Research Article

Agricultural Engineering., 47(4) (2024) 551-564 ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2024.48055.1744 ISSN (E): 2588-5944

Investigating the factors affecting density, strength and durability of pellets made from olive processing plant waste

R. Tabatabaeekoloor[1*] and Sh. Ghavami Jolandan[2]

1. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
2. Assistant professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Received: 28 September 2024 Accepted: 15 November 2024 *Corresponding Author: r.tabatabaei@sanru.ac.ir

Abstract

Introduction: Fuel pellets are one of the uses of biomass, which are made from agricultural waste, plant residue, and animal excrement. They produce more energy per unit volume. Various factors are effective in the pelleting process. Having information about them helps to optimize the pelleting process and to understand the compression mechanism and the design of compacting equipment.

Materials and Methods: Olive pomace raw material for making pellets was obtained from an olive processing factory in Rudbar city in Gilan province. The prepared materials were transferred to the laboratory in the necessary amount in nylon bags and dried in the oven at 105 degrees Celsius for 24 hours. The dried samples were powdered by a laboratory grinder and then passed through sieves in the range of 0.6-1.5 mm and used to make pellets. Before making pellets, the initial moisture content of the samples was obtained using the drying method. First, pre-tests were conducted to make pellets and the moldability and strength of the samples were checked. A palletization mechanism was used to compress the pellets. 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 was done by a piston with a quasi-static speed of 6 mm/min. In this research, the effect of particle size (600-900, 900-1200 and 1200-1500 µm), compaction pressure (75, 150 and 225 MPa), and temperature (50, 70 and 90 ℃) on the density, strength and durability of the pellets were investigated.

Results and Discussion: The results indicated that the main effects of all three mentioned treatments on the strength, density and durability of the pellets were significant. Also, the mutual effects of some treatments were also significant on these characteristics. The interaction effect of particle size and compaction pressure on pellets compressive strength was significant at 5% level. With the increase in particle size, the pellets strength increased first, and then with the further increase in particle size, the pellets strength decreased slightly. On the other hand, with the increase in compression pressure, the pellets resistance increased. The pellets density is an important factor for storage and transportation as well as combustion efficiency. The mutual effect of compression pressure and particle size on the pellets density was significant. Changes in the pellets density were obtained in the range of 1.015 to 1.350 g/cm^3. The usual and recommended density for pellets made from agricultural and forest residues should be more than 0.8 g/cm^3. The interaction effect of compaction pressure and temperature on the pellets durability was significant. The range of durability changes for the pellets was between 81 and 95 %. Increasing compaction pressure significantly improved the stability of the

© 2024 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.

pellets, which indicates the role of compaction in bonding between particles and creating bridges for greater particle strength. The highest pellets strength was obtained in the combination of particle size of 900-1200 μm, temperature of 90 °C and compaction pressure of 225 MPa. The highest density was obtained at a particle size of 600-900 μm and a compression pressure of 225 MPa and the best stability at a compression pressure of 150 MPa and a temperature of 90 °C. In general, the physical and mechanical properties of the pellets were affected by all three factors: particle size, temperature and compaction pressure.

Conclusion: The results of this research showed that all three factors of particle size, compaction pressure and temperature have a significant effect on the physical and mechanical properties of the pellets including density, strength and durability. Choosing the correct particle size plays an important role in making the pellets stronger. Also, temperature of the die during pelleting is very important in the bonding of the pellets particles because at the correct temperature, the bonding between the bridges strengthens the connection of the particles and as a result increases the strength and durability of the pellets. In general, the results of the research showed that to make pellets from olive processing factory waste, a suitable combination of particle size, compaction pressure and die temperature parameters is needed to make pellets with high strength and durability.

Keywords: Olive biomass, Density, Pressure strength, Durability, Pellet.

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۷ شماره۴، زمستان ۱۴۰۳

مقاله پژوهشی

بررسی عوامل موثر بر چگالی، مقاومت و پایداری پلت‌های ساخته شده از ضایعات کارخانه فرآوری زیتون

رضا طباطبائی کلور[1*] و شعبان قوامی جولندان[2]

۱- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷

پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

کلمات کلیدی:

پلت،

چگالی،

مقاومت فشاری،

پایداری،

فرآوری زیتون

* عهده دار مکاتبات

Email: r.tabatabaei@sanru.ac.ir

چکیده

پلت‌های سوختی یکی از موارد استفاده از انرژی زیست‌توده‌ها می‌باشند که از پسماند کشاورزی، بقایای گیاهان و فضولات حیوانات ساخته شده و سبب تولید انرژی بیشتر در واحد حجم می‌شوند. عوامل مختلفی در فرآیند پلت سازی موثر هستند که شناخت آنها به بهینه سازی فرایند پلت سازی و شناخت مکانیزم فشردن و طراحی تجهیزات متراکم کننده کمک می کند. در این پژوهش، از یک دستگاه تک پلت ساز برای ساخت پلت هایی از پسماند کارخانه روغن کشی زیتون استفاده شد و تاثیر تیمارهای اندازه ذرات (۶۰۰-۹۰۰، ۹۰۰-۱۲۰۰ و ۱۲۰۰-۱۵۰۰ میکرومتر)، فشار تراکم (۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ مگاپاسکال) و دما (۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه سلسیوس) بر چگالی، مقاومت و پایداری پلت بررسی شد. نتایج نشان داد که اثرات اصلی هر سه تیمار مذکور بر مقاومت، چگالی و پایداری پلت معنی دار است. همچنین اثرات متقابل برخی تیمارها نیز بر این خصوصیات معنی دار است. بیشترین مقاومت پلت در ترکیب اندازه ذرات ۹۰۰-۱۲۰۰ میکرومتر، دمای ۹۰ درجه سلسیوس و فشار تراکم ۲۲۵ مگاپاسکال بدست آمد. بیشترین چگالی در اندازه ذرات ۶۰۰-۹۰۰ و فشار تراکم ۲۲۵ مگاپاسکال و بهترین پایداری در فشار تراکم ۱۵۰ مگاپاسکال و دمای ۹۰ درجه سلسیوس بدست آمد. بطور کلی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پلت تحت تاثیر هر سه عامل اندازه ذرات، دما و فشار تراکم قرار گرفت.

