Research Article

Agricultural Engineering., 46(3) (2023) 273-288
DOI: 10.22055/AGEN.2023.45376.1692

ISSN (P): 2588-526X
ISSN (E): 2588-5944

Evaluation of Fuel Pellets Made from the Combination of Spruce Sawdust with Corn and Soybean Biomass

A.R. Abdollahpour[1], R. Tabatabaeekoloor[2,*] and S.J. Hashemi[3]

1. MSc. Student in Renewable energy, Department of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Tel: 09364431191 Email: arabdollahpour@gmail.com
2,3. Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.

Received: 25 November 2023 Accepted: 4 December 2023 *Corresponding Author: r.tabatabaei@sanru.ac.ir

Abstract

Introduction: Agricultural residues and wastes are the main source of biomass for use in bioenergy production and animal and poultry feed production industries. These biomasses in their original form have a large volume and low energy (per unit volume) and require a lot of space and extensive movement. Therefore, one of the methods of optimal use of these biomasses is to transform them into pellets, which have more mass and energy per unit volume and enable their easier use and transportation. Currently, biomass has the fourth place in energy supply after oil, natural gas and coal and provides approximately 14% of the world's energy needs. The use of biomass, especially in European Union countries, as an attractive source for replacing fossil fuels is developing and expanding. The use of biomass as fuel has significantly reduced the amount of environmental pollutants, so that the amount of CO_2 absorbed from the atmosphere during biomass growth is similar to the amount produced during combustion, followed by a net cycle of production.

Materials and Methods: The raw materials for making pellets were prepared from spruce wood sawdust (collected from a sawmill in Sari) as well as corn stalk and soybean residues in the fields of Dasht Naz in Sari. The desired materials were transferred to the laboratory in the necessary amount and kept at ambient temperature until the experiments. The samples were first crushed into 20 mm sizes and then powdered using a grain mill (Mehr Tehiz company, Iran) and passed through 18 mesh sieves in the range of 1 mm to make pellets. A palletization mechanism was used to compress the pellet. This system was designed and built in biosystem mechanics of Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. The material was placed inside a steel mold with a cylinder inner diameter of 8.05 mm and a height of 150 mm with a blocked end. A piston with a diameter of 8 mm connected to the driving arm of the tension-compression test machine was used to compress the material. Loading by a piston with a quasi-static speed of 5 mm per minute is compressed to a pressure of 1300 N.

Results and Discussion: In this research, the mechanical and thermal properties of pellets made from the combination of spruce sawdust and corn and soybean residues were evaluated. In the present study, the effect of four combinations of agricultural and forest materials at two moisture

© 2023 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

levels (12% and 18% based on fresh weight) on the indices of density, compressibility, Hausner ratio, strength and calorific value of the produced pellets were investigated and evaluated. it placed. The results showed that the pellet density at 18% humidity was lower than the density at 12% humidity. The highest density related to the combination of 60% spruce wood sawdust-40% corn stalks was obtained with a value of about 149 kg/m3 and the lowest value related to 100% soybean stalks was about 110 kg/m3. Also, the ratio of Hanser and CI in the combined pellets that have a higher percentage of sawdust and also in the combination of sawdust with corn stalks are within the permissible range. The highest pellet strength was 23.8 N/cm corresponding to 100% sawdust at 18% humidity and the lowest was 15.4 N/cm corresponding to 100% soybean stalk at 12% humidity. The calorific value of the pellets is in the range of 14.37 to 18.52 MJ/kg, which is the minimum value for the pellet made from 100% soybean stalk at 18% humidity and the maximum value for the pellet made from 100% fir wood sawdust and It was obtained at a humidity of 12%. Therefore, the use of agricultural wastes and their proper combination is a good option for the production of biofuels due to their density and strength.

Conclusion: The type of biological waste and moisture percentage affect the physical and mechanical properties of the produced pellets. In general, the combination of spruce wood sawdust with corn stalks and soybean improved the mechanical and thermal properties of the pellet. Hanser's ratio and compressibility in the combined pellets that have a higher percentage of sawdust and also in the combination of sawdust with corn stalks are within the standard range. Also, in the compositions that have a higher proportion of spruce wood sawdust and lower moisture, the density and strength factors of the pellet increase. The highest and lowest calorific values were obtained in a higher ratio of sawdust and a higher ratio of corn, respectively. Therefore, it is possible to make pellets from the waste of garden and agricultural products that have good density and strength and high calorific value.

Keywords: Biomass, pellet, thermal value, density, durability

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۶ شماره۳، پاییز ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

ارزیابی پلت‌های سوختی ساخته شده از ترکیب خاک اره چوب صنوبر با زیست توده‌های ذرت و سویا

احمد رضا عبدالله پور[۱]، رضا طباطبائی کلور[۲*] و سید جعفر هاشمی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد انرژی های تجدید پذیر، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲ و ۳- دانشیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳

کلمات کلیدی:

مواد زیستی،

پلت ،

ارزش حرارتی،

چگالی،

پایداری

* عهده دار مکاتبات:

Email: r.tabatabaei@sanru.ac.ir

چکیده

تبدیل زیست توده‌های کشاورزی به شکل پلت و استفاده از آنها به عنوان منبع انرژی حرارتی اهمیت زیادی پیدا کرده است. در این تحقیق خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت‌های ساخته شده از ترکیب خاک اره صنوبر و پسماندهای ذرت و سویا مورد ارزیابی قرار گرفت. در پژوهش حاضر، تاثیر چهار ترکیب مواد کشاورزی و جنگلی (۱۰۰، ٦۰، ٤۰ و ۰ درصد خاک اره صنوبربا ساقه ذرت و سویا) در دو سطح رطوبت (۱۲٪ و ۱۸٪ بر مبنای وزن تر) بر شاخص‌های چگالی، تراکم پذیری، نسبت هاسنر، استحکام و ارزش حرارتی پلت‌های تولیدی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که چگالی پلت در رطوبت ۱۸٪ کمتر از چگالی در رطوبت ۱۲٪ است. بیشترین و کمترین چگالی برای ترکیب ٦۰٪ خاک اره چوب صنوبر-٤۰٪ ساقه ذرت و ترکیب ۱۰۰٪ ساقه سویا، به ترتیب حدود ۱٤۹ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب بدست آمد. همچنین، نسبت هانسر (R_h) و شاخص تراکم‌پذیری (CI) در پلت‌های ترکیبی که دارای درصد خاک اره بیشتری هستند و نیز در ترکیب خاک اره با ساقه ذرت در محدوده مجاز R_h < 1.25 و (5% - 15%) =CI قرار گرفته‌اند. بالاترین میزان استحکام پلت ۲۳/۸ نیوتن بر سانتیمتر مربوط به ۱۰۰٪ خاک اره در رطوبت ۱۸٪ و کمترین آن ۱۵/٤ نیوتن بر سانتیمتر مربوط به ۱۰۰٪ ساقه سویا در رطوبت ۱۲٪ بدست آمد. ارزش حرارتی پلت‌ها در محدوده ۱٤/۳۷ الی ۱۸/۵۲ مگاژول بر کیلوگرم قرار داشت که مقدار حداقل برای پلت ساخته شده از ۱۰۰٪ ساقه سویا در رطوبت ۱۸٪ و مقدار حداکثر از پلت ساخته شده از ۱۰۰٪ خاک اره چوب صنوبر و در رطوبت ۱۲٪ بدست آمد. بنابراین استفاده از ضایعات کشاورزی و ترکیب مناسب آنها به دلیل ایجاد چگالی و استحکام مناسب گزینه خوبی برای تولید سوخت‌های زیستی می‌باشد.

