

Effect of Temperature, Compression Force and Mixing Ratio of Materials on the Mechanical Properties of Pellets Made from Rice Bran and Sugarcane Molasses

REZA TABATABAEKOLOOR^{1*}, ALI MOTEVALI¹, RAMAZAN HADIPOURI¹, SINA MOVADATI¹

1. Department of Mechanic of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

(Received: Oct. 13, 2018- Revised: Feb. 5, 2019- Accepted: June. 9, 2020)

ABSTRACT

One of the best ways to use biomass is to convert them into a pellet that has more mass and energy per unit volume and makes it easier to use and transport. Various factors are involved in the process of pelletizing, which helps to optimize the process. In this study, the effect of temperature, compression force and mixing ratio were investigated on the mechanical properties of pellets made from rice bran and sugar cane molasses. The results showed that, except compression force and the interaction between the compression force and the temperature, other variables and their interactions have significant effect ($p < 0.01$) on the dependent variables. Mean comparison showed that increasing the amount of molasses in combination increased the compressive strength of the pellet in axial and radial direction. The highest compression strength was obtained at the ratio of 1 to 1.50 (rice bran to molasses) and 1300N compression force. The maximum bending strength of pellets was significant in all three ratios, and increasing sugar cane molasses increased the bending strength. Increasing the mold temperature and compression force increased the strength of the pellets in both axial and radial directions as well as their bending strength. Maximum density and drop resistance of pellet in the ratio of 1 to 1.65 (rice bran to molasses), compression force of 1300 N and temperature of 70 ° C were 1213 kg/m³ and 93.5%, respectively. Generally, in the pelletizing process the mixing ratio, compression force and temperature have an effect on the strength of the pellet.

Keywords: Pellet, Mechanical properties, Rice Bran, Sugarcane Molasses, Density, drop strength

بررسی تاثیر دما، فشار تراکم و نسبت اختلاط مواد بر خصوصیات مکانیکی پلت‌های تولید شده از سبوس برنج و ملاس نیشکر

رضا طباطبائی کلور*^۱، علی متولی^۱، رمضان هادیپور^۱، سینا مودتی^۱

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری،

ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۳/۲۰)

چکیده

یکی از روش‌های استفاده بهینه از زیست توده‌ها تبدیل آنها به شکل پلت می‌باشد که جرم و انرژی بیشتر در واحد حجم داشته و امکان استفاده و حمل و نقل آسان‌تر آنها را فراهم می‌کند. عوامل مختلفی در فرآیند پلت سازی موثر هستند که شناخت آنها به بهینه سازی فرآیند پلت سازی کمک می‌کند. در این تحقیق تاثیر دما، فشار تراکم و نسبت ترکیب مواد بر خصوصیات مکانیکی پلت‌های تولید شده از سبوس برنج و ملاس نیشکر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج 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 هستند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش میزان ملاس در ترکیب، مقاومت فشاری پلت در راستای محوری و شعاعی روند افزایشی نشان داد. بیشترین مقاومت فشاری پلت در نسبت سبوس به ملاس ۱ به ۱/۵ و بار ۱۳۰۰ نیوتن بدست آمد. بیشترین مقاومت خمشی پلت نیز در هر سه نسبت دارای اختلاف معنی‌داری بودند و با افزایش میزان ملاس نیشکر مقاومت خمشی افزایش یافت. افزایش دمای قالب و فشار تراکم موجب افزایش مقاومت پلت‌ها در هر دو راستای محوری و شعاعی و نیز مقاومت خمشی آنها شد. حداکثر مقادیر چگالی و پایداری پلت در نسبت سبوس به ملاس ۱ به ۱/۶۵، نیروی فشاری ۱۳۰۰ نیوتن و دمای ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب 1213 kg/m^3 و ۹۳٪/۵ بدست آمد. بطور کلی در فرآیند پلت سازی هر سه عامل نسبت ترکیب مواد، فشار تراکم و دما بر استحکام پلت تاثیر دارند.

واژه‌های کلیدی: پلت، خصوصیات مکانیکی، سبوس برنج، ملاس نیشکر، چگالی، مقاومت سقوط

مقدمه

پسماندها و ضایعات محصولات کشاورزی منبع اصلی زیست توده برای استفاده در تولید بیوانرژی هستند. این زیست توده‌ها 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 زیست توده‌ها تبدیل آنها به شکل پلت می‌باشد 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). کیفیت و دوام پلت‌هایی که تحت فشار ساخته می‌شوند به عوامل متعددی همچون خصوصیات فیزیکی، ساختمان شیمیایی، دما، وزن حجمی اولیه، درصد رطوبت، سرعت بارگذاری، مقدار فشار وارده و مدت زمان اعمال آن بستگی دارد. شناخت این خواص جهت بهینه‌سازی فرآیند پلت سازی بسیار مهم می‌باشد (Carone *et al.*, 2011, Amiri *et al.*, 2012).

مخلوط انواع مختلف مواد زیست توده اغلب برای بهبود

در دهه‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر یا انرژی سبز مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است. اما عواملی چون محدودیت سرمایه و هزینه‌های تولید هنوز نتوانسته انرژی سبز را در مقایسه با انرژی‌های تجدید ناپذیر مطلوب‌تر سازد. از این رو محققان بدنبال راه‌های مناسبی جهت مطلوب سازی انرژی‌های طبیعی هستند. پلت سازی پسماندهای زیستی از لحاظ اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است (Lu *et al.*, 2014). مطابق گزارش وزارت جهاد کشاورزی ایران، سطح زیر کشت نیشکر حدود ۹۳ هزار هکتار با تولید سالانه ۷/۸۰۰ هزار تن و سطح زیر کشت شلتوک برنج حدود ۵۹۶ هزار هکتار با تولید سالانه ۳/۲۰۶ هزار تن می‌باشد (آمارنامه کشاورزی، ۱۳۹۷). حدود ۱۰٪ شلتوک برنج سبوس نرم (Keshavarz Hedaiaty *et al.*, 2012) و حدود ۵٪ ماده خشک نیشکر ملاس است (Fazaeli, 2009).

