Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 15, No. 4, Page 437 - 457 (2025)

DOI: 10.22034/ijwp.2024.2040817.1680

Investigation of the pelletization process of sugarcane bagasse pith using the response surface methodology and evaluation of the optimal physical and chemical properties of the pellets

Zahra Nemati[1], Mohammad Hossein Kianmehr[2*], Akbar Arab Hosseini[3], Ali Abdulkhani[4], Morteza Aghbashlo[5]

1- PhD Student, Department of Agrotechnology, Faculty of Agricultural Technology, Abouraihan, University College of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Corresponding author, Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agricultural Technology, Abouraihan, University College of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: kianmehr@ut.ac.ir
3- Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agricultural Technology, Abouraihan, University College of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran.
4- Professor, Department of wood and paper science and technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
5- Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: September 2024 Accepted: October 2024

Abstract

Problem definition and objectives: Pollution from fossil fuels has driven societies toward renewable energy sources. Bioenergy plays a significant role in ensuring energy security and promoting rural development. Due to challenges such as global warming and fluctuations in fossil fuel prices, the use of biomass is on the rise. In Iran, sugarcane bagasse is recognized as a high-efficiency renewable energy source. To improve the quality of paper pulp, pith must be removed from bagasse. Pelletization is an effective method for increasing energy density and enhancing the fuel properties of lignocellulosic materials. This study focuses on producing fuel pellets from paper and particleboard factory waste and examining their properties without using a binder.

Methodology: This study was conducted to produce fuel pellets from sugarcane bagasse pith using a laboratory-scale single pellet press. The effects of parameters such as moisture, pressure, and temperature on pellet density were evaluated using Design Expert software, and the optimal sample was determined based on the highest density achieved. Additionally, the physical and chemical properties of the bagasse pith were measured before and after the pelletizing process. In the final stage, pellets were produced on a larger scale based on the optimal conditions identified.

Results: The results indicated that the moisture content of the biomass and the pelletizing temperature had the greatest impact on pellet density. Reducing moisture to 20% and increasing the temperature to 120°C resulted in the highest pellet density. These conditions led to improved physical and chemical properties of the pellets, with reduced volatile matter and ash content. Simultaneously, the fixed carbon content and heating value of the pellets increased. Additionally, the amount of lignin decreased during the compression process. The reduction in lignin after

pelletizing is due to physical and chemical changes occurring during the process. During pelletizing, parts of the lignin may act as a natural binder and transfer to the surface of the pellets or, due to chemical reactions with other biomass components, alter its structure and reduce its amount. These changes can enhance the mechanical and thermal properties of the pellets but lead to a decrease in the overall lignin content.

Conclusion: The results suggest that precise control of process conditions, particularly moisture and temperature, can significantly improve the quality and added value of fuel pellets. This research could greatly contribute to the development of biomass energy technologies and enhance the environmental sustainability of these processes.

Keywords: Calorific Value, Renewable Energy, Moisture, Biomass, Lignin, Pelletization.

بررسی فرآیند پلت‌سازی پیت باگاس نیشکر با کمک روش سطح پاسخ و ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بهینه پلت

زهرا نعمتی[۱]، محمد حسین کیان‌مهر[۲*]، اکبرعرب‌حسینی[۳]، علی عبدالخانی[۴]، مرتضی آغباشلو[۵]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی فنی کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشکدگان کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی فنی کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشکدگان کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. پست الکترونیک: kianmehr@ut.ac.ir
۳- استاد، گروه مهندسی فنی کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشکدگان کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۴- استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۵- استاد، گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: مهر ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی، جوامع را به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. انرژی زیستی، سهم بالایی در تأمین امنیت انرژی و توسعه روستایی دارد. به دلیل چالش‌هایی مانند گرمایش زمین و نوسانات قیمت سوخت‌های فسیلی، استفاده از زیست‌توده در حال افزایش است. در ایران، باگاس نیشکر به‌عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر با بازده بالا شناخته می‌شود. برای بهبود کیفیت خمیر کاغذ، باید پیت از باگاس حذف شود. پلت‌سازی یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش چگالی انرژی و بهبود خواص سوختی مواد لیگنوسلولزی است. این پژوهش به تولید پلت‌های سوختی از زائدات کارخانه‌های کاغذ و نئوپان‌سازی بررسی خواص آن‌ها بدون استفاده از بایندر پرداخته است.

مواد و روشها: این تحقیق به منظور تولید پلت سوختی از پیت باگاس نیشکر با استفاده از دستگاه پلت‌ساز منفرد آزمایشگاهی انجام شد. تأثیر پارامترهایی مانند رطوبت، فشار و دما بر چگالی پلت با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ارزیابی و نمونه بهینه بر اساس بیشترین مقدار چگالی تعیین، همچنین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی پیت باگاس قبل و بعد از فرآیند پلت‌سازی اندازه‌گیری شد. در مرحله آخر، با توجه به شرایط بهینه نهایی به‌دست‌آمده پلت‌ها در مقیاس بیشتر تولید شدند.

نتایج: نتایج نشان داد که رطوبت زیست‌توده و دمای قالب پلت‌سازی بیشترین تأثیر را بر چگالی پلت‌ها دارند. با کاهش رطوبت به ۲۰ درصد و افزایش دما به ۱۲۰ درجه سلسیوس، چگالی پلت‌ها به حداکثر مقدار خود رسید. این شرایط منجر به بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی پلت‌ها شد، به طوری که میزان مواد فرار و مقدار خاکستر کاهش یافت. در عین حال، مقدار کربن ثابت و ارزش حرارتی پلت‌ها افزایش یافت. همچنین، مقدار لیگنین در فرآیند متراکم‌سازی کاهش یافت. کاهش لیگنین بعد از پلت‌سازی به دلیل تغییرات فیزیکی و شیمیایی در طول فرآیند پلت‌سازی است. در طول پلت‌سازی، بخش‌هایی از لیگنین ممکن است به‌عنوان عامل چسبنده عمل کرده و به سطح پلت‌ها منتقل شود یا به دلیل واکنش‌های شیمیایی با سایر اجزای زیست‌توده، تغییر ساختار داده و مقدار آن کاهش یابد. این تغییرات می‌توانند به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی پلت‌ها کمک کنند، اما به کاهش مقدار کلی لیگنین منجر می‌شوند.

نتیجه‌گیری: این نتایج نشان می‌دهد که کنترل دقیق شرایط فرآیند، به ویژه رطوبت و دما، می‌تواند به تولید پلت‌های سوختی با کیفیت و ارزش‌افزوده بالاتر کمک کند. این پژوهش می‌تواند به توسعه فناوری‌های تولید انرژی از زیست‌توده و بهبود پایداری زیست‌محیطی این فرآیندها کمک شایانی نماید.

واژه های کلیدی: ارزش حرارتی، انرژی تجدیدپذیر، رطوبت، زیست‌توده، لیگنین، متراکم‌سازی.

مقدمه

در آینده به دلیل مشکلاتی مانند گرم شدن زمین، کاهش ذخایر نفت و نوسانات قیمت منابع فسیلی انتظار می‌رود که استفاده از زیست‌توده[1] و دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یابد. برخلاف سوخت‌های فسیلی که پس از سوختن، دی‌اکسید کربن را به جو اضافه می‌کنند، زیست‌توده لیگنوسلولزی منبعی است که با سوختن این مشکل را ایجاد نمی‌کند و یک گزینه پایدار و مؤثر برای امنیت انرژی آینده و کاهش گازهای گلخانه‌ای است [1]. کمبود انرژی در حال حاضر یک نگرانی جهانی است و بسیاری از اقتصادهای در حال توسعه مجبور به واردات سوخت از کشورهای دیگر هستند [2]. علاوه بر این، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و اثرات منفی آن بر محیط‌زیست، جامعه مدرن را به‌سوی تولید و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است [3]. زیست‌توده یک منبع انرژی تجدیدپذیر، سبز و پاک است که به دلیل در دسترس بودن، خنثی بودن ازنظر تولید دی‌اکسید کربن، و محتوای گوگرد کم، می‌تواند به‌عنوان یکی از معدود گزینه‌های جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی در نظر گرفته شود [4]. سوخت‌های تولید شده از زیست‌توده به‌صورت‌های مایع (متانول و اتانول)، گازی (متان) و جامد (زغال‌سنگ و پلت‌های سوخت) قابل دسترسی هستند. [5] اگرچه استفاده از سوخت‌های زیستی جامد به دلیل داشتن شکل و اندازه‌های ناهمگن، رطوبت بالا و چگالی انرژی پایین، با چالش‌هایی مواجه است [6]. در سیستم‌های تولید انرژی حرارتی یا تلفیقی (حرارت و برق) حجم راکتورها معمولاً ثابت است، از این رو استفاده از پسماندهای با دانسیته حجمی بالا از اولویت بیشتری برخوردار است. یکی از مشکلات استفاده از پسماندهای کشاورزی برای تولید انرژی، کم بودن دانسیته حجمی آن‌ها به منظور عملیات انتقال، ذخیره‌سازی و سوزاندن است که لزوماً باید به این منظور فشرده شوند [7].

بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, ۲۰۱۹)، سالانه ۲/۰۱ میلیارد تن پسماندهای زیستی در جهان تولید می‌شوند و تخمین زده می‌شود که تولید پسماندهای زیستی تا سال ۲۰۵۰ به ۳/۴ میلیارد تن برسد [8]. ایران یکی از کشورهای تولیدکننده نیشکر در سطح جهان است. در حال حاضر، سالانه حدود ۱۹۰۰ میلیون تن نیشکر در جهان و ۱۰ میلیون تن نیشکر در ایران تولید می‌شود. به طور کلی، در فرآوری صنایع نیشکر حدود ۳۰ درصد معادل ۳ میلیون تن از نیشکر در ایران به باگاس تبدیل می‌شود. باگاس نیشکر شامل ۶۷ درصد کربوهیدرات و ۲۲ درصد لیگنین با محتوای رطوبت بیش از ۵۰ درصد است [9].