مقدمه

یکی از منابع مهم انرژی تجدیدپذیر، زیست‌توده‌ها هستند که جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی به شمار می‌آیند. پسماندها و ضایعات کشاورزی منبع اصلی زیست‌توده برای استفاده در تولید بیوانرژی و صنایع تولید خوراک دام و طیور 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 می کند (۷).

در حال حاضر، زیست توده پس از نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ جایگاه چهارم را در تامین انرژی دارا بوده و تقریبا ۱۴ درصد نیازهای انرژی جهان را تامین می‌کند (۲۰). استفاده از زیست توده‌ها به ویژه در کشورهای اتحادیه اروپا به عنوان یک منبع جذاب برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی در حال توسعه و گسترش می‌باشد (۱۱). استفاده از زیست توده به عنوان سوخت، میزان آلاینده‌های محیطی را به طور قابل توجهی کاهش داده به طوری که میزان CO_2 جذب شده از جو در طول رشد زیست توده مشابه همان میزان تولید شده در طول احتراق بوده و به دنبال آن اثر گلخانه‌ای چرخه خالص تولید و مصرف CO_2 خنثی می-شود (۳). علاوه بر این، زیست توده نسبت به سوخت‌های فسیلی محتوای نیتروژن و گوگرد کمتری دارد و در نتیجه تولید اکسید نیتروژن و دی اکسید سولفور پایین‌تر بوده که این امر سبب کاهش باران اسیدی در مناطق نزدیک به تاسیسات احتراق می‌شود (۵).

بررسی‌های مختلفی در زمینه تولید پلت‌های سوختی از ضایعات محصولات کشاورزی و پسماندهای چوبی انجام شده است. مطالعات متعددی در مورد پلت کردن گزارش شده است که بر پارامترهای مواد و فرآیند و تشکیل پیوند تمرکز دارد. پلتهای تولید شده از ترکیب خاک اره چوب کاج و دیگر بقایای زیستی در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و رطوبت ۱۶/۶ درصد دارای چگالی حجمی ۶۱۶ کیلوگرم بر متر مکعب و ارزش حرارتی ۱۸ مگاژول بر کیلوگرم و پایداری ۹۹/۴ درصد بودند (۶). در تحقیق دیگری اثر فشرده سازی بر کیفیت پلت ساخته شده از کلش برنج مورد ارزیابی قرار گرفت که بهترین کیفیت مربوط به پلت ساخته شده با رطوبت ۱۷٪ تحت دمای ۵۰ درجه سلسیوس بود که میزان پایداری آن ۹۹/۳ درصد اندازه‌گیری شد (۱۹). نتایج حاصل از پژوهشی نشان داد که پارامترهای فرآیند پلت‌سازی مانند محتوای رطوبت، اندازه ذرات و ترکیبات زیست توده تاثیر قابل توجهی بر تولید پلت‌های سوختی خواهد داشت (۱۷).

تراکم پذیری 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 فشاردهنده با انرژی کافی و تعیین تاثیر متغیرهای مختلف بر چگالی و دوام پلت‌ها بسیار مهم می‌باشد (۱و۲).

بررسی تاثیر 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٪ معنی دار بودند (۲۴). ویژگی‌های زیست توده‌های مختلف نیز برای ارتباط آن با پیوند ذرات در پلت‌های ساخته شده از راش، صنوبر و کاه مورد بررسی قرار گرفته است (۲۲). آنها سطح شکست پلت را تجزیه و تحلیل کردند و دریافتند که پلت‌های ساخته شده از راش و صنوبر مقاومت مکانیکی بیشتری نسبت به پلت‌های ساخته شده از کاه دارند. همچنین نتیجه‌گیری می‌شود که پلت‌های ساخته شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس نسبت به پلت‌های ساخته شده در دمای ۲۰ درجه سلسیوس تأثیر بیشتری بر پایداری مکانیکی دارند.

کارهای تحقیقاتی بسیار محدودی در مورد تولید پلت‌ها با روش ترکیب زیست توده کشاورزی با زیست توده چوبی گزارش شده است، این فرضیه وجود دارد که ترکیب زیست

توده کشاورزی در پلت‌های مبتنی بر زیست توده چوبی فعلی ممکن است جهت توسعه مواد اولیه جدید بکار رود. هدف از این کار بررسی اثر اندازه ذرات بر چگالی و تنش تسلیم پلت‌های ساخته‌شده از منتخب زیست توده‌های کشاورزی و چوبی و ترکیبات آن‌ها است.

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 درصد)، اندازه ذرات (۴/۲۵ و ۶/۲۵ میلیمتر) و اندازه پلت (۱۲و ۱۵میلیمتر) بر کیفیت پلت و روند ساخت پلت 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 (۱۷).

در پژوهشی دیگر 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 و۵۰٪ سبوس برنج به ۱۵ MJ/kg رسید و دوام آنها به ۹۸٪ رسید. نتایج نشان داد که این روش پلت-کردن به دلیل عدم استفاده از انرژی حرارتی برای آبگیری و خشک‌کردن، هزینه‌های تولید را کاهش داد (۲۷).

در پژوهشی دیگر به بررسی عملکرد سیستم‌های زیست توده 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 درصد و ۸۶/۳ درصد برای پلت درخت زیتون و درخت بادام به دست آمد (۱۲).

اختلاط زیست توده‌های کشاورزی با مواد چوبی جنگلی موجب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پلت‌ها می‌شود. 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 (۸).

