



## Effect of ozone pretreatment and densification parameters on the physical, mechanical and fuel characteristics of bagasse briquettes

Hussain Shafaie<sup>1</sup> | Ali Mashaallah Kermani<sup>2✉</sup> | Ehsan Sarlaki<sup>3</sup> | Mohammad Hossein Kianmehr<sup>4</sup>

1. Department of Agrotechnology, College of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran. E-mail: [hossein.shafaie73@gmail.com](mailto:hossein.shafaie73@gmail.com)
2. Corresponding author, Department of Agrotechnology, College of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran. E-mail: [amkermani@ut.ac.ir](mailto:amkermani@ut.ac.ir)
3. Department of Agrotechnology, College of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran. E-mail: [e.sarlaki685@ut.ac.ir](mailto:e.sarlaki685@ut.ac.ir)
4. Department of Agrotechnology, College of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran. E-mail: [kianmehr@ut.ac.ir](mailto:kianmehr@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Aug. 11, 2024

**Revised:** Sep. 30, 2024

**Accepted:** Oct. 14, 2024

**Published online:** Spring 2024

**Keywords:**

*Calorific value,  
Sugarcane bagasse,  
Fuel briquette,  
Ozonation pretreatment,  
Toughness.*

### ABSTRACT

Conversion of biomass resources such as agricultural residues can enhance the energy supply and improve the diversify of the energy portfolio. One of the primary methods for preparing solid fuel for energy uses involves densifying shredded residues, a process known as briquetting. This study investigated the modeling of ozone pretreatment and its impacts on the production of bagasse fuel briquettes, utilizing a hydraulic press and employing response surface methodology (RSM). The effect of independent variables including the particle size of bagasse ( $\leq 1.18$ , 1.18-2.36, and 2.36-4.75 mm), briquetting temperature (280, 320, and 360 °C), moisture content of bagasse during ozonation (20, 35, and 50%), and ozonation time (15, 25, and 35 min.) was evaluated on the physical, mechanical, and chemical properties of the briquettes. The results indicated that the moisture content of bagasse played a significant role in the ozonation pretreatment. Increasing the moisture content during the ozonation process to approximately 30% enhanced the toughness of the produced briquettes; however, further increasing it to 50% resulted in a decrease in toughness. The calorific value of the briquettes was calculated using validated experimental equations based on the results of proximate analysis. Findings revealed that ozone pretreatment boosts the calorific value of the briquettes compared to those without pretreatment. The optimal conditions for briquette production were identified as 15 minutes of ozonation, a bagasse particle size smaller than 1.18 mm, a moisture content of 33.448%, and a briquetting temperature of 280 °C. The optimum briquette density and toughness were found to be 982.310 kg/m<sup>3</sup> and 249.934 kPa, respectively. Overall, ozonation pretreatment significantly enhanced the properties of sugarcane bagasse fuel briquettes.

Cite this article: Shafaie, H., Kermani, A. M., Sarlaki, E., & Kianmehr, M. H. (2024). Effect of ozone pretreatment and densification parameters on the physical, mechanical and fuel characteristics of bagasse briquettes, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 55 (1), 71-92. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.380626.665561>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.380626.665561>

## اثر پیش تیمار ازن دهی و پارامترهای فشرده سازی بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و سوختی بریکت‌های باگاس

حسین شفاعی<sup>۱</sup> | علی ماشاءالله کرمانی<sup>۲</sup> | احسان سرلکی<sup>۳</sup> | محمد حسین کیان مهر<sup>۴</sup>

۱. گروه فنی کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، پاکدشت، ایران. رایانامه: [hossein.shafaei73@gmail.com](mailto:hossein.shafaei73@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه فنی کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، پاکدشت، ایران. رایانامه: [amkermani@ut.ac.ir](mailto:amkermani@ut.ac.ir)

۳. گروه فنی کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران. رایانامه: [s.sarlaki685@ut.ac.ir](mailto:s.sarlaki685@ut.ac.ir)

۴. گروه فنی کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران. رایانامه: [kianmehr@ut.ac.ir](mailto:kianmehr@ut.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۷/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۲۳

تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۳

### واژه‌های کلیدی:

ارزش حرارتی،

باگاس نیشکر،

بریکت سوختی،

پیش تیمار ازن دهی،

چقرمگی.

تبدیل منابع زیست توده مانند پسماندهای کشاورزی می‌تواند عرضه انرژی را افزایش داده و ترکیب انرژی را ارتقا دهد. یکی از روش‌های اصلی تهیه سوخت جامد برای اهداف انرژی، فشرده کردن بقایای خرد شده به شکل بریکت است. در این مطالعه مدل سازی و بهینه سازی اثر پیش تیمار ازن در تولید بریکت سوختی باگاس با استفاده از پرس هیدرولیکی به روش پاسخ سطح (RSM) انجام شد. اثر متغیرهای مستقل شامل اندازه ذرات باگاس (کوچک تر از ۱/۱۸، ۱/۱۸، ۲/۳۶-۱/۱۸ و ۴/۷۵-۲/۳۶ میلی متر)، دمای فرآیند بریکت سازی (۲۸۰، ۳۲۰ و ۳۶۰ درجه سلسیوس)، رطوبت باگاس در فرآیند ازن دهی (۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد) و مدت زمان ازن دهی (۱۵، ۲۵ و ۳۵ دقیقه) بر پاسخ‌های خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی بریکت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رطوبت ذرات باگاس نقش مؤثری در پیش تیمار ازن دهی داشت. با افزایش رطوبت تا حدود ۳۰ درصد، چقرمگی بریکت افزایش و با افزایش رطوبت تا ۵۰ درصد، چقرمگی کاهش یافت. ارزش حرارتی بریکت از طریق معادلات تجربی صحت گذاری شده با استفاده از آنالیز تقریبی محاسبه شد. یافته‌ها نشان داد که پیش تیمار ازن، ارزش حرارتی بریکت‌ها را در مقایسه با نمونه‌های بدون پیش تیمار افزایش می‌دهد. شرایط بهینه تولید بریکت در مدت زمان ازن دهی ۱۵ دقیقه، اندازه ذرات باگاس کوچک تر از ۱/۱۸ میلی متر، رطوبت باگاس ۳۳/۴۴۸ درصد و دمای قالب ۲۸۰ درجه سلسیوس تعیین شد. مقدار بهینه پاسخ‌های چگالی و چقرمگی بریکت به ترتیب برابر با ۹۸۲/۳۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲۴۹/۹۳۴ کیلوپاسکال بود. به طور کلی، پیش تیمار ازن دهی موجب بهبود ویژگی‌های بریکت سوختی باگاس نیشکر گردید.

استناد: شفاعی، حسین؛ کرمانی، علی ماشاءالله؛ سرلکی، احسان؛ کیان مهر، محمد حسین. (۱۴۰۳). اثر پیش تیمار ازن دهی و پارامترهای فشرده سازی بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و سوختی بریکت‌های باگاس، *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۵ (۱)، ۷۱-۹۲.



<https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.380626.665561>

© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.380626.665561>

## مقدمه

سوخت‌های فسیلی مانند فرآورده‌های نفتی، زغال‌سنگ و گاز طبیعی مهم‌ترین منابع انرژی هستند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، سوخت‌های تجدیدناپذیر مانند زغال‌سنگ (۲۷ درصد)، گاز طبیعی (۳۴ درصد) و نفت (۲۴ درصد) حدود ۶۶ درصد از کل مصرف انرژی جهان را تشکیل می‌دهند (Ali et al., 2024). با این وجود، به دلیل استفاده روزافزون از سوخت‌های فسیلی برای توسعه صنعتی، این امر با افزایش اثرات نامطلوب تغییرات اقلیم ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای مواجه شده است (He et al., 2024). کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال‌های آینده برای دستیابی به اهداف تعیین‌شده توسط اتحادیه اروپا تحت قرارداد سبز (۲۰۲۰) یک امر ضروری بوده و هدف آن افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی از ۱۸ درصد در سال ۲۰۱۸ به ۳۲ درصد در سال ۲۰۳۰ است (European Environment Agency, 2020). این موضوع انتقال منابع انرژی از سوخت‌های فسیلی به منابع انرژی تجدیدپذیر جایگزین را در پی داشته است (Sarlaki, & Hassan-Beygi, 2019). از میان منابع انرژی تجدیدپذیر، زیست‌توده که در حال حاضر نزدیک به ۱۴ درصد از مصرف انرژی جهان را به خود اختصاص داده است (Ali et al., 2024)، دارای پتانسیل مناسبی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی می‌باشد و به یک منبع مهم انرژی تجدیدپذیر تبدیل شده است (Brandt et al., 2013). بنابراین استفاده از زیست‌توده، به‌عنوان منبع انرژی، مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی را به ارمغان می‌آورد (Kheiralipour et al., 2024).