یکی از روش‌های امیدوارکننده برای بهبود کیفیت مواد زیست‌توده اولیه با کیفیت پایین، فشرده‌سازی است. این فرآیند، زیست‌توده اولیه را به سوخت زیستی جامد همگن با تراکم حجمی و انرژی بالاتر تبدیل می‌کند که در نتیجه، کارایی بهتری در رسیدگی، حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و احتراق فراهم می‌آورد [10]. Tumulur (۲۰۱۸) گزارش داد که پلت‌های زیست‌توده دارای رطوبت کمتر از ۱۰٪، ارزش حرارتی حدود ۲۰-۱۵ مگاژول بر کیلوگرم و چگالی ظاهری تا ۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند. پلت‌ها معمولاً تحت فشار مکانیکی در یک شرایط عادی تولید می‌شوند [11]. بر مبنای گزارش محققان، هزینه تولید، حمل‌ونقل، نگهداری و پیش‌فرآوری مواد زیست‌توده حدود ۶۰-۴۰ درصد هزینه کل تولید محصول نهایی را تشکیل می‌دهند، در حالی که هزینه حمل‌ونقل فقط ۲۸-۱۳ درصد از کل هزینه‌ها را شامل می‌شود [12]. برای درک بیشتر این موضوع دیگر محققان، گزارش دادند که هزینه ۵۰ کیلومتر حمل‌ونقل یک تن کاه و کلش ذرت ۱۰ برابر هزینه کاه و کلش ذرت پلت شده است .کاهش اندازه ذرات و فشرده‌سازی مواد اولیه زیست‌توده می‌تواند تا حدی بر این چالش‌ها غلبه کند [13].

پارامترهای مهم برای استفاده از زیست‌توده در تولید انرژی شامل اندازه ذرات و جرم مخصوص، مقدار خاکستر، مقدار رطوبت، مقدار مواد استخراجی، مقدار عناصر شیمیایی (کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن) و مقدار ترکیب‌های شیمیایی (سلولز، همی‌سلولز و لیگنین) هستند. ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های زیست‌توده برای سوزاندن، با توجه به گونه زراعی و زادگاه آن تفاوت‌های زیادی دارد. همچنین ترکیب شیمیایی درون چوب،

[1]- Biomass

پوست، شاخه و برگ با هم تفاوت زیادی دارد [14]. انتخاب و طراحی هر سیستمی که از زیست‌توده به‌عنوان سوخت بهره می‌گیرد، به ویژگی‌های زیست‌توده، محدودیت‌های زیست‌محیطی، هزینه تجهیزات و ظرفیت تولید کارخانه وابسته است. کاهش آلودگی‌ها و افزایش بهره‌وری از جمله اهداف اصلی در تولید انرژی محسوب می‌شوند [15]. پلت‌هایی که رطوبت بالایی دارند، در حین ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل دچار کاهش ماده خشک می‌شوند و همچنین زودتر تجزیه می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهد که میزان رطوبت تأثیر قابل‌توجهی در تولید پلت‌های سوختی دارد [12].

روش سطح پاسخ[2](RSM) یک روش آماری است که برای طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی تأثیر متغیرهای فرآیندی استفاده می‌شود. روش سطح پاسخ بر اساس اصول طراحی آزمایش‌ها[3] (DOE) است. طراحی آزمایش‌ها شاخه‌ای از آمار کاربردی است که برای برنامه‌ریزی، اجرا، تجزیه و تحلیل و تفسیر آزمایش‌های کنترل‌شده به منظور ارزیابی عواملی که بر مقادیر پارامترها تأثیر می‌گذارند استفاده می‌شود. روش سطح پاسخ از روش آماری برای طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی بهره می‌برد. برای بهینه‌سازی در روش سطح پاسخ همگرایی به سمت فاکتور بهینه است زیرا آن‌ها اثرات عوامل بی‌نظمی را کاهش می‌دهند. این استراتژی در اصل برای برازش مدل‌های آزمایشی توسعه داده شد، اما می‌تواند برای آزمایش‌های عددی نیز به کار رود [16].

درک نقش ترکیب مواد اولیه در فرآیند پلت‌سازی زیست‌توده بسیار مهم است. در مواد اولیه لیگنوسلولزی، سلولز دارای ساختار نیمه بلوری است و در برابر هیدرولیز مقاوم است، درحالی‌که همی‌سلولز دارای ساختاری نامنظم و آمورف با استحکام کم بوده و به راحتی هیدرولیز می‌شود. می‌توان فرض کرد که پیوندهای طبیعی ممکن است به دلیل محصولات چسبنده‌ای شکل بگیرند که از تجزیه همی‌سلولز تولید می‌شوند. علاوه بر این، لیگنین با ایجاد پل‌های محکم در دماهای بالا، نقش مهمی در پلت‌سازی زیست‌توده ایفا می‌کند.

با توجه به اهمیت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زیست‌توده در فرآیند سوختن، هدف این مطالعه بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در فرآیند تولید پلت بدون استفاده از بایندر، به منظور افزایش کیفیت پلت‌ها و تحلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پلت‌های سوختی از پیت باگاس نیشکر است. همچنین، این تحقیق به دنبال تعیین شرایط بهینه در طول فرآیند فشرده‌سازی به منظور دستیابی به حداکثر چگالی در مقیاس آزمایشگاهی و تولید نمونه بهینه در مقیاس بزرگ‌تر می‌باشد.

مواد و روش

آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور بررسی اثرات فشرده‌سازی بر چگالی پیت باگاس نیشکر با هدف تولید پلت سوختی، پژوهشی در گروه فنی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها، پیت باگاس نیشکر از کشت و صنعت شعیبیه واقع در استان خوزستان با ۳۷ درجه و ۱۷ دقیقه طول جغرافیایی و ۵۵ درجه و ۱۸ دقیقه عرض جغرافیایی تهیه شد. این پیت باگاس پس از مرحله جداسازی پیت از باگاس (دپیتر) که به‌عنوان زائدات در کارخانه‌های کاغذسازی دور ریخته می‌شوند مورد استفاده قرار گرفت. از این مواد با همان اندازه ذرات (۰/۴۲۵≤X≤۲ mm) که دریافت شد برای فرآیند پلت-سازی و تولید پلت سوختی استفاده شد.

محتوای رطوبت

تعیین محتوای رطوبت اولیه مواد بر اساس استاندارد (ASAE, Moisture D3173) تعیین شد که به موجب آن سه نمونه، هرکدام حاوی ۱۰ گرم پیت باگاس به مدت ۲۴ ساعت درون آون با دمای ۱۰۵ °C قرار داده شد و وزن نمونه‌ها قبل و بعد از قرار دادن درون آون، توسط ترازوی دیجیتال با دقت (۰/۰۰۰۱) اندازه‌گیری شد و درصد رطوبت بر پایه‌تر بر اساس رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$MC = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \qquad (۱)$$

m_1: جرم اولیه مواد (گرم)، m_2: جرم نهایی مواد بعد از قرارگیری در آون (گرم)، MC: مقدار رطوبت بر پایه‌تر (درصد).

[2] Response Surface Methodology
[3] Design of Expriments

برای محاسبه آب مورد نیاز به منظور رساندن نمونه‌ها به سطوح رطوبتی مورد نظر قبل از فرآیند پلت‌سازی (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی) از رابطه ۲ استفاده شد. به این ترتیب که آب با روش اسپری کردن به نمونه اضافه شد.

$$M_w = \frac{m_i(M_{wf} - M_{wi})}{1 - M_{wf}} \qquad (۲)$$

m_w: جرم آب اضافه شده به نمونه (گرم)، m_i: جرم اولیه نمونه بر مبنای تر (گرم)، M_{wi}: رطوبت اولیه نمونه بر مبنای تر (درصد)، M_{wf} :رطوبت نهایی نمونه بر مبنای تر (درصد).

فرآیند پلت‌سازی

در این پژوهش، تبدیل پیت باگاس نیشکر به پلت به روش قالب با انتهای بسته انجام شد و پیت باگاس در شرایط عملیاتی مختلف پلت شد. برای تهیه پلت از یک پرس هیدرولیکی به همراه پلت‌ساز منفرد استفاده شد (شکل ۱). فشرده‌سازی در سه سطح رطوبتی (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد بر پایه‌تر)، سه سطح فشار تراکم (۸۹، ۱۷۸ و ۲۶۷ مگاپاسکال که به ترتیب معادل ۲۰، ۴۰ و ۶۰ بار) و سه سطح دما (۷۰، ۹۵ و ۱۲۰ درجه سلسیوس) انجام شد. به منظور توزیع یکنواخت رطوبت در نمونه‌ها، پس از افزودن رطوبت، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون کیسه-های پلاستیکی درب بسته در دمای ۴°C نگهداری شدند. برای تهیه پلت از یک قالب با قطر ۶ میلی‌متر (قطر پلت) استفاده شد (ASABE Standards S269.5). پارامترهای قابل کنترل پرس هیدرولیکی شامل فشار تراکم، سرعت پایین آمدن سنبه و مدت زمان نگهداری پلت تحت بار هستند. فشار تراکم با سرعت پایین آمدن سنبه به میزان ۴/۵ میلی‌متر بر دقیقه و مدت زمان نگهداری نمونه تحت بار ۲۰ ثانیه تنظیم شد. برای تهیه پلت ابتدا مقداری نمونه فشرده نشده (۰/۶ گرم) را درون قالب ریخته و نمونه داخل پیستون مقداری به روش دستی فشرده شد به طوری‌که قالب تا حدی پرشده و سپس پیستون را روی آن قرار داده و این نمونه تحت فشار پرس هیدرولیکی و توسط قالبی که انتهای آن بسته است تحت فشار قرار داده شد تا متراکم شود. در مرحله بعد انتهای قالب را باز کرده و با اعمال فشار مجدد بر نمونه، پلت تولید شده از داخل قالب خارج شد. برای اندازه‌گیری چگالی پلت‌ها ابتدا طول (L) و قطر (D) پلت‌ها با استفاده از کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر (Mastercraft, Miami FL,USA) اندازه‌گیری شد و سپس وزن آن‌ها با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم (GR200, A&D Inc. Tokyo, Japan) توزین شد.

چگالی پلت‌ها با تقسیم جرم پلت‌ها (m) بر حجم (V) آن‌ها به دست آمد. میانگین ۲۰ نمونه پلت تولید شده با دستگاه پرس منفرد اندازه‌گیری و به‌عنوان چگالی نمونه بهینه گزارش شد.

$$\rho = \frac{4m}{\pi D^2 L} = \frac{m}{V} \qquad (۳)$$

شکل ۱– دستگاه پلت پرس منفرد در مقیاس آزمایشگاهی و پلت تولید شده در شرایط بهینه.

آنالیز لیگنین بر اساس آزمون NREL

مقدار لیگنین موجود در نمونه‌ها، بر اساس پروتکل آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر آمریکا NREL TAP:510 – 42618 محاسبه شد. این روش شامل دو مرحله هیدرولیز اسید غلیظ و رقیق نمونه‌های لیگنوسلولزی می‌باشد. به منظور بررسی مقدار لیگنین در

هر دو نمونه پیت-باگاس و بهینه پلت از این آنالیز استفاده شد [۱۷].

