

## مقاله پژوهشی

# بررسی خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت‌های تولید شده از ترکیب پوسته بادام و گردو و تفاله کنجد با نسبت‌های مختلف

وحید نیساری فام<sup>۱</sup>، رضا طباطبائی کلور<sup>۲\*</sup> و علی متولی<sup>۲</sup>

## چکیده

تبدیل زیست توده‌های کشاورزی به شکل پلت و استفاده از آنها به عنوان منبع انرژی حرارتی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، تأثیر چهار نسبت ترکیب پوست بادام، گردو و تفاله کنجد به ترتیب با نسبت (۱:۱:۱)، (۱:۱:۲)، (۱:۲:۱)، (۱:۱:۱) بر مبنای وزن و دو اندازه ذرات ( $0/6$  و  $1$  میلی متر) بر شاخص‌های چگالی، چگالی فشرده شده، مقاومت فشاری و ارزش حرارتی پلت‌های تولیدی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که چگالی فشرده شده و مقاومت پلت‌ها در ترکیباتی که دارای مقادیر بیشتر تفاله کنجد هستند بیشتر از سایر نمونه‌ها است بطوریکه بیشترین چگالی فشرده (۷۲۱ کیلوگرم بر مترمکعب) و بیشترین مقاومت فشاری ( $50/73$  نیوتن بر سانتیمتر) برای ترکیب با نسبت تفاله کنجد بیشتر و ذرات کوچک‌تر به دست آمد. همچنین، بالاترین میزان ارزش حرارتی در نسبت بالاتر پوست گردو (نسبت بادام، گردو و تفاله کنجد ۱:۲:۱) به میزان ۹۵۷۶ کیلوژول بر گرم به دست آمد. بنابراین استفاده از ضایعات کشاورزی و ترکیب مناسب آنها به دلیل ایجاد چگالی و استحکام مناسب گزینه خوبی برای تولید سوخت‌های زیستی است.

**واژه‌های کلیدی:** ارزش حرارتی، پلت‌های سوختی، چگالی، ضایعات باغی.

ارجاع: نیساری فام و. طباطبائی کلور ر. و متولی ع. ۱۴۰۰. بررسی خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت‌های تولید شده از ترکیب پوسته بادام و گردو و تفاله کنجد با نسبت‌های مختلف. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۱: ۶۷-۷۶.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.  
۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

\* نویسنده مسئول: [r.tabatabaei@sanru.ac.ir](mailto:r.tabatabaei@sanru.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶

## مقدمه

وابستگی جهان به انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی و نگرانی از پیامدهای زیست‌محیطی مصرف روزافزون این سوخت‌ها، محققان را بر آن داشت تا منابع جدیدی از انرژی را به عنوان منابع همیشگی، تجدیدپذیر و پایدار برای تولید انرژی الکتریکی و حرارتی در دسترس داشته باشند (Kylili et al., 2016). یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از زیست‌توده‌ها است که به ویژه در کشورهای اتحادیه اروپا به عنوان یک منبع جذاب برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی در حال توسعه و گسترش است (Lieder & Rashid, 2016; Zuwała, 2012). در حال حاضر، زیست‌توده پس از نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ جایگاه چهارم را در تأمین انرژی دارا بوده و تقریباً ۱۴ درصد نیازهای انرژی جهان را تأمین می‌کند (Shen et al., 2009). ضایعات و پس مانده‌های کشاورزی یکی از فراوان‌ترین و ارزان‌ترین منابع زیست‌توده در جهان هستند. بررسی‌های مصرف زیست‌توده در کشورهای مختلف جهان نشان داد که در کشورهای صنعتی ۹ تا ۱۴ و در کشورهای در حال توسعه ۳۵-۴۰ درصد از کل انرژی از زیست‌توده تأمین می‌شود (Permchart & Kouprianov, 2004). بررسی‌های زیست‌محیطی نشان می‌دهد که استفاده از زیست‌توده به عنوان سوخت، میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی را به طور قابل توجهی کاهش داده به طوری که میزان CO<sub>2</sub> جذب شده از جو در طول رشد زیست‌توده مشابه همان میزان تولید شده در طول احتراق بوده و به دنبال آن چرخه خالص تولید و مصرف CO<sub>2</sub> به اثر گلخانه‌ای کمک نمی‌کند (Demirbas, 2004). علاوه بر این، زیست‌توده دارای محتوای کمتر نیتروژن و گوگرد نسبت به سوخت‌های فسیلی بوده و در نتیجه تولید NO<sub>x</sub> و SO<sub>2</sub> پایین‌تر بوده که این امر سبب کاهش باران اسیدی در مناطق نزدیک به تأسیسات احتراق می‌شود. همچنین مقدار خاکستر تولیدی در اثر احتراق نیز بسیار پایین و مقادیر آن تقریباً ۱٪ است (Fernández et al., 2012). در کنار این مباحث در سال‌های اخیر رشد سریع و تولید و مصرف زیست‌توده در قالب پلت‌های چوبی برای به دست آوردن انرژی الکتریکی و حرارتی ثبت شده است (Barbanera et al., 2016). با توجه به چشم‌انداز انرژی زیستی اروپا در سال ۲۰۱۳، تولید جهانی پلت چوب در سال ۲۰۱۳ حدود ۲۴/۵ میلیون تن بوده که سهم

کشورهای اروپایی در حدود ۵۰ درصد است (Calderon et al., 2013). بررسی‌ها نشان می‌دهد که تولید سالانه بادام، گردو و کنجد در جهان در حدود ۳/۴۹، ۴/۵ و ۶/۵۴ میلیون تن بوده که سهم ایران به ترتیب ۱۷۷، ۳۲۱ و ۲۹ هزار تن در سال ۲۰۱۹ است (FAO, 2019). از این بین استفاده از پوسته بادام با ۳۵ تا ۷۵ درصد وزن کل میوه بوده و تخمین‌ها نشان می‌دهد که در حدود ۰/۸ تا ۱/۷۲ میلیون تن پوسته بادام به صورت سالانه در جهان تولید می‌شود و می‌تواند منبع بسیار خوبی از زیست‌توده باشد (Ebringerová et al., 2008).