قابلیت استفاده از پلت‌های چوبی با افزودن روغن سبزیجات و چگونگی کیفیت فیزیکی پلت، خواص سطحی و فرآیند پلت-کردن مورد بررسی قرار گرفت. پلت‌ها با استفاده از روش تک فشاری تحت چهار سطح فشرده سازی (۷۵، ۱۵۰، ۲۲۵و۳۰۰ مگاپاسکال) در سه درجه حرارت (۶۰، ۱۲۰و۱۸۰درجه سلسیوس) تولید شدند. نتایج نشان داد که افزودن روغن به میزان قابل توجهی سبب افزایش انرژی در پلت‌های چوبی می‌شود (۱۳).

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. همچنین نتایج نشان داد که فشار بیش از ۲۰۰ مگاپاسکال فقط سبب افزایش جزئی تراکم پلت می‌شود (۲۳).

تقاضای روزافزون بازار برای سوخت‌های تجدیدپذیر، تحقیقات برای تولید انواع جدید زیست‌توده مناسب برای پلت‌سازی را سرعت بخشیده است. در پژوهش‌های انجام شده اطلاعاتی در مورد استفاده از ضایعات و پسماندهای کلزا و ذرت و بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و حرارتی ترکیبات مختلف آنها وجود ندارد. هدف از این پژوهش تعیین ویژگی‌ها و کیفیت پلت‌های تولید شده از ترکیب خاک اره چوب صنوبر و ساقه ذرت و سویا در نسبت‌های مختلف می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

مواد اولیه برای ساخت پلت از خاک اره چوب صنوبر (جمع‌آوری شده از یک چوب‌بری در ساری) و نیز پسماندهای ساقه ذرت و سویا در مزارع دشت ناز ساری تهیه شد. مواد مورد نظر به مقدار لازم به آزمایشگاه منتقل و تا زمان آزمایش‌ها در دمای محیط نگهداری شد. نمونه‌ها ابتدا در اندازه های ۲۰ میلی-متر خرد شدند و سپس با استفاده از یک دستگاه آسیاب غلات (شرکت مهر تجهیز، ایران) پودر شده و با عبور از الک‌ها شماره

مش ۱۸ در محدوده یک میلیمتر برای ساخت پلت مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب خاک اره صنوبر با بقایای ذرت و سویا در جدول ۱ آورده شده است.

درصد رطوبت

رطوبت اولیه نمونه‌ها با استفاده از روش خشک کردن در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت بدست آمد (۸). سپس نمونه‌ها با نسبت‌های مورد نظر ترکیب شده و با افزودن آب مقطر در یک همزن آزمایشگاهی تا رسیدن به رطوبت مورد نظر با هم مخلوط شدند. نمونه ها در دو رطوبت حدود ۱۲ و ۱۸ درصد آماده شدند. جدول ۲ مقادیر رطوبت و نسبت طول به قطر (L/D) پلت‌ها برای ترکیبات مختلف را نشان می‌دهد.

جدول (۱) نسبت ترکیب مواد برای ساخت پلت

Table(1)composition ratio for producing pellet

مخلوط خاک اره و ساقه سویا Sawdust-soybean stalk		مخلوط خاک اره و ساقه ذرت Sawdust-corn stalk	
ساقه سویا (٪) Soybean stalk (%)	خاک اره (٪) Sawdust (%)	ساقه ذرت (٪) Corn stalk (%)	خاک اره (٪) Sawdust (%)
100	0	100	0
60	40	60	40
40	60	40	60
0	100	0	100

.جدول (۲) مقادیر رطوبت و نسبت طول به قطر پلت‌های ساخته شده

Table(2) Moisture content and ratio of length/diameter of pellets

ترکیب مواد Combination	نسبت طول به قطر (L/D)	رطوبت خشک (٪) Dry Moisture (%)	رطوبت بعد از افزودن آب (٪) Wet Moisture (%)
۱۰۰٪ ذرت 100% corn stalk	3.12	12±0.4	18±0.1
۴۰٪ خاک اره-۶۰٪ ذرت 40% sawdust-60% corn stalk	3.24	12±1.1	18±1.4
۶۰٪ خاک اره-۴۰٪ ذرت 60% sawdust- 40% corn stalk	3.18	12±0.9	18±0.8
۱۰۰٪ سویا 100% soybean stalk	3.22	12±0.7	18±1.2
۴۰٪ خاک اره-۶۰٪ سویا 40% sawdust- 60% soybean stalk	3.14	12±1.4	18±1
۶۰٪ خاک اره-۴۰٪ سویا 60% sawdust- 40% soybean stalk	3.21	12±0.6	18±0.9
۱۰۰٪ خاک اره 100% sawdust	3.19	12±1.3	18±1.1

ساخت پلت

برای فشرده‌سازی پلت از سیستمی مطابق شکل ۱ استفاده شد. این سیستم در مکانیک بیوسیستم دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری طراحی و ساخته شد. مواد داخل یک قالب فولادی با قطر داخلی سیلندر ۸/۰۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر و با انتهای مسدود شده قرار گرفت. برای فشرده‌سازی مواد از یک پیستون به قطر ۸ میلی‌متر متصل به بازوی محرک دستگاه تست کشش-فشار استفاده شد. بارگذاری توسط پیستون با سرعت شبه استاتیکی ۵ میلی‌متر در دقیقه تا فشار ۱۳۰۰ نیوتن انجام شد. پس از اعمال این نیرو و فشرده‌سازی مواد درون قالب دستگاه، بعداز ۱۰ ثانیه وقفه در همان فشار۱۳۰۰ نیوتن، با بیرون آوردن مسدودکننده‌ی متحرک انتهایی سیلندر، پلت ساخته شده خارج شده و برای انجام تست‌های بعدی درون ظرف شیشه‌ای نگهداری شده تا رطوبت محیط باعث تخریب ساختمان آن‌ها نشود. ابتدا پیش آزمون‌هایی برای ساخت پلت با هر ماده و نیز با نسبت‌های مختلف انجام گرفت و قالب‌پذیری و استحکام نمونه‌ها بررسی شد.