در ایران مقادیر عظیم پسماندهای زراعی و صنایع فرآوری، زمینه‌های گسترده‌ای را در راستای تحقیق و توسعه کاربرد سوخت‌های زیستی فراهم کرده است. یکی از این منابع زیست‌توده باگاس نیشکر است که محصول جانبی صنایع قند است. باگاس نیشکر در واقع تفاله نیشکر است که پس از استحصال قند از آن به شکل توده فیبر خشک باقی می‌ماند. میزان بسیار زیاد بقایای باگاس علاوه بر اشغال فضای بسیار زیاد، هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی نامطلوب از دفع و سوزاندن آنها ایجاد کرده است (سرلکی و همکاران، ۱۴۰۰). اما این ماده ارزشمند کاربردهای فراوانی دارد. قسمت اعظم این پسماند فیبری خشک و محکم را سلولز، پنتوزان و لیگنین تشکیل می‌دهد. از باگاس می‌توان به‌عنوان سوخت استفاده کرد، یا از طریق فرآوری به خمیر کاغذ، خوراک دام، اتانول و فورفورال جهت مصارف پزشکی و داروسازی و چندین فرآورده دیگر تبدیل نمود. ارزیابی اقتصادی تولید انرژی از باگاس به‌جای گاز طبیعی در کارخانه شکر کارون نتایج نشان داد که از ۲۷۰ هزار تن باگاس مازاد، قابلیت تأمین ۱۴/۱۵ درصد کل انرژی کارخانه و کاهش ۲۹ هزار تن آلاینده در سال را وجود دارد (حسنکی و همکاران، ۱۳۹۸). در کشورهای تولیدکننده شکر در کارخانه‌های نیشکر حجم بسیار زیاد باگاس تولید می‌شود که به دلیل انرژی گرمایی که تولید می‌کند از آن به‌عنوان منبع سوخت در کارخانه استفاده می‌شود. باگاس نیشکر به‌عنوان خوراک دام نیز استفاده می‌شود که باعث تولید گازهای گلخانه‌ای مانند اتانول می‌شود. از این‌رو، تبدیل باگاس به محصولات سوختی سازگار با محیط زیست با فناوری‌های نوین ضرورت دارد. در مورد زیست‌توده، اغلب فاصله دور بین محل اصلی زیست‌توده و محل استفاده از آن، به دلیل محتوای رطوبت بالا، شکل نامنظم و چگالی حجمی پائین (۲۰۰-۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب) منجر به هزینه‌های حمل و نقل زیاد می‌شود (Poddar et al., 2014). همچنین احتراق مستقیم زیست‌توده با چالش‌های رطوبت زیاد، چگالی حجمی کم و تولید انرژی اندک همراه است. این مشکلات مربوط به زیست‌توده می‌تواند از طریق فشرده‌سازی کاهش یابد، فرآیندی که قادر به تولید یک سوخت جامد و متراکم با خواص یکنواخت می‌باشد (Ali et al., 2024).

امروزه، فشرده‌سازی زیست‌توده‌ها، ویژگی‌های سوختی و حمل و نقل سوخت‌های زیستی جامد را بهبود بخشیده است. در میان روش‌های فشرده‌سازی، پلت‌سازی و بریکت‌سازی بیش‌ترین کاربرد را در صنعت سوخت‌های زیستی جامد فراهم کرده‌اند (He et al., 2024). این فرآیندها مبتنی بر فشرده‌سازی مواد اولیه حجیم برای تولید بریکت و پلت با تراکم انرژی بالا هستند. در واقع این فرآیند اجازه می‌دهد تا انرژی زیادی از ضایعات یا بقایای چوب حاصل شود. بنابراین به دلیل چگالی انرژی بالا و سهولت در مدیریت و حمل و نقل، بریکت زیست‌توده‌ها به یک سوخت زیستی برتر در مقایسه با زیست‌توده اولیه آن‌ها تبدیل شده‌اند (He et al., 2024). علاوه بر آن، تولید بریکت‌های سوختی یک روش مستقیم و آسان به‌منظور استفاده از منابع انرژی زیستی می‌باشد زیرا فقط نیاز به عملیات مکانیکی داشته و پیچیدگی‌های روش‌های ترموشیمیایی و بیوشیمیایی را ندارد. بنابراین بریکت‌ها از معروف‌ترین محصولات متراکم‌شده برای اهداف سوختی می‌باشند (Wang et al., 2018).

اصل تراکم، تشکیل نیروهای بین مولکولی است که در اثر نزدیک شدن اتصال ذرات به یکدیگر ایجاد می‌شود. در واقع، فرآیند بریکت‌سازی با اعمال نیروی مکانیکی و در حضور دما به وسیله تشکیل پیوندهای بین ذره‌ای انجام می‌شود. روش‌های مختلفی برای تبدیل زیست‌توده به حامل‌های انرژی کارآمد وجود دارد که به فرآیندهای ترموشیمیایی، بیوشیمیایی و فیزیکی - مکانیکی طبقه‌بندی می‌شوند. در

فرایند بریکت‌سازی عوامل اتصال‌دهنده طبیعی مانند لیگنین، پروتئین و نشاسته نقش مهمی داشته و با توجه به اینکه سازوکار احتمالی اتصال ذرات، ایجاد پل‌های جامد است، با اعمال فشار و دماهای زیاد از طریق نفوذ مولکول‌ها از ذره‌ای به ذره دیگر در نقاط اتصال، این پل‌های جامد گسترش می‌یابند. نقش رطوبت زیست‌توده نیز در ژلاتینه شدن نشاسته، کاهش دمای انتقال شیشه‌ای لیگنین و تشکیل پل‌های مایع بین ذرات از طریق نیروهای موئینگی و کشش سطحی اهمیت دارد (Soleimani, 2017).

استفاده از زیست‌توده‌های لیگنوسولوزی برای تولید سوخت‌های زیستی جامد معمولاً نیاز به پیش‌تیمار دارد تا تبدیل زیست‌توده به سوخت باعث بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و پارامترهای سوختی بریکت گردد. زیست‌توده‌های لیگنوسولوزی پس از فرآیند پیش‌تیمار، دارای ساختار همگن‌تری می‌شوند و قابلیت اتصال ذرات بالاتری پیدا می‌کنند (He et al., 2024). قبل از فشرده‌سازی، زیست‌توده‌های لیگنوسولوزی باید برای آزادسازی چسب‌های طبیعی خود (نشاسته، کربوهیدرات‌های محلول در آب، پروتئین، موم‌ها، مواد استخراجی و لیگنین) پیش‌تیمار شوند. لیگنین در اکثر زیست‌توده‌های لیگنوسولوزی به دلیل حساسیت کم‌تر به دما و دمای ذوب ۱۴۰ درجه سلسیوس، باعث ایجاد پیوند ذرات در حین فشرده‌سازی می‌شود (Ghorbani et al., 2023). لیگنین در شبکه لیگنوسولوز در بین سلولز و همی‌سلولز قرار دارد، بنابراین ظرفیت اتصال آن محدود است. روش‌های مختلف پیش‌تیمار زیست‌توده می‌توانند به آزاد شدن پیوندهای لیگنین و کاهش دما و فشار مورد نیاز در فرآیندهای فشرده‌سازی کمک کنند. در طول پیش‌تیمار، زیست‌توده‌ها دستخوش تغییرات ساختاری می‌شوند و اصطکاک خارجی بین زیست‌توده و کانال‌های فشرده‌سازی کاهش می‌یابد (Travaini et al., 2016). روش‌های پیش‌تیمار مختلفی قبل از فشرده‌سازی زیست‌توده، از جمله انفجار بخار (Tanase-Opedal et al., 2024)، انفجار فیبر آمونیاک (Sundaram et al., 2016)، پیش‌تیمار هیدروترمال (Xia et al., 2019)، پیش‌تیمار برشته‌سازی (Granado et al., 2023)، پیش‌تیمار با حلال‌های یوتکتیک عمیق (Liu et al., 2024)، پیش‌تیمار با فراصوت (Li et al., 2024)، و پیش‌تیمار با ریزموج (Li et al., 2018) استفاده شده است. به‌طور ویژه، روش‌های انفجار بخار و انفجار فیبر آمونیاک برای تولید پلت‌ها و بریکت‌های سوختی از زیست‌توده‌های لیگنوسولوزی کاربرد بیشتری یافته‌اند (Tanase-Opedal et al., 2024). این روش‌ها می‌توانند به فعال‌سازی چسب‌های طبیعی در زیست‌توده، تغییر ساختار نشاسته و پروتئین (ژلاتینه شدن نشاسته و نرم‌سازی پروتئین) و بهبود چگالی ظاهری، دوام و آب‌گریزی پلت‌ها کمک کنند (Mohammadi et al., 2024). با این حال، در این روش‌ها دماهای بیشتر از دمای انتقال شیشه‌ای لیگنین ( $T_g > 170$  درجه سلسیوس) برای استخراج لیگنین از دیواره سلولی و فشرده‌سازی زیست‌توده استفاده شده است. به‌طور کلی، فشرده‌سازی زیست‌توده در دمای انتقال شیشه‌ای لیگنین برای کاهش مصرف انرژی و تولید پلت و بریکت با کیفیت بالا توصیه شده است (Stelte et al., 2012). علاوه بر این، در روش‌های مذکور، ایجاد ترکیبات سمی در فرآیند پیش‌تیمار، از بین رفتن بخش زیادی از کربوهیدرات زیست‌توده، نیاز به قلیا یا اسید در فرآیند پیش‌تیمار و همچنین نیاز به سیستم‌های مجهز و کنترل‌شده برای تأمین دما و فشار بالا که هزینه‌ها و مصرف انرژی فرآیند را بالا می‌برد، از جمله محدودیت‌هایی است که بر بلوغ فناوری و تجاری‌شدن این روش‌های پیش‌تیمار تأثیر بسیار زیادی می‌گذارد.