ارزش حرارتی

ارزش حرارتی ناخالص بر مبنای استاندارد DS/EN ISO 18125:2017 و توسط بمب کالری متر مدل Parr (6300,DTU University) اندازه‌گیری شد. بمب کالری متری برای تعیین دقیق ارزش حرارتی هیدروکربن‌های مایع و جامد و سایر سوخت‌ها به کار می‌رود. این دستگاه شامل بمب، محفظه کالری متری، یک محفظه آب دوجداره خارجی، سیستم جرقه زنی، حسگر دما و یک واحد شارژ اکسیژن مجهز به درجه فشار می‌باشد. این روش به‌عنوان روش مستقیم و یا واقعی اندازه‌گیری ارزش حرارتی ناخالص مطرح است.

خاکستر

اندازه‌گیری میزان خاکستر بر مبنای استاندارد E1755-01(۲۰۱۵) انجام شد. مقدار یک گرم نمونه با ۳ تکرار در کوره الکتریکی با دمای ۲۵ ± ۵۷۵ °C به مدت ۳ ساعت قرار داده شد و با تقسیم وزن خاکستر به وزن اولیه نمونه، درصد خاکستر آن محاسبه شد [۱۸].

مواد فرار

اندازه‌گیری مواد فرار با استفاده از استاندارد (۲۰۱۳) ASTM-E872-82 انجام شد. مقدار یک گرم از نمونه (بر مبنای وزن خشک) با ۳ تکرار در داخل کوره در دمای ۲۰˚C ± ۹۵۰ مدت ۷ دقیقه قرار داده شد. سپس با اندازه‌گیری وزن ازدست‌رفته و تقسیم آن به وزن اولیه، درصد مواد فرار محاسبه شد [۱۹].

روش سطح پاسخ یا طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی برای تعیین و مشخص نمودن روابط بین متغیرهای خروجی و ورودی است. این روش برای مدل‌سازی و آنالیز کاربردهایی مفید است که در آن خروجی از چندین فاکتور کمی تأثیر می‌پذیرد. وقتی‌که خروجی تابعی از k متغیر ورودی است می‌توان خروجی را برحسب k+۱ بعد از رویه یا سطح نمایش داد. این رویه، سطح پاسخ نامیده می‌شود. تابعی که خروجی را تخمین می‌زند را می‌توان به‌عنوان یک تابع خطی از متغیرهای مستقل یک تابع چندجمله‌ای مثل تابع درجه دوم (کوادراتیک یا سهمی) مدل نمود (رابطه ۴). برای برازش مدل سطح پاسخ به داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیند پلت‌سازی نمونه‌های پیت باگاس نیشکر با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۳ (Stat-Ease Inc, Minneapolis, MN, USA) با روش سطح پاسخ در قالب طرح مرکب مرکزی[4](CCD) مرکز وجه[5](α=۱) انجام شد. در میان طراحی‌های آزمایشی کلاسیک، روش سطح پاسخ به دلیل سادگی و اثربخشی‌اش به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از RSM بررسی رابطه بین پاسخ (متغیر وابسته) و عوامل مورد مطالعه (متغیرهای مستقل) در یک آزمایش است [۲۰]. روش سطح پاسخ به منظور یافتن حالت بهینه برهمکنش عوامل و برآورد شرایط بهینه فرآیند با کمترین تعداد آزمایش‌ها انجام می‌شود. طرح مرکب مرکزی طراحی مناسب برای آزمایش‌های متوالی برای به دست آوردن اطلاعات مناسب برای آزمایش عدم تناسب[6] بدون نیاز به تعداد زیادی از نقاط طراحی است. در این پژوهش از روش سطح پاسخ به منظور بررسی ارتباط بین سه متغیر مستقل رطوبت (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد بر پایه‌تر)، فشار تراکم (۸۹، ۱۷۸و ۲۶۷ مگاپاسکال) و دمای قالب پلت (۷۰، ۹۵ و ۱۲۰ درجه سلسیوس) با یک متغیر پاسخ (وابسته) چگالی پلت‌ها استفاده شد (جدول ۱). هر عامل در طرح

4- Central Composite Designs
5- Face centered
6- Lack of fit

مرکب مرکزی مرکز وجه، در سه سطح مختلف (۱-، ۰ و ۱+)، دو نقطه محوری (α+ و α-) و ۶ تکرار در نقطه مرکزی برای تخمین خطای آزمایش بررسی شد.

کیفیت مدل برازش شده با استفاده از آزمون معنی‌داری و آنالیز واریانس (ANOVA) ارزیابی شد. ANOVA یک روش مناسب به‌منظور بررسی اهمیت یک پارامتر مستقل همچنین استفاده از یک رابطه ریاضی برای انتخاب یک مدل بهینه‌شده است. معادله مدل رگرسیون عمومی در رابطه ۴ آورده شده است. که در این رابطه Y متغیر وابسته (پاسخ)، d0 ضریب ثابت، dj، djj و dij ضرایب معادلات خطی، درجه دوم و اثرات متقابل مرتبه دوم و Xj و Xi متغیرهای مستقل کد شده را به ترتیب نشان می‌دهند [۲۱].

$$Y = d_0 + \sum_{i=1}^{n} d_i X_i + \sum_{i=1}^{n} d_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^{n} d_{ij} X_i X_j + \varepsilon \qquad (۴)$$

جدول ۱– متغیرهای مستقل و مقادیر واقعی و کد شده آن‌ها به منظور تولید پلت سوختی از پیت باگاس نیشگر

متغیر مستقل	نماد ریاضی	سطوح متغیر		
		−۱	۰	+۱
محتوای رطوبت (درصد)	A	۲۰	۳۰	۴۰
دما (درجه سلسیوس)	B	۷۰	۹۵	۱۲۰
فشار تراکم (مگا پاسکال)	C	۸۹	۱۷۸	۲۶۷

تابع مطلوبیت[7]

رویکرد تابع مطلوبیت روشی برای تعیین هم‌زمان مقادیر بهینه متغیرهای ورودی است که می‌تواند سطوح عملکرد مطلوب را برای یک یا چند پاسخ تعیین کند. روش مطلوبیت شامل دو مرحله است: ۱) یافتن سطوح متغیرهای مستقل که به طور هم‌زمان مطلوب‌ترین پاسخ‌های پیش‌بینی شده را روی متغیرهای وابسته ایجاد می‌کنند و ۲) مطلوبیت کلی را با توجه به متغیرهای مستقل قابل کنترل به بیشینه می‌رسانند [۲۲].

هنگام استفاده از یک سیستم پیچیده، چندین عامل تجربی باید بهینه‌سازی شوند، بنابراین ضروری است که روش‌های تحلیلی جایگزین بر اساس معیارهای مختلف ارزیابی شوند. برای تعیین شرایط بهینه برای متغیرهای ورودی، لازم است که همه پاسخ‌ها به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. این نوع مسئله که بر اساس تصمیم‌گیری چند معیاره است، به‌عنوان مشکل چند پاسخ شناخته می‌شود.

برای دستیابی به یک توافق رضایت‌بخش، روش مطلوبیت به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در سیستم‌های چند پاسخی استفاده می‌شود. تابع مطلوبیت، که توسط [۲۳ و ۲۴] تعریف شده است، یکی از روش‌های بهینه‌سازی عوامل در چنین سیستم‌هایی به شمار می‌آید. این روش بر مبنای تبدیل تمامی پاسخ‌های به‌دست‌آمده از مقیاس‌های مختلف به یک مقدار بدون مقیاس استوار است. مقادیر تابع‌های مطلوبیت بین صفر و ۱ ($0 \le d_i \le 1$) قرار دارند. مقدار صفر زمانی اختصاص داده می‌شود که عوامل پاسخ نامطلوبی ارائه دهند، در حالی که مقدار ۱ نشان‌دهنده عملکرد بهینه برای عوامل موردبررسی است.

علاوه بر این، برای بررسی رفتار سیستم‌های پیچیده، استفاده از روش تابع مطلوبیت به همراه طراحی‌های آزمایشی کلاسیک این امکان را فراهم می‌آورد که: تعداد شرایطی که باید آزمایش شوند کاهش یابد و توافق بهینه بین سطوح مختلف عوامل محیطی که به پاسخ‌های متضاد منجر می‌شود، تعیین گردد. ترکیب روش سطح پاسخ و روش مطلوبیت، روشی قدرتمندتر برای یافتن تعادل بهینه بین پاسخ‌ها، از جمله پاسخ‌های متضاد (بهینه‌سازی چندمعیاره)، فراهم می‌آورد [20]. مقادیر بهینه با تابع مطلوبیت با هدف تولید پلت سوختی از پیت باگاس نیشکر با بیشترین چگالی بدون استفاده از بایندر در جدول ۲ آورده شده است.

[7]- Desirability function

جدول ۲– مقادیر بهینه متغیرها

متغیر	درصد رطوبت	دما (درجه سلسیوس)	فشار(مگا پاسکال)
مقدار	۲۰	۱۲۰	۸۹

نتایج و بحث

در این پژوهش از روش سطح پاسخ در قالب طرح مرکب مرکزی مرکز وجه به منظور تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی چگالی پلت‌های سوختی استفاده شد. تعداد ۲۰ واحد آزمایشی توسط نرم‌افزار تعیین و اثر متغیرهای مستقل شامل رطوبت (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی بر پایه‌تر)، فشار تراکم (۸۹، ۱۷۸ و ۲۶۷) و دمای قالب پلت (۷۰، ۹۵ و ۱۲۰ درجه سلسیوس) بر پاسخ فرآیند شامل چگالی پلت‌ها بررسی شد و نتایج مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده آن‌ها توسط طرح CCD-RSM در جدول ۳ آورده شده است. برای متغیر پاسخ یک مدل برهمکنش دو عاملی توسط نرم‌افزار با بیشترین R2 و کمترین انحراف معیار پیشنهاد شد. نزدیک بودن نقاط به خط یا مقدار ضریب تبیین R2 بالا، نشان می‌دهد که مدل پیش‌بینی شده به خوبی برازش شده و کفایت مدل آماری با توجه داده‌های آماری موجود در جدول ۴ مورد تائید است. لازم به ذکر است که با توجه به مقدار ضریب تبیین بالای ۰/۹ و مقدار P کمتر از یک درصد، دلیل دیگری برای تائید کفایت مدل آماری می‌باشد. اثر سایر فاکتورها از جمله انحراف معیار (۱/۸۵>) و ضریب تغییرات (۹/۴۸>)، بیانگر اعتبار بالای مدل‌های پیشنهادی برای متغیر پاسخ موردبررسی توسط نرم‌افزار است. از طرف دیگر برای متغیر پاسخ، بین ضریب همبستگی اصلاح شده با ضریب همبستگی پیش بینی شده تطابق مناسبی ایجاد شد به طوری که اختلاف آن‌ها کمتر از ۰/۱۵ بود. دقت مؤثر، بیانگر اختلاف مقدار پاسخ پیش بینی شده مدل با مقدار متوسط خطای پیش بینی می‌باشد و مقادیر بیش از ۴ بیانگر کفایت مدل است. در واقع این معیار، شاخصی از نسبت سیگنال به اغتشاش می‌باشد و مقدار بزرگ‌تر از ۴ نشان می‌دهد که مدل‌های پیش بینی‌کننده از طرح CCD تبعیت می‌کند که دقت مؤثر در این مطالعه بیش از ۴ به دست آمد. در نتیجه می‌توان بیان داشت که این مدل‌های پیشنهادی می‌توانند برای هدایت فضای طراحی طرح CCD-RSM مورد استفاده قرار بگیرند. مدل نهایی پیش‌بینی تأثیر متغیرهای مستقل رطوبت (A)، دما (B) و فشار (C) بر چگالی (Y) با حذف عوامل غیرمعنی‌دار در جدول ۵ نشان داده شده که در آن ضرایب به‌صورت کدگذاری شده هستند. در معادله علائم مثبت و منفی به ترتیب به اثرات افزاینده یا افزایشی و اثر کاهنده یا کاهشی بر پاسخ‌های موردبررسی نسبت داده می‌شوند. همچنین شکل ۲ نمودار پاسخ پیش‌بینی شده از مقادیر تجربی در برابر مقادیر واقعی به‌دست‌آمده از آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۳– تطابق یافته‌های حاصل از مدل و آزمایش‌های تجربی بر چگالی