کلزا و جو دوسر بدست آمد. میزان متراکم سازی یا فشار تراکم در پلت سازی بستگی به نوع مواد، دمای قالب و اندازه قالب دارد اما آنچه کیفیت پلت را مطلوب می‌سازد تعیین شرایط بهینه این عوامل هستند (Stelte *et al.*, 2011). Shaw *et al.*, (2009) پیش تیمار بخار، دمای قالب، اندازه ذرات و رطوبت را بر روی کیفیت فیزیکی پلت های تولید شده از کلش گندم و چوب را بررسی کردند. پیش تیمار بخار موجب افزایش چگالی و مقاومت کششی گردید. همچنین، افزایش دمای قالب و کوچکتر شدن اندازه ذرات موجب بهبود کیفیت فیزیکی پلت شد. (Niedziolka *et al.*, 2015) خصوصیات مکانیکی و ارزش حرارتی پلت های تولید شده از کلش گندم، ذرت و کلزا و نیز ترکیب آنها را ارزیابی کردند. کمترین چگالی مربوط به پلت های کلش گندم (۳۸۶-۴۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب) و بیشترین چگالی (۵۶۱-۵۷۲ کیلوگرم بر متر مکعب) برای ساقه های ذرت بدست آمد. همچنین، کمترین مقاومت مکانیکی برای کلزا (۹۵/۵ - ۹۶/۸ درصد) و بیشترین مقدار برای ترکیب گندم و ذرت (۹۸/۹۶-۹/۸ درصد) بدست آمد. Said *et al.*, (2015) تاثیر پارامترهای فشرده سازی را بر کیفیت پلت های تولید شده از کلش برنج بررسی کردند. بالاترین کیفیت پلت با پایداری ۹۹/۳٪ در رطوبت ۱۷٪، دمای ۵۰٪ و نسبت قطر به طول قالب ۸ به ۳۲ میلیمتر بدست آمد.

اثر اندازه ذرات بر روی خواص مکانیکی پلت های ساخته شده از زیست توده های کشاورزی و جنگلی و نیز ترکیب آنها بررسی شد. نتایج نشان داد که بطور کلی اختلاط زیست توده های کشاورزی با مواد چوبی جنگلی موجب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پلت ها می شود. پلت های ساخته شده از ذرات ریزتر دارای جرم مخصوص بیشتری بودند. همچنین، تنش تسلیم برای مواد جنگلی ۴۰ مگاپاسکال و برای مواد کشاورزی ۲۷ الی ۴۸ مگاپاسکال بدست آمد ولی بعد از اختلاط این مواد با هم تنش تسلیم به مقادیر مواد جنگلی نزدیکتر بود (Harun & Afzal, 2016). Mani *et al.*, (2006) گزارش کردند که استحکام مکانیکی پلت های ساخته شده در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد بیشتر از پلت های ساخته شده در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد است. ایجاد گرما در قالب پرس پلت موجب فعال شدن مواد پیوندی کلش یا مواد چسبنده افزودنی شده و در نتیجه فرایند خودچسبی تقویت شده و کیفیت پلت بهبود پیدا می کند (Ewida *et al.*, 2006). اثر پنج ماده چسبنده شامل تفاله زیتون، بنتونیت، نشاسته، گلیسرول و تفاله دانه کلزا را بر روی استحکام پلت کلش برنج بررسی شد و نتایج نشان داد که نشاسته بهترین ماده برای ایجاد چسبندگی در ساختن پلت است (Rhen *et al.*, 2005). افزودن خاک اره کاج به عنوان ماده پیوند دهنده به کلش جو موجب

خواص و کیفیت پلت ها بکار می رود. افزودن بامبو به کلش برنج موجب کاهش خاکستر از ۱۶ به ۲ درصد و افزایش ارزش حرارتی شد. کیفیت پلت ها بستگی به خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آنها دارد (لیو و همکاران، ۲۰۱۳). برای افزایش استحکام پلت ها می توان به آنها مواد افزودنی از جمله پیوند دهنده ها اضافه نمود (Liu *et al.*, 2014). Lu *et al.*, (2014) با افزودن گلیسرول خام، بنتونیت، لیگنو سولفونات و بقایای چوبی پیش تیمار شده به کلش گندم دریافتند که مقاومت کششی پلت حاصل از ۱/۱۳ مگاپاسکال به ۱/۶۳ مگاپاسکال افزایش پیدا کرد. Jiang *et al.*, (2014) از ترکیب پسماندهای زراعی و بقایای لجن فاضلاب برای ساخت پلت استفاده کردند. آنها نشان دادند که ذرات پیوند دهنده لجن در بین فضاهای خالی و خلل و فرج ذرات بیومس پر می شوند و سپس در اثر حرارت، پروتئین موجود در مواد بیومس به حالت خمیری در می آید و بعنوان یک پیوند دهنده عمل می کند. همچنین، لیگنین موجود در بیومس نرم شده و در نقطه تماس از یک ذره به ذره دیگر نفوذ می کند و تشکیل پل جامد می دهد.

در یک تحقیق خواص مکانیکی پلت های خاک اره مخلوط با کلش گندم و کلزا با نسبت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد دو نوع کلش در مخلوط مقدار جرم مخصوص پلت کاهش پیدا کرد. مخلوط خاک اره با کلش کلزا موجب مقاومت و پایداری بیشتر پلت ها شد. بعلاوه، با زیاد شدن رطوبت، مقاومت پلت کمتر و با افزایش نیروی تراکم مقاومت پلت بیشتر شد. گرمای احتراق با افزایش میزان کلش در مخلوط کاهش پیدا کرد (Stasiak *et al.*, 2017). Kaliyan & Morey, (2009) تاثیر فشار، رطوبت، اندازه ذرات و پیش تیمار دما را بر روی خصوصیات تراکمی ذرت بررسی کردند. تحقیقات مشابهی توسط Ishii & Furuichi (2014) بر روی کلش برنج برای تولید پلت هایی با ارزش حرارتی بالا و تعیین مناسبترین رطوبت انجام دادند. آنها رطوبت مناسب برای پلت سازی کلش برنج را بین ۱۳٪ الی ۲۰٪ گزارش کردند. Tsuchiya & Yoshida (2017) پلت هایی از ترکیب ذغال قهوه ای و سبوس برنج ساختند و خصوصیات پایداری و ارزش حرارتی آنها را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که پلت حاصل از ترکیب ۵۰٪ این دو ماده با هم دارای پایداری ۹۸٪ و انرژی حرارتی ۱۵ مگاژول بر کیلوگرم می باشد. Adapa *et al.*, (2009) چگالی و انرژی مخصوص لازم برای تراکم کلش جو، کلزا، جو دوسر و گندم را در رطوبت ۱۰٪ مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که کمترین مصرف انرژی مخصوص برای تولید بیشترین تراکم پلت ها در فشار حدود ۶۳ مگاپاسکال برای جو و گندم و فشار حدود ۹۴ مگاپاسکال برای

پلت سازی

برای ساخت پلت از یک پیستون به قطر ۸ میلی‌متر و یک قالب فولادی با قطر داخلی سیلندر ۸/۰۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر و با انتهای مسدود شده توسط یک نگهدارنده متحرک استفاده شد (شکل ۲). پلت ساز مورد استفاده در این تحقیق بر اساس طرح پیشنهادی (Nguyen et al., 2015) و با اعمال تغییراتی ساخته شد. از دو المنت خطی به طول ۱۰۰ میلی‌متر در دو طرف سوراخ قالب استفاده شد و یک سیستم کنترل دمای ترموکوپلی (محدوده ۱۵- الی ۴۰۰+)، شرکت میکروماکس، چین) برای تنظیم دمای مورد نظر قالب بکار گرفته شد.