پیش‌تیمار ازن می‌تواند مشکلات مربوط به روش‌های مذکور را برطرف کند. ازناسیون تحت دما و فشار محیط انجام می‌شود و می‌تواند به‌طور قابل توجهی لیگنین و مواد استخراجی را در زیست‌توده تجزیه کند (Ghorbani et al., 2022). ازن، در میان اکسیدکننده‌های شیمیایی نسبت به ترکیبات حاوی پیوندهای دوگانه کربن و گروه‌های عاملی با تراکم الکترونی زیاد مانند لیگنین، واکنش‌پذیری زیادی نشان می‌دهد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۸). تفاوت در ویژگی‌های الکترونگاتیوی بین لیگنین و کربوهیدرات‌ها موجب فرآیند انتخابی تخریب لیگنین توسط ازن می‌شود، زیرا ازن نسبت به لیگنین  $۱۰^6$  برابر سریع‌تر از کربوهیدرات‌ها واکنش می‌دهد (Maia & Colodette, 2003). همچنین ازناسیون از طریق تغییر موقعیت مکانی و جایجایی لیگنین‌ها، همی‌سلولزها و مواد استخراجی مانند واکنش‌های تجزیه شده در حین پیش‌تیمار زیست‌توده، منجر به کاهش اصطکاک ذرات زیست‌توده با قالب تراکم و در نتیجه کاهش مصرف انرژی در حین فرآیند فشرده‌سازی زیست‌توده‌ها می‌شود (Ghorbani et al., 2023). علاوه بر این، برای بریکت‌سازی زیست‌توده، نیازی به چسب‌های مصنوعی نیست (Travaini et al., 2016). لازم به ذکر است که استفاده از چسب‌های مصنوعی در فرآیندهای فشرده‌سازی زیست‌توده‌ها آلاینده‌های احتراق را افزایش می‌دهد (Zhang et al., 2018).

بر اساس مرور منابع علمی، تا به اکنون، پژوهشی در مورد بررسی تأثیر پیش‌تیمار ازن و پارامترهای فرآیندی بریکت‌سازی بر شاخص‌های فیزیکی، مکانیکی و حرارتی بریکت باگاس نیشکر وجود ندارد. هدف از این مطالعه بررسی اثر پیش‌تیمار ازن‌دهی و متغیرهای مختلف فرآیند بریکت‌سازی در راستای افزایش کیفیت بریکت و بررسی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی بریکت‌های سوختی و همچنین بدست آوردن شرایط بهینه فرآیند متراکم‌سازی شامل بیش‌ترین مقادیر چگالی و چقرمگی می‌باشد.

## پیشینه پژوهش

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه تولید بریکت‌های سوختی از زایدات کشاورزی صورت گرفته است که بسیاری از آن‌ها مرتبط با نوع ماده اولیه مختلف مورد استفاده، مواد اتصال دهنده<sup>۱</sup> به کار برده شده و همچنین در زمینه پیش تیمار مواد اولیه بوده است. در تحقیقی اثر فشار بریکت‌سازی و ترکیب اولیه زیست‌توده بر کیفیت بریکت‌های حاصل از باگاس نیشکر و سیوس برنج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی مانند ساختار و اجزای مواد باعث بهبود استحکام بریکت می‌شود. همچنین متراکم کردن مکانیکی منجر به تغییر در ویژگی‌های احتراق مواد به‌عنوان سوخت نشد (Navalta et al., 2020). در پژوهشی برای مطالعه استحکام مکانیکی بریکت‌های تولید شده با نسبت ترکیب‌های مختلف از زغال زیستی پوسته‌های برنج، پوسته‌های قهوه و پوسته‌های بادام زمینی و استفاده از نشاسته به‌عنوان مواد اتصال دهنده، آزمون مقاومت سقوطی و چگالی بریکت بررسی شد (Lubwama et al., 2020). در پژوهشی دیگر، اثر نسبت‌های مختلف دو نوع زیست‌توده کاه برنج و باگاس نیشکر و ترکیب آن‌ها با اتصال دهنده‌های طبیعی کندر، صمغ عربی و سریش در سه سطح نسبت ترکیب، بر خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت‌های سوختی تولیدی شامل چگالی، مقاومت شکست، پایداری و ارزش حرارتی نتایج نشان داد که بهترین ترکیب زیست توده ۷۵ درصد باگاس نیشکر و ۲۵ درصد کاه برنج با اتصال دهنده کندر با نسبت ترکیب ۱۵ درصد بود (صادقی و همکاران، ۱۴۰۱). در پژوهشی (Granado et al., 2021) به بررسی اثر فشار فشرده‌سازی بر استحکام و خواص بریکت کاساوا پرداختند. نتایج آنالیز تقریبی نشان داد که درصد مواد فرار ۷۲/۵، درصد کربن ثابت ۱۳/۱ و درصد خاکستر ۱۴/۴۵ بود. همچنین مقدار حداکثر ارزش حرارتی برابر با ۱۷/۱۲ مگاژول بر کیلوگرم تعیین گردید.

Setter & Oliveira (2022) خواص فیزیکی- مکانیکی بریکت‌های تولید شده با زغال زیستی<sup>۲</sup> پوسته قهوه با افزودن لیگنین کرافت به‌عنوان ماده اتصال دهنده با نسبت‌های مختلف برای تولید سوخت‌های زیستی جامد را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد بریکت‌های تولید شده با ۵۰ درصد لیگنین کرافت بالاترین چگالی ظاهری و مقاومت فشاری را دارند. نهایتاً، با توجه به بهبود خواص بریکت نتیجه‌گیری کردند که ترکیبی از پسماندهای کشاورزی و صنعتی (پوسته قهوه و لیگنین کرافت) می‌تواند راه حلی پایدار برای بخشی از سناریوی انرژی ارائه نماید.

بررسی اثر شرایط بریکت‌کردن شامل فشار و دمای فرآیند و پیش تیمار هیدروترمال در دماهای مختلف بر زیست توده ساقه پنبه و خاک اره درخت کاج نتایج نشان داد که پیش تیمار به‌طور قابل توجهی چگالی و مقاومت فشاری بریکت‌های زیست توده را بهبود بخشید و با افزایش دمای پیش تیمار، ارزش حرارتی و محتوای کربن ثابت بریکت‌های حاصل افزایش و بازده مواد فرار کاهش یافت (Song et al., 2020).

Vidal & Molinier (1988) به بررسی فرآیند ازن دهی خاک اره صنوبر تحت شرایط آزمایشگاهی پرداختند. آنان فرآیند ازن دهی را در دو راکتور بستر ثابت و راکتور نیمه پیوسته هم‌زمان دار مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد از بین پارامترهای مورد مطالعه (محتوای رطوبت نمونه، اندازه ذرات و غلظت ازن در جریان گاز)، میزان رطوبت خاک اره بیش‌ترین تأثیر را بر حلالیت دارد و راکتور بستر ثابت عملکرد بهتری را نشان داد. در تحقیقی (Atan et al., 2018) به بررسی تأثیر پیش تیمار برشته‌سازی بر ویژگی‌های فیزیکی و احتراق بریکت‌های تولید شده از پوسته برنج و بقایای موز پرداختند. نتایج نشان داد که برشته‌سازی یک روش حرارتی است که می‌تواند بریکت‌های با کیفیت و با ارزش حرارتی بالا، محتوای کربن ثابت بالا، مواد فرار کم و محتوای خاکستر کم تولید کند.

## روش‌شناسی پژوهش

### تهیه و آماده‌سازی مواد

در این مطالعه باگاس مورد نیاز از شرکت کشت و صنعت هفت تپه، خوزستان تهیه شد. باگاس مورد نظر برای نگهداری مطلوب و تهیه نمونه‌های با رطوبت مورد نظر خشک شدند. پس از آن، برای خرد کردن باگاس از آسیاب چکشی استفاده شد. در فرآیند تولید بریکت، اندازه ذرات نقش مهمی دارد، بنابراین باید اندازه ذرات باگاس مشخص باشد تا بهترین ابعاد ذرات در تولید نهایی بریکت انتخاب شود. برای تهیه مواد با رطوبت‌های مورد نظر، ابتدا رطوبت اولیه مواد با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه ۲ مقدار آب مورد نیاز برای هر سطح رطوبتی تعیین و به مقدار باگاس مشخص اضافه شد. نمونه‌های باگاس در کیسه‌های پلاستیکی بدون درز در یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس برای ۷۲ ساعت نگهداری شد تا رطوبت به‌طور یکنواخت در ساختار زیست‌توده پخش شود (Sarlaki et al., 2021).



$$\%MC_{(w.b.)} = \frac{m_w}{m_t} \times 100 = \frac{m_w}{m_w + m_d} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

که در این رابطه،  $MC_{(w.b.)}$  درصد رطوبت (بر پایه تر) بر حسب درصد،  $m_t$  جرم نمونه اولیه باگاس (گرم)، و  $m_d$  جرم نمونه باگاس بعد از ۲۴ ساعت قرار گرفتن در آون در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس (گرم)، و  $m_w$  جرم آب موجود در باگاس (گرم) است (قربانی و همکاران، ۱۴۰۰).

$$m_w = \frac{m(MC_f - MC_i)}{1 - MC_f} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در این رابطه،  $m_w$  = جرم آب اضافه شده (گرم)،  $m$  = جرم نمونه باگاس (گرم)،  $MC_i$  = رطوبت اولیه باگاس بر پایه تر (درصد)،  $MC_f$  رطوبت نهایی بر پایه تر (درصد) می‌باشد.