واحد آزمایش	متغیرهای مستقل			متغیر پاسخ (مشاهدات)	متغیر پاسخ (پیش بینی)
	رطوبت (٪)	دما (°C)	فشار(MPa)	چگالی (kg/m^3)	چگالی (kg/m^3)
۱	۳۰	۹۵	۱۷۸	۹۹۵	۹۹۹/۰۸
۲	۳۰	۹۵	۱۷۸	۹۵۷	۹۹۹/۰۸
۳	۴۰	۷۰	۲۶۷	۷۲۶	۷۰۸/۹۳
۴	۳۰	۷۰	۱۷۸	۸۸۵	۸۸۴/۷۵
۵	۲۰	۱۲۰	۸۹	۱۱۶۴	۱۱۷۴/۴۷
۶	۲۰	۹۵	۱۷۸	۱۰۵۱	۱۱۲۹/۶۲
۷	۳۰	۱۲۰	۱۷۸	۱۱۶۴	۱۱۲۸/۱۸
۸	۳۰	۹۵	۲۶۷	۹۱۹	۹۹۱/۰۴
۹	۳۰	۹۵	۱۷۸	۱۰۲۴	۹۹۹/۰۸

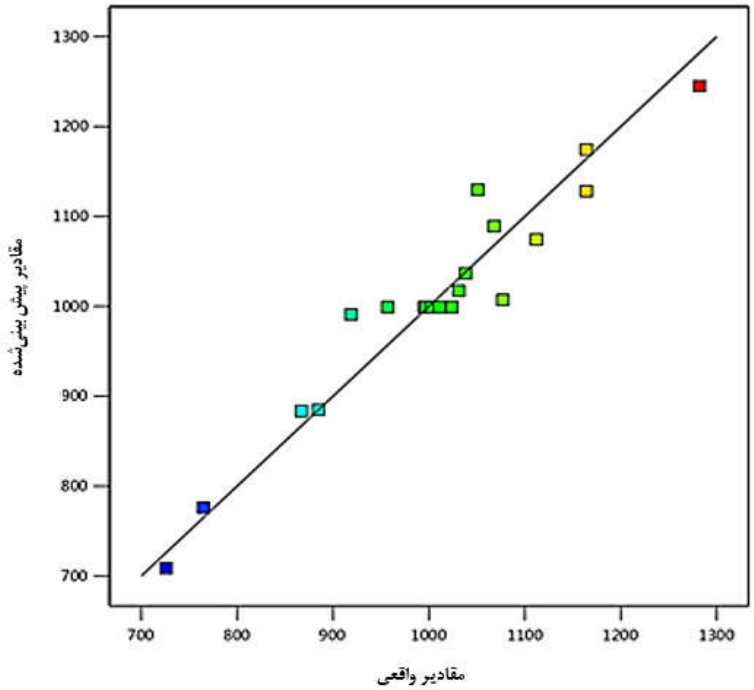
۱۰	۳۰	۹۵	۸۹	۱۰۷۷	۱۰۰۷/۱۹
۱۱	۴۰	۹۵	۱۷۸	۸۶۷	۸۸۳/۶۳
۱۲	۲۰	۱۲۰	۲۶۷	۱۲۸۲	۱۲۴۴/۹۵
۱۳	۲۰	۷۰	۸۹	۱۰۳۸	۱۰۳۶/۵
۱۴	۳۰	۹۵	۱۷۸	۱۰۱۱	۹۹۹/۰۸
۱۵	۴۰	۱۲۰	۲۶۷	۱۰۳۱	۱۰۱۷/۲۹
۱۶	۴۰	۷۰	۸۹	۷۶۵	۷۷۶/۱۷
۱۷	۳۰	۹۵	۱۷۸	۹۹۷	۹۹۹/۰۸
۱۸	۲۰	۷۰	۲۶۷	۱۱۱۲	۱۰۷۴/۳۹
۱۹	۴۰	۱۲۰	۸۹	۱۰۶۸	۱۰۸۹/۱۲
۲۰	۳۰	۹۵	۱۷۸	۱۰۰۳	۹۹۹/۰۸

جدول ۴– یافته‌های آماری مدل برازش شده

پاسخ	نوع مدل	انحراف معیار	میانگین	ضریب تغییرات (%)	ضریب تبیین	ضریب تبیین اصلاح شده	ضریب تبیین پیش بینی شده	دقت مؤثر	
چگالی	خطی	۰/۰۸	۶/۹۱	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۶۹	۱۹/۴۴	
	برهمکنش دو عاملی	۰/۰۴	۶/۹۱	۰/۶۱	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۷۹	۲۲/۷۲	مدل پیشنهادشده
	درجه دوم	۰/۰۶	۶/۹۱	۰/۶۷	۰/۸۴	۰/۸۰	۰/۵۵	۱۶/۵۹	

جدول ۵– مدل رگرسیونی پیش بینی اثرات متغیرهای مستقل بر متغیر پاسخ

متغیر پاسخ	مدل رگرسیونی
چگالی (gr/cm3)	Y = +6.91-0.1228A+0.1215B-0.0081C+0.0534 AB - 0.0316 AC +0.0056 BC



شکل ۲– مقادیر پیش بینی شده مدل نهایی در برابر مقادیر واقعی

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل واریانس برای مدل برهمکنش دو عاملی با سطح معنی‌داری (۰/۰۰۰۱>) برای متغیر پاسخ (چگالی) در جدول ۶ آورده شده است. قابلیت اطمینان و معنی‌داری بیشتر مدل به ترتیب با F-value بیشتر و P-value کمتر به دست می‌آید. P-value کمتر (۰/۰۰۰۱> P) نشان می‌دهد که احتمال به دست آوردن F-valueبیشتر، به دلیل اغتشاش فقط ۰/۰۱ درصد است. بر این اساس، برای مطالعه حاضر، تنها اثرات اصلی محتوای رطوبت (A) و دمای قالب (B) ازنظر آماری بر چگالی پلت معنی‌دار بودند. محتوای رطوبت و دمای قالب به دلیل داشتن F-value بیشتر و P-value کمتر (۰/۰۰۰۱> P) بیشترین تأثیر را در بین سایر پارامترها بر تغییرات چگالی پلت نشان دادند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که فشار بر چگالی پلت تأثیر معنی‌دار نداشته است. به طور کلی، برای بررسی معنی‌داری اثر هر پارامتر در جدول تجزیه واریانس می‌توانP-value آن را ارزیابی کرد به طوری که P-value کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر پارامتر است. بر این اساس، با توجه به جدول ۶، اثر متقابل پارامترهای محتوای رطوبت و دمای قالب (AB) بر چگالی پلت اثر معنی‌داری داشتند برای عدم برازش غیرمعنی‌دار شده و دلالت بر این موضوع دارد که دقت بالایی در تکرارپذیری نقاط میانی طرح وجود داشته است.

جدول ۶– نتایج تجزیه واریانس تخمین زده‌شده مدل برهم‌کنش دو عاملی برای متغیر پاسخ در فرآیند تولید پلت سوختی از پیت باگاس نیشکر

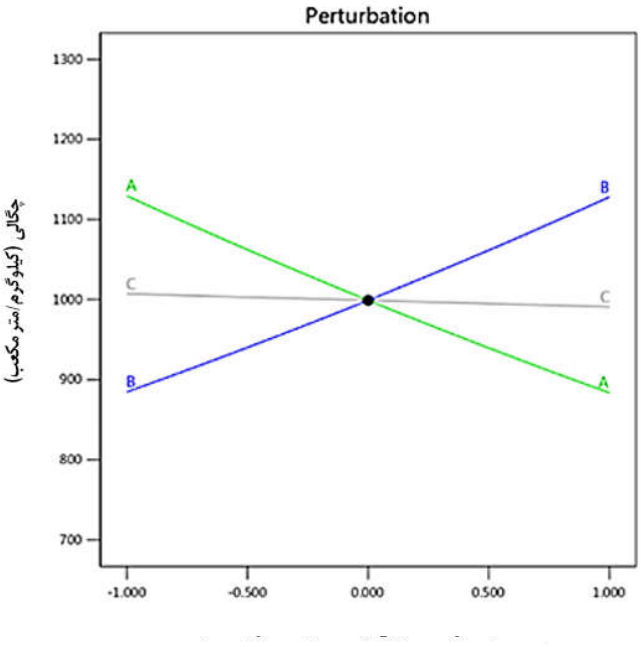
منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	ارزش F	ارزش P	
مدل (برهمکنش دو عاملی)	۶	۰/۳۳۰۲	۰/۰۵۵۰	۳۱/۳۶	<۰/۰۰۰۱	**
محتوای رطوبت	۱	۰/۱۵۰۸	۰/۱۵۰۸	۸۵/۹۳	<۰/۰۰۰۱	**
دمای قالب	۱	۰/۱۴۷۷	۰/۱۴۷۷	۸۴/۱۶	<۰/۰۰۰۱	**
فشار	۱	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۳۷۲۱	۰/۵۵۲۴	ns