مقدمه

ایران نهمین تولید کننده زیتون در جهان است و سالانه حدود ۲۵۰ هزار تن زیتون در کشور تولید می‌شود (۴). بخش قابل توجهی از زیتون تولیدی (حدود ۷۰٪) به صورت تازه‌خوری و کنسروی مصرف می‌شود و حدود ۳۰ درصد آن در صنایع روغن‌کشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدیریت پسماندهای کارخانجات روغن‌کشی زیتون و تبدیل آن به محصول با ارزش افزوده یکی از چالش‌های اصلی این صنعت است. از آنجا که بخش اعظمی از پسماند صنایع روغن‌کشی را هسته و تفاله زیتون تشکیل می‌دهد لذا قابلیت تبدیل به پلت‌های سوختی و همچنین پلت‌های تغذیه دام و طیور را دارد. تولید پلت از پسماندهای کشاورزی و دامی روش بسیار مناسبی برای استفاده بهینه و جابجایی و حمل و نقل موثر آنها می‌باشد. تراکم پذیری و دوام پلت-هایی که تحت فشار ساخته می‌شوند به عوامل متعددی از جمله ساختمان و ابعاد ماده، فشار تراکم، دمای تبدیل،

رطوبت، حجم اولیه ماده و سرعت بارگذاری بستگی دارد. شناخت این عوامل جهت بهینه سازی فرایند پلت‌سازی و شناخت مکانیزم فشاری و طراحی سیستم‌های تولید پلت اهمیت زیادی دارد. ساختار پلت‌ها حاوی نوعی مواد افزودنی به منظور افزایش استحکام ساختمان آنها می‌باشد، شکل هندسی این سوخت‌های جامد معمولا به فرم استوانه، با قطر ۶ تا ۲۰ میلی متر و طول ۲۰ تا۴۰ میلی‌متر است. در تحقیقی از ترکیب خاک اره چوب کاج و دیگر بقایای زیستی پلت‌های در مقیاس صنعتی تولید کردند. پلت‌های تولید شده در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد 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(۵). در تحقیقی دیگر خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت‌های ساخته شده از ترکیب خاک اره صنوبر و پسماندهای ذرت و سویا مورد ارزیابی قرار گرفت(۱). در پژوهشی به منظور بررسی تراکم ظاهری پلت ساخته شده از چوب بامبو، درصدهای گوناگونی از ذرات کاج با چوب بامبو ترکیب شده و کیفیت پلت‌های نهایی ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت، که مشخص شد افزودن ذرات کاج به بامبو یک راه مؤثر برای بهبود تراکم ظاهری پلت‌ها می‌باشد (۱۴). خصوصیات 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(۱۲ و ۱۵ میلی‌متر) 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 (۱۹). 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 و۵۰٪ 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 آبگیری و خشک‌کردن، هزینه‌های تولید را کاهش داد (۲۹). بررسی تاثیر دما، فشار تراکم و نسبت اختلاط سبوس برنج و ملاس نیشکر بر خصوصیات مکانیکی پلت های 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 (۲۷). پارامترهای مکانیکی و احتراقی پلت‌های ساخته شده از خاک اره چوب کاج با کاه گندم و کلزا وابسته به نسبت ترکیب آنها بوده و تراکم پلت حاصل با افزایش درصد کاه در مخلوط کاهش می‌یابد. بعلاوه، افزایش فشار متراکم-سازی 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 (۲۴). 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 (۱۶). در تحقیقی با استفاده از پیوند دهنده‌های طبیعی لیگنوسولفات، آرد و نشاسته گندم، پلت-هایی از ساقه علوفه در دو رطوبت ۲ و ۱۵ درصد تولید شد. اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی پلت‌ها نشان داد که مقاوم ترین پلت از لحاظ سختی و پایداری در رطوبت ۲ درصد و با استفاده از پیوند دهنده آرد گندم بدست آمد (۲۶).

پلت‌هایی با استفاده از ساقه ذرت با چگالی $g.cm^{-3}$ ۰/۷۴ و مقاومت فشاری ۸۸-۹۲ کیلو نیوتن ساخته شد. افزایش فشار تراکم موجب بالا رفتن پایداری پلت و ارزش حرارتی آن

