood and Forest Products Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO). Tehran, Iran. Email: smahdavi@rifr-ac.ir

Received: March., 2019 Accepted: Oct., 2019

### Abstract

The use of renewable sources of energies, such as biomass, is becoming increasingly important as countries realize that bioenergy present an approach to their international commitments to reduce greenhouse gas emissions. Biomass with higher thermal energy value and optimal composition is more desirable for the thermal conversion systems. In present investigation, properties of ten different types of wood biomass relevant were evaluated. Important characteristics of the biomass for energy generation were moisture and ash content, volatile matter, elemental composition (C, H, N, S, and O), and high and low heating values (HHV and LHV). The heating value has been determined based on experimental and computational methods using colorimeter bomb and elemental content, respectively. The results showed that *eldarica pine* biomass had the highest content of sulfur, which is undesirable environmental factor in the bioenergy system. Regarding to the fixed carbon to volatile matter ratio, *Citrus sinensis var. thomson* has the lowest ratio, so it is the best biomass for the gasification process. The highest and lowest heating values were determined for poplar pruning residues (group a) and apple tree pruning (group b and c), respectively. The highest and lowest HHV and LHV were measured for *P. deltoides* and *Malus spp.*, respectively.

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