پسماندها و ضایعات کشاورزی منبع اصلی زیست‌توده برای استفاده در تولید بیوانرژی و صنایع تولید خوراک دام و طیور هستند. این زیست‌توده‌ها در شکل اولیه خود دارای حجم زیاد و انرژی کم (در واحد حجم) هستند و نیاز به فضای زیاد و جابجایی گسترده دارند. بنابراین، یکی از روش‌های استفاده بهینه از این زیست‌توده‌ها تبدیل آنها به شکل پلت است که جرم و انرژی بیشتر در واحد حجم داشته و امکان استفاده و حمل و نقل آسان‌تر آنها را فراهم می‌کند (Garcia-Maraver et al., 2015). خواص پلت‌های سوختی (خواص فیزیکی، شیمیایی، حرارتی) به مواد معدنی مورد استفاده بستگی داشته و علاوه بر آن خواصی مانند تراکم، تخلخل و سطح داخلی گونه‌های زیست‌توده می‌تواند بر خواص آن تأثیر داشته باشد (Ragland et al., 1991). کیفیت پلت‌های تولیدی به خصوصیات فیزیکی مواد تشکیل دهنده و نیز کنترل شرایط تولید در مرحله پلت‌سازی (از جمله دما و فشار تراکم) بستگی دارد (Bushnell et al., 1990). تراکم‌پذیری و دوام پلت‌هایی که تحت فشار ساخته می‌شوند به عواملی همچون ساختمان شیمیایی و ابعاد ماده، دمای تبدیل، وزن حجمی اولیه، درصد رطوبت، سرعت بارگذاری، مقدار فشار وارده و مدت زمان اعمال آن بستگی دارد. شناخت این خواص جهت بهینه‌سازی فرایند پلت‌سازی و شناخت مکانیزم فشردن و طراحی تجهیزات فشار دهنده با انرژی کافی و تعیین تأثیر متغیرهای مختلف بر چگالی و دوام پلت‌ها بسیار مهم است (Amiri et al., 2012; Carone et al., 2011).

بررسی‌های مختلفی در زمینه تولید پلت‌های سوختی از ضایعات محصولات کشاورزی و پسماندهای چوبی انجام شده است. در پژوهشی افزودنی‌های بیولوژیکی مانند

ترکیب آنها بوده و تراکم پلت حاصل با افزایش درصد کاه در مخلوط کاهش می‌یابد. به علاوه، افزایش فشار متراکم‌سازی منجر به افزایش تراکم پلت شد. مقادیر مقاومت سقوط با افزودن نشاسته گندم کاهش یافت و این کاهش برای مخلوط با محتوای رطوبت بالاتر و فشار تراکم پایین‌تر بود. همچنین مخلوط خاک اره با کاه کلزا از دوام بیشتر و مقاومت سقوط بالاتری برخوردار است (Stasiak *et al.*, 2017).

در پژوهشی دیگر به بررسی عملکرد سیستم‌های زیست‌توده برای تولید پلت سوختی از درختان بادام و زیتون پرداخته شد و راندمان احتراق تحت شرایط بهینه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقادیر کارایی احتراق به ترتیب ۸۷/۷٪ و ۸۶/۳٪ برای پلت درخت زیتون و درخت بادام به دست آمد (Molina-Moreno *et al.*, 2016).

اختلاط زیست توده‌های کشاورزی با مواد چوبی جنگلی موجب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پلت‌ها می‌شود. پلت‌های ساخته شده از ذرات ریزتر دارای جرم مخصوص بیشتری بودند. همچنین، تنش تسلیم برای مواد جنگلی ۴۰ MPa و برای مواد کشاورزی ۲۷ الی ۴۸ MPa به دست آمد ولی بعد از اختلاط این مواد با هم تنش تسلیم به مقادیر مواد جنگلی نزدیک‌تر بود (Harun & Afzal, 2016).

قابلیت استفاده از پلت‌های چوبی با افزودن روغن سبزیجات (به میزان ۲/۲٪ و ۵/۸٪ بر پایه جامدات خشک) و چگونگی کیفیت فیزیکی پلت، خواص سطحی و فرآیند پلت‌کردن مورد بررسی قرار گرفت. پلت‌ها با استفاده از روش تک فشاری تحت چهار سطح فشرده‌سازی (۷۵، ۱۵۰، ۲۲۵، ۳۰۰ MPa) در سه درجه حرارت (۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰°C) تولید شدند. نتایج نشان داد که افزودن روغن به میزان قابل توجهی سبب افزایش انرژی در گلوله‌های چوبی می‌شود (Mišljenović *et al.*, 2015).

تولید پلت‌ها از مخلوط کاه گندم، کلزا و ذرت (مخلوط کاه گندم- کلزا، گندم- ذرت و ذرت- کلزا) با ترکیب ۵۰٪ وزنی از هر کدام) نشان داد که میزان کالری متوسط برای مخلوط کاه گندم و کلزا بین ۱۵/۳ MJ/kg تا ۱۶/۲ MJ/kg متغیر است. کمترین چگالی توده برای پلت‌های کاه گندم (۳۸۶-۴۲۰ Kg/m<sup>3</sup>) و بالاترین (۵۶۱ Kg/m<sup>3</sup>) و ۷۵۲ Kg/m<sup>3</sup> برای پلت‌های ذرت ثبت شد. پایین‌ترین

لیگنین قلیایی، گلیسرول و L-proline برای ساخت پلت‌های سوختی از ضایعات کلزا استفاده شد. فرمولاسیون اتصال برای تولید پلت با دوام ۹۹٪ (آزمون سقوط)، تراکم آرام ۱/۱۱۰ kg/m<sup>3</sup> و تراکم انرژی ۱۸/۶۰۳ MJ/m<sup>3</sup> بهینه شدند. نتایج نشان داد که L-proline بهترین عملکرد را در افزایش خواص مکانیکی پلت در مقایسه با دو اسید آمینه دیگر دارد. در مقایسه با گلیسرول خالص، استفاده از گلیسرول خام سبب کاهش انرژی فشاری مورد نیاز شد، در عین حال پلت تولید شده دارای استحکام کششی پایین بود (Azargohar *et al.*, 2019).