گردید (۳۱). با استفاده از فرایند پیرولیز در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس ساقه‌های پنبه به شکل پلت تولید شد. نتایج نشان داد که فرایند پیرولیز موجب بهبود کیفیت پلت گردید. میزان کربن زغال زیستی از ۴۹ درصد به ۶۷ درصد افزایش یافت. مواد سلولوزی کریستالی عامل افزایش مقاومت پلت‌ها می-باشد. ارزش حرارتی پلت نیز با وجود لیگنین بیشتر افزایش یافت (۱۱). در پژوهشی از کاه برنج به منظور تولید پلت استفاده شد، پارامترهای ارزش حرارتی و میزان رطوبت مورد بررسی قرار گرفت که مناسب‌ترین رطوبت برای ساخت پلت از کاه برنج بین ۱۳٪ الی ۲۰٪ گزارش شد (۷). محققین دریافتند که کمترین مصرف انرژی مخصوص برای تولید بیشترین تراکم پلت‌ها در فشار حدود ۶۳ مگاپاسکال برای جو و گندم و فشار حدود ۹۴ مگاپاسکال برای کلزا و جو دوسر می‌باشد که این نتایج از بررسی فاکتورهای انرژی مخصوص و چگالی کلش کلزا، جو، جودوسر و گندم در رطوبت ۱۰٪ بدست آمد (۲). 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 سانتی‌گراد بود که میزان پایداری آن ۹۹/۳٪ اندازه‌گیری شد (۲۲). اختلاط زیست توده‌های کشاورزی با مواد چوبی جنگلی موجب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پلت‌ها می شود. پلت‌های 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 (۶). در تحقیقی دیگر 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 فشرده سازی(۷۵، ۱۵۰، ۲۲۵ و ۳۰۰ مگاپاسکال) در سه درجه حرارت(۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه سانتیگراد) تولید شدند. نتایج نشان داد که افزودن روغن به میزان قابل توجهی سبب افزایش انرژی در گلوله‌های چوبی می‌شود (۱۵). تولید پلت‌ها از مخلوط کاه گندم، کلزا و ذرت (مخلوط کاه گندم_کلزا، گندم_ذرت و ذرت_کلزا با ترکیب ۵۰ درصد 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 متغییر است. کمترین چگالی توده برای پلت‌های کاه گندم (۳۸۶-۴۲۰ Kg/m^3) و بالاترین(۵۶۱ Kg/m^3 و ۷۵۲) برای پلت‌های ذرت ثبت شد. پایین‌ترین میزان مقاومت مکانیکی پلت‌ها برای کلزا (۹۶/۸ – ۹۵/۴ درصد) بود در حالی که بیشترین میزان برای پلت‌هایی با مخلوط کاه گندم و ذرت (۹۸/۹ – ۹۶/۸ درصد) بود (۱۸). 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 تا ۲/۸ میلی‌متر 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 مگاپاسکال فقط سبب افزایش جزئی تراکم پلت می‌شود (۲۵). حجم عظیم تولید پسماندهای کشاورزی و جنگلی در کشور امکان تحقق سرمایه‌گذاری در زمینه تولید پلت‌ها را فراهم می‌کند. با وجود اینکه پلت سازهای تکی نمی‌توانند همه جنبه‌های فرایند پلت‌سازی در مقیاس بزرگ یا تجاری را شبیه سازی کنند اما استفاده از پلت سازهای مقیاس بزرگ برای بررسی اثرات پارامترهای مختلف بر روی خصوصیات و کیفیت پلت ها نیاز به ماده اولیه زیاد دارد و زمان بر است. لذا اکثر محققان ترجیح می‌دهند از پلت سازهای تکی برای مطالعه و ارزیابی خصوصیات پلت سازی زیست توده‌های جدید استفاده کنند. بررسی منابع نشان داد که در مورد خصوصیات پلت‌های حاصل از پسماندهای زیتون هیچ اطلاعاتی گزارش نشده است. در این راستا، در تحقیق حاضر اثرات نسبت ترکیب مواد، دمای قالب و فشار تراکم بر خصوصیات مکانیکی پلت

های تولید شده از پسماندهای کارخانجات فرآوری زیتون مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روشها

آماده سازی نمونه‌ها

برای ساخت پلت مواد اولیه تفاله زیتون از یک کارخانه فرآوری زیتون در شهرستان رودبار تهیه شد. مواد تهیه شده به مقدار لازم درون کیسه‌های نایلونی به آزمایشگاه منتقل شد و در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد و به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. نمونه‌های خشک شده توسط خردکن آزمایشگاهی پودر شده و سپس با عبور از الک‌هایی در محدوده ۰/۶-۱/۵ میلی‌متر برای ساخت پلت مورد استفاده قرار گرفت. قبل از ساخت پلت ابتدا رطوبت اولیه نمونه‌ها با استفاده از روش خشک کردن بدست آمد (۶). ابتدا پیش آزمون‌هایی برای ساخت پلت انجام گرفت و قالب پذیری و استحکام نمونه‌ها بررسی شد.

پلت سازی

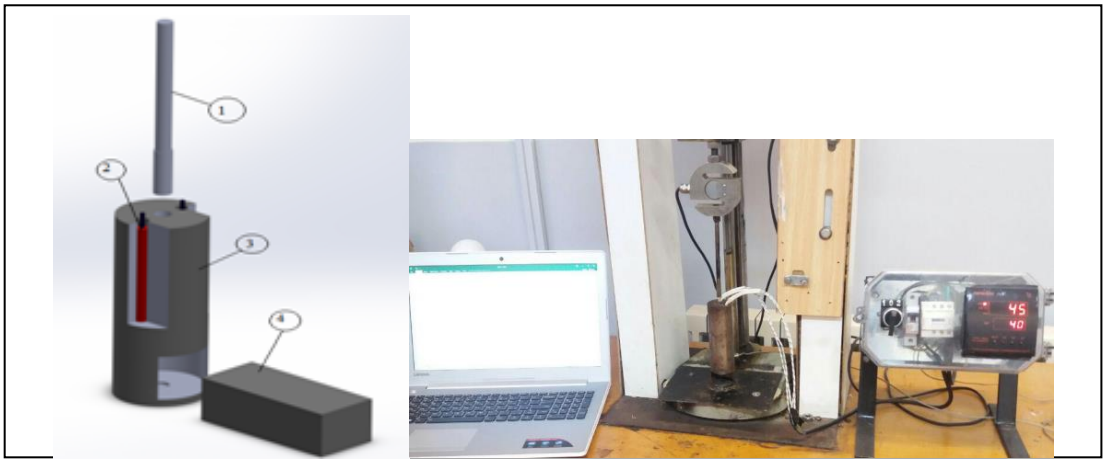
برای ساخت پلت از یک پیستون به قطر ۸ میلی‌متر و یک قالب فولادی با قطر داخلی سیلندر ۸/۰۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر و با انتهای مسدود شده توسط یک نگهدارنده متحرک استفاده شد (شکل ۱). پلت ساز مورد استفاده در این تحقیق بر اساس طرح پیشنهادی (۱۷) و با اعمال تغییراتی ساخته شد. از دو المنت خطی به طول ۱۰۰ میلی‌متر در دو طرف سوراخ قالب استفاده شد و یک سیستم کنترل دمای ترموکوپلی برای تنظیم دمای مورد نظر قالب بکار گرفته شد.