### چگالی حجمی مواد اولیه

برای اندازه‌گیری چگالی حجمی مواد اولیه، نمونه باگاس خرد شده درون ظرفی از جنس استیل به حجم ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب ریخته شد. سپس مقدار باگاس اضافی از لبه ظرف تراشیده و وزن گردید. سپس وزن ظرف خالی را از وزن کل کم کرده تا جرم باگاس موجود در آن مشخص شود. سپس از تقسیم مقدار جرم بدست آمده بر حجم ظرف، چگالی حجمی محاسبه گردید. جدول ۱ مقادیر چگالی حجمی باگاس در سه اندازه ذرات مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱. چگالی حجمی نمونه باگاس نیشکر خرد شده با اندازه ذرات مختلف

اندازه ذرات (mm)	کوچک‌تر از ۱/۱۸	۲/۳۶-۱/۱۸	۴/۷۵-۲/۳۶
چگالی (kg/m <sup>۳</sup> )	۶۹/۹۸	۵۷/۲۱	۴۶/۵۸

### طراحی آزمایش‌ها با استفاده از نرم افزار Design Expert

در این تحقیق اثر متغیرهای زمان ازن‌دهی در سه سطح (۱۵، ۲۵ و ۳۵ دقیقه)، اندازه ذرات باگاس در سه سطح (کوچک‌تر از ۱/۱۸، ۱/۱۸-۲/۳۶ و ۲/۳۶-۴/۷۵ میلی‌متر)، دما در سه سطح (۲۸۰، ۳۲۰ و ۳۶۰ درجه سلسیوس) و رطوبت باگاس در زمان ازن‌دهی بر پایه تر در سه سطح (۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد) بر کیفیت فیزیکی و مکانیکی بریکت مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که کلیه سطوح پیشنهادی بر اساس تولید بریکت در صنعت و به منظور بررسی پارامترهای مختلف بر کیفیت بریکت انتخاب شده است. طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ با روش طرح مرکب مرکزی<sup>۲</sup> (CCD) مرکز وجه با مقدار آلفا برابر با ۱ (Face Centered) در نرم‌افزار Design Expert v.11 انجام شد. طرح مرکب مرکزی با طراحی ماتریس آزمایش‌ها به کم‌ترین تعداد از طریق نقاط مرکزی، نقاط محوری و نقاط فاکتوریل اطلاعاتی در مورد مرزهای داخلی نواحی آزمایشی فراهم می‌کند که موجب می‌شود اثرات انحنایی نیز مورد بررسی قرار گیرد (قربانی و همکاران، ۱۴۰۰). جدول ۲ مقادیر سطوح مختلف چهار متغیر مستقل را در طراحی آزمایش‌ها با نرم‌افزار Design Expert نشان می‌دهد. در این پژوهش پس از مشخص شدن متغیرهای مستقل و وارد کردن آن‌ها در نرم‌افزار Design Expert نسخه ۱۱، تعداد ۳۰ واحد آزمایشی با بیش‌ترین تکرار نقاط مرکزی طرح (۶ تکرار) تعیین شد.

جدول ۲. متغیرهای مستقل فرآیند و مقادیر واقعی آن

عامل	واحد	سطوح		
		-۱	۰	+۱
اندازه ذرات (A)	mm	۱	۳	۵
رطوبت (B)	%	۲۰	۳۵	۵۰
زمان ازن‌دهی (C)	min	۱۵	۲۵	۳۵
درجه حرارت (D)	°C	۲۸۰	۳۲۰	۳۶۰

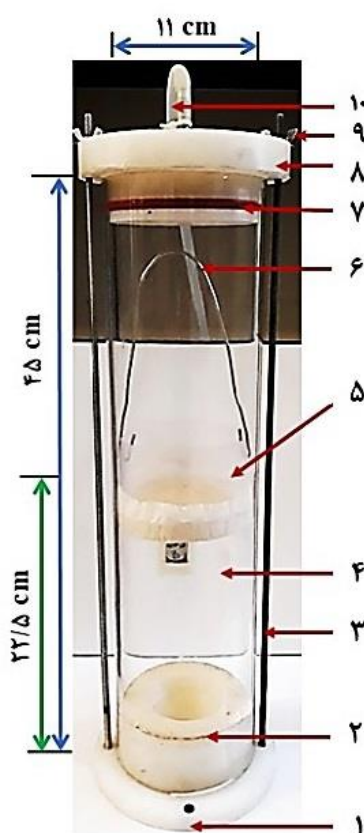
### فرآیند پیش تیمار ازن‌دهی

عامل‌های بسیاری بر کارایی فرآیند ازن‌دهی از قبیل طراحی راکتور، محتوای رطوبت، اندازه ذرات، غلظت ازن، نرخ جریان ازن/اکسیژن و

1. Bulk density

2. Central Composite Design (CCD)

زمان واکنش تأثیر می‌گذارد (Travaini et al., 2016; Ghorbani et al., 2021). در این پژوهش فرآیند ازن دهی در یک راکتور استوانه‌ای بستر ثابت از جنس پلکسی گلاس شفاف (شکل ۱) به قطر داخلی ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. دستگاه تولیدکننده گاز اکسیژن با خلوص بالا ( $93 \pm 3$  درصد) جهت تغذیه و برای تبدیل اکسیژن به ازن از دستگاه مولد گاز ازن (ARION, ODS-1300p, 220v, Iran) استفاده شد. برای فرآیند پیش تیمار، مقدار خروجی دستگاه ازناسیون در حالت بیشترین مقدار و برابر با ۳۰ گرم بر ساعت تنظیم شد. روش انجام آزمایش بدین شرح می‌باشد که مقدار ۱۲ گرم نمونه از هر تیمار برای فرآیند ازن دهی داخل ظرف مخصوص در داخل راکتور قرار داده شد. گاز ازن با روش تخلیه الکتریکی از اکسیژن تولید شده و مخلوط ازن / اکسیژن از شیر بالا وارد راکتور شده و پس از تماس با باگاس مرطوب که روی توری پلاستیکی در قسمت میانی راکتور قرار گرفته واکنش داده و از پایین راکتور خارج می‌شود. در این آزمایش، زمان ماند مواد داخل راکتور طبق طراحی آزمایش‌ها جهت ازن دهی ۱۵، ۲۵ و ۳۵ دقیقه می‌باشد که پس از سپری شدن این زمان‌ها مواد از داخل راکتور خارج و درون پاکت پلاستیکی قرار داده شد و سپس درون یخچال تا زمان بریکت کردن نگهداری شدند (Ghorbani et al., 2021).



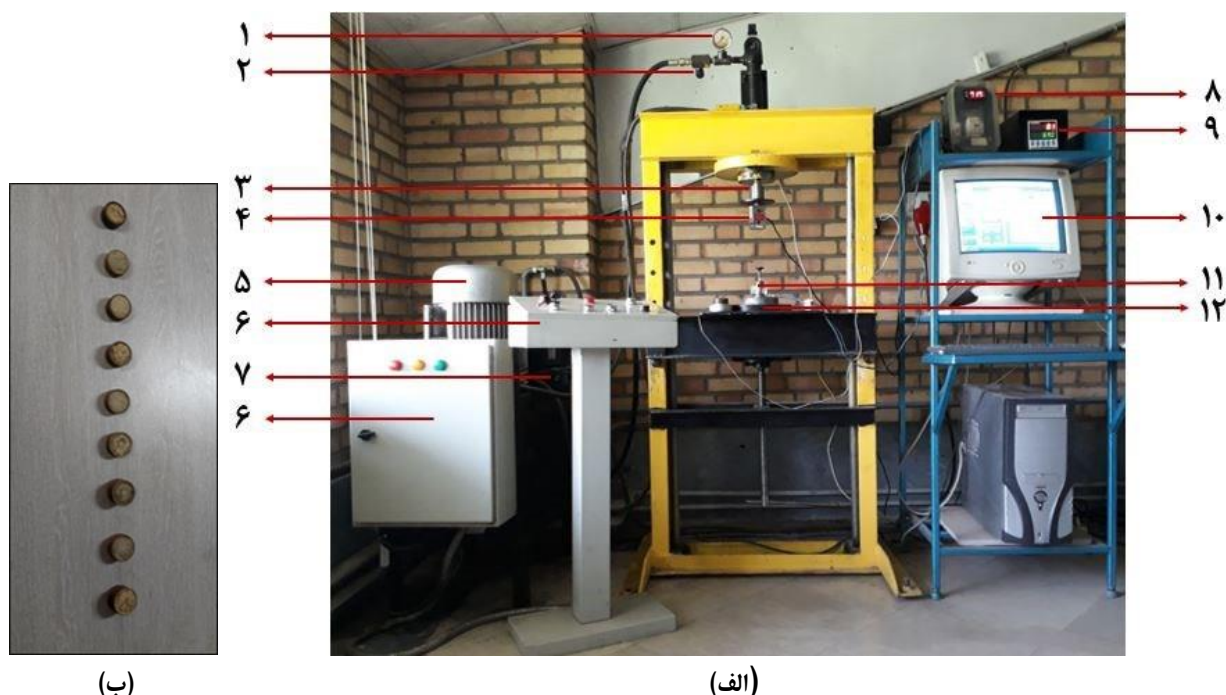
شکل ۱. طرح کلی راکتور استوانه‌ای بستر ثابت جهت فرایند ازن دهی باگاس: (۱) سرشلنگی برای جریان خروجی گاز، (۲) درب ثابت، (۳) نگه‌دارنده، (۴) بدنه راکتور، (۵) ظرف نمونه، (۶) دستگیره، (۷) واشر آب‌بندی، (۸) درب متحرک، (۹) واشر و مهره، (۱۰) سرشلنگی برای جریان ورودی گاز.