روش آزمون

از یک دستگاه تست کشش- فشار برای متراکم سازی مواد درون قالب استفاده شد (شکل ۲). در این دستگاه از یک اینورتور (مدل N100 plus ساخت شرکت هیوندای کره جنوبی) برای تنظیم سرعت بارگذاری استفاده شد. بار گذاری از طریق یک لودسل ۵ کیلونیوتن (مدل SS300، با دقت ۰/۱ نیوتن، شرکت لوترون تایوان) انجام شد و میکروکنترلر آردونیو (ساخت ایتالیا) برای ثبت مقادیر جابجایی بکار گرفته شد. انتهای پیستون پلت ساز به فک متحرک دستگاه متصل شده و بارگذاری در سرعت ۶ میلی‌متر در دقیقه (Nielsen et al., 2009) انجام گرفت. ابتدا قالب پلت تا دمای مورد نظر گرم شد و پس از رسیدن به تعادل دمایی هر نمونه ترکیب شده به نسبت معین سبوس به ملاس و به وزن اولیه ۱/۵ گرم درون قالب ریخته شد و توسط پیستون تا فشار مورد نظر متراکم شد. پس از اعمال بار مورد نظر نمونه متراکم شده پس از ۱۰ ثانیه استراحت در فشار کامل با بیرون آوردن صفحه متحرک پائینی از سیلندر خارج شد. پلت ها برای انجام آزمایشهای بعدی درون ظروف شیشه ای دربسته نگهداری شدند.

تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری به صورت آزمایش فاکتوریل با طرح پایه کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام گرفت. متغیرهای مستقل شامل نیروی متراکم سازی (۷۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۳۰۰ نیوتن)، دمای قالب (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد) و نسبت اختلاط سبوس به ملاس (۱ به ۱/۳۵، ۱ به ۱/۵ و ۱ به ۱/۶۵) و متغیرهای وابسته شامل مقاومت فشاری محوری و شعاعی و مقاومت خمشی می باشند. تجزیه واریانس داده ها با استفاده از نرم افزار spss نسخه ۲۲ و مقایسه میانگین ها به روش دانکن انجام شد و نمودارها با استفاده از اکسل رسم شدند.

مقاومت پلت

شکل ۳ نحوه اعمال نیرو بر پلت را در سه حالت مختلف نشان می

افزایش ۱۲ درصدی پایداری پلت گردید (Serrano et al., 2011). بررسی ها نشان می‌دهد که تعیین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی، حرارتی و بررسی عوامل موثر بر این خصوصیات اهمیت فراوانی دارد. بنابراین، اکثر محققان ترجیح می دهند از پلت سازهای تکی برای مطالعه و ارزیابی خصوصیات پلت‌های زیست توده‌ای جدید استفاده کنند. بررسی منابع نشان داد که در مورد خصوصیات پلت های حاصل از ترکیب سبوس برنج و ملاس نیشکر هیچ اطلاعاتی گزارش نشده است. در این راستا، هدف تحقیق حاضر بررسی اثرات نسبت ترکیب مواد، دمای قالب و فشار تراکم بر خصوصیات مکانیکی پلت‌های تولید شده از سبوس برنج و ملاس نیشکر می باشد.

مواد و روش ها

آماده سازی نمونه ها

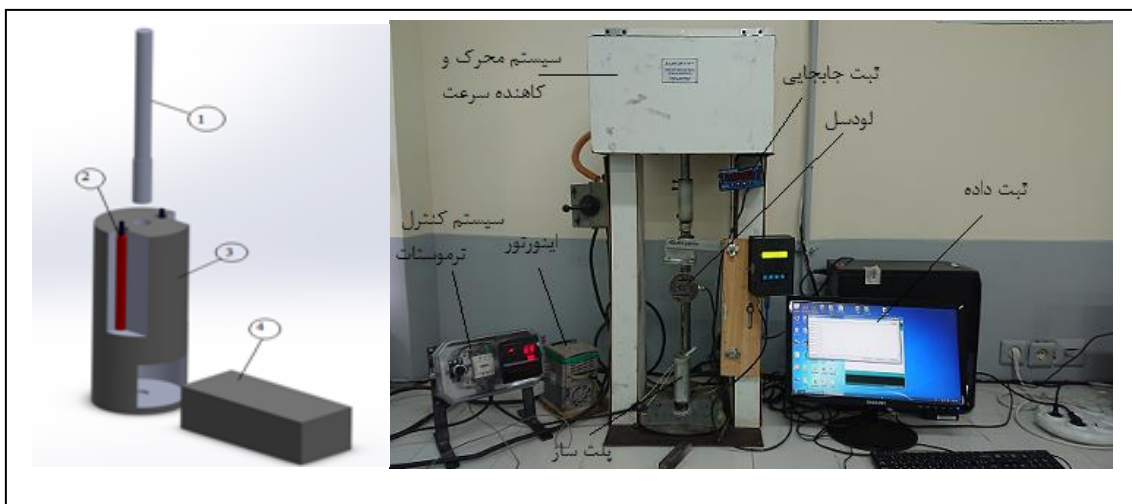
برای ساخت پلت از مواد اولیه سبوس نرم برنج و ملاس نیشکر به عنوان یک ماده پیوند دهنده طبیعی استفاده شد (شکل ۱). سبوس برنج از یک شالیگری و ملاس نیشکر از یک کارگاه فراوری نیشکر در شهرستان بهنمیر تهیه شد. مواد درون کیسه‌های نایلونی به آزمایشگاه منتقل شد و تا زمان آزمایش ها در دمای محیط نگهداری شد. نمونه های سبوس با عبور از الک های به شماره مش ۶۰ و ۳۵ در محدوده ۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر برای ساخت پلت مورد استفاده قرار گرفت. قبل از ساخت پلت ابتدا رطوبت اولیه نمونه ها با استفاده از روش خشک کردن در آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت بدست آمد (Harun & Afzal, 2016). ابتدا پیش آزمون هایی برای ساخت پلت با نسبت‌های برابر سبوس و ملاس انجام گرفت و قالب پذیری و استحکام نمونه ها بررسی شد. مشاهده شد که در نسبت‌های کمتر از ۱:۱/۲۵ سبوس به ملاس پلت استحکام کافی نداشت لذا نمونه‌های مناسب و با استحکام کافی برای آزمون با نسبت‌های سبوس به ملاس ۱:۱/۳۵، ۱:۱/۵۰ و ۱:۱/۶۵ بر مبنای وزن بکار گرفته شد.