روش آزمون

مطابق شکل ۱ از یک دستگاه تست کشش-فشار برای متراکم سازی مواد درون قالب استفاده شد. یک انتهای پیستون به فک متحرک دستگاه متصل شد. ابتدا قالب پلت تا دمای مورد نظر گرم و پس از رسیدن به تعادل دمایی هر نمونه به وزن اولیه ۱/۵ گرم درون قالب ریخته شد و توسط پیستون با سرعت ۶ میلی‌متر در دقیقه تا فشار مورد نظر متراکم شد (۱۳). 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. پلت‌ها برای انجام آزمایش‌های بعدی درون ظروف شیشه‌ای دربسته نگهداری شدند.

تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری به صورت آزمایش فاکتوریل با طرح پایه کاملا تصادفی و در سه تکرار انجام گرفت. متغیرهای مستقل شامل سه سطح فشرده سازی (۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ مگاپاسگال)، دمای قالب (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد) و اندازه ذرات (۹۰۰-۶۰۰، ۱۲۰۰-۹۰۰ و ۱۵۰۰-۱۲۰۰ میکرومتر) و متغیرهای وابسته شامل چگالی، مقاومت فشاری و پایداری می‌باشند. داده‌ها با استفاده از نرم افزار spss تحلیل و نمودارها با استفاده از اکسل رسم شدند.



(ب) (الف)

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

Figure (1) The pelletizing mechanism; (1: compression piston, 2: two thermo-elements, 3: cylinder block, 4: holder base)

چگالی پلت

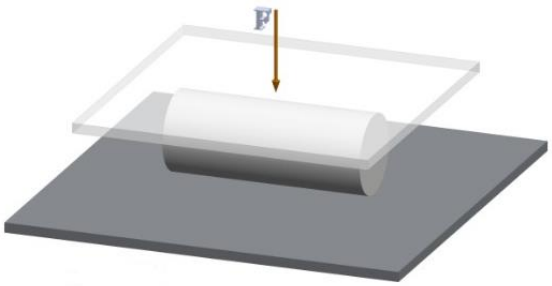
چگالی پلت با تقسیم جرم بر حجم آن محاسبه شد. جرم توسط یک ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱± گرم حجم از روی قطر و طول پلت با فرض شکل کامل استوانه‌ای به دست آمد. طول و قطر پلت نیز توسط یک کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱± میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

مقاومت پلت

شکل ۲ نحوه اعمال نیرو بر پلت را در حالت بارگذاری نشان می‌دهد. مقاومت فشاری پلت‌ها در راستای شعاعی با روش پیشنهادی (۱۸) اندازه‌گیری شد. بعد از ساخته شدن پلت‌ها به مدت دو ساعت درون یک شیشه دربسته نگهداری شدند و سپس نمونه‌ها 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 شعاعی از تقسیم حداکثر نیروی فشاری بر طول نمونه به دست آمد. هر داده از متوسط سه اندازه گیری به دست آمد. 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 (۲۸).

پایداری پلت

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 که بر اساس طرح Ligno ساخته شده (شکل۳)، صورت پذیرفت. پلت‌ها در معرض شوک‌های ناشی از جریان هوا و دیواره داخلی دستگاه قرار می‌گیرد. دستگاه تست پایداری به فرم هرم چهارضلعی می-باشد 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.



شکل(۲) نمایش روش بارگذاری برای تعیین مقاومت پلت
Figure (2) Loading method for determining the pellet strength

شکل (۳) دستگاه آزمون پایداری
Figure (3) Durability test device

نتایج و بحث

در جدول ۱ مشاهده می‌شود که اثر متقابل اندازه ذرات و فشار تراکم بر مقاومت فشاری پلت در سطح ۵٪ معنی‌دار است. مطابق شکل ۴ با افزایش اندازه ذرات ابتدا مقاومت پلت بیشتر شد و سپس با افزایش بیشتر اندازه ذرات، مقاومت پلت اندکی کاهش پیدا کرد. از طرفی، با افزایش فشار تراکم مقاومت پلت افزایش پیدا کرد. البته تفاوت معنی داری بین بارهای ۱۵۰ و ۲۲۵ مگاپاسگال وجود نداشت. بیشترین مقاومت فشاری پلت در فشار تراکم ۱۵۰ مگاپاسگال و اندازه ذرات ۹۰۰-۱۲۰۰ میکرومتر بدست آمد. این تغییرات در مقاومت پلت نشان می‌دهد که برای ایجاد استحکام در پلت، فشار تراکم و اندازه ذرات تاثیر بسزایی در استحکام پلت دارد. در اندازه ذرات کوچکتر مقدار نیروی درونی کمتری برای استحکام بخشیدن پیوند بین ذرات پلت ایجاد شده و در نتیجه مقاومت کمتری در مقابل نیروی فشاری دارد. در اندازه ذرات بزرگتر یک فیلم

نازک در اطراف ذرات پیوند تشکیل می‌شود که موجب ایجاد حالت روان کنندگی بین ذرات شده و در نتیجه ذرات روی هم می‌لغزند. اندازه ذرات ریز در محدوده ۶۰۰-۹۰۰ میکرومتر و درشت در محدوده ۱۲۰۰-۱۵۰۰ میکرومتر موجب می‌شود که پیوند بین ذرات برای تشکیل پل‌های ارتباطی و ایجاد پیوند محکم بین ذرات به خوبی شکل نگیرد و استحکام لازم ایجاد نشود. همچنین، وجود روغن زیتون در تفاله نیز نقش پیوند دهنده طبیعی داشته و می‌تواند در میزان مناسب، عامل چسبندگی ذرات به هم باشد.