#### تهیه بریکت با استفاده از پرس هیدرولیکی

به منظور فشرده‌سازی و تهیه بریکت‌های سوختی، از پرس هیدرولیکی (شکل ۲ الف) استفاده شد. برای تولید بریکت از یک سیلندر و پیستون به‌عنوان قالب (شکل ۱ الف) استفاده شد که قطر داخلی و ارتفاع آن به ترتیب ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متر است. همچنین از یک کمر بند حرارتی با توان ۱۰۰۰ وات برای تامین گرمای مورد نیاز و یک واحد کنترل دما (شکل ۱ الف) برای تنظیم دمای مورد نظر استفاده شد. برای انجام فرایند بریکت‌سازی از باگاس ازن دهی شده، در ابتدا لازم بود که محتوای رطوبت تیمارهای مختلف کاهش یابد؛ به دلیل آنکه بریکت کردن مواد تحت رطوبت‌های بالا ممکن نیست. برای کاهش رطوبت، مواد در آون قرار گرفت تا رطوبت آن‌ها کاهش پیدا کند. سپس با توجه به آزمایش‌های قبلی، رطوبت آن‌ها از ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد به ترتیب به ۷، ۱۳ و ۱۹ درصد رسانده شد. برای انجام آزمایش‌های بریکت‌سازی، پس از تعادل دمایی قالب و سطح دماهای تنظیم شده، بلافاصله حدود ۱۲ گرم از باگاس ازن دهی شده به درون سیلندر اضافه شد و پرس هیدرولیکی به مدت ۳۵ ثانیه مواد درون سیلندر را تحت فشار قرار می‌داد. پس از آن بریکت‌های تولید شده از درون سیلندر



خارج می‌شد. در این تحقیق در کلیه آزمایش‌ها فشرده‌سازی باگاس در سطح فشار سیلندر هیدرولیک ۵۰ بار انجام شد. شکل ۱ ب نمونه بریکت‌های تولید شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲. الف) پرس هیدرولیک و اجزای تشکیل دهنده آن: ۱) فشارسنج، ۲) شیر تنظیم سرعت، ۳) فک متحرک، ۴) نیروسنج، ۵) پمپ هیدرولیک، ۶) جعبه کنترل جریان برق پرس هیدرولیک، ۷) پیچ تنظیم فشار، ۸) ترموکوپل (شامل ترموستات و کنتاکتور قطع و وصل جریان حرارتی)، ۹) داده-خوان، ۱۰) رایانه، ۱۱) قالب تراکم، ۱۲) فک ثابت، و ب) نمونه بریکت‌های تولید شده توسط پرس هیدرولیکی.

### پارامترهای ارزیابی بریکت تولید شده

#### تعیین چقرمگی بریکت‌ها

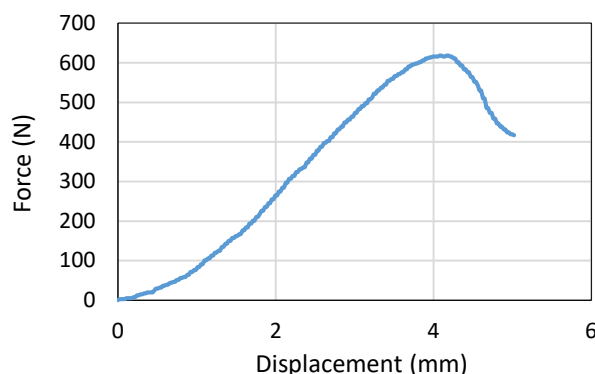
این آزمایش به منظور تعیین استحکام بریکت‌های تولیدی و درهم‌رفتگی مکانیکی و ایجاد پیوند بین ذرات انجام شد. آزمایش توسط آزمون فشار قطری و بارگذاری شبه استاتیک با استفاده از ماشین آزمون چند کاره مواد بیولوژیکی انجام گردید (شکل ۳ الف). در این آزمون نمونه بریکت در وضعیت به پهلو روی فک پائینی و ثابت ماشین قرار داده شد، سپس فک متحرک دستگاه که نیروسنج به آن متصل است با سرعت ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پائین حرکت کرده و بیشینه نیروی لازم برای شکستن بریکت‌ها توسط منحنی نیرو-جابجایی بریکت (شکل ۳ ب) تعیین گردید. در این آزمایش حداکثر نیروی لازم برای شکستن بریکت‌ها به عنوان مبنای استحکام آن‌ها در نظر گرفته شد. سپس مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی که برابر با میزان انرژی لازم جهت شکستن بریکت‌ها می‌باشد طبق رابطه ۳ محاسبه گردید. با داشتن انرژی شکست و با استفاده از رابطه ۴ چقرمگی بریکت‌ها محاسبه شد (Sprengr et al., 2018).

$$E = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{1}{2} (f_i + f_{i+1}) \Delta x \quad \text{رابطه ۳}$$

$$T_0 = \frac{E}{V} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در این روابط: E انرژی لازم جهت شکستن بریکت‌ها (N.mm)،  $f_i$  نیروی معادل جابجایی  $x_i$  (N)،  $T_0$  میزان چقرمگی بریکت (MPa)، و V حجم نمونه ( $\text{mm}^3$ ) می‌باشد.





(ب)

(الف)

شکل ۳. آزمون فشار قطری بریکت، (الف) دستگاه آزمون مواد بیولوژیکی، و (ب) نمودار نیرو - جابجایی.

### خواص حرارتی بریکت‌ها

#### آنالیز تقریبی<sup>۱</sup>

آنالیز تقریبی شامل اندازه‌گیری عناصر اصلی تشکیل‌دهنده زیست‌توده است و اثر مستقیمی بر خصوصیات سوختی دارد. برای اندازه‌گیری درصد مواد فرار، بریکت در یک آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت قرار داده شد تا به یک وزن ثابت برسد و درصد رطوبت تعیین شد. سپس نمونه خشک در یک کوره الکتریکی با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ دقیقه نگهداری و پس از خنک‌شدن توزین و درصد مواد فرار با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد (Pongsak, 2015). برای اندازه‌گیری درصد خاکستر مواد، نمونه در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت چهار ساعت قرار داده شد و پس از خنک‌شدن توزین شد (Pongsak, 2015). سپس درصد خاکستر مواد با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد. اندازه‌گیری کربن ثابت شامل باقیمانده جامد قابل سوختن یک ماده پس از خارج شدن مواد فرار آن است. میزان کربن ثابت طبق رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$PVM = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

$$PAC = \frac{C}{A} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

$$PFC = 100\% - (PMC + PVM + PAC) \quad \text{رابطه ۷}$$

که در این رابطه‌ها:  $PMC$  = درصد رطوبت،  $PVM$  = درصد مواد فرار،  $PAC$  = درصد خاکستر،  $PFC$  = درصد کربن ثابت،  $A$  = جرم نمونه آون خشک شده (گرم)،  $B$  = جرم نمونه پس از ۱۰ دقیقه در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس (گرم)، و  $C$  = جرم نمونه پس از ۴ ساعت در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس (گرم) هستند.

#### تعیین حداکثر ارزش حرارتی<sup>۲</sup>

یکی از ویژگی‌های مهم در ارزیابی کیفیت بریکت سوختی تعیین حداکثر ارزش حرارتی آن است. در این تحقیق برای اندازه‌گیری حداکثر ارزش حرارتی طبق رابطه ۸ از نتایج آنالیز تقریبی مانند مواد فرار، کربن ثابت و محتوای خاکستر برای پیش‌بینی حداکثر ارزش حرارتی بریکت از طریق برخی معادلات تجربی استفاده شده است (Nhuchhen & Salam, 2012). برای بررسی صحت نتایج از تحقیقات مشابه که در زمینه تولید بریکت از زیست‌توده می‌باشد، استفاده شد و معادله حاضر همبستگی نزدیکی را با نتایج تحقیقات نشان داد.

$$HHV = 19.2880 - 0.2135 \left( \frac{VM}{FC} \right) + 0.0234 \left( \frac{FC}{A} \right) - 1.9584 \left( \frac{A}{VM} \right) \quad \text{رابطه ۸}$$

که در این رابطه:  $HHV$  = حداکثر ارزش حرارتی (مگاژول بر کیلوگرم)،  $A$  = محتوای خاکستر (درصد)،  $VM$  = مواد فرار (درصد)،  $FC$  = کربن ثابت (درصد) می‌باشد.