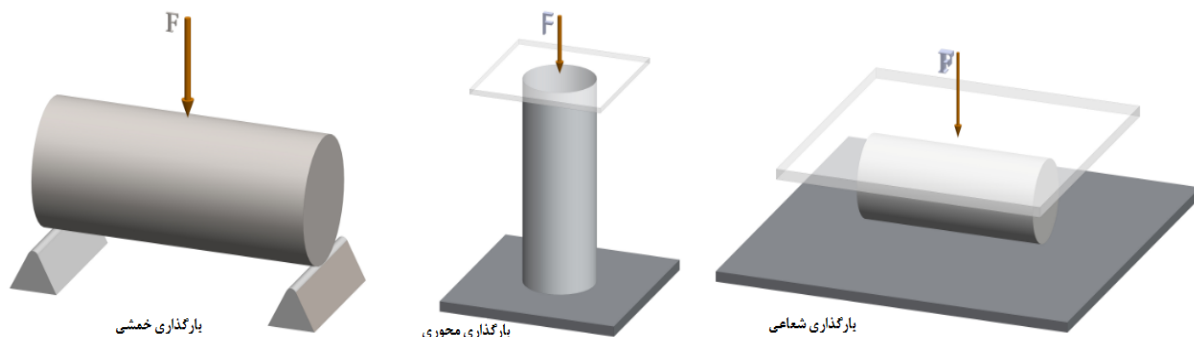
شکل ۱- مواد اولیه و ترکیب آنها برای ساخت پلت

از تقسیم این نیرو بر سطح مقطع نمونه و در راستای شعاعی از تقسیم حداکثر نیروی فشاری بر طول نمونه بدست آمد. نیروی شکست خمشی نیز با قرار گرفتن دو انتهای نمونه روی تکیه گاه و اعمال بار در وسط نمونه بدست آمد و سپس مقاومت خمشی نمونه محاسبه شد. هر داده از متوسط سه اندازه گیری بدست آمد.

مقاومت فشاری پلت ها در راستای محوری و شعاعی با روش پیشنهادی (Nielsen *et al.*, 2009) اندازه گیری شد. بعد از ساخته شدن پلت ها به مدت دو ساعت درون یک شیشه دربسته نگهداری شدند و سپس نمونه ها توسط یک ماشین تست کشش-فشار با سرعت بارگذاری ۶ میلیمتر در دقیقه تحت نیروی فشاری تا نقطه گسیختگی قرار گرفتند. سپس مقاومت فشاری در راستای محوری



شکل ۲- اجزای دستگاه و مکانیزم پلت ساز (۱): پیستون فشاردهنده، (۲): المنت حرارتی دو عدد، (۳): بلوک سیلندر، (۴): پایه نگهدارنده متحرک



شکل ۳- نمایش روش بارگذاری پلت برای تعیین مقاومت پلت

شود. جرم هر پلت قبل و بعد از سقوط اندازه گیری شد و میزان مقاومت در برابر سقوط بر مبنای درصد کاهش وزن تعیین گردید.

نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از تجزیه واریانس مقاومت فشاری و خمشی پلت بصورت میانگین مربعات در جدول ۱ آورده شده است. نتایج نشان می دهد که نیروی فشاری (B) و نیز اثر متقابل نیروی فشاری و دمای قالب (B×C) بر متغیرهای وابسته معنی دار نیستند ولی دیگر متغیرهای مستقل و اثرات متقابل آنها بر برخی متغیرهای وابسته در سطح ۱٪ معنی دار هستند.

چگالی پلت

چگالی پلت با تقسیم جرم بر حجم آن محاسبه شد. جرم توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.001 گرم حجم از روی قطر و طول پلت با فرض شکل کامل استوانه ای بدست آمد. طول و قطر پلت نیز توسط یک کولیس دیجیتال با دقت ± 0.01 میلی متر اندازه گیری شد.

مقاومت سقوط پلت

برای تعیین مقاومت سقوط پلت از روش پیشنهادی Stasiak *et al.* (2017) استفاده شد. در این روش مقاومت سقوط هر پلت با رها شدن از ارتفاع یک متری بر روی سطح بتنی سنجیده می

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس مربوط به مقاومت فشاری در دو راستای محوری و شعاعی و مقاومت خمشی پلت

میانگین مربعات				
منبع تغییر	df	مقاومت فشاری محوری (N/cm ²)	مقاومت فشاری شعاعی (N/cm)	مقاومت خمشی (N/cm ²)
نسبت سیوس به ملاس (A)	۲	۷۷۱/۶۴**	۱۰۶۳۷۲/۷**	۴۶/۷۰**
نیروی فشاری (نیوتن) (B)	۲	۲۲/۸۳ ns	۶۸۰۵/۶۴ ns	۱/۳۷ ns
دمای قالب (درجه سانتیگراد) (C)	۲	۳۲۴/۳۱**	۸۳۳۶/۵۳ ns	۳۸/۹۳**
A × B	۴	۶۹/۰۲**	۸۵۹۹/۲۵ *	۱/۸۶ ns
A × C	۴	۱۹۴/۷۲**	۹۶۸۷/۵۷ *	۲۰/۸۵**
B × C	۴	۱۹/۱۲ ns	۵۳۵۳/۷۵ ns	۱/۶۸ ns
A × B × C	۸	۲۷/۶۱*	۷۶۳۴/۳۱ ns	۲/۲۵ ns
خطا	۵۲	۱۰/۱۶	۳۳۴۰/۷۴	۱/۴۸ ns

***، * و ns به ترتیب معنی دار در سطح ۱٪، ۵٪ و غیر معنی دار

مقاومت پلت

جدول ۱ نشان می دهد که اثر متقابل نسبت ترکیب مواد و نیروی متراکم سازی بر مقاومت فشاری محوری در سطح ۱٪ و بر مقاومت شعاعی پلت در سطح ۵٪ معنی دار است. مطابق شکل ۴ با افزایش ملاس از ۱/۳۵ به ۱/۵۰ مقاومت پلت در هر دو راستای محوری و شعاعی بیشتر شد و سپس با رسیدن مقدار ملاس به ۱/۶۵ اندکی کاهش پیدا کرد. تفاوت معنی داری در مقاومت پلت برای بارهای ۱۰۰۰ و ۱۳۰۰ نیوتن وجود نداشت ولی بیشترین مقاومت فشاری پلت در نسبت سیوس به ملاس ۱ به ۱/۵۰ بدست آمد. این تغییرات در مقاومت پلت نشان می دهد که برای ایجاد استحکام در پلت، ماده پیوند دهنده بایستی به میزان مناسبی افزوده شود. ملاس هم می تواند نقش پیوند دهنده داشته باشد و هم نقش روان کننده به شرطی که به میزان مناسب افزوده شود. مقدار ملاس کمتر و بیشتر از ۱/۵۰ هر دو منجر به کاهش مقاومت محوری پلت شدند. این امر نشان می دهد که در نسبت ۱/۳۵ مقدار نیروی درونی کمتری برای استحکام بخشیدن پیوند بین ذرات پلت ایجاد شده و در نتیجه مقاومت کمتری در مقابل نیروی فشاری دارد. از طرف دیگر با افزایش نسبت ملاس به ۱/۶۵ یک فیلم نازک در اطراف ذرات پیوند تشکیل می شود که موجب ایجاد حالت روان کنندگی بین ذرات شده و در نتیجه ذرات روی هم می لغزند. از آنجا که ملاس بصورت مایع غلیظ و مرطوب بوده و در ترکیب با سیوس برنج یک مخلوط خمیری تشکیل می شود لذا افزودن ملاس بیشتر از ۱/۵۰ موجب زیاد شدن رطوبت مخلوط و در نتیجه ایجاد حالت خمیری بیش از حد شده و استحکام پل های تشکیل شده بین ذرات کاهش می یابد. (Wu et al., 2011) نشان داد که در پلت های ساخته شده از ترکیب کلش گندم، ذرت و کلزا چنانچه رطوبت از یک حد مطلوب بیشتر باشد، استحکام پلت کاهش می یابد. اعمال فشار تراکم بیشتر موجب