در تحقیقی (۳۰) نشان دادند که چنانچه ماده پیوند دهنده از یک حد مطلوب بیشتر باشد، استحکام پلت کاهش می‌یابد. اعمال فشار تراکم بیشتر موجب گسترده شدن سطح تماس بین ذرات مجاور هم می‌شود و در نتیجه پلت‌ها و نیروهای جاذبه قوی تری بین ذرات شکل می‌گیرد و موجب افزایش مقاومت پلت‌های زیست توده‌ای می‌شود (۱۴). برای افزایش استحکام پلت‌های ساخته شده از پسماندهای جنگلی می‌توان از پیوند دهنده‌های طبیعی استفاده کرد (۸). تنش تسلیم پلت در مقابل فشار بستگی به نوع ماده پیوند دهنده و میزان چسبندگی ذرات به همدیگر دارد (۶). همچنین، نتایج این مطالعه با نتایج (۱۵) و (۲۱) مطابقت دارد که پیوند ضعیف بین ذرات را عامل کاهش مقاومت پلت‌ها بیان کردند.

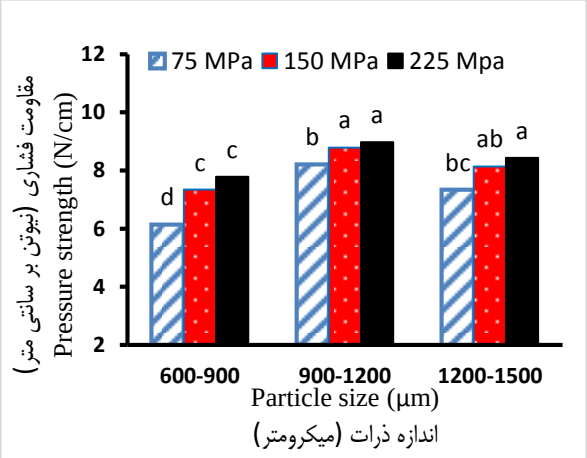
جدول (۱) نتایج تجزیه واریانس مربوط به چگالی، مقاومت فشاری و پایداری پلت

Table (1) Analysis of variance results related to density, pressure strength and durability of the pellets

متغیر Variable	df	میانگین مربعات Mean of squares		
		چگالی Density (g/cm^3)	مقاومت فشاری Pressure strength (N/cm)	پایداری Durability (%)
اندازه ذرات (A) Particle size (A)	2	753.67**	86842.1*	79.34**
فشار تراکم (B) Compression pressure (B)	2	425.24 *	9805.64 **	28.67 *
دمای قالب (C) Die temperature (C)	2	415.11**	8336.53 *	45.93**
A × B	4	87.31**	7992.25 *	1.86 ns
A × C	4	188.42 *	9688.71 *	2.42 ns
B × C	4	17.31 ns	373.55 ns	1.88 *
A × B × C	8	27.61 ns	7634.31 *	2.12 ns
خطا	52	12.16	312.74	1.30 ns

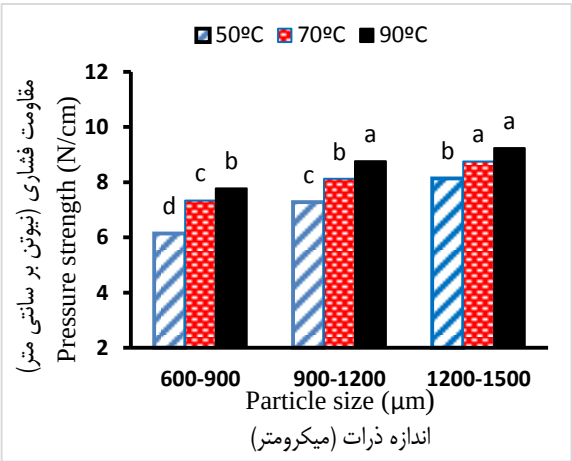
**، * و ns به ترتیب معنی دار در سطح ۱٪، ۵٪ و غیر معنی دار در سطح ۵٪

**, * and ns significant at 1%, 5% level and non-significant



شکل(٤) اثر متقابل اندازه ذرات و فشار تراکم بر مقاومت پلت

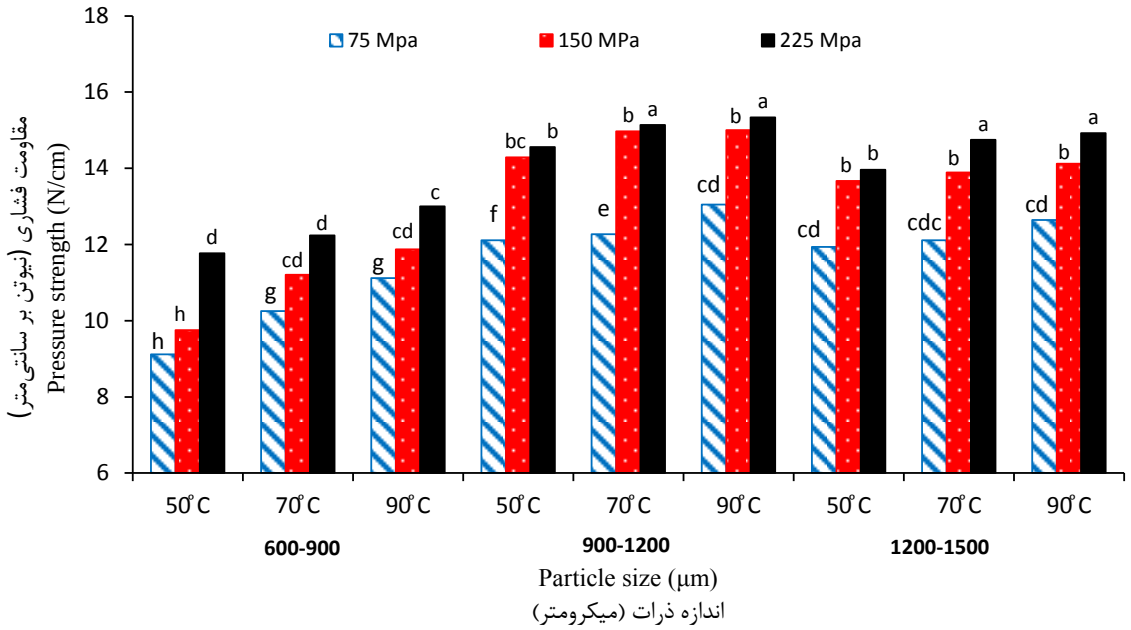
Figure (4) Interaction effect of particle size and compression pressure on the pellets strength