شاخص‌های ارزیابی پلت

چگالی و چگالی فشرده دو کمیتی هستند که بر اساس آن شاخص فشردگی و نسبت هاسنر بدست می‌آیند. برای بدست آوردن شاخص فشردگی CI (Carr Index) از روش توصیه شده توسط استاندارد ASTM D6393 و نسبت هاسنر[1] (R_h) از روش استاسیاک و همکاران[2] (۲۰۱۷) استفاده شد (۲۲). برای این کار مواد اولیه درون یک ظرف استوانه‌ای با ارتفاع مشخص قرار داده شد و وزن‌گردید. برای بدست آوردن چگالی اولیه و ثانویه، مواد اولیه درون ظرف با شدت ضربه ثابت و به تعداد ۱۸۰ مرتبه فشرده شد. سپس ارتفاع ثانویه به وسیله کولیس (Shoka gulf ساخت کشور اسپانیا با دقت ۰/۰۱ میلی متر) اندازگیری شد. چگالی اولیه و ثانویه محاسبه و با استفاده از رابطه‌های زیر درصد CI و R_h بدست آمد.

$$CI(\%) = 100 \times (\rho_1 - \rho_0)/\rho_1 \quad (۱)$$

$$R_h = \rho_1/\rho_0 \quad (۲)$$

در رابطه‌های بالا: ρ_0 چگالی اولیه (کیلوگرم بر میلی‌مترمکعب) و ρ_1 چگالی ثانویه (کیلوگرم بر میلی‌مترمکعب) می‌باشد.

استحکام پلت‌ها با بارگذاری آنها در راستای قطر بین پراب فشار دهنده و یک صفحه دایره ای تعیین شد. قبل از اندازه‌گیری مقاومت پلت‌ها، ابعاد (طول و قطر) و جرم هر پلت برای محاسبه چگالی اندازه‌گیری شد. استحکام پلت‌ها در راستای شعاعی با روش پیشنهادی نیلسن و همکاران[3] (۱۵) اندازه گیری شد. پلت استوانه ای شکل به طور افقی بین دو فک بارگذاری دستگاه بافت‌سنج (مدل بروکفیلد[4]، ساخت آمریکا) قرار گرفت و نیروی فشاری توسط یک صفحه مطابق شکل (۲) 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 بدست آمد.

آزمون پایداری به منظور بررسی سایش و تخریب ساختار پلت‌ها، در اثر زیر و رو شدن و تکان خوردن در طول فرایند حمل و نقل و نگهداری صورت می‌پذیرد. این آزمون با دستگاه تست پایداری بر اساس طرح (۲۸) صورت پذیرفت. پلت‌ها در معرض شوک‌های ناشی از جریان هوا و دیواره داخلی دستگاه قرار می‌گیرد. دستگاه تست پایداری به فرم هرم چهارضلعی می‌باشد و جریان هوا از زیر هرم به داخل آن وارد می‌شود. این هرم چهارضلعی که با توری فلزی ساخته شده به تنهایی قادر به ایجاد جریان چرخشی در محفظه نمی‌باشد. به همین جهت ساختار این دستگاه به گونه‌ای است که این هرم چهارضلعی درون یک فضای بسته مکعبی شکل قرار گرفته است که این محفظه بسته باعث گردش هوا درون دستگاه شده و سبب افزایش دقت آزمایش تست پایداری پلت می‌شود.

1- Hasner ratio
2- Stasiak *et al.*
3- Nielsen *et al.*
4- Brookfield

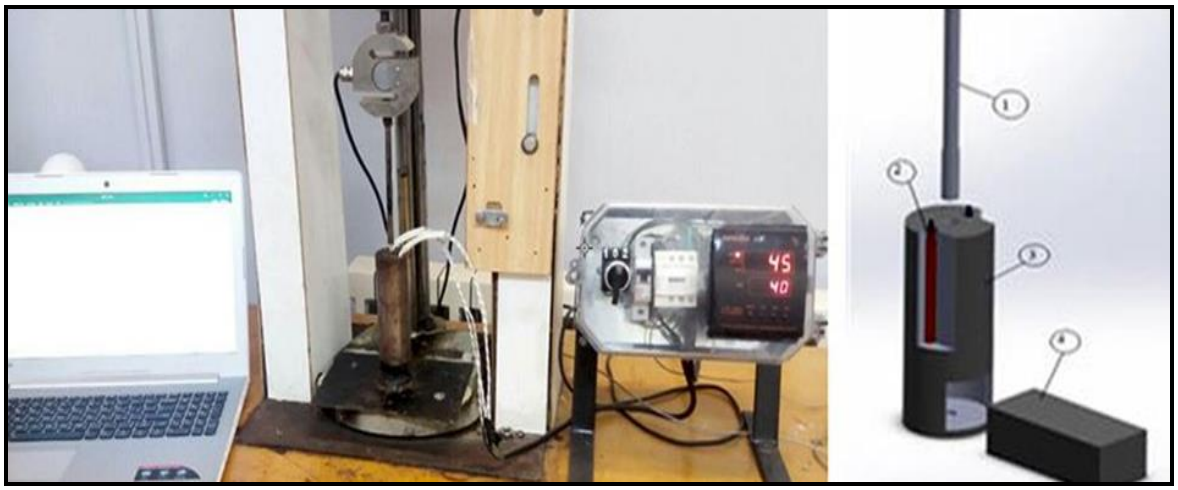
ارزش حرارتی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه بمب کالریمتر اندازگیری شد. برای این کار مقدار ۱ گرم از هر ترکیب به صورت جداگانه وزن‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در دستگاه بمب کالریمتر (شرکت مهر تجهیز، ایران) قرار گرفت و دمای اولیه و دمای ثانویه حاصل از سوختن نمونه‌ها اندازگیری شد. ارزش حرارتی نمونه‌ها با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد (۱۲).

$$4.2(1350 + 550) \times \Delta T = H \times m \qquad (۳)$$

در رابطه بالا: ΔT اختلاف دما (درجه سلسیوس)، H ارزش حرارتی (کیلوژول بر گرم) و m جرم نمونه (گرم) می‌باشد.

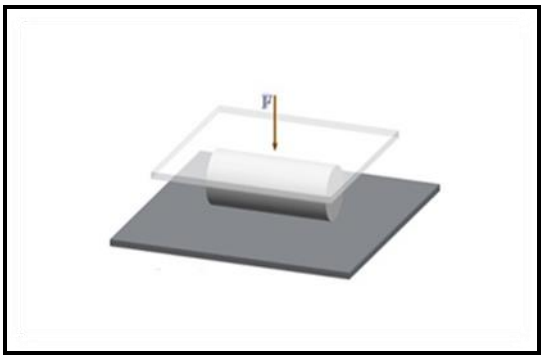
تحلیل داده‌ها

آنالیز واریانس داده‌های بدست آمده با استفاده از نرم افزار STATISTICA 12 انجام شد. معنی‌داری آماری داده-ها در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شد.