محتوای رطوبت × دمای قالب	۱	۰/۰۲۲۹	۰/۰۲۲۹	۱۳/۰۲	۰/۰۰۳۲	**
محتوای رطوبت × فشار	۱	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۸۰	۴/۵۶	۰/۰۵۲۳	ns
دمای قالب × فشار	۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳	۰/۱۴۲۷	۰/۷۱۱۷	ns
باقیمانده	۱۳	۰/۰۲۲۸	۰/۰۰۱۸			
عدم برازش	۸	۰/۰۲۰۲	۰/۰۰۲۵	۴/۸۱	۰/۰۵۰۱	ns
خطای خالص	۵	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۵			
کل		۰/۳۵۳۰				

در شکل پرشیدگی (شکل ۳) می‌توان تأثیر هر یک از متغیرهای ورودی بر متغیر خروجی را مشاهده کرد. هر یک از متغیرهای ورودی به‌صورت کد شده، بین ۱ تا ۱− تعریف شده‌اند. شیب یا انحنای خط در شکل نشان‌دهنده حساس بودن پاسخ به عامل مورد نظر است. هر چه شیب‌خط تندتر باشد، پاسخ نسبت به متغیر حساس‌تر است و خط نسبتاً افقی، غیر حساس بودن پاسخ را به تغییر آن متغیر خاص نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، هر اندازه متغیر A (رطوبت) افزایش یابد مقدار چگالی کاهش و هر اندازه متغیر B (دما) افزایش پیدا می‌کند مقدار چگالی پلت ها افزایش می‌یابد. نمودار رفتار هر دو متغیر A و B خطی و خط صاف متغیر C (فشار)، تأثیر غیر معنی‌دار آن را بر چگالی به وضوح نشان می‌دهد. در این تحقیق، با افزایش رطوبت نمونه‌های پلت تولید شده می‌توان شاهد کاهش چگالی نهایی پلت بود. محتوای رطوبت بسیار بالا در زیست‌توده می‌تواند به‌عنوان یک روان‌کننده عمل کند که اجازه می‌دهد که باعث لغزش زنجیرها می‌شود و این امر پدیده‌های اتصال را محدود می‌کند [۱۲]. Stelte et al (2012) مشاهده کردند که پایداری پلت‌ها در دمای بالاتر از دمای گذار شیشه‌ای لیگنین افزایش یافت و پیشنهاد کردند که لایه‌های نازک موم در اطراف ساقه (کوتیکولا) در طی این فرآیند ذوب و جامد می‌شوند و به‌عنوان یک چسب بین فیبرهای کاه عمل می‌کنند [۲۵].

اتصال زیست‌توده ممکن است به دلیل همبستگی طبیعی بین ذرات و بار مکانیکی باشد که باعث تماس بین ذرات می‌شود [۲۶]. محققان نتیجه‌گیری کردند که اعمال دما و فشار بالاتر در حین فشرده‌سازی منجر به توسعه مواردی همچون الف) پل‌های جامد به دلیل واکنش شیمیایی، تبلور مواد حل‌شده، سخت شدن چسب و جامد شدن مواد ذوب‌شده، ب) نیروهای بین‌سطحی و فشارهای مویینگی به دلیل وجود آب یا مایعات دیگر، ج) پل‌های مایع غیرقابل حرکت به دلیل چسب‌های ویسکوز و لایه‌های جذب نازک، د) نیروهای الکترواستاتیک یا مغناطیسی به دلیل جذب بین ذرات و ه) قفل شدن مکانیکی الیاف و ذرات حجیم مسطح می‌شود [۲۷].

چگالی پلت پیت باگاس در شرایط بهینه که توسط نرم‌افزار تعیین شد در آزمایشگاه تولید و با ۲۰ تکرار در جدول ۷ آورده شده است.



شکل ۳– پرشیدگی (A: رطوبت، B : دما، C: فشار)

جدول ۷– چگالی نمونه بهینه پلت تعیین شده از روش سطح پاسخ

شماره پلت	ارتفاع (mm)	وزن (gr)	حجم (mm3)	چگالی (gr/cm3)
۱	۱۳	۰/۴۱	۳۶۸/۰۴	۱/۱۱
۲	۱۸	۰/۵۲	۵۰۹/۵۹	۱/۰۲
۳	۱۶	۰/۴۹	۴۵۲/۹۷	۱/۰۸
۴	۱۵	۰/۴۹	۴۲۴/۶۶	۱/۱۵
۵	۱۳	۰/۴۱	۳۶۸/۰۴	۱/۱۱
۶	۱۵	۰/۴۷	۴۲۴/۶۶	۱/۱۱
۷	۱۴	۰/۴۲	۳۹۶/۳۵	۱/۰۶
۸	۱۶/۵	۰/۵۳	۴۶۷/۱۲	۱/۱۳
۹	۱۵	۰/۴۸	۴۲۴/۶۶	۱/۱۳
۱۰	۱۴	۰/۴۵	۳۹۶/۳۵	۱/۱۴
۱۱	۱۴/۵	۰/۴۷	۴۱۰/۵۰	۱/۱۴
۱۲	۱۵/۵	۰/۴۹	۴۳۸/۸۱	۱/۱۲
۱۳	۱۷	۰/۵۲	۴۸۱/۲۸	۱/۰۸
۱۴	۱۵	۰/۴۷	۴۲۴/۶۶	۱/۱۱
۱۵	۱۴	۰/۴۵	۳۹۶/۳۵	۱/۱۴
۱۶	۱۵/۵	۰/۴۹	۴۳۸/۸۱	۱/۱۲
۱۷	۱۷	۰/۵۴	۴۸۱/۲۸	۱/۱۲
۱۸	۱۴	۰/۴۶	۳۹۶/۳۵	۱/۱۶
۱۹	۱۶	۰/۵۱	۴۵۲/۹۷	۱/۱۳
۲۰	۱۶	۰/۴۹	۴۵۲/۱۶	۱/۰۹
میانگین				۱/۱۰ ± ۳۲/۸۶

بررسی اثرات متقابل

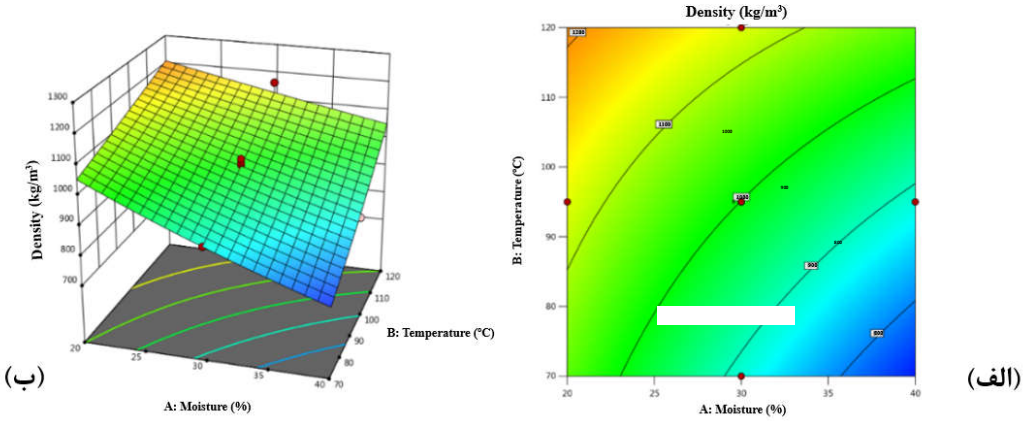
اثرات متقابل هنگامی رخ می‌دهند که میزان تأثیر یک متغیر، به مقدار متغیر دیگر بستگی داشته باشد. اثرات متقابل در تجزیه و تحلیل رگرسیون، تجزیه واریانس ANOVA و طراحی آزمایش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. اثر متقابل در واقع اثر هم‌زمان دو یا چند متغیر مستقل بر حداقل یک متغیر وابسته است که در آن اثر مشترک آن‌ها به طور معنی‌داری بیشتر (یا به طور معنی‌داری کمتر) از مجموع اجزا است. وجود اثرات متقابل در هر نوع تحقیق مهم است زیرا مشخص می‌شود که چگونه دو یا چند متغیر مستقل بر هم اثر می‌کنند تا بر متغیر وابسته تأثیر بگذارند. گنجاندن اثرات برهمکنش در یک مدل تحلیلی، ارائه و درک بهتری از رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل را برای محقق فراهم می‌کند.

در شکل ۴ نمودار دو بعدی و سه‌بعدی چگالی برحسب متغیرهای دما و رطوبت نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش رطوبت، چگالی پلت به‌تدریج کاهش می‌یابد در حالی که با افزایش دما چگالی پلت افزایش خواهد داشت و بیشترین مقدار چگالی در کمترین مقدار رطوبت و بالاترین سطح دما مشاهده می‌شود.

مقدار رطوبت زیست‌توده، زمانی که در حد مطلوب باشد، با تسهیل انتقال حرارت و کمک به نرم شدن حرارتی، مانند یک عامل پیونددهنده عمل می‌کند و از طریق نیروهای وان‌دروال باعث پیوند خودبخودی ذرات مجزا می‌شود، که این امر موجب افزایش سطح تماس بین ذرات می‌گردد. هر گونه افزایش بیشتر در مقدار رطوبت فراتر از مقدار بهینه، نیروهای بین‌ذره‌ای را کاهش می‌دهد و حتی مقدار بالاتر رطوبت باعث ایجاد مخلوطی دو فازی (فاز مایع و جامد) شده و منجر به از بین رفتن کامل نیروهای بین‌ذره‌ای می‌شود، که این امر به تورم و از هم پاشیدگی پلت‌ها می‌انجامد. رطوبت موجود در زیست‌توده به ژلاتینه شدن نشاسته، دناتوره شدن[8] پروتئین و فرآیندهای حلالیت در هنگام اکستروژن فیبر کمک می‌کند [28].