شکل(٥) اثر متقابل اندازه ذرات و دما بر مقاومت پلت

Figure (5) Interaction effect of particle size and temperature on the pellets strength

با توجه به جدول ۱ اثر متقابل دما و اندازه ذرات در طی فرآیند متراکم سازی بر روی استحکام پلت معنی‌دار است. شکل ۵ اثر متقابل دما و اندازه ذرات را بر مقاومت پلت نشان می‌دهد. با افزایش دما و نیز اندازه ذرات مقدار مقاومت پلت افزایش یافت. دمای قالب موجب می‌شود که پروتئین موجود در ماده زیست‌توده به حالت خمیری درآید و بعنوان یک پیوند دهنده عمل کند. همچنین، لیگنین موجود در ماده زیست‌توده نرم شده و در نقطه تماس ذرات مجاور هم از یک ذره به ذره دیگر نفوذ کرده و تشکیل پل جامد می‌دهد. در تحقیقی (۱۷) دمای قالب پلت را بعنوان مهمترین عامل موثر بر مقاومت فشاری پلت عنوان کردند. کیفیت پلت‌ها بستگی به خصوصیات فیزیکی مواد تشکیل دهنده آنها و نیز کنترل شرایط در مرحله پلت سازی از جمله دما و فشار تراکم دارد (۳). لیگنین و پروتئین بعنوان پیوند دهنده‌های طبیعی عمل می‌کنند (۹). 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 می‌کند (۲۱). مقایسه میانگین-های اثر متقابل اندازه ذرات، دما و فشار تراکم بر مقاومت پلت در شکل ۶ نشان داده شده است. افزایش فشار تراکم و دما موجب افزایش مقاومت محوری پلت گردید. البته لازم به ذکر است که در فشار تراکم ۱۵۰ و ۲۲۵ مگاپاسکال و دمای ۷۰ و ۹۰ درجه سلسیوس تفاوت معنی‌داری در مقاومت پلت وجود نداشت با این وجود بیشترین مقاومت در اندازه ذرات ۹۰۰-۱۲۰۰ و دمای ۹۰ درجه سلسیوس و فشار تراکم ۲۲۵ مگاپاسکال بدست آمد. نتایج بدست آمده توسط (۲۵)، نشان داد که دما بر کیفیت پلت تاثیر گذار است بطوریکه استحکام مکانیکی پلت‌های ساخته شده در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد بیشتر از پلت‌های ساخته شده در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد بود. پلت‌هایی که در دمای بالاتر ساخته می‌شوند بدلیل نرم‌تر شدن لیگنین موجود در پیوند دهنده، بعد از سرد شدن در بین ذرات تشکیل پل‌های ارتباطی جامد را داده و موجب چسبندگی بیشتر و در نتیجه استحکام آنها می‌شوند. افزایش مقاومت مکانیکی با دما برای پلت‌های ساخته شده از صنوبر، چمن، کاج، تفاله زیتون، راش و کلش گندم گزارش شده است (۲۰).



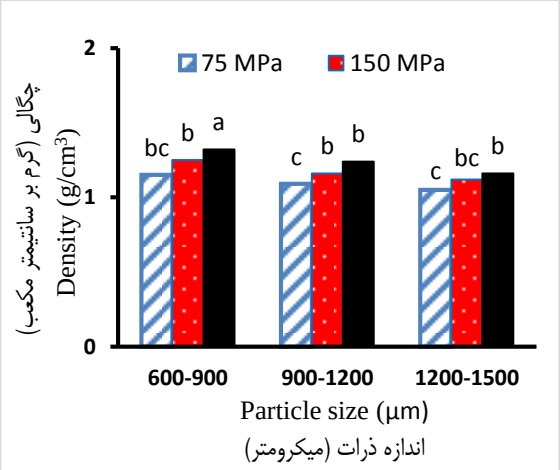
شکل(٦) اثر متقابل اندازه ذرات، دما و فشار تراکم بر مقاومت پلت

Figure (6) Interaction effect of particle size, temperature and compression pressure on the pellets durability