شکل(۱) مکانیزم پلت ساز و نحوه اتصال آن به دستگاه تست فشار (۱: پیستون فشاردهنده، ۲: المنت حرارتی ، ۳: بلوک سیلندر، ٤: پایه نگهدارنده متحرک

Figure(1) Pelletizing mechanism and connection to pressure device (1) compression piston, (2) thermal element, (3) cylinder block, (4) movable grabbing base



شکل(۲) نمایش روش بارگذاری فشاری پلت

Figure(2) schematics of pellet compression loading

نتایج و بحث

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس مربوط به استحکام، پایداری و ارزش حرارتی پلت‌ها را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود کلیه تیمارها بر فاکتورهای مورد نظر تاثیر معنی‌داری دارند. جدول (۴) مقادیر چگالی و پارامترهای جریان‌پذیری شامل شاخص‌های تراکم و نسبت هاسنر را نشان می‌دهد. بطور کلی چگالی پلت در رطوبت ۱۸٪ کمتر از چگالی در رطوبت ۱۲٪ بدست آمد. این امر به دلیل وجود آب بیشتر بین ذرات و در نتیجه تراکم‌پذیری کمتر می‌باشد. بیشترین چگالی مربوط به ترکیب ۶۰٪ خاک اره–۴۰٪ ذرت با مقدار حدود ۱۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین مقدار مربوط به ۱۰۰٪ سویا در رطوبت ۱۲٪ حدود ۱۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب بدست آمد. داده‌های جدول ۴ نشان داد که در مقادیر بیشتر خاک اره صنوبر چگالی افزایش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند ساختار سلولزی متراکم چوب نسبت به ساقه‌های ذرت و سویا باشد که سلولز کمتری نسبت به چوب دارد. همچنین، در رطوبت بیشتر وجود مولکول‌های آب با ایجاد فشار هیدرواستاتیکی موجب کاهش نزدیکی و فشردگی ذرات نسبت به هم شده و چگالی کمتر می‌شود. چگالی فشرده نیز همین روند را دارد و دارای مقادیر بیشتری نسبت به چگالی است. 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 ذخیره سازی و حمل و نقل و همچنین بازده احتراقی محسوب می شود (۱۱). تغییرات کوچک چگالی فشرده شده در نسبت ترکیب‌های مختلف به دلیل تغییر در مقدار ماده اولیه و خاصیت پیوند دهندگی بین ذرات به وجود می‌آید. در مواد اولیه در ترکیبات دارای مقدار بیشتر ساقه ذرت تراکم بیشتر از ترکیبات دیگر مشاهده شد که به دلیل دارا بودن خاصیت چسبندگی است. همچنین ترکیب خاک اره با ساقه ذرت تراکم بیشتری نسبت به ساقه سویا دارد که به چگالی کمتر ساقه سویا مربوط می‌شود. نتایج جدول ۴ نشان داد هر چقدر داد که چگالی پلت بیشتر باشد هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری کمتر می‌شود (۱۰).

محدوده شاخص تراکم‌پذیر و نسبت هاسنر خوب Rh < 1.25 و 15% - 5% =CI می‌باشد. نسبت هانسر و CI در پلت‌های ترکیبی که دارای درصد خاک اره بیشتری هستند و نیز در ترکیب خاک اره با ساقه ذرت در محدوده مورد نظر قرار گرفته‌اند. این امر نشان می‌دهد که دارای جریان‌پذیری خوب نسبت به بقیه ترکیبات هستند. نتایج بدست آمده با نتایج گزارش شده توسط استاسیاک و همکاران (۲۲) مطابقت دارد.

جدول(۳) نتایج تجزیه واریانس مربوط به استحکام، پایداری و ارزش حرارتی پلت‌ها

Table(3) ANOVA for the strength, durability and heating value of different treatments

منابع تغییرات S.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات (MS)		
		استحکام Strength	پایداری Durability	ارزش حرارتی Heating value
درصد ترکیب مواد Combination ratio (A)	4	11679.49**	278.35**	6224727.27**
درصد رطوبت Moisture content (B)	1	6815.65**	263.31**	410308.25**
برهم‌کنش ترکیب – رطوبت A ×B	4	104.29**	13.24**	80832.24**
خطا Error	18	1.31	0.27	1466.30