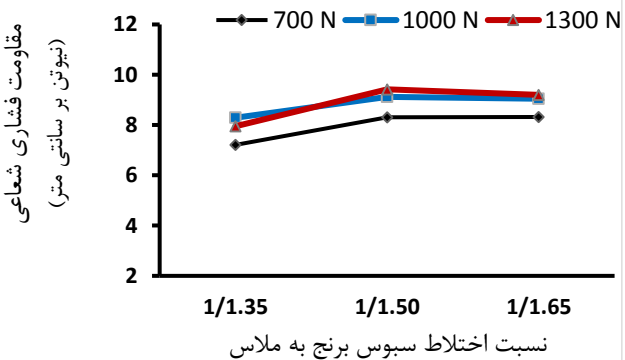
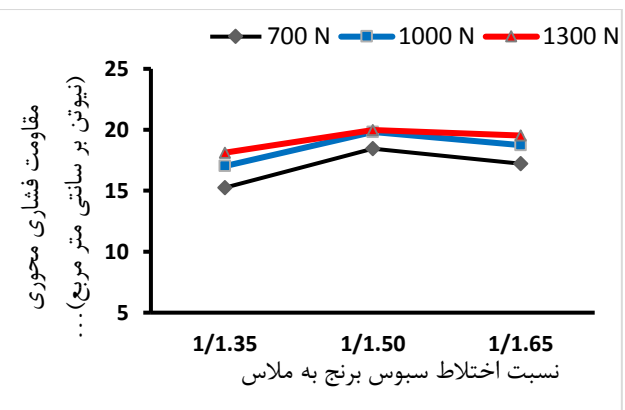
گسترده شدن سطح تماس بین ذرات مجاور هم می شود و در نتیجه پلها و نیروهای جاذبه قوی تری بین ذرات شکل می گیرد و موجب افزایش مقاومت پلت های زیست توده ای ساخته شده از ترکیب خاک اره کاج، پوسته برنج و پوسته و الیاف نارگیل می شود (Liu et al., 2014). برای افزایش استحکام پلت های ساخته شده از پوست اکالیپتوس و پایاپا می توان از پیوند دهنده های طبیعی بدست آمده از صمغ درختان استوایی و روغن پوسته بادام استفاده کرد (Jamradloedluk & Lertsatitthanakorn, 2017). تنش تسلیم پلت ساخته شده از ترکیب چوب کاج و صنوبر و سه نوع علفه وحشی در مقابل فشار بستگی به نوع ماده پیوند دهنده و میزان چسبندگی ذرات به همدیگر دارد (Harun & Afzal, 2016). همچنین، نتایج این مطالعه با نتایج Misljenovic et al. (2015). مطابقت دارد که پیوند ضعیف بین ذرات را عامل کاهش مقاومت پلت های ساخته شده از چوب صنوبر بیان کردند.

با توجه به جدول ۱ تاثیر نسبت ترکیب سیوس به ملاس بر مقاومت خمشی پلت در سطح ۱٪ معنی دار است. شکل ۵ مقایسه میانگین های مقاومت خمشی در نسبت های مختلف ترکیب سیوس و ملاس را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود افزایش میزان ملاس در ترکیب موجب افزایش مقاومت خمشی پلت شد. افزایش ملاس حالت خمیری شدن ترکیب را افزایش داده و در نتیجه موجب انعطاف پذیری بیشتر پلت می شود و این امر موجب افزایش بیشتر مقاومت خمشی می شود. بعلاوه، پیوندهای ایجاد شده بین ذرات سیوس در اثر کشش سطحی که ممکن است بدلیل رطوبت موجود در ملاس ایجاد شود انعطاف پذیری پلت را افزایش می دهد. پیوند دهنده های طبیعی مانند لیگنین و پروتئین در زیست توده هایی مانند کلش برنج و بامبو در طی فرآیند پلت سازی نرم می شوند و تشکیل یک پیوند قوی بین ذرات می دهند. بنابراین، مقدار بیشتر لیگنین منجر به

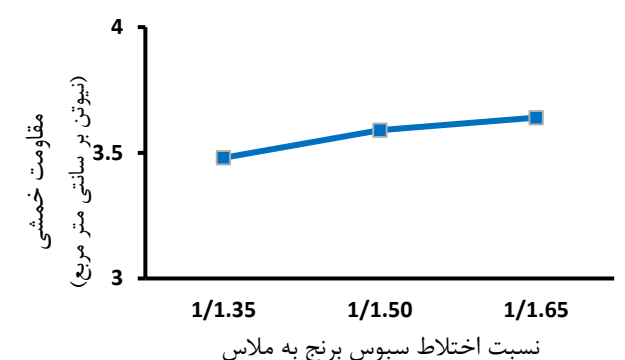
سانتیگراد بدست آمد. مقاومت پلت ها در هر دو راستای محوری و شعاعی با افزایش دمای قالب افزایش یافت اما افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سانتیگراد اثر معنی داری بر مقاومت فشاری شعاعی پلت نداشت. دمای قالب موجب می شود که پروتئین موجود در ماده بیومس به حالت خمیری درآید و بعنوان یک پیوند دهنده عمل کند. همچنین، لیگنین موجود در ماده بیومس نرم شده و در نقطه تماس ذرات مجاور هم از یک ذره به ذره دیگر نفوذ کرده و تشکیل پل جامد می دهد. (Nguyen et al., 2015) نیز دمای قالب پلت را بعنوان مهمترین عامل موثر بر مقاومت فشاری پلت عنوان کردند. کیفیت پلت ها بستگی به خصوصیات فیزیکی مواد تشکیل دهنده آنها و نیز کنترل شرایط در مرحله پلت سازی از جمله دما و فشار تراکم دارد (Carone et al., 2011). لیگنین و پروتئین بعنوان پیوند دهنده های طبیعی عمل می کنند (Jiang et al., 2014). ایجاد گرما در قالب پرس پلت موجب فعال شدن مواد پیوندی بیومس یا مواد چسبنده افزودنی شده و در نتیجه فرایند خودچسبی تقویت شده و کیفیت پلت بهبود پیدا می کند (Rhen et al., 2005).