چگالی پلت

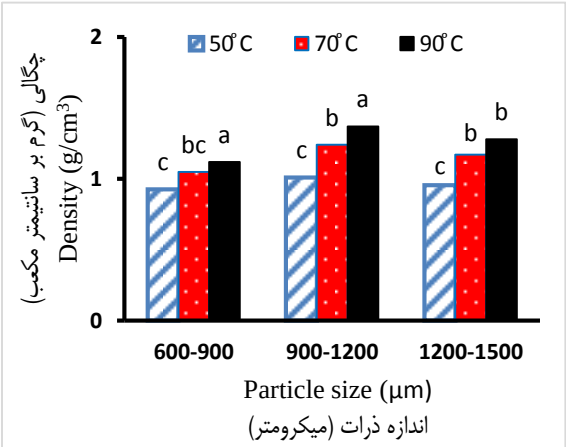
چگالی پلت فاکتور مهمی برای ذخیره سازی و حمل و نقل و همچنین بازده احتراقی محسوب می‌شود. تاثیر متقابل فشار تراکم و اندازه ذرات بر چگالی پلت در شکل ۷ آورده شده است. تغییرات چگالی پلت در محدوده ۱/۰۱۵ تا۱/۳۵۰ گرم بر سانتیمتر مکعب بدست آمد. چگالی معمول و توصیه شده برای پلت‌های ساخته شده از پسماندهای کشاورزی و جنگلی باید بیشتر از ۰/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب باشد (۲۲). برخی محققان میانگین چگالی پلت‌های ساخته شده از زیست توده‌ها را بین ۰/۸ الی ۱/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب گزارش کرده‌اند (۲۱، ۱۰، ۱۳ و ۱۲). چگالی پلت با افزایش فشار تراکم از ۷۵ مگاپاسکال به ۲۲۵ مگاپاسکال افزایش پیدا کرد اما با افزایش اندازه ذرات کاهش پیدا کرد. 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 می‌دهند و در نتیجه سطح تماس برای پیوند بین آنها افزایش می‌یابد. در مرحله پایانی، تغییرات اندکی در چگالی رخ می‌دهد چرا که مواد به چگالی واقعی خود نزدیک شده و حفره‌های هوایی بطور کامل از بین می‌رود. بعد از برداشتن فشار اندکی آسایش تنش اتفاق می‌افتد که بدلیل انبساط هوای باقی مانده تحت فشار و یا تغییر شکل الاستیک رخ می‌دهد (۱۵). در فشار بالاتر، ذرات به هم نزدیکتر شده و موجب محکم شدن پیوند بین ذرات می‌شود. هر چقدر چگالی پلت بیشتر باشد هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری کمتر می‌شود (۱۰). در پلت‌های ساخته شده از کلش 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 (۹). افزودن پودر ذغال قهوه ای به سبوس برنج به نسبت ۲ به ۸، ۵ به ۵ و ۸ به ۲ چگالی پلت به ترتیب ۵۸۰، ۵۸۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بدست آمد (۲۹). پلت‌های ساخته شده از ذرات درشت‌تر دارای چگالی کمتری نسبت به پلت های با اندازه

ذرات کوچکتر بودند. در اثر فشار تراکم روغن موجود در تفاله زیتون به آرامی به داخل فضاهای خالی و خلل و فرج ذرات سبوس نفوذ کرده 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 می‌یابد. پلت‌هایی که در دمای بالاتر ساخته می‌شوند (شکل ۸) دارای چگالی بیشتری نسبت به پلت‌های ساخته شده در دمای پائین‌تر هستند.



شکل(۷) اثر متقابل اندازه ذرات و فشار تراکم بر چگالی پلت

Figure (7) Interaction effect of compression pressure and temperature on the pellets density



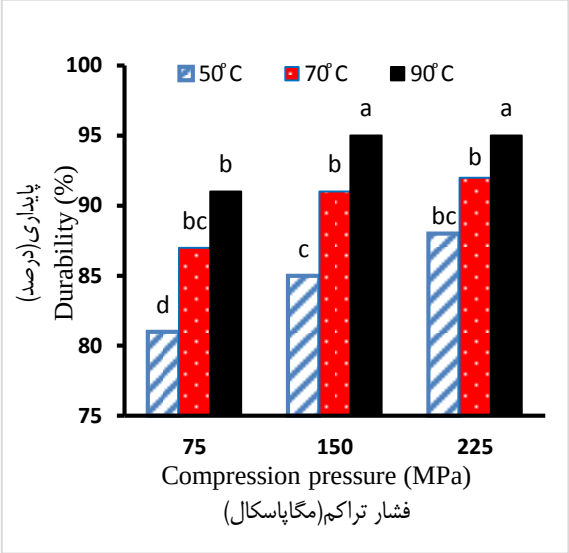
شکل(۸) اثر متقابل اندازه ذرات و دما بر چگالی پلت

Figure (8) Interaction effect of particle size and temperature on the pellets durability

این امر بدلیل اثر نرم کنندگی دما بر روی لیگنین بوده که موجب ایجاد خاصیت پلاستیکی در فیبرهای لیگنوسلولزی می‌شود. در تحقیقی (۹) گزارش کردند که در اثر افزایش دمای پلت، مدول الاستیسیته ذرات کمتر شده و ماده تشکیل دهنده پلت انعطاف پذیرتر می‌شود. در نتیجه فضاهای خالی بین و درون ذرات کاهش یافته و چگالی پلت افزایش می‌یابد. همچنین، در اندازه ذرات ۹۰۰–۱۲۰۰ میکرومتر در هر سه دما چگالی پلت دارای مقدار بیشتری است که نشان دهنده تراکم پذیری بیشتر در این اندازه ذرات است.

پایداری

پایداری پلت یکی از فاکتورهای مهم کیفیت پلت محسوب می‌شود و نقش مهمی در حفظ شکل ظاهری پلت در جابجایی، بارگیری و تخلیه دارد. پایداری بالاتر نشانه کیفت بهتر پلت است. نتایج جدول ۱ نشان داد که اثر متقابل فشار تراکم و دما بر پایداری پلت معنی‌دار است. محدوده تغییرات پایداری برای پلت بین ۸۱ الی ۹۵ درصد می‌باشد. افزایش فشار تراکم، پایداری پلت‌ها را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید که این امر نشان دهنده نقش تراکم در پیوند بین ذرات و ایجاد پل‌های ارتباطی برای استحکام بیشتر ذرات است. محققان (۲۹) با افزودن ۲۰٪ پودر ذغال قهوه‌ای به سبوس برنج پایداری پلت را به ۹۷/۵٪ رساندند و دریافتند که ذغال قهوه‌ای به عنوان ماده پیوند دهنده عمل می‌کند. شکل ۹ نشان می‌دهد که افزایش دما و فشار، تراکم پایداری پلت‌ها را افزایش داد. پلت‌هایی که در فشار ۲۲۵ مگاپاسکال و دمای ۹۰ درجه سلسیوس ساخته شده‌اند دارای بیشترین پایداری هستند. با افزایش دما و فشار، استحکام مکانیکی پلت افزایش می‌یابد و در نتیجه پلت پایداری بهتری دارد. افزودن لجن به کلش برنج موجب افزایش قابل توجه پایداری پلت گردید (۱۲). با افزودن خاک اره کاج به پلت ساخته شده از کلش جو پایداری پلت ۱۲ درصد افزایش پیدا کرد (۲۳).