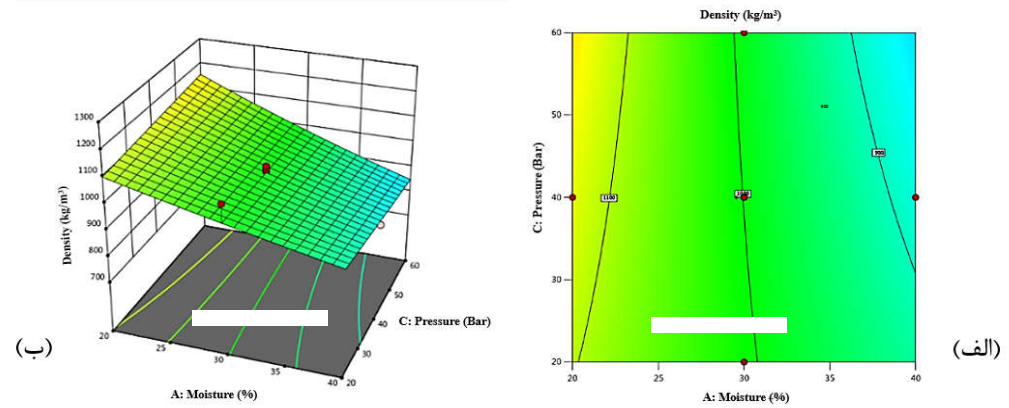
گرمای مورد نیاز برای تبخیر در مقدار رطوبت کم کاهش می‌یابد و بنابراین مقدار گرمای بیشتری برای فرآیند پلت‌سازی در دسترس خواهد بود. در مقابل، افزایش میزان رطوبت باعث افزایش تحرک مولکولی پلیمرهای آمورف (لیگنین و همی‌سلولز) و سایر مواد استخراجی با انتقال شیشه‌ای کم می‌شود، در نتیجه اصطکاک ساکن را کاهش می‌دهد که به نوبه خود بر کیفیت پلت و مصرف انرژی در هنگام پلت‌سازی تأثیر می‌گذارد [۱۳]. Mani et al (2006) گزارش دادند که با افزایش رطوبت از ۱۲ به ۱۵ درصد در نمونه‌های مختلف زیست‌توده (کاه گندم، کاه جو، بقایای ذرت و علف سوییچ)، چگالی پلت کاهش می‌یابد [۱۴]. Shaw et al (2009) نیز گزارش دادند که با افزایش رطوبت از ۹ به ۱۵ درصد (وزنی) در زیست‌توده چوب بید و کاه گندم، چگالی پلت کاهش یافته و پلت‌ها منبسط می‌شوند [۲۹]. Carone et al (2011) نیز تأثیر رطوبت با مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد را بر روی بقایای هرس درخت زیتون بررسی کردند [۳۰]. علاوه بر این، Puig- et al (2016) Arnavat تأثیر رطوبت را با استفاده از پرس پلت تک برای شش منبع زیست‌توده (فِسک، شبدر، سورگوم، تریتیکاله، میسکانتوس و بید) مطالعه کردند و گزارش دادند که رطوبت حدود ۱۰ درصد بهینه است [۳۱]. نتیجه‌گیری مشترک این بود که رطوبت، یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر کیفیت پلت است. شایان ذکر است که در تمامی این موارد، آزمایش‌ها با استفاده از یک واحد پلت‌ساز منفرد در آزمایشگاه انجام‌شده است. Tabil (1996) رفتار فشرده‌سازی پلت‌های شبدر را بررسی کرد و گزارش داد که رطوبت مواد آسیاب شده در دامنه ۸/۵ تا ۱۰ درصد (وزنی) برای پلت‌سازی بهینه است [۳۲]. Rhén et al (2005) مشاهده کردند که با افزایش دمای پلت‌سازی از ۲۶ به ۱۴۴ درجه سلسیوس و کاهش رطوبت زیست‌توده به ۶/۳ درصد در زمان شروع فشرده‌سازی، چگالی و مقاومت فشاری پلت‌های خاک‌اره درخت نروژی افزایش یافت [۳۳].

[8]- Denaturation

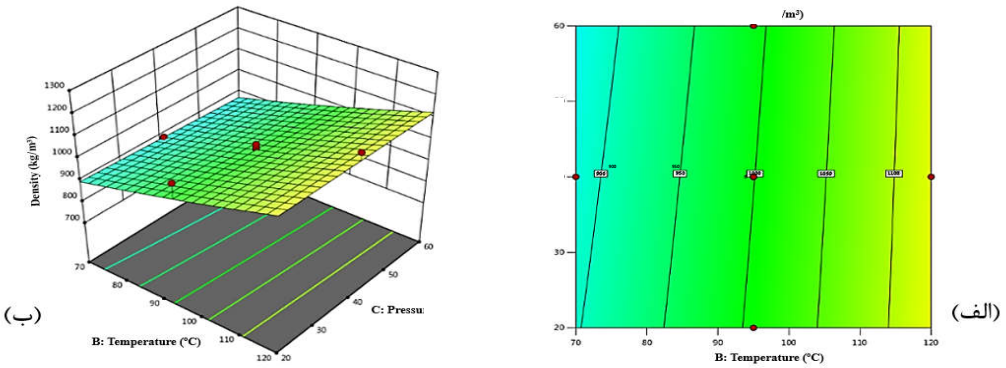


شکل ۴- چگالی پلت برحسب متغیرهای رطوبت و دما، الف) نمودار دو بعدی و ب) سه‌بعدی

در شکل ۵ چگالی برحسب متغیرهای رطوبت و فشار به‌صورت نمودارهای دو بعدی و سه‌بعدی آورده شده‌اند. با توجه به شکل، بیشترین مقدار چگالی در کمترین سطح رطوبتی می‌توان انتظار داشت که با افزایش فشار در کمترین سطح رطوبت (۲۰٪) چگالی نسبتاً افزایش خواهد افت. محققان دیگر مشاهده کردند که افزایش فشار پلت‌سازی، در اندازه ذرات کوچک‌تر (از ۲/۸ میلی‌متر به کمتر از ۰/۵ میلی‌متر)، به دلیل افزایش اصطکاک مؤثر است. آن‌ها گزارش دادند که افزایش فشار پلت‌سازی منجر به افزایش چگالی پلت‌ها می‌شود. بااین‌حال، افزایش بیشتر فشار تراکم (بیش از ۲۰۰ مگاپاسکال) تنها به افزایش جزئی چگالی پلت منجر شد [۳۴]. تحقیقات دیگر نشان داده‌اند که افزایش فشارها می‌تواند به بهبود کیفیت پلت‌ها کمک کند [۱۴، ۲۹ و ۳۲]، در حالی که طبق گفته Rhén et al (۲۰۰۵)، فشار فشرده‌سازی تأثیر اندک و تقریباً قابل‌توجهی بر چگالی ندارد [۳۳]. در این پژوهش یافته‌ها با نتایج Rhén et al (۲۰۰۵) مطابقت دارد و فشار، اثر معنی‌داری بر چگالی پلت نداشت. در شکل ۶ مقدار چگالی پلت برحسب متغیرهای دما و فشار نشان داده شده است، که بیشترین مقدار چگالی بر اساس این نمودار با افزایش دما همراه است. Carone et al (۲۰۱۱) گزارش کردند که دما به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر خواص مکانیکی پلت‌های تولید شده از بقایای درخت زیتون شناخته شد، و پس از آن، میزان رطوبت اولیه و اندازه ذرات ماده اولیه قرار دارند. به‌ویژه، دمای بالای فرآیند، رطوبت کم و اندازه ذرات کوچک منجر به تولید پلت‌های با کیفیت مطلوب شدند. تأثیر نیروی فشرده‌سازی نیز به‌طور قابل‌توجهی کم‌اهمیت بود [۳۰].



شکل ۵– چگالی پلت برحسب متغیرهای رطوبت و فشار، الف) نمودار دو بعدی و ب) سه‌بعدی



شکل ۶– چگالی پلت برحسب متغیرهای دما و فشار، الف) نمودار دو بعدی و ب) سه‌بعدی

بهینه‌سازی فرآیند پلت‌سازی پیت باگاس نیشکر

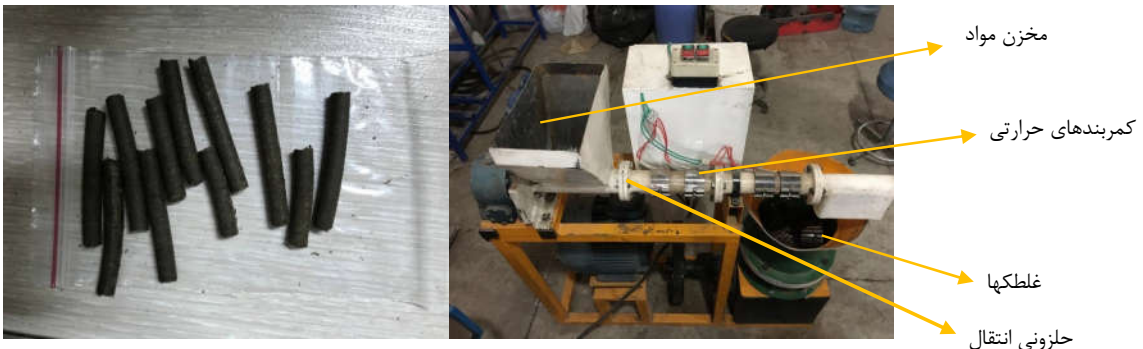
با استفاده از روش تابع مطلوبیت نرم‌افزار، ده راه حل برتر برای تعیین شرایط بهینه با مقدار شاخص مطلوبیت ۰/۸۴۱ برای داده‌های آزمایشی حاصله ارائه شد (جدول ۸). راه حل اول پیشنهادشده با استفاده از تابع مطلوبیت نشان داد که بهترین شرایط پلت‌سازی پیت باگاس نیشکر در محتوای رطوبت ۲۰ درصد وزنی و فشار تراکم ۸۹ مگاپاسکال (۲۰ بار) و دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به دست آمد. نرم‌افزار شرایط بهینه را بر اساس اهداف مورد نظر (حداقل سازی یا حداکثر سازی) پاسخ موردبررسی، تعیین کرد. در این پژوهش، شرایط بهینه با در نظر گرفتن حداکثر چگالی پلت تعیین شد. متغیرهای مستقل (محتوای رطوبت، دما و فشار تراکم) در محدوده In-range قرار گرفتند. در واقع تعیین شرایط بهینه با توجه به هدف اصلی پژوهش بر مبنای حداکثر چگالی پلت و بالا نگه‌داشتن شاخص مطلوبیت انجام شد. تحت این شرایط در محتوای رطوبت ۲۰ درصد وزنی و فشار تراکم ۸۹ مگاپاسکال و دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس حداکثر چگالی پلت ۱۱۷۴/۴۷ گرم بر سانتیمترمکعب با تابع مطلوبیت ۰/۸۴۱ پیشنهاد شد.