*: وجود اختلاف معنی‌دار در سطح 1% ns: عدم وجود اختلاف معنی‌دار

* and ** shows meaningful at 5 and 1 percent level, respectively

جدول(٤) مقادیر شاخص‌های ارزیابی پلت

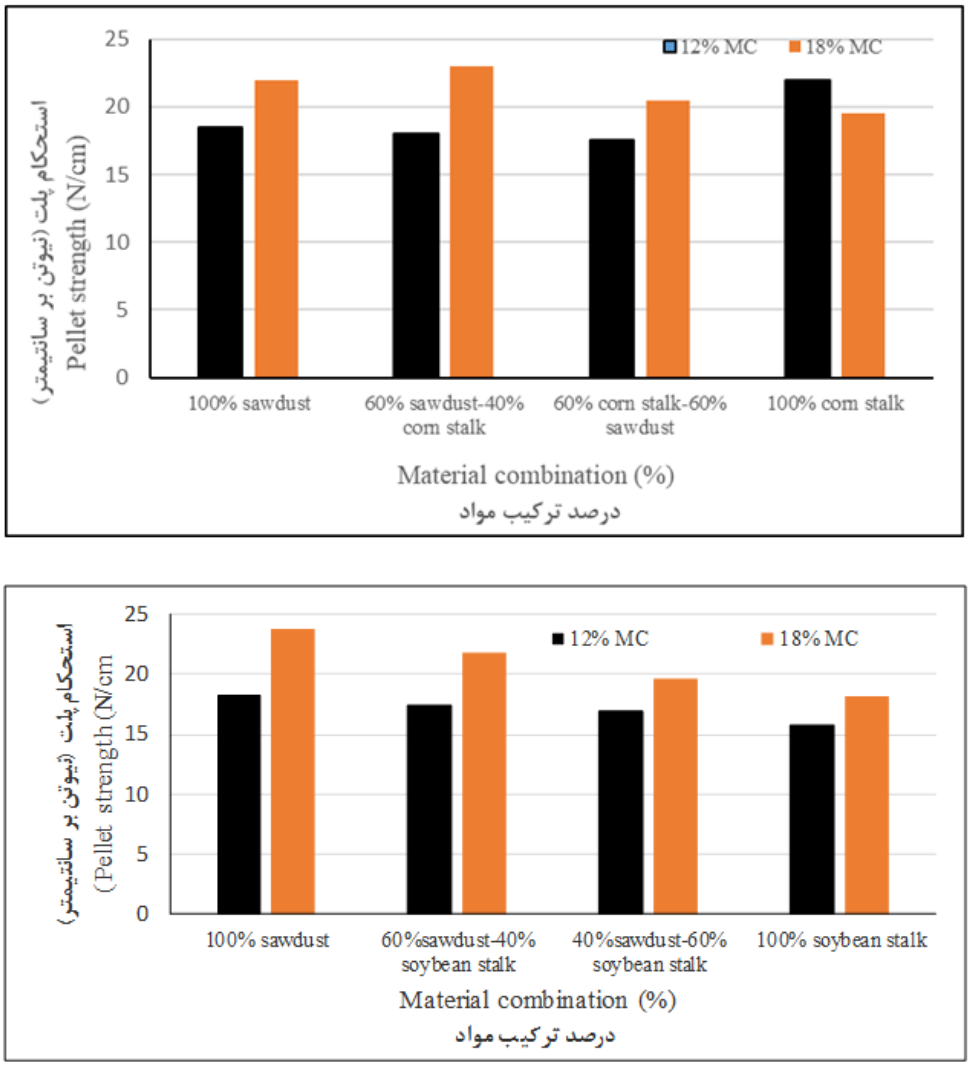
Table(4) Pellet evaluation indices

خاک اره چوب صنوبر Spruce sawdust (%)	ساقه ذرت Corn stalks (%)	رطوبت Moisture (%)	چگالی Density ($Kg.m^{-3}$)	چگالی فشرده Taped density ($Kg.m^{-3}$)	شاخص تراکم CI (%)	نسبت هاسنر Rh
100	0	12	140.1±3.2	187.1±2.5	17.7	1.26
60	40	12	149.6±2.4	188.4±1.7	14.9	1.21
40	60	12	139.3±2.2	175.7±1.9	19.7	1.28
0	100	12	143.5±3.1	169.2±2.3	20.4	1.32
100	0	18	118.2±1.6	158.1±2.9	19.5	1.41
60	40	18	121.8±2.5	155.3±2.3	21.7	1.31
40	60	18	123.4±2.3	162.1±2.0	22.5	1.31
0	100	18	115.1±2.6	137.4±3.1	26.6	1.21
	ساقه سویا Soybean stalk (%)					
100	0	12	120.8±2.7	156.2±2.4	18.7	1.27
60	40	12	133.6±2.2	173.8±1.8	15.9	1.25
40	60	12	140.3±1.5	181.3±1.6	21.7	1.28
0	100	12	139.8±1.8	186.2±2.1	22.4	1.32
100	0	18	115.2±1.7	157.8±3.7	17.5	1.26
60	40	18	122.4±2.5	155.1±2.3	14.7	1.21
40	60	18	125.4±1.6	160.4±2.0	15.5	1.34
0	100	18	110.0±2.3	157.4±3.1	19.6	1.39

استحکام پلت

مقدار استحکام پلت‌های سوختی یکی از موارد اصلی در سنجش کیفیت پلت‌ها می‌باشد و نقش اساسی در حفظ شکل ظاهری پلت‌های سوختی دارد. استحکام پلت در برابر بارهای فشاری فاکتور مهمی در ذخیره‌سازی و هنگام پر کردن سیلوها یا مخازن است. با توجه به مقایسه میانگین‌ها در شکل ۳ استحکام پلت برای ترکیب ۴۰٪ و ۶۰٪ تفاوت معنی‌داری ندارد اما در هر یک از مواد با

ترکیب ۱۰۰٪ اختلاف معنی‌داری بین مقادیر استحکام وجود دارد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد خاک اره چوب صنوبر استحکام پلت افزایش می‌یابد. این امر به دلیل ایجاد پیوند مستحکم‌تر بین ذرات در بین فضاهای خالی و خلل و فرج می باشد. برای افزایش استحکام پلت‌های ساخته شده از مواد جنگلی و کشاورزی می‌توان از پیوند دهنده‌های طبیعی استفاده نمود. تاثیر ماده پیوند دهنده بر استحکام مکانیکی پلت‌های ساخته شده از مخلوط خاک اره کاج با کلش گندم 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 میزان چسبندگی ذرات به همدیگر دارد (۸). برای افزایش استحکام پلت‌های ساخته شده از پوست اکالیپتوس و پاپایا می‌توان از پیوند دهنده‌های طبیعی بدست آمده از صمغ درختان استوایی و روغن پوسته بادام استفاده کرد (۹).

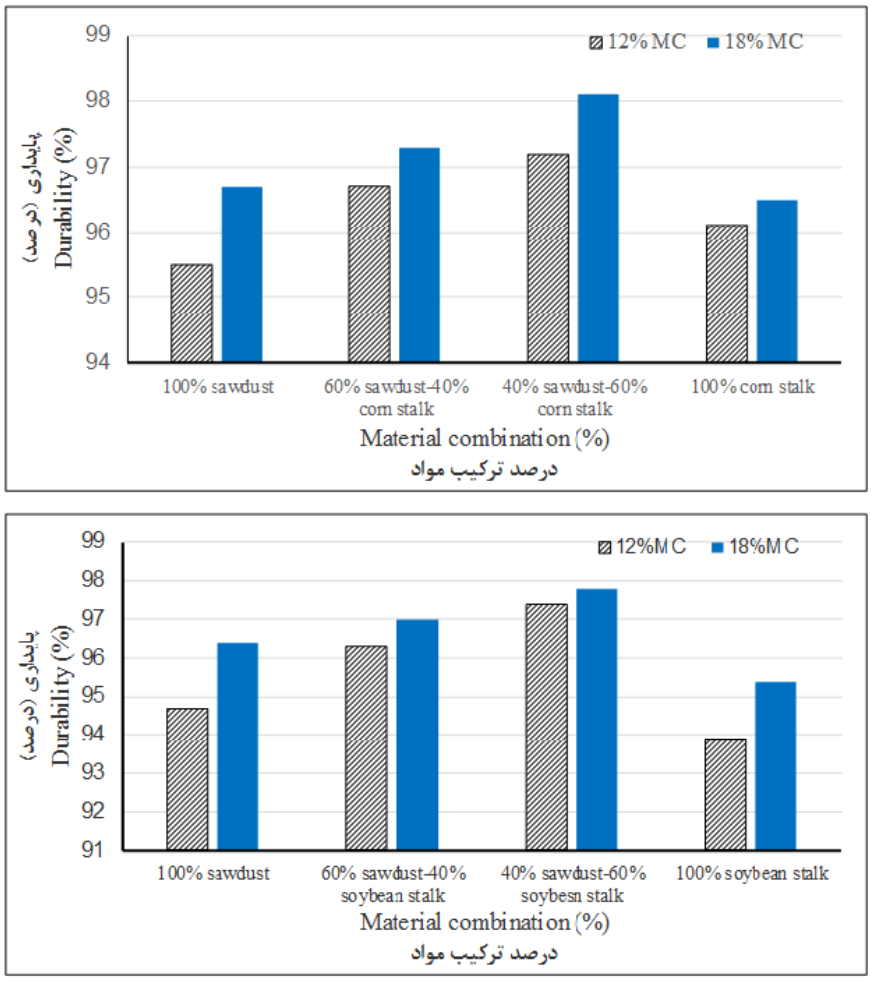


شکل(۳) استحکام پلت در ترکیب خاک اره چوب صنوبر با ذرت و سویا در دو سطح رطوبت

Figure(3) Pellet strength in combination of sawdust with soybean and corn stalks at two MC