در پژوهشی دیگر پلت‌های سوختی با کیفیت بالا با استفاده از ضایعات باغی بدون افزودنی‌های اضافی مورد بررسی قرار گرفت. درصد رطوبت مواد اولیه (۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵٪)، اندازه ذرات (۲۵/۴ و ۶/۲۵ mm) و اندازه پلت (۱۲ و ۱۵ mm) بر کیفیت پلت و روند پلت‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دوام پلت‌ها با افزایش درصد رطوبت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج آزمایش‌های احتراق نشان داد که پلت ضایعات باغی می‌تواند به راحتی در اجاق‌های مسکونی مورد استفاده قرار گیرد (Pradhan *et al.*, 2018).

در پژوهشی دیگر با هدف استفاده از زغال سنگ قهوه‌ای به عنوان سوخت در نیروگاه‌های سوختی، یک روش برای تولید پلت از ذغال سنگ قهوه‌ای و سبوس برنج ارائه شد. با مخلوط کردن سبوس برنج و ذغال سنگ قهوه‌ای، ارزش گرمایی زغال سنگ قهوه‌ای بهبود و ایمنی آن در طول حمل و نقل افزایش یافت. ارزش گرمایی پلت‌ها با ۵۰٪ زغال سنگ قهوه‌ای و ۵۰٪ سبوس برنج به ۱۵ MJ/kg رسید و دوام آنها به ۹۸٪ رسید. نتایج نشان داد که این روش پلت‌کردن به دلیل عدم استفاده از انرژی حرارتی برای آگیری و خشک‌کردن، هزینه‌های تولید را کاهش داد (Tsuchiya & Yoshida, 2017).

بررسی تأثیر دما، فشار تراکم و نسبت اختلاط سبوس برنج و ملاس نیشکر بر خصوصیات مکانیکی پلت‌های تولید شده نشان داد که بجز نیروی متراکم سازی پلت و اثر متقابل نیروی فشار و دمای قالب دیگر متغیرهای مستقل و اثرات متقابل آنها بر برخی متغیرهای وابسته در سطح ۱٪ معنی‌دار بودند (Tabatabaei *et al.*, 2020).

پارامترهای مکانیکی و احتراقی پلت‌های ساخته شده از خاک اره چوب کاج با کاه گندم و کلزا وابسته به نسبت

۱). قبل از ساخت پلت، رطوبت اولیه نمونه‌ها با استفاده از روش خشک کردن در آون با دمای  $105^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۲۴ ساعت به دست آمد (Harun & Afzal, 2016).



شکل ۱- دستگاه آسیاب برای پودر کردن مواد

ابتدا پیش‌آزمون‌هایی برای ساخت پلت با نسبت‌های مختلف انجام گرفت و قالب‌پذیری و استحکام نمونه‌ها بررسی شد. نمونه‌های مناسب و با استحکام کافی برای آزمون با نسبت‌های پوست بادام، گردو و تفاله کنجد [T1) ۱:۱:۱، (T2) ۱:۲:۱، (T3) ۱:۱:۲، (T4) ۱:۱:۱] بر مبنای وزن به کار گرفته شد.

برای به دست آوردن شاخص فشردگی CI (Carr Compressibility) و نسبت هاسنر ( $R_h$ ) از روش Stasiak et al. (2011) استفاده شد. برای این کار مواد اولیه درون یک ظرف استوانه‌ای با ارتفاع مشخص قرار داده شد و وزن گردید. برای به دست آوردن چگالی اولیه و ثانویه، مواد اولیه درون ظرف با شدت ضربه ثابت و به تعداد ۱۲۰ مرتبه فشرده شد. سپس ارتفاع ثانویه به وسیله کولیس (Shoka gulf) ساخت کشور اسپانیا با دقت mm ۰/۱ (۰/۱) اندازه‌گیری شد. چگالی اولیه و ثانویه محاسبه و با استفاده از معادلات زیر درصد CI و  $R_h$  به دست آمد.

$$CI(\%) = 100 \times (\rho_1 - \rho_0) / \rho_1 \quad (1)$$

$$R_h = \rho_1 / \rho_0 \quad (2)$$

در معادلات فوق،  $\rho_0$  چگالی اولیه ( $\text{kg}/\text{mm}^3$ ) و  $\rho_1$  چگالی ثانویه ( $\text{kg}/\text{mm}^3$ ) است.

### پلت‌سازی

برای ساخت پلت از یک پیستون به قطر ۸ mm و یک قالب فولادی با قطر داخلی سیلندر ۸/۰۵ mm و ارتفاع ۱۵۰ mm و با انتهای مسدود شده توسط یک نگهدارنده

میزان مقاومت مکانیکی پلت‌ها برای کلزا (۹۶/۸-۹۵/۴%) بود در حالیکه بیشترین میزان برای پلت‌هایی با مخلوط کاه گندم و ذرت (۹۸/۹-۹۶/۸%) بود (Niedziółka et al., 2015).

در پژوهشی دیگر تأثیر نوع مواد خام، طول پلت، دما، رطوبت و اندازه ذرات بر فشار وارده در واحد پرس پلت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فشار پلت کردن با افزایش طول پلت افزایش یافته و میزان افزایش وابسته به نوع زیست توده، دما، رطوبت و اندازه ذرات متفاوت بود. قطر ذرات از ۰/۵ mm تا ۲/۸ mm مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نشان داد که فشار پلت شدن با افزایش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که فشار بیش از ۲۰۰ MPa فقط سبب افزایش جزئی تراکم پلت می‌شود (Stelte et al., 2011).