## یافته‌های پژوهشی و بحث

### تجزیه واریانس و تحلیل رگرسیون برازش مدل برای پاسخ‌ها

در این پژوهش از روش سطح پاسخ در قالب طرح مرکب مرکزی به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند تولید بریکت از باگاس ازن‌دهی شده استفاده شد. برای متغیر پاسخ یک مدل درجه دوم توسط نرم‌افزار با بیشترین ضریب همبستگی  $R^2$  و کم‌ترین انحراف معیار و مجموع مربعات باقیمانده پیش‌بینی شده پیشنهاد شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدل کلی طرح و همچنین متغیرهای اندازه ذرات و رطوبت در سطح یک درصد تأثیر معنی‌داری بر پاسخ چگالی بریکت دارد. همچنین به منظور تعیین استحکام بریکت‌های تیمارهای مختلف از فرآیند باگاس ازن‌دهی شده، رفتار بریکت تحت بارگذاری شبه استاتیک برای تعیین چقرمگی بریکت‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس داده‌های چقرمگی بدست آمده نشان می‌دهد که مدل کلی طرح و متغیر رطوبت در سطح یک درصد و اثر متقابل زمان ازن‌دهی و دما در سطح پنج درصد معنی‌دار شده‌اند.

جدول ۳. تجزیه واریانس برای متغیرهای پاسخ چگالی و چقرمگی بریکت

چقرمگی			چگالی		
میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات	میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات
۰/۰۰۱۷**	۵	مدل درجه دوم	۴/۸۳۷ E-۰۸**	۵	مدل درجه دوم
۰/۰۰۵۱**	۱	رطوبت (B)	۲/۴۹۳ E-۰۸**	۱	اندازه ذرات (A)
۰/۰۰۰۲ <sup>ns</sup>	۱	زمان (C)	۱/۸۴۸ E-۰۷**	۱	رطوبت (B)
۰/۰۰۰۱ <sup>ns</sup>	۱	دما (D)	۱/۸۴۳ E-۱۱ <sup>ns</sup>	۱	دما (D)
۰/۰۰۰۶*	۱	CD	۲/۶۳۹ E-۰۹ <sup>ns</sup>	۱	AD
۰/۰۰۲۶**	۱	B <sup>2</sup>	۲/۹۵۲ E-۰۸**	۱	B <sup>2</sup>
۰/۰۰۰۱	۲۴	باقی‌مانده	۸/۸۰۸ E-۱۰	۲۳	باقی‌مانده
۰/۰۰۰۲ <sup>ns</sup>	۱۹	عدم برازش	۸/۵۸۵ E-۱۰ <sup>ns</sup>	۱۸	عدم برازش
۰/۰۰۰۱	۵	خطای خالص	۹/۶۰۸ E-۱۰	۵	خطای خالص
	۲۹	جمع کل		۲۸	جمع کل

\*\* معنی‌داری در سطح ۱٪، \* معنی‌داری در سطح ۵٪، <sup>ns</sup> معنی‌دار نبودن در سطح ۵٪.

رابطه‌های ۹ و ۱۰ مدل رگرسیون با ضرایب جملات مربوطه را به ترتیب برای پیش‌بینی چگالی و چقرمگی بریکت با استفاده از متغیرهای فرآیند تولید بریکت ارائه می‌کند. این مدل‌های سطح پاسخ، توانایی پیش‌بینی اثرات متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته را دارد و رفتار سامانه را برای پاسخ پیش‌بینی می‌کند.

$$\frac{1}{\rho} = 0.001447 + 7.3E - 05 * (A) - 2.7E - 05 * (B) + 4.76E - 07 * (D) - 1.67E - 07 * (AD) + 2.89E - 07 * (B2) \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\frac{1}{\sqrt{T_0}} = 0.229963 - 0.004746 * (B) - 0.004633 * (C) - 0.000337 * (D) + 0.000015 * (CD) + 0.000084 * (B2) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در این رابطه‌ها،  $\rho$  چگالی بریکت (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $T_0$  چقرمگی بریکت (مگا پاسکال)، A، اندازه ذرات باگاس (میلی‌متر)، B رطوبت ذرات باگاس (درصد)، C مدت زمان پیش‌تیمار ازن‌دهی (دقیقه)، و D دمای فرآیند (درجه سلسیوس) می‌باشد.

جدول ۴ آماره‌های تناسب به شکل کاهیده برای تخمین متغیرهای پاسخ را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، زیاد بودن  $R^2$  تعدیل شده نشان می‌دهد که عامل غیرمعنی‌داری در مدل وجود ندارد. در این جدول، با توجه به مقدار بالای ضریب تعیین تعدیل شده ( $\text{Adj. } R^2 = 0.91$ ) برای متغیر پاسخ چگالی، مجموعه متغیرهای ورودی حاضر در معادله رگرسیون توانسته است ۹۱ درصد از تغییرات آن را تبیین کنند. ضریب تغییرات که بیان‌کننده نقاط داده‌های تجربی از مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل است برابر ۲/۶۹ درصد بود.

جدول ۴. آماره‌های تناسب به شکل کاهیده برای تخمین متغیرهای پاسخ

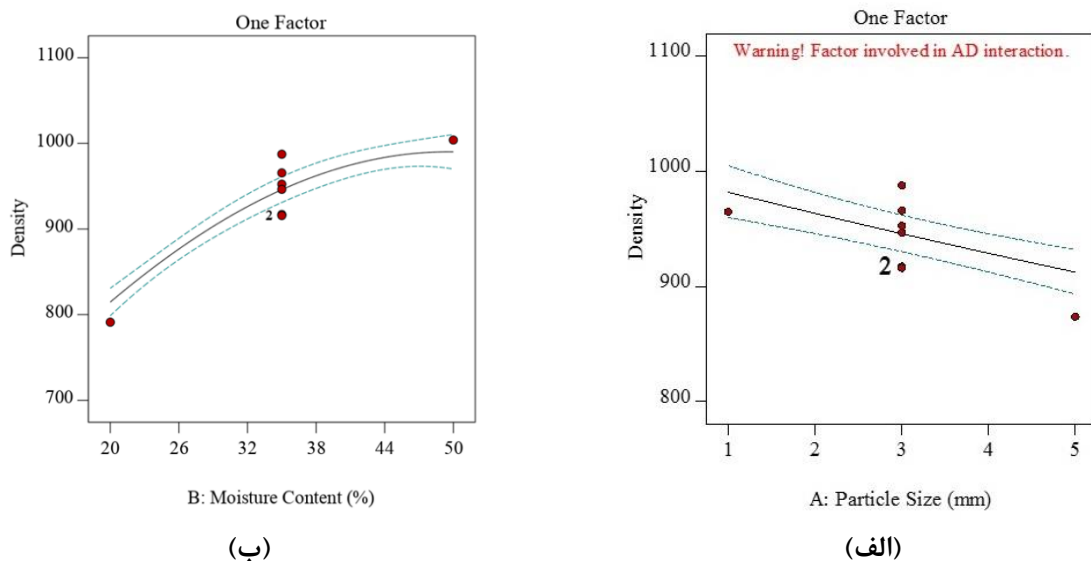
متغیرهای پاسخ	انحراف معیار	میانگین	ضریب تغییرات	$R^2$	Adj. $R^2$
چگالی	۰/۰۰	۰/۰۰۱۱	٪۲/۶۹	۰/۹۲	۰/۹۱
چقرمگی	۰/۰۱۱۴	۰/۰۷۷۷	٪۱۴/۷۲	۰/۷۳	۰/۶۷