جدول ۸ – نقاط بهینه‌سازی برای ۱۰ راه حل برتر پاسخ پلت سازی پیت باگاس نیشکر با روش CCD-RSM

شماره	رطوبت (٪)	دما (°C)	فشار (MPa)	چگالی (gr/cm3)	خطای استاندارد	مطلوبیت	ملاحظه
۱	۲۰/۰۰۰	۱۲۰/۰۰۰	۸۹/۰۰۰	۱۱۷۴/۴۷۰	۰/۰۳۶	۰/۸۴۱	انتخاب‌شده
۲	۲۰/۰۰۰	۱۲۰/۰۰۰	۸۹/۵۲۹	۱۱۷۴/۷۱۷	۰/۰۳۶	۰/۸۳۹	
۳	۲۰/۰۸۰	۱۲۰/۰۰۰	۸۹/۰۰۰	۱۱۷۴/۱۱۷	۰/۰۳۶	۰/۸۳۸	
۴	۲۰/۰۰۲	۱۱۹/۷۱۸	۸۹/۰۰۰	۱۱۷۳/۶۳۲	۰/۰۳۵	۰/۸۳۶	
۵	۲۰/۰۰۰	۱۲۰/۰۰۰	۹۰/۴۱۷	۱۱۷۵/۰۵۸	۰/۰۳۵	۰/۸۳۶	
۶	۲۰/۱۷۵	۱۲۰/۰۰۰	۸۹/۰۱۳	۱۱۷۳/۶۹۹	۰/۰۳۵	۰/۸۳۴	
۷	۲۰/۰۰۰	۱۲۰/۰۰۰	۹۱/۳۰۱	۱۱۷۵/۳۵۵	۰/۰۳۵	۰/۸۳۳	
۸	۲۰/۴۵۶	۱۲۰/۰۰۰	۸۹/۰۰۰	۱۱۷۲/۴۵۱	۰/۰۳۵	۰/۸۲۴	
۹	۲۰/۰۰۰	۱۲۰/۰۰۰	۹۴/۱۸۷	۱۱۷۶/۵۱۱	۰/۰۳۵	۰/۸۲۴	
۱۰	۲۰/۵۷۲	۱۲۰/۰۰۰	۸۹/۰۰۰	۱۱۷۱/۹۳۸	۰/۰۳۵	۰/۸۲۰	

تولید بهینه پلت در مقیاس بزرگ

هدف دیگر تحقیق این بود که بتوان از پارامترهای بهینه آزمایشگاهی برای تولید پلت در مقیاس بزرگ‌تر استفاده و مقادیر زیادی پلت از این نمونه تولید کرد. به همین منظور حدود ۵ کیلوگرم از نمونه در سطح ۲۰–۲۵٪ مرطوب شد و از دستگاه پلت‌ساز با ظرفیت ۱۰۰ کیلوگرم بر ساعت برای تولید پلت بیشتر استفاده شد (شکل ۷)، پلت‌ها تحت شرایط بهینه که در آزمایشگاه به‌دست‌آمده بود در دانشگاه تهران تولید شدند.



شکل ۷ – دستگاه قالب و غلطک (دای و رولر) موجود در پردیس ابوریحان و نمونه پلت تولید شده

به منظور ارزیابی استفاده بالقوه از زائدات سلولزی به‌عنوان منابع تجدیدپذیر که مقادیر قابل‌توجهی از آن‌ها سالانه بدون استفاده دفن یا سوزانده می‌شود، بررسی ویژگی‌های مؤثر آن‌ها برای تولید انرژی ضروری است. نتایج مربوط به آنالیز فیزیکی و شیمیایی نمونه پیت باگاس و نمونه بهینه پلت اندازه‌گیری و در جدول ۹ آورده شده است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زیست‌توده نقش مهمی در سوختن آن دارد. رطوبت و خاکستر به‌عنوان دو جزء مهم زیست‌توده مواد لیگنوسلولزی در فرآیندهای تولید انرژی حرارتی و یا تولید سوخت‌های زیستی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. افزایش چگالی حجمی زیست‌توده‌ها از ۰/۰۴ تا ۰/۲ به ۰/۶ تا ۱/۲ گرم بر سانتیمترمکعب با فشردن امکان پذیر است. (۲۰۱۷) Ghorbannezhad et al برای باگاس مغز زدایی نشده رطوبت ۹ درصد، مواد فرار ۷۵٪، خاکستر ۲/۵٪، ۱۳/۵٪، سلولز ۵۰/۵٪، همی‌سلولز ۲۴/۵٪ و لیگنین نامحلول ۲۳٪/۵ گزارش کردند [۳۵].

(۲۰۰۹) Sugumaran et al مقدار دانسیته حجمی باگاس نیشکر را حدود ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، و اجزای آن را شامل مواد فرار ۸۵/۰۶، خاکستر ۴/۳۳، کربن ثابت ۶/۶۶ گزارش دادند [۳۶]. آنالیز پیت باگاس و پلت آن (جدول ۹) نشان می‌دهد که پیت باگاس در مقایسه با پلت پیت باگاس، حاوی لیگنین نامحلول بیشتر و مواد استخراجی کمتر است. این امر نشان می‌دهد که در فرآیند فشرده‌سازی افزایش دما موجب جریان یافتن لیگنین موجود در دیواره سلولی و در نتیجه موجب چسبندگی ذرات به هم می‌شود. در این پژوهش، مقدار لیگنین قبل و بعد از فشرده‌سازی مشخص شد و کاهش مقدار لیگنین مشاهده شد. احتمالاً در حین فرآیند پلت‌سازی، لیگنین موجود در دیواره سلولی تحت تأثیر دما و فشار بالا نرم می‌شود. این نرم شدن لیگنین باعث می‌شود که لیگنین به‌عنوان یک عامل چسبنده عمل کرده و ذرات زیست‌توده را به هم متصل کند، که به شکل‌گیری و افزایش استحکام پلت‌ها کمک می‌کند. همچنین با افزایش دما مقاومت ذرات در برابر بار کاهش یافته و در نتیجه موجب افزایش چگالی می‌شود. کاهش مواد فرار (در نمونه بهینه پلت) بر اثر افزایش دما، نشان دهنده افزایش روند خارج شدن ترکیبات فرار، محصولات گازی و هیدروکربن‌هایی با وزن مولکولی کم می‌باشد. گذار شیشه‌ای لیگنین، جریان و سخت شدن بعدی آن، به بهبود کیفیت پلت‌ها منجر می‌شود. انتظار می‌رود که در دماهای بالا، لیگنین موجود در زیست‌توده نرم شده و به‌عنوان عامل چسبنده عمل کند. میزان بالاتر لیگنین در زیست‌توده باعث تولید پلت‌های با دوام‌تر می‌شود زیرا لیگنین به‌عنوان چسب عمل می‌کند. بااین‌حال، رابطه‌ای خطی میان محتوای لیگنین و دوام پلت‌ها وجود ندارد [۱۳]. علاوه بر این، هیدروکربن‌های با وزن مولکولی کم مانند روغن‌ها، واکس‌ها و سایر مواد استخراجی، اصطکاک دیواره (μ) را کاهش می‌دهند و در نتیجه فشار پلت‌سازی (PY) را نیز کم می‌کنند، زیرا حضور این مواد بر روی سطح پلت در دماهای بالا افزایش می‌یابد [۳۱].

کیفیت زیست‌توده فشرده‌شده تولید شده تحت تأثیر متغیرهای فرآیند (دمای قالب، فشار و هندسه)، متغیرهای زیست‌توده (محتوای رطوبت، اندازه و شکل ذرات) و ترکیب زیست‌توده (پروتئین، چربی، سلولز، همی سلولزها و لیگنین) قرار می‌گیرد. ترکیبات شیمیایی زیست‌توده که

در فرآیند فشرده‌سازی نقش فعالی دارد، شامل رطوبت، پروتئین، چربی، موم[9] و لیگنین است. گرمای اصطکاکی تولید شده در پرس مکانیکی به دلیل فشرده‌سازی و اکستروژن به فعال شدن بسیاری از اجزای زیست‌توده کمک می‌کند. برای برخی از سیستم‌های فشرده‌سازی، مانند اکسترودر پیچی، گرمای خارجی نیز تأمین می‌شود. اجزای مختلف زیست‌توده در اثر اعمال فشار و دما در حضور رطوبت به طور متفاوتی واکنش نشان می‌دهند [۱۲]. نجفی و همکاران مقادیر اندازه‌گیری شده مواد فرار، خاکستر، کربن ثابت و رطوبت برای کاه نیشکر[10]، باگاس نیشکر[11] و پیت باگاس نیشکر[12] (مشابه زیست‌توده در این پژوهش) گزارش کردند که این مقادیر برای پیت باگاس نیشکر به ترتیب ۷۷/۳۰٪، ۱۳٪/۹۰، ۸/۸ ٪ و ۳٪/۹۳ محاسبه شد [۳۷].

آگاهی از درصد خاکستر زیست‌توده این امکان را فراهم می‌کند که واکنش‌های خاکستر در سیستم‌های چند سوختی قابل پیش‌بینی شود، زیرا معمولاً پیشنهاد می‌شود که زیست‌توده به‌صورت ترکیبی با سایر سوخت‌ها سوزانده شود. کیفیت خاک، کوددهی، و شرایط آب و هوایی تأثیر قابل‌توجهی بر مقادیر کلسیم، پتاسیم، سدیم، کلر، و فسفر موجود در خاکستر پسماندهای کشاورزی دارند. خاکستر کاه غلات دارای مقادیر نسبتاً زیادی پتاسیم و کلر است، ساقه برنج (بیش از ۱۰٪) و باگاس نیز دارای مقدار زیادی سیلیس هستند. پتاسیم و سیلیس در پسماندهای کشاورزی، در دمای بین ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس، باعث ایجاد لایه‌ای سخت در کف دیگ بخار می‌شوند که ازیک‌طرف موجب کاهش ظرفیت انتقال حرارت و از طرف دیگر باعث خوردگی قطعات فلزی خواهد شد [۳۸].

چندین محقق گزارش کرده‌اند که در مورد مواد چوبی (مانند چوب راش)، در اثر نرم شدن لیگنین و انتشار بین ذرات چوب مجاور، مناطقی از پل‌های جامد مشاهده‌شده است [۲۵ و ۳۹].

تامالورو در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که پیوند بین ذرات عمدتاً از طریق پل‌های جامد ایجاد می‌شود. این پل‌های جامد توسط چسب‌های طبیعی مانند لیگنین، پروتئین‌ها و نشاسته در دماهای مناسب فرآیند و میزان رطوبت تشکیل می‌شوند [۴۰].