تقاضای روزافزون بازار برای سوخت‌های تجدیدپذیر، جستجوی انواع جدید زیست‌توده مناسب برای پلت‌سازی را تحریک کرده است. یکی از مهمترین منابع برای تولید پلت‌های سوختی، استفاده از ضایعات و پسماندهای کشاورزی است. در پژوهش‌های انجام شده اطلاعاتی در مورد استفاده از ضایعات و پسماندهای بادام، گردو و تفاله کنجد و بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و حرارتی ترکیبات مختلف آنها وجود ندارد. هدف از این پژوهش تعیین خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت‌های تولید شده از مخلوط پوست بادام، گردو و تفاله کنجد و بررسی تأثیر اندازه ذرات و نسبت ترکیب مواد اولیه بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پلت‌ها است.

### مواد و روش‌ها

#### آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش به منظور ساخت پلت از مواد اولیه پوست بادام، گردو و نیز تفاله کنجد به عنوان ماده پیوند دهنده طبیعی استفاده شد. پوست بادام و گردو از استان آذربایجان شرقی و تفاله کنجد از کارگاه روغن‌گیری در شهرستان ساری تهیه شد. مواد تهیه شده به مقدار لازم به آزمایشگاه منتقل و تا زمان آزمایش‌ها در دمای محیط نگهداری شد. نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه آسیاب غلات (شرکت مهر تجهیز، ایران) پودر شده و با عبور از الک‌های به شماره مش ۱۸ و ۳۰ در محدوده ۰/۶ و ۱ میلی‌متر برای ساخت پلت مورد استفاده قرار گرفت (شکل

خطی به طول ۱۰۰ mm در یک طرف سوراخ قالب استفاده شد و یک سیستم کنترل دمای ترموکوپلی برای تنظیم دمای مورد نظر به کار گرفته شد.

متحرک استفاده شد (شکل ۲). پلت ساز مورد استفاده در این پژوهش بر اساس طرح پیشنهادی (Nguyen *et al.*, 2015) و با اعمال تغییراتی ساخته شد. از یک المنت

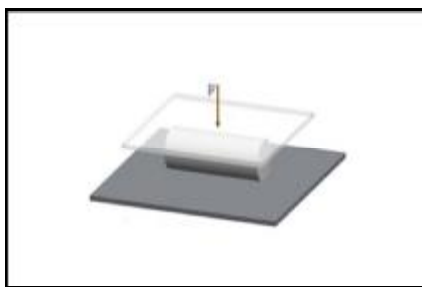


شکل ۲- مکانیزم پلت ساز و نحوه اتصال آن به دستگاه آزمون فشار (۱: پیستون فشاردهنده، ۲: المنت حرارتی یک عدد، ۳: بلوک سیلندر، ۴: پایه نگهدارنده متحرک

مطابق شکل ۲ از یک دستگاه آزمون کشش-فشار (شرکت لوترون، تایوان) برای متراکم سازی مواد درون قالب استفاده شد. ابتدا قالب پلت تا دمای مورد نظر گرم شده و پس از رسیدن به تعادل دمایی ( $70^{\circ}\text{C}$ )، نمونه‌های ترکیب شده با نسبت معین به وزن اولیه  $0.8\text{ g}$  درون قالب قرار داده شد و توسط پیستون با سرعت  $6\text{ mm/min}$  تا فشار  $6\text{ N}$  متراکم شد (Nielsen *et al.*, 2009). پس از اعمال نیروی مورد نظر، نمونه پس از ۳۰ ثانیه استراحت در فشار کامل با بیرون آوردن صفحه متحرک پایینی از سیلندر خارج شد. پلت‌ها برای انجام آزمایش‌های بعدی درون ظروف شیشه‌ای درب بسته نگهداری شدند.



شکل ۳- دستگاه آزمون گر بافت، نفوذ کننده و نحوه قرارگیری پلت



شکل ۴- روش بارگذاری پلت برای تعیین مقاومت

### مقاومت فشاری پلت

مقاومت فشاری پلت‌ها ۴۸ ساعت بعد از تولید آنها اندازه‌گیری شد. قبل از اندازه‌گیری مقاومت پلت‌ها ابعاد (طول و قطر) و جرم هر پلت برای محاسبه چگالی اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری پلت‌ها در راستای شعاعی با روش پیشنهادی (Nielsen *et al.*, 2009) اندازه‌گیری شد. پلت استوانه‌ای شکل به طور افقی بین دو فک بارگذاری دستگاه بافت‌سنج (Texture Analyzer) قرار گرفت (شکل ۳) و نیروی فشاری توسط یک صفحه مطابق شکل ۴ اعمال شد. نمونه‌ها با سرعت بارگذاری یک میلی‌متر در دقیقه تحت نیروی فشاری تا نقطه گسیختگی قرار گرفتند. سپس مقاومت فشاری در راستای شعاعی از تقسیم حداکثر نیروی فشاری بر طول نمونه به دست آمد.

### ارزش حرارتی

ارزش حرارتی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه بمب کالریمتر اندازه‌گیری شد. برای این کار مقدار  $1\text{ g}$  از هر ترکیب به صورت جداگانه وزن‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در دستگاه

و فضای بین ذرات به وجود می‌آید. در مواد اولیه درشت‌تر با سه نسبت ترکیب (۱:۱:۱، ۱:۲:۱، ۲:۱:۱) این نسبت کمتر بوده و جریان پذیری بیشتری نسبت به ذرات ریزتر و برای ذرات درشت با نسبت (۱:۱:۲) دارد. در ترکیبات دارای مقدار بیشتر تفاله کنجد تراکم بیشتر از موارد دیگر مشاهده شد که به دلیل دارا بودن خاصیت چسبندگی است. تغییرات در تراکم بهره برداری شده برای مقدار مختلف ذرات کوچک‌تر و بزرگ‌تر می‌تواند به دلیل تشکیل یک ساختار نسبتاً سخت از ذرات بزرگ با ذرات کوچک، حرکت آزادانه و پر کردن حفره‌ها باشد. همچنین نسبت بالاتر پوست بادام تراکم بیشتری نسبت به پوست گردو دارد که به چگالی کمتر بادام مربوط می‌شود. هر چقدر چگالی پلت بیشتر باشد هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری کمتر می‌شود (Kaliyan & Morey, 2010).