### اثر متغیرها و نمودارهای سطح پاسخ چگالی

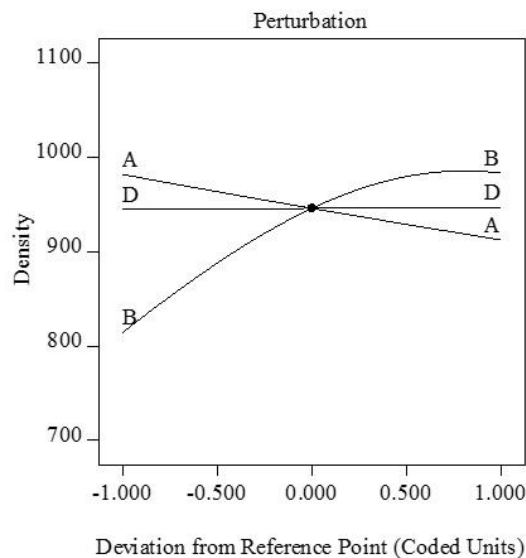
نتایج حاصل از اثر اندازه ذرات در فرآیند بر چگالی بریکت در شکل ۴ الف نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، با کاهش اندازه ذرات در محدوده ذکر شده، سطح تماس آن‌ها افزایش یافته و همچنین ذرات ریزتر، خلل و فرج‌ها را پر کرده و باعث کاهش برگشت‌پذیری الیاف در ماده اولیه شده و موجب افزایش چگالی می‌شود. در پژوهشی که Chou et al., (2009) انجام دادند، نتایج نشان داد که اندازه ذرات کاه برنج تأثیرگذارترین عامل برای استحکام بریکت سوختی است. همچنین Okot et al., (2018) در مطالعه خود دریافتند که افزایش اندازه ذرات، تأثیر منفی بر کیفیت بریکت دارد، بنابراین با کاهش اندازه ذرات، جرم حجمی افزایش می‌یابد. در این تحقیق بیشترین مقدار چگالی برابر با ۱۰۷۶ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دست آمد که نشان می‌دهد در مقایسه با بریکت تولید شده از باگاس بدون پیش‌تیمار مقدار چگالی حداکثر برابر با ۸۷۳ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دست آمد (شفاعی و همکاران، ۱۴۰۰). در واقع می‌توان بیان نمود که فرآیند ازن‌دهی به‌طور غیرمستقیم تأثیر مثبتی بر کیفیت بریکت به‌ویژه چگالی دارد. از آنجایی که پیش‌تیمار ازن یک واکنش سطحی است، اندازه ذرات نقش مهمی به‌عنوان پارامتر فرآیند دارد. لیگنین به‌عنوان یک ماده مستحکم در بین ریز الیاف‌های سلولز در ساختار زیست‌توده شناخته می‌شود. پیوندهای لیگنین، حرکت ذرات زیست‌توده را در شبکه بریکت محدود می‌کند. شکستن پیوندهای لیگنین و تغییر ساختار سلولز به‌دلیل ازناسیون می‌تواند تشکیل پیوندهای جدید و حرکت ذرات زیست‌توده در شبکه بریکت را بهبود بخشد و در نتیجه بریکت‌های بادوام‌تر و مستحکم‌تری ایجاد کند (Ghorbani et al., 2023). لیگنین‌های تجزیه‌شده در اثر ازناسیون در مرحله بریکت‌سازی، در دماهای بالای قالب پرس از فاز شیشه‌ای به فاز لاستیکی تغییر پیدا کرده و به‌عنوان یک چسب و عامل اتصال‌دهنده ذرات در حین فشرده‌سازی عمل می‌کنند (Sarker et al., 2023). لیپیدها، پروتئین‌ها، موم‌ها، نشاسته و سایر مواد استخراجی زیست‌توده‌ها، اصطکاک بین قالب بریکت‌ساز و کانال پرس را کاهش می‌دهند و در نتیجه با ایجاد یک لایه سطحی که به‌عنوان روان‌کننده عمل می‌کنند، فشار فرآیند بریکت‌سازی را کاهش می‌دهند (Sarker et al., 2023). قابل ذکر است که مواد استخراجی در زیست‌توده در طی پیش‌تیمار با گاز ازن آزاد می‌شوند (Travaini et al., 2016). این عمل می‌تواند استحکام بریکت را بهبود بخشد، زیرا مواد استخراجی می‌توانند تماس نزدیک بین محل‌های اتصال ذرات در بریکت را محدود کنند.

اثر رطوبت باگاس ازن‌دهی شده بر چگالی بریکت‌ها در شکل ۴ ب نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت از ۲۰ تا ۵۰ درصد در فرآیند ازن‌دهی، چگالی بریکت‌ها افزایش می‌یابد. همان‌طور که از شکل پیداست تأثیر رطوبت در فرآیند ازن‌دهی بر چگالی شامل دو مرحله می‌باشد. در مرحله اول با افزایش رطوبت از ۲۰ تا ۳۵ درصد، چگالی با سرعت بیش‌تری افزایش پیدا می‌کند و پس از آن از ۳۵ تا ۵۰ درصد، افزایش چگالی با سرعت کم‌تری اتفاق افتاده است. در واقع می‌توان چنین بیان کرد که تأثیر پیش‌تیمار ازن‌دهی بر باگاس به میزان رطوبت اضافه شده به باگاس بستگی دارد. ازن، یک مولکول سه اتمی غیر خطی، حدود ۱۴ برابر بیش‌تر از اکسیژن در آب محلول است و پایداری ازن تحت تأثیر دما، فشار، pH و قدرت یونی آب بستگی دارد (Travaini et al., 2016). حلالیت ۱۳ برابری ازن در آب نسبت به هوا دلیل مرطوب‌سازی زیست‌توده‌ها برای واکنش‌های پیش‌تیمار ازن هستند (Peretz et al., 2017) و لذا محتوای رطوبت مهم‌ترین پارامتر ازناسیون زیست‌توده‌ها به شمار می‌رود (Ben'ko et al., 2017). آب همچنین به‌عنوان یک محیط واکنش که گاز ازن در آن حل می‌شود، محصولات واکنش ازن (ازن‌کافت) را از سطح لیگنوسولز حذف می‌کند (Ben'ko et al., 2017). قابل ذکر است که ازن عمدتاً از طریق دو مکانیسم واکنش می‌دهد: واکنش مستقیم با ازن مولکولی و واکنش غیرمستقیم با گونه‌های رادیکالی که هنگام تجزیه ازن در آب تشکیل می‌شوند (Travaini et al., 2016). تجزیه ازن در آب شامل یک سری فرآیندهای انتقال الکترون و رادیکال‌های هیدروکسیل است. در این شرایط واکنش‌های رادیکال غیرمستقیم و غیرانتخابی قالب هستند. رادیکال هیدروکسیل با واکنش‌پذیری بسیار بالا و با پتانسیل اکسیداسیون ۲/۸ الکترون ولت همراه با رادیکال‌های هیدروژن پراکسیل گونه‌های فعال رادیکالی در اثر واکنش ازن با لیگنوسولز مرطوب است. مکانیسم واکنش ازن با یک لیگنوسولز ممکن است شامل واکنش مستقیم با ازن و واکنش غیرمستقیم با رادیکال‌های هیدروکسیل باشد. واکنش گاز ازن با زیست‌توده مرطوب ابتدا از طریق واکنش ازن با آب آزاد موجود در منافذ زیست‌توده شروع می‌شود. در آغاز پیش‌تیمار، عملاً هیچ گاز ازنی در سطح واکنش آب وجود ندارد، زیرا تمام ازن موجود در آب آزاد است (Travaini et al., 2016). سپس ازن به آب محدود شده (بافتی) می‌رسد و پس از عبور از آن، در نهایت واکنش بین ازن و اجزای لیگنوسولز به‌ویژه لیگنین رخ می‌دهد (Choi et al., 2002; Li et al., 2015). آب سبب ایجاد تورم در دیواره سلولی و موجب افزایش دسترسی ازن به گروه‌های عاملی موجود در اجزای لیگنوسولز می‌شود. در رطوبت‌های کم، واکنش لیگنوسولز با گاز ازن بسیار کم رخ می‌دهد و علی‌رغم مقدار زیاد ازن تحویلی، انتقال جرم ازن تقریباً ناچیز است، زیرا سطح تماس بین ازن و لیگنوسولز نسبتاً کم‌تر است. در

مقابل، هنگامی که محتوای رطوبت مناسب باشد، ازن در آب جذب و تجزیه می‌شود، یک لایه ضخیم از آب منافذ زیست‌توده را مسدود می‌کند و به نفع زمان ماند بیشتر ازن و افزایش تجزیه آن در رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود. در واقع رطوبت زیاد منجر به زمان ماند زیاد ازن و افزایش تجزیه آن می‌شود. سپس واکنش‌ها مسیرهای غیرانتخابی دیگری را دنبال می‌کنند و مصرف بیش از حد ازن را به همراه دارد (Mamleeva et al., 2009). نمودار پرتیجی مقایسه اثرات متغیرهای مستقل حول نقطه مرکزی در شکل ۵ نشان داده شده است. در این نمودار شیب یا انحنای خط در شکل نشان‌دهنده حساس بودن پاسخ به عامل مورد نظر می‌باشد. هر چه شیب یا انحنای خط تندتر باشد، پاسخ نسبت به متغیر حساس‌تر است و خط نسبتاً صاف، غیرحساس بودن پاسخ را نسبت به آن متغیر نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که متغیر اندازه ذرات (A) دارای اثر خطی و متغیر رطوبت (B) دارای اثر درجه دوم می‌باشد. در این نمودار تأثیر مستقیم متغیر رطوبت با ضریب مثبت رگرسیون به دلیل روند صعودی و تأثیر غیرمستقیم متغیر اندازه ذرات با ضریب منفی و روند نزولی قابل مشاهده است. به عبارت دیگر اثر مستقل متغیرها نشان داد که با افزایش مقدار رطوبت و کاهش اندازه ذرات، چگالی افزایش یافت.