پایداری پلت

شکل ۴ میانگین مقادیر پایداری پلت‌های ساخته شده از زیست‌توده‌ها در دو رطوبت را نشان می‌دهد. کمترین و بیشترین مقادیر میانگین پایداری پلت‌های ساخته شده از زیست‌توده‌ها، به ترتیب برابر با ۹۳/۹ درصد مربوط به ترکیب ۱۰۰٪ ساقه سویا در رطوبت ۱۲٪ و ۹۸/۱ درصد مربوط به ترکیب ۶۰٪ ساقه ذرت- ۴۰٪ خاک اره چوب صنوبر در رطوبت ۱۸٪ بدست آمد. نسبت بیشتر ساقه ذرت در مقایسه با خاک اره درترکیب مواد پایه‌ی ساخت پلت، پایداری پلت‌های سوختی ساخته شده را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این امر می تواند به دلیل وجود مواد پیوند دهنده در ساقه ذرت باشد که در اثر فشار تراکم رها شده و موجب چسبندگی بهتر ذرات به هم می شود. همچنین، ترکیبات فیبری و خصوصا میزان لیگنین و سلولز موجود در ساختار کلش ذرت می‌تواند موثر باشد. محققان طی تحقیقاتی بیان کردند که میزان تجزیه‌پذیری ساقه نیشکر حتی اگر له شده باشد نیز خیلی پایین بوده و مشاهده شد که حتی بعد از ۱۲۰ روز نیز فیبرها استحکام خود را حفظ کرده بودند (۱۶). ساختمان باگاس نیشکر و کاه برنج از مواد فیبری و لیگنوسلولزی ساخته شده است که تخریب و تجزیه‌پذیری بیولوژیکی آن کند و دشوار است. ترکیبات فیبری حدود ۶۹ درصد از ساختار کاه (۲۵) و ۸۰ درصد از باگاس (۴ و ۱۸) را شامل می‌شوند.

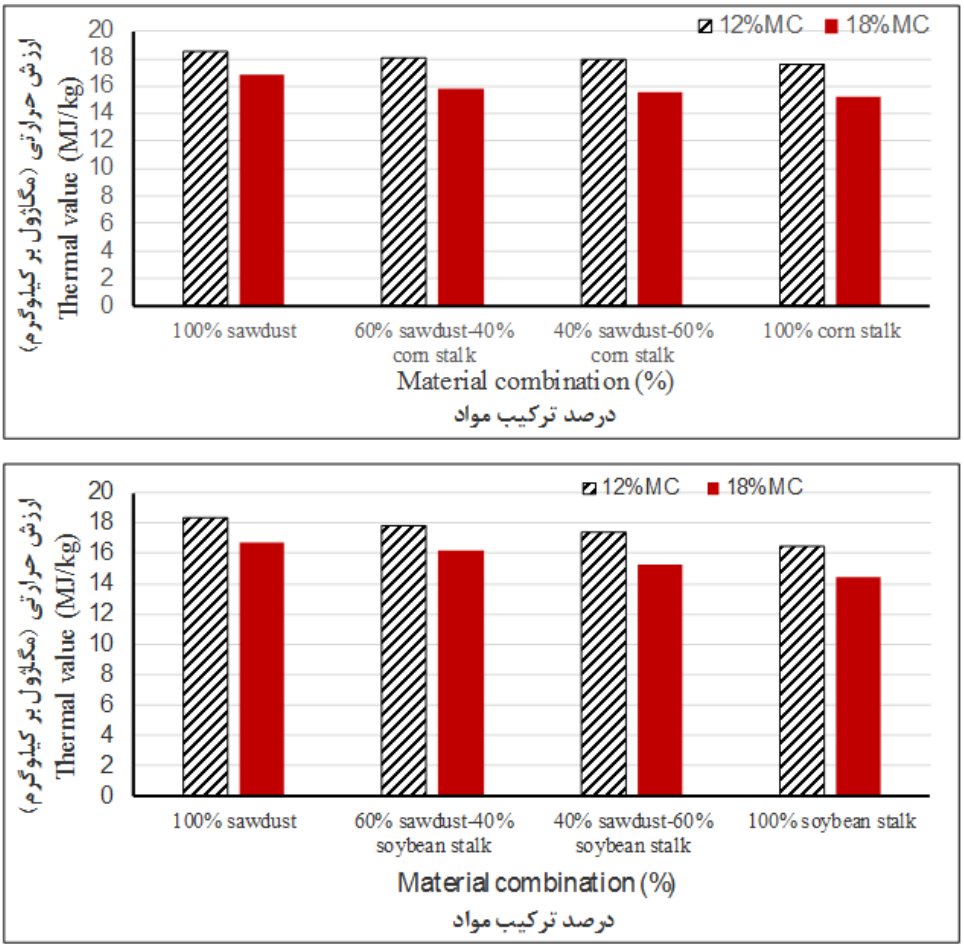


شکل(٤) پایداری پلت در ترکیب خاک اره چوب صنوبر با ذرت و سویا در دو سطح رطوبت

Figure(4) Pellet durability in combination of sawdust with soybean and corn stalks at two MC