با توجه به این نکته که  $R_h < 1.25$  و  $CI = 5\% - 15\%$  برای نشان دادن جریان‌پذیری خوب به کار می‌رود، لذا نسبت هانسر ( $R_h$ ) و  $CI$  به دست آمده برای نمونه‌ها (جدول ۱) نشان داد که در اندازه ذرات درشت‌تر (الک شماره ۱۸) با نسبت‌های (۱:۱:۱، ۲:۱:۱، ۱:۲:۱) نسبت هانسر و  $CI$  صدق می‌کند. این امر نشان می‌دهد که ترکیب مواد در این نسبت‌ها دارای جریان‌پذیری بهتری نسبت به بقیه ترکیبات و اندازه ذرات هستند. نتایج به دست آمده با نتایج گزارش شده توسط (Stasiak et al., 2017) مطابقت دارد.

#### مقاومت شکست

مقاومت پلت در برابر بارهای فشاری فاکتور مهمی در ذخیره‌سازی و هنگام پر کردن سیلوا یا مخازن است. مقدار مقاومت پلت‌های سوختی یکی از موارد اصلی در سنجش کیفیت پلت‌ها است و نقش اساسی در حفظ شکل ظاهری پلت‌های سوختی دارد. هرچه مقاومت فشاری پلت‌های ساخته شده بیشتر باشد، کیفیت پلت‌ها بالاتر است. نتایج به دست آمده از آزمون فشار پلت (جدول ۲) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت تفاله کنجد، مقاومت پلت افزایش می‌یابد. این امر به دلیل وجود روغن در تفاله کنجد و ایجاد پیوند بین ذرات در بین فضاهای خالی و خلل و فرج است. طی تحقیقات به عمل آمده برای افزایش استحکام پلت‌های ساخته شده از مواد جنگلی و کشاورزی می‌توان از پیوند دهنده‌های طبیعی استفاده نمود

بمب کالریمتر (شرکت مهر تجهیز، ایران) قرار گرفت و دمای اولیه و دمای ثانویه حاصل از سوختن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (Mishra & Mohanty, 2018). ارزش حرارتی نمونه‌ها با استفاده معادله زیر محاسبه گردید.

$$4.2(1350 + 550) \times \Delta T = H \times m \quad (3)$$

در معادله فوق،  $\Delta T$  اختلاف دما (C)،  $H$  ارزش حرارتی (KJ/kg) و  $m$  جرم نمونه (g) است.

#### نتایج و بحث

##### چگالی و چگالی فشرده

بررسی نتایج به دست آمده از جدول ۱ نشان داد که چگالی اولیه محاسبه شده در اندازه ذرات ریزتر برای نسبت برابر از مواد اولیه (T1) برابر با  $330 \text{ kg/m}^3$  و برای نسبت بالاتر پوست گردو (T2)  $310 \text{ kg/m}^3$ ، برای نسبت بالاتر پوست بادام (T3)  $280 \text{ kg/m}^3$  و برای نسبت بالاتر تفاله کنجد (T4)  $300 \text{ kg/m}^3$  بود. مقادیر این پارامتر برای اندازه ذرات درشت‌تر افزایش یافت که  $600 \text{ kg/m}^3$  برای نسبت برابر از مواد اولیه (T1) و  $580 \text{ kg/m}^3$  در نسبت بالاتر پوست گردو و پوست بادام (T2 و T3) و  $510 \text{ kg/m}^3$  برای نسبت بالاتر تفاله کنجد (T4) به دست آمد. چگالی فشرده برای نسبت برابر از مواد اولیه (T1) در اندازه ذرات ریزتر برابر با  $490 \text{ kg/m}^3$ ، برای نسبت بیشتر پوست گردو (T2) برابر با  $460 \text{ kg/m}^3$ ، برای نسبت بیشتر پوست بادام (T3)  $450 \text{ kg/m}^3$  و برای نسبت بالاتر تفاله کنجد (T4)  $530 \text{ kg/m}^3$  به دست آمد. در اندازه ذرات درشت‌تر چگالی فشرده نسبت به اندازه ذرات ریزتر افزایش یافت که برای نسبت برابر از ترکیبات (T1) برابر با  $660 \text{ kg/m}^3$  و برای نسبت بالاتر پوست گردو (T2)  $680 \text{ kg/m}^3$ ، برای نسبت بالاتر پوست بادام (T3)  $670 \text{ kg/m}^3$  و برای نسبت بالای تفاله کنجد (T4)  $720 \text{ kg/m}^3$  به دست آمد. در اثر ضربه زدن به مواد برای ایجاد تراکم با نزدیک شدن ذرات به همدیگر هوای موجود بین فضاهای خالی ذرات بیرون رانده شده و سپس در ادامه نرخ فشردگی کمتر شده و ذرات تغییر شکل می‌دهند و در نتیجه سطح تماس برای پیوند بین آنها افزایش می‌یابد.

چگالی پلت فاکتور مهمی برای ذخیره‌سازی و حمل و نقل و همچنین بازده احتراقی محسوب می‌شود. تغییرات کوچک چگالی فشرده شده در نسبت ترکیب‌های مختلف برای ذرات ریز و درشت به دلیل تغییر در مقدار ماده اولیه

میزان چسبندگی ذرات به همدیگر دارد (Harun & Afzal, 2016). برای افزایش استحکام پلت‌های ساخته شده از پوست اکالیپتوس و پایاپا می‌توان از پیوند دهنده‌های طبیعی به دست آمده از صمغ درختان استوایی و روغن پوسته بادام استفاده کرد (Jamradloedluk & Lertsatitthanakorn, 2017).