نتایج بدست آمده توسط Mani et al. (2006) نشان داد که دما بر کیفیت پلت تاثیر گذار است بطوریکه استحکام مکانیکی پلت های ساخته شده در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد بیشتر از پلت های ساخته شده در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد بود. پلت هایی که در دمای بالاتر ساخته می شوند بدلیل نرم تر شدن لیگنین موجود در پیوند دهنده، بعد از سرد شدن در بین ذرات تشکیل پل های ارتباطی جامد را داده و موجب چسبندگی بیشتر و در نتیجه استحکام آنها می شوند (Stelte et al., 2011). افزایش مقاومت مکانیکی با دما از ۵۰ به ۸۰ درجه سانتیگراد برای پلت های ساخته شده از صنوبر، چمن، کاج، تفاله زیتون، راش و کلش گندم گزارش شده است (Puig-Arnavat et al., 2016). با توجه به جدول ۱ اثرات سه گانه نسبت ترکیب، دما و نیروی فشار بر مقاومت محوری در سطح ۱٪ معنی دار است. مقایسه میانگین های اثر متقابل نسبت ترکیب مواد، دما و نیروی فشاری بر مقاومت فشاری محوری پلت در شکل ۸ نشان داده شده است. افزایش میزان ملاس در ترکیب و دما موجب افزایش مقاومت محوری پلت گردید. البته لازم به ذکر است که در بار ۱۰۰۰ و ۱۳۰۰ نیوتن و دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس تفاوت معنی داری در مقاومت پلت وجود نداشت با این وجود بیشترین مقاومت در نسبت ترکیب ۱ به ۱/۶۵ سبوس به ملاس و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و بار ۱۳۰۰ نیوتن بدست آمد.

دگرچسبی بیشتر و در نتیجه مقاومت بیشتر می شود (Kaliyan (2010) & Stasiak et al. (2017) تاثیر افزایش درصد ماده پیوند دهنده بر استحکام مکانیکی پلت های ساخته شده از مخلوط خاک اره کاج با کلش گندم و کلزا را گزارش کردند.



شکل ۴- اثر متقابل نسبت ترکیب و نیروی فشاری بر مقاومت فشاری محوری و شعاعی پلت

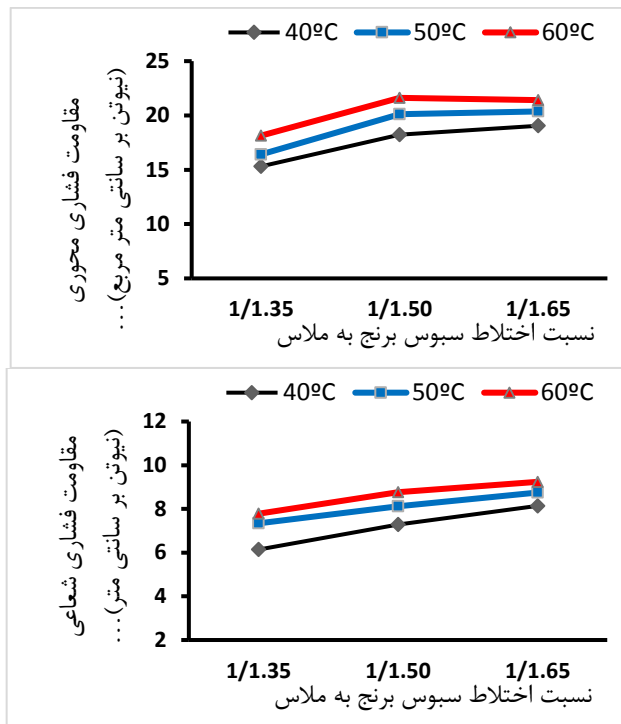


شکل ۵- تاثیر نسبت سبوس برنج به ملاس بر مقاومت خمشی پلت

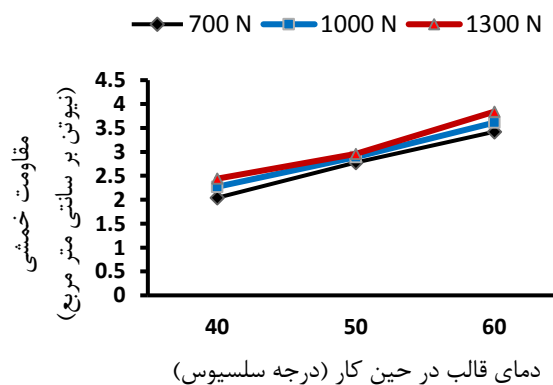
با توجه به جدول ۱ اثرات متقابل دما و نسبت ترکیب مواد و نیز دما و نیروی فشاری در طی فرآیند تراکم سازی بر روی استحکام پلت تاثیر دارد. شکل ۶ اثر متقابل دما و نسبت ترکیب مواد را بر مقاومت پلت نشان می دهد. با افزایش دما بیشترین مقدار مقاومت محوری در نسبت سبوس به ملاس ۱ به ۱/۵۰ و مقاومت شعاعی در نسبت ۱ به ۱/۶۵ و در دمای ۶۰ درجه