---

[9]- Wax

[10] - Sugarcane straw (SCS)

[11] - Sugarcane bagasse (SCB)

[12] - Sugarcane bagasse pith (SBP)

جدول ۹– ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پیت باگاس نیشکر و پلت در شرایط بهینه

ویژگی	پیت باگاس	پلت
رطوبت (٪)	۵/۱۱ ± ۰/۱۸	۷/۷۵ ± ۰/۳۸
مواد فرار(٪)	۷۲/۶۰ ± ۰/۶۲	۶۵/۳۹ ± ۱/۰۴
خاکستر(٪)	۱۱/۸۶ ± ۰/۳۹	۱۱/۱۵ ± ۰/۳۵
کربن ثابت	۹/۶۳ ± ۰/۵۳	۱۶/۴۳ ± ۰/۰۸
نسبت سوخت (نسبت کربن ثابت به مواد فرار)	۰/۱۳ ± ۰/۰۰	۰/۲۵ ± ۰/۰۲
ارزش حرارتی (MJ/kg)	۱۷/۱۰ ± ۰/۰۱	۱۷/۱۸ ± ۰/۲۵
گلوکز(٪)	۴۳/۱۷ ± ۰/۸۵	۵۶/۵۳ ± ۰/۳۳
زایلوز(٪)	۲۷/۰۹ ± ۰/۲۶	۳۱/۹۵ ± ۱/۳۹
آرابینوز (٪)	۱/۷۴ ± ۰/۱۱	۱/۹۲ ± ۰/۰۷
لیگنین نامحلول (٪)	۲۷/۹۹ ± ۰/۴۴	۲۳/۰۸ ± ۰/۳۶
لیگنین محلول (٪)	۱/۳۵ ± ۰/۰۹	۱/۴۴ ± ۰/۰۰۹
مواد استخراجی (٪)	۵/۳۳ ± ۰/۶۶	۵/۴۷ ± ۰/۵۷
چگالی* (gr/cm3)		۱/۱۰ ± ۳۲/۸۶

*چگالی میانگین ۲۰ نمونه است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی پارامترهای مؤثر در تولید پلت سوختی از پیت باگاس با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیکی آزمایشگاهی نشان داد که رطوبت و دمای قالب پلت بیشترین تأثیر را بر چگالی پلت‌های تولید شده بدون استفاده از بایندر دارد. با کاهش رطوبت تا ۲۰ درصد و افزایش دما تا ۱۲۰ درجه سلسیوس بیشترین مقدار چگالی مشاهده شد. از طرفی بعد از فشرده‌سازی پیت‌باگاس به منظور تولید پلت سوختی با ارزش‌افزوده بالا، میزان مواد فرار ۹/۹۳٪ و مقدار خاکستر ۲۱/۲۵٪ کاهش یافت در حالی که مقدار کربن ثابت ۲۷/۴۵٪ و ارزش حرارتی حدود ۰/۵۰٪ (به‌صورت مستقیم با بمب کالری متر اندازه‌گیری شد) افزایش یافت. مقدار لیگنین بعد از متراکم شدن حدود ۱۷/۵۴٪ کاهش یافت. احتمالاً کاهش لیگنین بعد از پلت‌سازی به دلیل تغییرات فیزیکی و شیمیایی است که در طول فرآیند پلت‌سازی رخ می‌دهد. در طی این فرآیند، حرارت و فشار بالا باعث نرم شدن و حتی شکستن پیوندهای لیگنین می‌شود. لیگنین که به‌عنوان یک پلیمر پیچیده عمل می‌کند، در دماهای بالا و تحت فشار، دچار تخریب حرارتی و شیمیایی می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش مقدار آن شود.

علاوه بر این، در طول پلت‌سازی، بخش‌هایی از لیگنین ممکن است به‌عنوان یک عامل چسبنده طبیعی عمل کرده و به سطح پلت‌ها منتقل شود یا به دلیل واکنش‌های شیمیایی با سایر اجزای زیست‌توده، تغییر ساختار داده و مقدار آن کاهش یابد. این تغییرات می‌توانند به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی پلت‌ها کمک کنند، اما به کاهش مقدار کلی لیگنین منجر می‌شوند.

منابع

[1] Galiwango, E, Rahman, N.S.A, Al-Marzouqi, A.H, Abu-Omar, M.M. and Khaleel, A.A, 2018. Klason method: an effective method for isolation of lignin fractions from date palm biomass waste. Chemical and Process Engineering Research, 57, pp.46-58.

[2] Lotfabadi, A.K., Hajinezhad, A., Kasaeian, A. and Moosavian, S.F., 2022. Energetic, economic, environmental and climatic analysis of a solar combisystem for different consumption usages with PSI method ranking. Renewable Energy, 197, pp.178-196.

[3] Mohammadi, F., Hajinezhad, A., Kasaeian, A. and Moosavian, S.F., 2022. Effect of dust accumulation on performance of the photovoltaic panels in different climate zones. International Journal of Sustainable Energy and Environmental Research, 11(1), pp.43-56.

[4] Rokni, E., Ren, X., Panahi, A. and Levendis, Y.A., 2018. Emissions of SO2, NOx, CO2, and HCl from

Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. Fuel, 211, pp.363-374.

[5] Zhang, Z., Hu, X., Zhang, L., Yang, Y., Li, Q., Fan, H., Liu, Q., Wei, T. and Li, C.Z., 2019. Steam reforming of guaiacol over Ni/Al2O3 and Ni/SBA-15: Impacts of support on catalytic behaviors of nickel and properties of coke. Fuel Processing Technology, 191, pp.138-151.

[6] Schwarzböck, T., Aschenbrenner, P., Rechberger, H., Brandstätter, C. and Fellner, J., 2016. Effects of sample preparation on the accuracy of biomass content determination for refuse-derived fuels. Fuel Processing Technology, 153, pp.101-110.

[7] Roy, P., 2005. Characterization of biomass as a feedstock of alternate fuels. University of Guelph, Ontario, Canada.

[8] Hamedani, S.R., Colantoni, A., Gallucci, F., Salerno, M., Silvestri, C. and Villarini, M., 2019. Comparative energy and environmental analysis of agro-pellet production from orchard woody biomass. Biomass and bioenergy, 129, p.105334.

[9] Zafari, A. and Kianmehr, M.H., 2012. Effect of temperature, pressure and moisture content on durability of cattle manure pellet in open-end die method. Journal of Agricultural Science, 4(5), pp.203-208.

[10] Arromdee, P. and Ninduangdee, P., 2023. Combustion characteristics of pelletized-biomass fuels: a thermogravimetric analysis and combustion study in a fluidized-bed combustor. Energy, Ecology and Environment, 8(1), pp.69-88.

[11] Tumuluru, J.S., 2018. Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. Carbon Resources Conversion, 1(1), pp.44-54.

[12] Pradhan, P., Mahajani, S.M. and Arora, A., 2018. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. Fuel processing technology, 181, pp.215-232.

[13] Mani, S., Tabil, L.G. and Sokhansanj, S., 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. Biomass and bioenergy, 30(7), pp.648-654.

[14] Demirbas, A., 2010. Biorefineries for biomass upgrading facility. Speringer-verlag, Germany.

[15] Bauen, A., Woods, J. and Hailes, R., 2004. Bioelectricity vision: Achieving 15% of electricity from biomass in OECD countries by 2020. A Report to WWF.

[16] Veza, I., Spraggon, M., Fattah, I.R. and Idris, M., 2023. Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition. Results in Engineering, 18, p.101213.

[17] Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D. and Crocker, D.L.A.P., 2008. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory analytical procedure, 1617(1), pp.1-16.

[18] Drews, A.W., 1998. Manual on hydrocarbon analysis. ASTM International.

[19] ASTM, E., 2013. 1534-93. Standard Test Method for Determination of Ash Content of Particulate Wood Fuels–ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.

[20] Amdoun, R., Khelifi, L., Khelifi-Slaoui, M., Amroune, S., Asch, M., Assaf-Ducrocq, C. and Gontier, E., 2018. The desirability optimization methodology; a tool to predict two antagonist responses in biotechnological systems: case of biomass growth and hyoscyamine content in elicited datura starmonium hairy roots. Iranian Journal of Biotechnology, 16(1), p.e1339.

[21] Khanian-Najaf-Abadi, M., Ghobadian, B., Dehghani-Soufi, M. and Heydari, A., 2023. Experimental evaluation of simultaneous variations in biodiesel yield and color using choline hydroxide catalyst in an ultrasonic reactor. Journal of Cleaner Production, 382, p.134767.

[22] Mourabet, M., El Rhilassi, A., El Boujaady, H., Bennani-Ziatni, M. and Taitai, A., 2017. Use of response surface methodology for optimization of fluoride adsorption in an aqueous solution by Brushite. Arabian Journal of Chemistry, 10, pp.S3292-S3302.

[23] Harrington, E.C., 1965. The desirability function. Industrial quality control, 21(10), pp.494-498.

[24] Derringer, G. and Suich, R., 1980. Simultaneous optimization of several response variables. Journal of quality technology, 12(4), pp.214-219.

[25] Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B. and Sanadi, A.R., 2012. Fuel pellets from wheat straw: The effect of lignin glass transition and surface waxes on pelletizing properties. Bioenergy research, 5, pp.450-458.

[26] Tabil, L., Sokhansanj, S. and Tyler, R.T., 1997. Performance of different binders during alfalfa pelleting. Canadian Agricultural Engineering, 39(1), pp.17-23.

[27] Tumuluru, J.S., Wright, C.T., Hess, J.R. and Kenney, K.L., 2011. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 5(6), pp.683-707.

[28] Ungureanu, N., Vladut, V., Voicu, G., Dinca, M.N. and Zabava, B.S., 2018. Influence of biomass moisture content on pellet properties–review. Engineering for rural development, 17, pp.1876-1883.

[29] Shaw, M.D., Karunakaran, C. and Tabil, L.G., 2009. Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds. Biosystems Engineering, 103(2), pp.198-207.

[30] 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), pp.402-410.

[31] 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 feedstocks. Fuel processing technology, 142, pp.27-33.

[32] Tabil, L.G., 1996. Binding and pelleting characteristics of alfalfa (Doctoral dissertation, University of Saskatchewan).

[33] Rhén, C., Gref, R., Sjöström, M. and Wästerlund, I., 2005. Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. Fuel Processing Technology, 87(1), pp.11-16.

[34] 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), pp.3285-3290.

[35] Ghorbannezhad, P., Dehghani Firouzabadi, M., Ghasemian, A., De Wild, P. and Heeres, H.J., 2018. Biorefinery of bagasse and it's pith by fast pyrolysis. Journal of Wood and Forest Science and Technology, 24(4), pp.27-40. (In Persian)

[36] Sugumaran, P. and Seshadri, S., 2009. Evaluation of selected biomass for charcoal production.

[37] Najafi, H., Sani, A.G. and Sobati, M.A., 2023. A comparative evaluation on the physicochemical properties of sugarcane residues for thermal conversion processes. Industrial Crops and Products, 202, p.117112.

[38] Mahdavi, S., 2020. Comparison of non-woody biomass properties for energy generation. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 10(4), pp.617-628. (In Persian)

[39] Samuelsson, R., Larsson, S.H., Thyrel, M. and Lestander, T.A., 2012. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. Applied energy, 99, pp.109-115.

[40] Tumuluru, J.S., 2014. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. Biosystems engineering, 119, pp.44-57.