(Jamradloedluk & Lertsatitthanakorn, 2017). تأثیر ماده پیوند دهنده بر استحکام مکانیکی پلت‌های ساخته شده از مخلوط خاک اره کاج با کلش گندم و کلزا گزارش شده است (Stasiak *et al.*, 2017). تنش تسلیم پلت ساخته شده از ترکیب چوب کاج و صنوبر و سه نوع علوفه وحشی در مقابل فشار بستگی به نوع ماده پیوند دهنده و

جدول ۱- نتایج چگالی، چگالی فشرده، نسبت  $R_h$  و  $CI$ 

نمونه	اندازه مش	نسبت ترکیب			چگالی ریخته ( $kg/m^3$ )	چگالی فشرده ( $kg/m^3$ )	تراکم‌پذیری (%)	نسبت هاسنر
		بادام	گردو	کنجد				
T1	۳۰	۱	۱	۱	۳۳۰	۴۹۰	۳۲/۶۵	۱/۴۸
T2	۳۰	۱	۲	۱	۳۱۰	۴۶۰	۳۲/۶۰	۱/۴۸
T3	۳۰	۲	۱	۱	۲۸۰	۴۵۰	۳۷/۷۷	۱/۶۰
T4	۳۰	۱	۱	۲	۳۰۰	۵۳۰	۴۹/۰۵	۱/۷۶
T1	۱۸	۱	۱	۱	۶۰۰	۶۶۰	۹/۰۹	۱/۱
T2	۱۸	۱	۲	۱	۵۸۰	۶۸۰	۱۴/۷۰	۱/۱۷
T3	۱۸	۲	۱	۱	۵۸۰	۶۷۰	۱۳/۴۳	۱/۱۵
T4	۱۸	۱	۱	۲	۵۱۰	۷۲۰	۲۹/۱۶	۱/۴۱

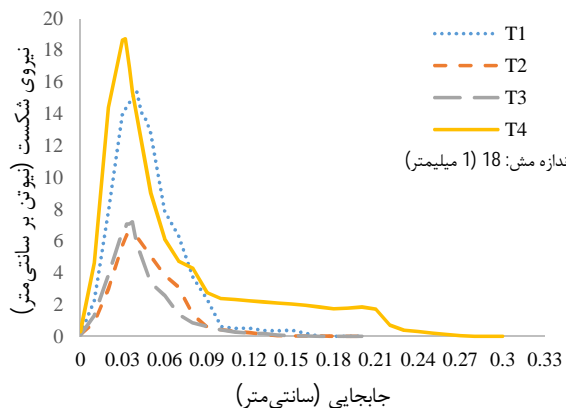
جدول ۲- مقایسه مقاومت پلت‌ها با ترکیب‌های مختلف مواد در دو اندازه ذرات

نمونه	اندازه مش	نسبت ترکیب			مقاومت پلت ( $N/cm^2$ )
		بادام	گردو	کنجد	
T1	۳۰	۱	۱	۱	۱۵/۴۴
T2	۳۰	۱	۲	۱	۶/۴۹
T3	۳۰	۲	۱	۱	۷/۲۱
T4	۳۰	۱	۱	۲	۵۰/۷۳
T1	۱۸	۱	۱	۱	۱۸/۷۲
T2	۱۸	۱	۲	۱	۴/۴۶
T3	۱۸	۲	۱	۱	۱۲/۲۶
T4	۱۸	۱	۱	۲	۲۰/۵۱

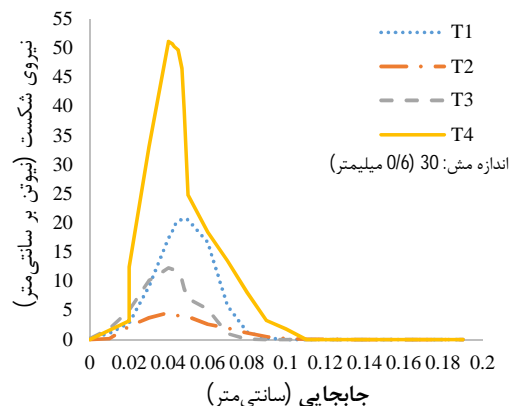
و استحکام بالاتری پیدا می‌کنند. تغییر در اندازه ذرات به دلیل سطح تنش وارده و از بین رفتن مرز ذرات باعث عملکرد قدرت پلت می‌شود. در مقایسه تیمارها کمترین مقاومت مربوط به نسبت بالاتر پوست گردو (تیمار T2) در اندازه ذرات درشت‌تر است. با توجه به داده‌های به دست آمده در اندازه ذرات ریزتر مقاومت فشاری برای نسبت برابر از مواد اولیه (T1)  $20/78 N/Cm$ ، برای نسبت بالاتر پوست گردو (T2)  $4/46 N/Cm$ ، در نسبت بالاتر پوست بادام (T3)  $12/26 N/Cm$  و برای مقدار بیشتر تفاله کنجد (T4)  $50/73 N/Cm$  به دست آمد. با تغییر در اندازه مواد اولیه که برای ذرات درشت‌تر است، مقاومت کاهش می‌یابد

علاوه بر چندین پارامتر دیگر در مواد و فرآیند، اندازه ذرات نقش اصلی در کیفیت و تراکم پلت دارد. این خاصیت به طور قابل توجهی به مقاومت مکانیکی پلت‌های زیست‌توده کمک می‌کند. در طی فرآیند تراکم، لایه اول ذرات با فشار دادن یکدیگر و پر کردن شکافها با لایه دوم ذرات تعامل می‌کنند. با ادامه حرکت و انباشته شدن لایه‌های دیگر، ذرات در برابر یکدیگر مقاومت می‌کنند و از این‌رو تنش بین ذره‌ای افزایش می‌یابد. پلت‌های ساخته شده از اندازه ذرات کوچک‌تر به دلیل کاهش شکافها و حفره‌ها نسبت به پلت‌های ساخته شده توسط ذرات بزرگتر دارای تخلخل کمتری بوده و به دنبال آن مقاومت

به دست آمده مربوط به نمودار نیرو-جابجایی پلت‌ها برای نسبت ترکیب مواد اولیه و اندازه ذرات در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تیماری که نسبت تفاله کنجد بیشتر و اندازه ذرات کوچک‌تر است نیروی فشاری بالاتری نسبت به بقیه تیمارها مشاهده می‌شود.