چگالی پلت

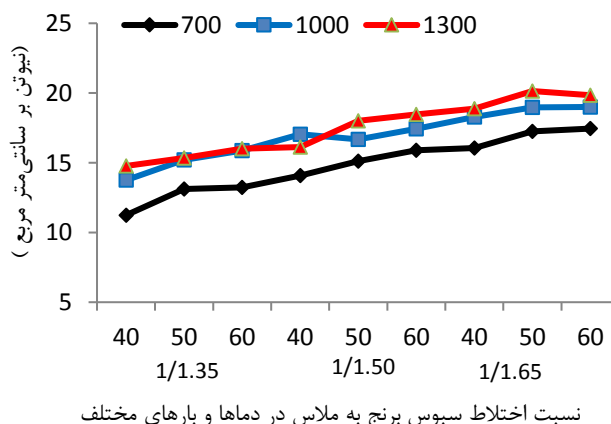
چگالی پلت فاکتور مهمی برای ذخیره سازی و حمل و نقل و همچنین بازده احتراقی محسوب می شود. تاثیر فشار تراکم بر چگالی پلت در جدول ۲ آورده شده است. تغییرات چگالی پلت در محدوده ۹۷۲/۹ تا ۱۲۱۳/۷ کیلوگرم بر متر مکعب بدست آمد. چگالی معمول و توصیه شده برای پلت های ساخته شده از پسماندهای کشاورزی و جنگلی ب بیشتر از ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد (Said et al., 2015). برخی محققان میانگین چگالی پلت های ساخته شده از زیست توده ها را بین ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش کرده اند (Rhen et al., 2005؛ Kaliyan & Morey, 2010؛ Li & Liu, 2000؛ Lehtikangas, 2001). چگالی پلت با افزایش فشار تراکم از ۷۰۰ نیوتن به ۱۳۰۰ نیوتن در دمای ۶۰°C و نسبت ۱ به ۱/۶۵ به میزان ۱۰/۳٪ افزایش یافت (جدول ۲). در مراحل اولیه فشار با نزدیک شدن ذرات به همدیگر هوای موجود بین فضاهای خالی ذرات بیرون رانده شده و سپس با ادامه فشار نرخ فشردگی کمتر شده و ذرات تغییر شکل می دهند و در نتیجه سطح تماس برای پیوند بین آنها افزایش می یابد. در مرحله پایانی تغییرات اندکی در چگالی رخ می دهد چرا که مواد به چگالی واقعی خود نزدیک شده و حفره های هوایی بطور کامل از بین می رود. بعد از برداشتن فشار اندکی آرامش تنش اتفاق می افتد که بدلیل انبساط هوای باقی مانده تحت فشار و یا تغییر شکل الاستیک رخ می دهد (Misljenovic et al., 2015). در فشار بالاتر، ذرات به هم نزدیکتر شده و موجب محکم شدن پیوند بین ذرات می شود. هر چقدر چگالی پلت بیشتر باشد هزینه های حمل و نقل و نگهداری کمتر می شود (Kaliyan & Morey, 2010). در پلت های ساخته شده از کلس برنج افزایش فشار از ۲۸ به ۱۱۰ مگاپاسکال موجب تغییر چگالی از ۱۰۵۱ به ۱۱۵۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب و در قهوه چینی از ۹۶۲/۷ به ۱۰۷۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب گردید (Jiang et al., 2014). افزودن پودر ذغال قهوه ای به سبوس برنج به نسبت ۲ به ۵، ۵ به ۸ و ۲ چگالی پلت به ترتیب ۵۸۰، ۵۸۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بدست آمد (Tsuchiya & Yoshida, 2017). پلت های ساخته شده از نسبت سبوس به ملاس ۱ به ۱/۳۵ دارای چگالی کمتری نسبت به پلت های با نسبت ۱ به ۱/۵۰ و ۱ به ۱/۶۵ بودند. در اثر فشار تراکم ذرات ملاس به آرامی به داخل فضاهای خالی و خلل و فرج ذرات سبوس نفوذ می کنند و سپس با تغییر حالت پروتئین و نرم شدن لیگنین به عنوان پیوند دهنده عمل کرده و در نتیجه تعداد فضاهای خالی بین ذرات کاهش می یابد. همچنین، پلت هایی که در دمای بالاتر ساخته می شوند



شکل ۶- اثر متقابل نسبت ترکیب و دما بر مقاومت فشاری محوری و شعاعی پلت



شکل ۷- اثر متقابل دما و نیروی فشاری بر مقاومت خمشی پلت



شکل ۸- اثر متقابل نسبت ترکیب، دما و نیروی فشاری بر مقاومت فشاری محوری پلت

اثر افزایش دمای پلت مدول الاستیسیته ذرات کمتر شده و ماده تشکیل دهنده پلت انعطاف پذیرتر می شود. در نتیجه فضاهای خالی بین و درون ذرات کاهش یافته و چگالی پلت افزایش می یابد.

دارای چگالی بیشتری نسبت به پلت های ساخته شده در دمای پائین تر هستند. این امر بدلیل اثر نرم کنندگی دما بر روی لیگنین بوده که موجب ایجاد خاصیت پلاستیکی در فیبرهای لیگنوسلولزی می شود. (Jiang et al. (2016) گزارش کردند که در

جدول ۲- چگالی و پایداری پلت برای تیمارهای مختلف

نسبت ترکیب (سبوس به ملاس)	دما (°C)	چگالی (kg/m ³)			پایداری (%)		
		فشار تراکم (N)	۷۰۰	۱۰۰۰	فشار تراکم (N)	۱۰۰۰	۱۳۰۰
۱:۱/۳۵	۴۰	۹۷۲/۹	۱۰۷۰/۱	۱۰۸۳/۵	۷۵/۸	۷۸/۲	۸۱/۶
	۵۰	۹۸۸/۱	۱۱۰۰/۹	۱۱۰۵/۲	۷۷/۱	۷۹/۷	۸۳/۴
	۶۰	۱۰۰۲	۱۱۷۴/۶	۱۱۸۰/۳	۷۸/۵	۸۲/۴	۸۵/۱
۱:۱/۵۰	۴۰	۱۰۰۸/۴	۱۰۵۷/۶	۱۰۶۰/۹	۸۲/۴	۸۴/۱	۸۵/۶
	۵۰	۱۰۱۱/۶	۱۰۷۳/۱	۱۰۷۸	۸۳/۷	۸۴/۹	۸۶/۲
	۶۰	۱۰۱۹/۷	۱۱۳۳/۸	۱۱۳۸/۸	۸۵/۴	۸۶/۵	۸۷/۶
۱:۱/۶۵	۴۰	۱۰۴۷/۵	۱۱۶۶/۳	۱۱۹۳/۶	۹۰/۷	۹۰/۲	۹۱/۸
	۵۰	۱۰۶۵/۳	۱۱۸۴	۱۲۰۲/۴	۹۱/۳	۹۱/۹	۹۲/۴
	۶۰	۱۰۸۸	۱۱۹۵/۴	۱۲۱۳/۷	۹۲/۶	۹۳/۱	۹۳/۵

برنج موجب افزایش قابل توجه پایداری پلت گردید. با افزودن خاک اره کاج به پلت ساخته شده از کلش جو پایداری پلت ۱۲ درصد افزایش پیدا کرد (Serrano et al., 2011).