شکل(۹) اثر متقابل فشار تراکم و دما بر پایداری پلت

Figure (9) Interaction effect of compression pressure and temperature on the pellets durability

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که هر سه عامل اندازه ذرات، فشار تراکم و دما بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پلت از جمله چگالی، مقاومت و پایداری تاثیر معنی‌داری دارد. انتخاب اندازه ذرات مناسب نقش مهمی در مقاومت بیشتر پلت دارد. دمای قالب در هنگام پلت سازی نیز در پیوند دهندگی ذرات پلت بسیار مهم است چرا که در دمای مناسب ایجاد پیوند بین پلهای ارتباطی موجب مستحکم شدن اتصال ذرات و در نتیجه افزایش مقاومت و پایداری پلت می‌شود. بطور کلی نتایج تحقیق نشان داد که برای ساخت پلت از پسماندهای کارخانه فرآوری زیتون، ترکیب مناسبی از پارامترهای اندازه ذرات، فشار تراکم و دمای قالب برای ساخت پلت با استحکام و پایداری بالا نیاز است.

References

1. Abdollahpour, A. R., Tabatabaeekoloor, R., and Hashemi, S. J. 2023. Evaluation of Fuel Pellets Made from the Combination of Spruce Sawdust with Corn and Soybean Biomass. Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture), 46 (3): 273-288. DOI: 10.22055/AGEN.2023.45376.1692. (In Persian)

2. Adapa, P., Tabil, L., and Shoenau, G. 2009. Comparison characteristics of barley, canola and wheat straw. Biosystems Engineering, 104, 335-344. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.022

3. 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. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052

4. FAO. 2020. Food and Agricultural Organization. Agricultural statistics. Data report

5. Garcia, R., Gil, M.V., Rubiera, F., and Pevida, C. 2019. Pelletization of wood and alternative biomass blends for producing industrial quality pellets. Fuel, 251: 739-753. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.141

6. 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. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.445

7. Ishii, K., and 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. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.008

8. Jamradloedluk, J., and Lertsatitthanakorn, C. 2017. Influence of mixing ratios and binder types on properties of biomass pellets. Energy Procida, 138, 1147-1152. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.223

9. Jiang, L., Liang, J., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Huang, H., Wang, H. and Zheng, G. 2014. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: the density and hardness of pellet. Bioresource Technology, 166, 435-443. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.077

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 switch grass. Bioresource Technology, 101(3), 1082-1090. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064

11. Lang, S., Zhang, S., Cao, Z., Yang J., Zhou, Y., Liu, S., Xu, J., and Yang, C. 2023. Improvement of biochar pellets prepared from cotton stalk by hydrothermal pretreatment. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Vol. 176: https:// doi.org/101016/j.Jaap.2023.106263

12. Lehtikangas, P. 2001. Quality properties of pelletized sawdust, lodging residue and bark. Biomass and Bioenergy, 20(5), 351-360. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1

13. Li, Y. and Liu, H. 2000. High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass and Bioenergy, 19(3), 177-186. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00026-X

14. Liu, Zh., Quek, A., and Balasubramanian, R. 2014. Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residue and their corresponding hydrochars. Applied Energy, 113, 1315-1322. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.087

15. 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. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.037

16. Molina-Moreno, V., Leyva-Díaz, J. C., and 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. Energies 9(10), 777. https://doi.org/10.3390/en9100777

17. Nguyen, Q. N., Cloutier, A., Achim, A., and 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. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.06.010

18. 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. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.040

19. Pradhan, P., Mahajani, S. M., and Arora, A. 2018. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. Fuel Processing Technology, 181, 215-232. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021

20. Puig-Arnavat, M., Shang, L., Sárossy, Z., Ahrenfeldt, J., and Henriksen, U.B. 2016. From a single pellet press to a bench scale pellet mill—Pelletizing six different biomass feedstock. Fuel Processing Technology, 142, 27-33. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.022

21. Rhen, C., Gref, R., Sjöström, M., and Wasterlund, I. 2005. Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. Fuel Processing Technology, 87(1), 11-16. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.03.003

22. 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. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.05.011

23. Serrano, C., Monedero, E., Lapaerta, M., and Portero, H. 2011. Effect of moisture content, particle size and 23. Pine added on quality parameters of barley straw pellets. Fuel Processing Technology, 92(3), 699-706. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.031

24. 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. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.09.021

25. 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. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011

26. Sykorova, V., Jezerska, L., Sassmanova, V., Honus, S., Peikertova, P., Kielar, J., and Zidek, M. 2024. Biomass pellets with organic binders-before and after Torre faction. Renewable Energy, Vol. 221. https:// doi.org/ 101016/ J. renewe.2023.119771.

27. Tabatabaei, 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 Journal of Biosystems Engineering, 51, 551-561. https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.267118.665104. (In Persian)

28. 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(11): 964-972. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.008

29. Tsuchiya, Y., and 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. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.10.009

30. Wu, M.R., Scholt, D.L., and Lodewijks, G. 2011. Physical properties of solid biomass. Biomass and Bioenergy, 35(5), 2093-2105. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.020

31. Zhang, C., Chen, W.-h., Ho, S.-H., Park, Y.-K., Wang, C., and Zheng, Y. 2023. Pelletization property analyses of raw and torrefied corn stalks for industrial applications to achieve agricultural waste conservation. Energy, 285, https:// doi.org/10.1016/ J.energy.2023.129463