که به ترتیب برای نسبت برابر از مواد (T1) N/Cm ۱۵/۴۴، پوست گردوی بیشتر (T2) N/Cm ۶/۴۹، برای پوست بادام بیشتر (T3) N/Cm ۷/۲۱ و برای تفاله کنجد بالاتر (T4) برابر با N/Cm ۱۸/۷۲ به دست آمد. نتایج این مطالعه با نتایج (Mišljenović *et al.*, 2015) و (Harun & Afzal, 2016) مطابقت دارد که پیوند ضعیف بین ذرات را عامل کاهش مقاومت پلت‌ها بیان کردند. نمونه‌ای از نتایج



شکل ۵- نمودار نیروی شکست-جابجایی

افزایش می‌یابد و ارزش حرارتی با محتوای لیگنین ارتباط مستقیم دارد. محتوای لیگنین پوست گردو بیشتر از پوست بادام است که همین امر می‌تواند یکی از دلایل بالا بودن ارزش حرارتی مخلوط‌های با میزان بالاتر پوست گردو است. نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش (Demirbaş, 2002) مطابقت دارد. همچنین با افزایش اندازه ذرات به دلیل سطح تماس بیشتر و اشتعال کامل پلت‌های تولیدی، ارزش حرارتی بالاتری نسبت به پلت‌های تولیدی با ذرات ریزتر دارد. بررسی‌های به دست آمده از داده‌های ارزش حرارتی نشان می‌دهد که بطور میانگین ذرات درشت‌تر به اندازه ۱/۲ نسبت به ذرات ریزتر ارزش حرارتی بیشتری ایجاد می‌کنند.

#### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر اندازه ذرات و نسبت ترکیب پوست بادام، پوست گردو و تفاله کنجد، بر خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت‌های تولید شده از این مواد پرداخته شد. نتایج نشان داد که در ترکیباتی که دارای نسبت تفاله کنجد بیشتر و اندازه ذرات کوچک‌تر هستند، فاکتورهای چگالی و مقاومت پلت افزایش می‌یابد

#### ارزش حرارتی

نتایج اندازه‌گیری ارزش حرارتی پلت‌های تولید شده در جدول ۳ آورده شده است که نشان می‌دهد در اندازه ذرات ۰/۶ میلی‌متر برای نسبت ترکیب برابر از مواد اولیه (T1) KJ/g ۷۹۸۰ و برای نسبت بالاتر پوست گردو (T2) KJ/g ۸۷۷۸، در نسبت بالاتر پوست بادام (T3) KJ/g ۷۱۸۲ و نسبت بالاتر تفاله کنجد (T4) KJ/g ۴۷۸۸ به دست آمد. مقادیر ارزش حرارتی در اندازه ذرات درشت‌تر افزایش یافت که برای نسبت برابر مواد اولیه (T1) KJ/g ۸۷۷۸، برای نسبت بالاتر پوست گردو (T2) KJ/g ۹۵۷۶، نسبت بالاتر پوست بادام (T3) KJ/g ۸۷۷۸ و برای نسبت بیشتر تفاله کنجد (T4) KJ/g ۷۹۸۰ به دست آمد. ارزش حرارتی بیش‌تر، نشانه کیفیت بهتر پلت‌های سوختی است. کمترین مقدار کالری برای پلت‌های ساخته شده از نسبت بالاتر تفاله کنجد است و بیشترین مقدار مربوط به نسبت بالاتر پوست گردو است که به دلیل بالا بودن درصد کربن و لیگنین پوست گردو است. هرچه میزان کربن در ساختار زیست‌توده‌های تشکیل دهنده مواد پایه پلت بیشتر باشد، ارزش حرارتی پلت ساخته شده نیز افزایش خواهد یافت. ارزش حرارتی پلت‌ها با افزایش محتوای لیگنین آنها نیز



دست آمد که به دلیل بالا بودن درصد کربن و لیگنین پوست گردو است. بنابراین ساخت پلت از ضایعات محصولات باغی و کشاورزی که دارای چگالی و استحکام مناسب و ارزش حرارتی بالایی باشند، امکان‌پذیر است.

که این امر بدلیل نقش پیوند دهندگی و ایجاد پل‌های محکم بین ذرات است و ذرات با اندازه کوچک‌تر سطح تماس بیشتری برای چسبندگی به هم ایجاد می‌کنند. بیشترین و کمترین میزان ارزش حرارتی به ترتیب در نسبت بالاتر تفاله کنجد و نسبت بالاتر پوست گردو به

جدول ۳- نتایج ارزش حرارتی پلت‌های ساخته شده

نمونه	اندازه مش	نسبت ترکیب			ارزش حرارتی (KJ/g)
		بادام	گردو	کنجد	
T1	۳۰	۱	۱	۱	۷۹۸۰
T2	۳۰	۱	۲	۱	۸۷۷۸
T3	۳۰	۲	۱	۱	۷۱۸۲
T4	۳۰	۱	۱	۲	۴۷۸۸
T1	۱۸	۱	۱	۱	۸۷۷۸
T2	۱۸	۱	۲	۱	۹۵۷۶
T3	۱۸	۲	۱	۱	۸۷۷۸
T4	۱۸	۱	۱	۲	۷۹۸۰

europaea L. *Biomass and bioenergy*, 35(1): 402-410.

Demirbaş, A. (2002). Fuel characteristics of olive husk and walnut, hazelnut, sunflower, and almond shells. *Energy Sources*, 24(3): 215-221.

Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in energy and combustion science*, 30(2): 219-230.

Ebringerová, A., Hromádková, Z., Košťálová, Z., & Sasinková, V. (2008). Chemical valorization of agricultural by-products: isolation and characterization of xylan-based antioxidants from almond shell biomass. *BioResources*, 3(1): 60-70.

FAO. (2017). Statistics: Faostat-Agriculture, Production, Crops. <http://www.faostat.fao.org/>.

Fernández, R. G., García, C. P., Lavín, A. G., & de las Heras, J. L. B. (2012). Study of main combustion characteristics for biomass fuels used in boilers. *Fuel Processing Technology*, 103: 16-26.

Garcia-Maraver, A., Rodriguez, M. L., Serrano-Bernardo, F., Diaz, L. F., & Zamorano, M. (2015). Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. *Fuel processing technology*, 129: 1-7.

Harun, N. Y. & Afzal, M. T. (2016). Effect of particle size on mechanical properties of pellets made from biomass blends. *Procedia engineering*, 148: 93-99.

Jamradloedluk, J. & Lertsatitthanakorn, C. (2017). Influences of mixing ratios and binder types on properties of biomass pellets. *Energy Procedia*, 138: 1147-1152.

## منابع

Amiri, H., Kiyanmehr, M., Arabhosseini, A. & Volaei, I. (2012). Determination of moisture content for production of cow dung pellet using extruder. *The 6th National and 1st International Conference on Waste Management*, 23-24 April 2012, Mashhad, Iran. (In Persian).

Azargohar, R., Nanda, S., Kang, K., Bond, T., Karunakaran, C., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2019). Effects of bio-additives on the physicochemical properties and mechanical behavior of canola hull fuel pellets. *Renewable Energy*, 132: 296-307.

Barbanera, M., Lascaro, E., Stanzione, V., Esposito, A., Altieri, R., & Bufacchi, M. (2016). Characterization of pellets from mixing olive pomace and olive tree pruning. *Renewable energy*, 88: 185-191.

Bushnell, D. J., Haluzok, C., & Dadkhah-Nikoo, A. (1990). *Biomass Fuel Characterization: Testing and Evaluating the Combustion Characteristics of Selected Biomass Fuels: Final Report May 1, 1988-July, 1989* (No. DOE/BP-1363). USDOE Bonneville Power Administration, Portland, OR (USA); Oregon State Univ., Corvallis, OR (USA). Dept. of Mechanical Engineering.

Calderon, C., Jossart, J. M., Goodwin, N., & Gauthier, G. (2013). European bioenergy outlook 2013 statistical report. *AEBIOM, European Biomass Association*.

Carone, M. T., Pantaleo, A., & Pellerano, A. (2011). Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of Olea

- production from garden waste biomass. *Energy for Sustainable Development*, 43: 1-14.
- Ragland, K. W., Aerts, D. J., & Baker, A. J. (1991). Properties of wood for combustion analysis. *Bioresource Technology*, 37(2): 161-168.
- Shen, D. K., Gu, S., Luo, K. H., Bridgwater, A. V., & Fang, M. X. (2009). Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, 88(6): 1024-1030.
- Stasiak, M., Molenda, M., Bańda, M., Wiącek, J., Parafiniuk, P., & Gondek, E. (2017). Mechanical and combustion properties of sawdust—Straw pellets blended in different proportions. *Fuel Processing Technology*, 156: 366-375.
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90(11): 3285-3290.
- Tabatabaeikoloor, R., Motevali, A., Hadipour, R., & Mavadati, S. (2020). Effect of temperature, compression force and mixing ratio of materials on the mechanical properties of pellets made from rice bran and sugarcane molasses. *Iranian Biosystem Engineering*, 51(3): 551-561. (In Persian).
- Tsuchiya, Y. & Yoshida, T. (2017). Pelletization of brown coal and rice bran in Indonesia: Characteristics of the mixture pellets including safety during transportation. *Fuel Processing Technology*, 156: 68-71.
- Zuwała, J. (2012). Life cycle approach for energy and environmental analysis of biomass and coal co-firing in CHP plant with backpressure turbine. *Journal of Cleaner Production*, 35: 164-175.
- Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2010). Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource technology*, 101(3): 1082-1090.
- Kylili, A., Christoforou, E., & Fokaides, P. A. (2016). Environmental evaluation of biomass pelleting using life cycle assessment. *Biomass and Bioenergy*, 84: 107-117.
- Lieder, M. & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 115: 36-51.
- Mishra, R. K. & Mohanty, K. (2018). Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 251: 63-74.
- Mišljenović, N., Mosbye, J., Schüller, R. B., Lekang, O. I., & Salas-Bringas, C. (2015). Physical quality and surface hydration properties of wood based pellets blended with waste vegetable oil. *Fuel Processing Technology*, 134: 214-222.
- Molina-Moreno, V., Leyva-Díaz, J. C., & Sánchez-Molina, J. (2016). Pellet as a technological nutrient within the circular economy model: Comparative analysis of combustion efficiency and CO and NOx emissions for pellets from olive and almond trees. *Energy*, 9(10): 777-785.
- Nguyen, Q. N., Cloutier, A., Achim, A., & Stevanovic, T. (2015). Effect of process parameters and raw material characteristics on physical and mechanical properties of wood pellets made from sugar maple particles. *Biomass and Bioenergy*, 80: 338-349.
- Niedziółka, I., Szpryngiel, M., Kachel-Jakubowska, M., Kraszkiewicz, A., Zawislak, K., Sobczak, P., & Nadulski, R. (2015). Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. *Renewable Energy*, 76: 312-317.
- Nielsen, N. P. K., Gardner, D. J., Poulsen, T., & Felby, C. (2009). Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood and Fiber Science*, 41(4): 414-425.
- Permchart, W., & Kouprianov, V. I. (2004). Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels. *Bioresource Technology*, 92(1): 83-91.
- Pradhan, P., Arora, A., & Mahajani, S. M. (2018). Pilot scale evaluation of fuel pellets