نتیجه گیری کلی

با توجه به نبود اطلاعات در خصوص ساخت پلت از ترکیب سبوس برنج و ملاس نیشکر این تحقیق برای بررسی تاثیر پارامترهای نسبت ترکیب سبوس به ملاس، دما و فشار تراکم بر مقاومت، چگالی و استحکام پلت انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزودن میزان ملاس به عنوان یک ماده پیوند دهنده نقش مهمی در استحکام پلت دارد. بیشترین مقاومت فشاری محوری و شعاعی در نسبت سبوس به ملاس ۱ به ۱/۵۰ و نیروی تراکم ۱۳۰۰ نیوتن بدست آمد. با افزایش دما از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس مقاومت پلت افزایش پیدا کرد. افزایش دما و فشار تراکم موجب افزایش چگالی و پایداری پلت ها گردید. همچنین، با افزایش میزان ملاس در ترکیب، چگالی و پایداری پلت ها به میزان قابل توجهی بهبود یافت. نتایج این تحقیق را می توان برای یافتن ترکیب مناسب مواد و فاکتورهای موثر برای ساختن پلت با استحکام و دوام مناسب در فناوری های تجاری مورد استفاده قرار داد.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

مقاومت سقوط

مقاومت سقوط پلت یکی از فاکتورهای مهم کیفیت پلت محسوب می شود و نقش مهمی در حفظ شکل ظاهری پلت در جابجایی، بارگیری و تخلیه دارد. مقاومت بالاتر نشانه کیفیت بهتر پلت است. نتایج جدول ۲ نشان داد که محدوده تغییرات مقاومت سقوط برای پلت بین ۷۵ الی ۹۳ درصد می باشد. افزایش میزان ملاس در ترکیب، مقاومت سقوط پلت ها را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید که این امر نشان دهنده نقش ملاس به عنوان پیوند دهنده می باشد. (Tsuchiya & Yoshida (2017) با افزودن ۲۰٪ پودر زغال قهوه ای به سبوس برنج پایداری پلت را به ۹۷/۵٪ رساندند و دریافتند که ذغال قهوه ای به عنوان ماده پیوند دهنده عمل می کند. جدول ۳ نشان می دهد که افزایش دما و فشار تراکم مقاومت سقوط پلت ها را افزایش داده است. پلت هایی که از نسبت سبوس به ملاس ۱ به ۱/۳۵ ساخته شده بودند در محدوده دما و فشار کاری مورد نظر دارای مقاومت سقوط حدود ۷۵-۸۵٪ بودند در صورتیکه با افزایش میزان ملاس به ۱/۶۵ مقاومت سقوط پلت به حدود ۹۰-۹۳٪ رسید. با افزایش دما و فشار استحکام مکانیک پلت افزایش می یابد و در نتیجه پلت مقاومت سقوط بیشتری دارد. (Jiang et al. (2016) گزارش کردند که افزودن لجن به کلش

REFERENCES

Adapa, P., Tabil, L. & Shoenau, G. (2009). Compaction characteristics of barley, canola and wheat straw.

Biosystems Engineering, 104, 335-344.
Amiri, H., Kianmehr, M. H., Arabhoseini, 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 Farsi).
- Agricultural Statistics (2018). *Agricultural Statistics. Volume 2: Crops production during (2016-2017) years.* Published by Ministry of Agriculture, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Carone, M. T., Puntaleoo, A. & Pellerano, A. (2011). Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the residue of oleo kuropaec L. *Biomass Bioenergy*, 35, 402-410.
- Ewida, K. T., El-salawy, H., Atta, N. N. & Mahmud, M. M. (2006). A sustainable approach to the recycling of rice straw through pelletization and controlled burning. *Clean Technology Environment Policy*, 21, 188-197.
- Fazaeli, H. (2009). Recycling of sugarcane waste and its importance. Third National Congress on Waste and Renewable Resources Use in Agriculture. 25-26 September, Tehran, Iran.
- 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.
- Ishii, K. & Furuichi, T. (2014). Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets. *Waste Management*, 34, 2621-2626.
- Jamradloedluk, J. & Lertsatitthanakorn, C. (2017). Influence of mixing ratios and binder types on properties of biomass pellets. *Energy procedia*, 138, 1147-1152.
- Jiang, L., Liang, J., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Huang, H., Wang, H. & Zheng, G. (2014). Co-pelletization of sewage sludge and biomass: the density and hardness of pellet. *Bioresource Technology*, 166, 435-443.
- Jiang, L., Yun, X., Xiao, Z., Liang, J., Li, H., Cao, L., Wang, H., Chen, X. & Zeng, G. (2016). A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: Energy input and pellet properties. *Energy Conversion and Management*, 126, 509-515.
- Kaliyan, N. & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy*, 33, 337-59.
- Kaliyan, N. & Morey, R. V. (2010). Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn Stover and switch grass. *Bioresource Technology*, 101, 1082-1090.
- Keshavarz heydari, A., Alami, M., Moatamedzadegan, A. (2012). Evaluation of physic-chemical characteristics of rice bran. Master Sciences thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, lodging residue and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20, 351-360.
- Li, Y. & Liu, H. (2000). High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, 19, 177-186.
- Liu, Z., Quek, A. & Balasubramanian, R. (2014). Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residue and their corresponding hydrochars. *Applied Energy*, 113, 1315-1322.
- Lu, D., Tabil, L. G., Wang, D., Wang, G. & Emami, S. (2014). Experimental trials to make straw pellets with wood residue and binders. *Biomass and Bioenergy*, 69, 287-296.
- Mani, S., Tabil, L. & Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30, 648-654.
- Misljenovic, N., Mosbye, J., Schuller, R. B., Lekang, O. I. & Salas-Bringas, C. S. (2015). Physical quality and surface hydration properties of wood based pellets blended with waste vegetable oil. *Fuel Processing Technology*, 134, 214-222.
- 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.
- 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 Fiber Science*, 41, 414-425.
- Niedziolka, I., Szpryngied, M., Kachel-yakubowska, M., Kraszki-ewicz, 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.
- Puig-Arnabat, M., Shang, L., Sarossy, Z., Ahremfeldt, J. & Henriksen, U. B. (2016). From a single pellet press to a benchscale pellet mill-pelletizing six different biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology*, 142, 27-33.
- Rhen, C., Gref, R. & Wasterlund, M. (2005). Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. *Fuel Process Technology*, 87, 111-116.
- Said, N., Abdel daiem, M.M., Garcia-Maraver, A. & Zamorano, M. (2015). Influence of densification parameters on quality properties for rice straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 138, 56-65.
- Serrano, C., Monedero, E., Lapaerta, M. & Portero, H. (2011). Effect of moisture content, particle size and pine added on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Process Technology*, 92, 699-

- 706.
- Shaw, M. D., Karunkaran, C. & Tabil, L. G. (2009). Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds. *Biosystems Engineering*, 103, 198-207.
- Stasiak, M., Molenda, M. Banda, M., Wiacek, J., Parafiniuk, P. & Gondek, E. (2017). Mechanical and combustion properties of sawdust-straw pellets blended in different proportion. *Fuel Processing Technology*, 112, 366-375.
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, V. B. & Sanad, A. R. (2011). Thermal transition of the amorphous polymers in wheat straw. *Industrial Crops and Products*, 34, 1053-1056.
- Tsuchiya, Y. & Yoshida, T. (2017). Pelletization of brown coal and rice bran in Indonesia. *Fuel Processing Technology*, 156, 68-71.
- Wu, M. R., Scholt, D. L. & Lodewijks, G. (2011). Physical properties of solid biomass. *Biomass Bioenergy*, 35, 2093-2105.