ارزش حرارتی

نمودارهای شکل ۵ ارزش حرارتی پلت‌ها را نشان می‌دهد. مقایسه میانگین ها نشان داد که اختلاف معنی داری بین ارزش حرارتی پلت ها با تغییر رطوبت وجود دارد. مقادیر ارزش حرارتی پلت‌ها در محدوده ۱۴/۳۷ الی ۱۸/۵۲ مگاژول بر کیلوگرم قرار دارد که مقدار حداقل برای پلت ساخته شده از ۱۰۰٪ ساقه سویا در رطوبت ۱۸٪ و مقدار حداکثر از پلت ساخته شده از ۱۰۰٪ خاک اره چوب صنوبر و در رطوبت ۱۲٪ بدست آمد. بنابراین رساندن رطوبت مواد به مقدار حداقل برای پلت سازی مناسب تر است. در حالت کلی با افزایش درصد ساقه محصول در ترکیب مواد پلت، ارزش حرارتی کاهش یافت. ارزش حرارتی بیش‌تر، نشانه کیفت بهتر پلت‌های سوختی است. مقادیر بالاتر ارزش حرارتی به‌دلیل بالا بودن درصد کربن و لیگنین و سلولز می‌باشد. 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 افزایش می یابد و ارزش حرارتی با محتوای لیگنین ارتباط مستقیم دارد. محتوای لیگنین خاک اره بیشتر است که همین امر می‌تواند یکی از دلایل بالا بودن ارزش حرارتی مخلوط-های با میزان بالاتر خاک اره باشد. نتایج بدست آمده با نتایج پژوهشهای (۱۴ و ۲۲) مطابقت دارد.



شکل(۵) ارزش حرارتی پلت در ترکیب خاک اره چوب صنوبر با ذرت و سویا در دو سطح رطوبت

Figure(5) Pellet thermal value in combination of sawdust with soybean and corn stalks at two MC

نتیجه گیری

نوع پسماند زیستی و درصد رطوبت بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پلت‌های تولید شده تاثیر می‌گذارد. در حالت کلی، ترکیب خاک اره چوب صنوبر با ساقه ذرت و سویا موجب بهبود خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت شد. نسبت هانسر و تراکم پذیری در پلت های ترکیبی که دارای درصد خاک اره بیشتری هستند و نیز در ترکیب خاک اره با ساقه ذرت در محدوده استاندارد قرار گرفته اند. همچنین، در ترکیباتی که دارای نسبت خاک اره چوب صنوبر بیشتر و رطوبت کمتر هستند، فاکتورهای چگالی و مقاومت پلت افزایش می یابد. بیشترین و کمترین میزان ارزش حرارتی به ترتیب در نسبت بالاتر خاک اره و نسبت بالاتر ذرت به دست آمد. بنابراین ساخت پلت از ضایعات محصولات باغی و کشاورزی که دارای چگالی و استحکام مناسب و ارزش حرارتی بالایی هستند امکان پذیر است. در این تحقیق، مناسب‌ترین ترکیب برای ساخت پلت، ۶۰٪ خاک اره صنوبر-۴۰٪ ساقه ذرت در رطوبت ۱۲٪ می‌باشد.

References

1. Azargohar, R., Nanda, S., Kang, K., Bond, T., Karunakaran, C., Dalai, A.K., and 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.

2. Carone, M.T., Pantaleo, A., and Pellerano, A. 2011. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of Olea europaea L. Biomass and Bioenergy, 35(1): 402-410.

3. Demirbas, A. 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. Progress in Energy and Combustion Science, 30(2): 219-230.

4. Farsi, M., and Janpour, J. 2013. Cultivation and improvement of oyster mushrooms. Mashhad Jihade-daneshgahi publications, Mashhad, Iran (in Persian).

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

6. Garsia, R., Gil, M.V., Rubiera, F., and Perida, C. 2019. Palletization of wood and alternative biomass blends for producing industrial quality pellets. Fuel, 251: 739-753.

7. Garcia-Maraver, A., Rodriguez, M.L., Serrano-Bernardo, F., Diaz, L.F., and Zamorano, M. 2015. Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. Fuel Processing Technology, 129: 1-7.

8. Harun, N.Y. and Afzal, M.T. 2016. Effect of particle size on mechanical properties of pellets made from biomass blends. Procedia Engineering, 148: 93-99.

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

10. Kaliyan, N., and 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.

11. Liu, Zh., Quek, A., and Balasubramanian, R. 2014. Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residue and their corresponding hydro chars. Applied Energy, 113: 1315-1322.

12. Mishra, R.K. and Mohanty, K. 2018. Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermos-gravimetric analysis. Bioresource Technology, 251: 63-74.

13. Mišljenović, N., Mosbye, J., Schüller, R.B., Lekang, O.I., and 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.

14. Niedziółka, I., Szpryngiel, M., Kachel-Jakubowska, M., Kraszkiewicz, A., Zawiślak, K., Sobczak, P., and Nadulski, R. 2015. Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. Renewable Energy, 76: 312-317.

15. Nielsen, N.P.K., Gardner, D.J., Poulsen, T., and 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.

16. Pound, B., Done, F., and Preston, T.R. 1981. Biogas production from mixtures of cattle slurry and pressed sugar cane stalk, with and without urea. Tropical Animal Production. 6:1-8.

17. Pradhan, P., Arora, A., and Mahajani, S. M. 2018. Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. Energy for Sustainable Development, 43: 1-14.

18. Rezende, C.A., de Lima, M.A., Maziero, P., deAzevedo, E.R., Garcia, W., Polikarpov, I. 2011. Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility. Biotechnology Biofuels, 4: 54-62.

19. Said, N., Abdel-daiem, M.M., Garcia-Maraver, A., and Zamorano, M. 2015. Influence of densification parameters on quality properties for rice straw pellets. Fuel Processing Technology, 138: 56-65.

20. Shen, D.K., Gu, S., Luo, K.H., Bridgwater, A.V., and Fang, M.X. 2009. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. Fuel, 88(6): 1024-1030.

21. Singh, A., Singh, N., and Bishnoi, N.R. 2010. Enzymatic hydrolysis of chemically pretreated rice straw by two indigenous fungal strains: a comparative study. Journal of Scientific and Industrial Research, 69: 232-237.

22. Stasiak, M., Molenda, M., Bańda, M., Wiącek, J., Parafiniuk, P., and Gondek, E. 2017. Mechanical and combustion properties of sawdust-straw pellets blended in different proportions. Fuel Processing Technology, 156: 366-375.

23. Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A.R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., and 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.

24. Tabatabaekoloor, R., Motevali, A., Hadipour, R., and 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 with English abstract)

25. Taherzadeh, M.J., and Karimi, K. 2008. Pretreatment of lignocellulose waste to improve ethanol and biogas production: A Review. International Journal of Molecular Sciences, 8: 234-244.

26. Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P.D., Hartmann, H., and Böhm, T. 2006. Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. Biomass and Bioenergy, 30: 964-972.

27. Tsuchiya, Y., and Yoshida, T. 2017. Pelletization of brown coal and rice bran in Indonesia. Fuel Processing Technology, 156: 68-71.