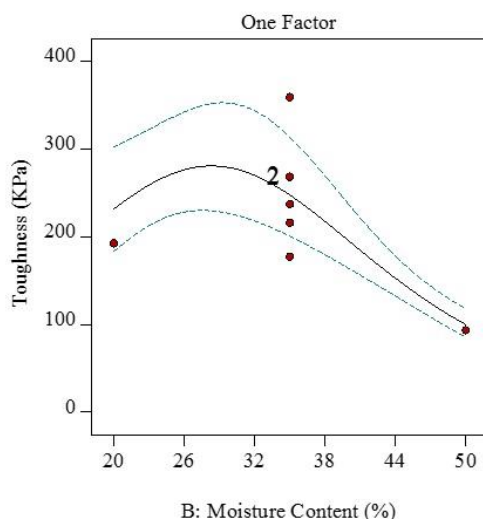
شکل ۴. الف) اثر اندازه ذرات فرآیند بریکت‌سازی بر چگالی، و ب) اثر رطوبت فرآیند بر چگالی بریکت باگاس ازن‌دهی شده.



شکل ۵. نمودار پرتیجی مدل حول نقطه مرکزی.

### اثر متغیرها و نمودارهای سطح پاسخ چقرمگی

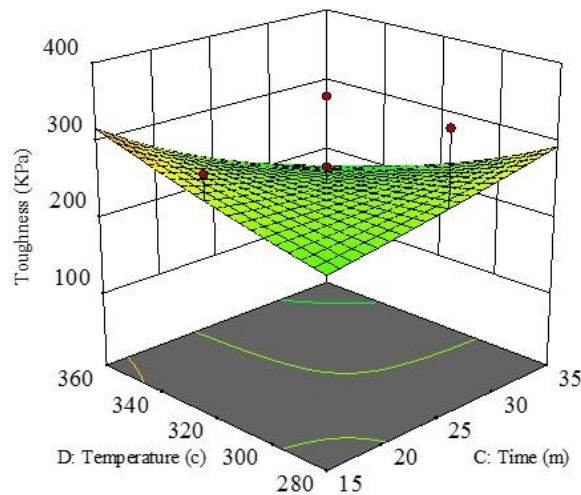
نتایج حاصل از اثر رطوبت در فرآیند بر چقرمگی بریکت در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که از شکل پیداست با افزایش رطوبت تا حدود ۳۰ درصد در فرایند ازن دهی، تأثیر آن بر چقرمگی بریکت‌ها افزایش می‌باشد که دلیل آن را می‌توان تأثیر پیش تیمار ازن بر باگاس دانست. در ادامه با افزایش رطوبت تا ۵۰ درصد، چقرمگی شروع به کم شدن می‌کند، زیرا رطوبت زیاد مانع عملکرد پیش تیمار ازن می‌شود و تأثیر آن را کاهش می‌دهد. همچنین رطوبت بالا باعث ایجاد منافذ در بریکت پس از خارج سازی از قالب به علت تبخیر رطوبت در دمای بالا می‌شود که مقاومت آن را کاهش می‌دهد. در تحقیقی که García-Cubero et al., (2009) بر پیش تیمار ازن انجام دادند، دریافتند که در تمام تیمارهای مورد بررسی محتوای لیگنین کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که محتوای رطوبت و نوع زیست توده بیشترین تأثیر معنی دار را در مواد تحت تیمار ازن دارد. در پژوهشی که افر و همکاران (۱۳۹۴) بر تولید بیواتانول از باگاس نیشکر انجام دادند، دریافتند که پیش تیمار ازن دهی با افزایش رطوبت از ۴۰ تا ۵۰٪، هیدرولیز آنزیمی افزایش می‌یابد که نشان دهنده آن است که با افزایش رطوبت در محدوده مناسب، تأثیر ازن بر تجزیه ساختار لیگنین بیش تر بوده و موجب در هم گسیختگی آن شده است. با توجه به تحقیقات می‌توان نتیجه گرفت که پیش تیمار ازن باعث شکستن ساختار لیگنین شده است و با جریان یافتن آن چگالی و استحکام بریکت‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۶. اثر رطوبت باگاس در فرآیند ازن دهی بر چقرمگی بریکت.

نتایج حاصل از بررسی اثر متقابل زمان ازن دهی و دما بر چقرمگی در شکل ۷ نشان می‌دهد که زمان ازن دهی تأثیر معنی داری بر چقرمگی در سطح ۵٪ ندارد. در واقع می‌توان چنین بیان کرد که بازه زمانی ۱۵ تا ۳۵ دقیقه نمی‌تواند تأثیر مدت زمان در فرایند ازن دهی را بر متغیر پاسخ چقرمگی بریکت‌ها نشان دهد، زیرا تأثیر پیش تیمار ازن بر باگاس به سرعت اتفاق می‌افتد و بازه زمانی انتخاب شده نمی‌توانست به خوبی تأثیر زمان را در فرآیند نشان دهد. در واقع، مشاهدات انجام شده در حین انجام آزمایش‌ها نشان داد که پس از مدت کوتاهی از زمان شروع پیش تیمار ازن دهی، رنگ باگاس شروع به روشن شدن می‌کند که نشان دهنده تأثیر ازن بر باگاس و تخریب ساختار لیگنین می‌باشد. ولی به دلیل آنکه بازه زمانی انتخاب شده بسیار کوتاه بود، نمی‌توانست تأثیر متغیر زمان را بر چقرمگی بریکت‌ها به درستی آزمون نماید. با توجه به نتایج بدست آمده، به دلیل آنکه رطوبت در نظر گرفته شده در محدوده مناسبی قرار داشت و روند افزایش را بر کیفیت بریکت نشان می‌داد، زمان لازم برای ازن دهی تا حدودی کاهش یافته بود. زیرا رطوبت سبب ایجاد تورم در دیواره سلولی و موجب افزایش دسترسی ازن به گروه‌های عاملی لیگنین می‌شود. همچنین آب به عنوان یک حلال برای ازن و برخی از مشتقات لیگنین‌زدایی عمل می‌کند. بنابراین رطوبت مناسب دسترسی ازن به لیگنین را افزایش می‌دهد و واکنش در زمان کم‌تری اتفاق خواهد افتاد. در مقابل، هنگامی که محتوای رطوبت بسیار زیاد است، ازن در اکثریت آب جذب و تجزیه می‌شود. در واقع یک پوسته ضخیم از موانع آب در منافذ زیست توده، منجر به زمان ماند زیاد ازن و افزایش تجزیه آن می‌شود. با توجه به آن که در ابتدای پیش تیمار، تمام ازن در آب آزاد است و با عبور ازن از آب محدود، واکنش با زیست توده آغاز می‌شود، بنابراین محتوای رطوبت بیشتر، زمان زیادی نیز برای آغاز واکنش نیاز دارد. در پژوهشی که روی بررسی اثر زمان واکنش و نرخ جریان انجام شد نتایج نشان داد که در شروع واکنش نرخ کاهش لیگنین سریع تر است، زیرا دسترسی ازن به لیگنین سطحی آسان است. همچنین مقدار زمان ازن دهی به نوع زیست توده وابستگی نشان می‌دهد و مشاهده شده است که زمان

واکنش‌های جزئی و کلی برای هر ترکیبی از عامل‌های فرآیند با توجه به نوع زیست‌توده متفاوت است (Baig et al., 2015). همچنین نمودار نشان می‌دهد که با افزایش دما، چقرمگی افزایش پیدا می‌کند. در واقع افزایش دما موجب جریان یافتن لیگنین موجود در دیواره سلولی و در نتیجه موجب چسبندگی ذرات به هم می‌شود. در این تحقیق، در اثر پیش‌تیمار از ندهی لیگنین موجود در مواد به سرعت تخریب شده و با افزایش دما موجب تشکیل پیوندهای جدید بین ذرات می‌شود که استحکام بریکت را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش دما مقاومت ذرات در برابر فشار کاهش یافته و در نتیجه موجب افزایش چگالی و چقرمگی می‌شود. محققان دریافتند که در فشار مشخص، افزایش دما موجب افزایش فشردگی و دوام بریکت‌های تولید شده از کاه گندم گردید (Smith et al., 1977).



شکل ۷. منحنی رویه سطح پاسخ اثر متقابل زمان از ندهی و دما بر چقرمگی بریکت.

### نتایج آنالیز تقریبی

نتایج مقادیر اندازه‌گیری شده مواد فرار، خاکستر و کربن ثابت بریکت تولید شده تحت پیش‌تیمار از ندهی در شرایط بهینه، بریکت تولید شده بدون پیش‌تیمار و ماده اولیه باگاس در جدول ۵ نشان داده شده است. در این جدول به منظور مقایسه نتایج آنالیز تقریبی بریکت‌های تولید شده با منابع موجود، مقادیر درصد مواد بر اساس ماده خشک نیز ارائه شده است. داده‌ها نشان می‌دهد که تشکیل بریکت سبب کاهش درصد مواد فرار نسبت به زیست‌توده آن‌ها شده است. از آنجایی که بخش زیادی از بقایای گیاهی از مواد استخراجی، همی سلولز و سلولز تشکیل شده و این ترکیبات در محدوده دمایی ۱۸۰ تا ۳۵۰ درجه سلسیوس تجزیه می‌شوند، فرآیند حرارت‌دهی در طی فرآیند تشکیل بریکت در محدوده دمایی ۲۸۰ تا ۳۶۰ درجه سبب تجزیه بخش عمده آن‌ها شده است. کاهش مواد فرار بر اثر افزایش دما، نشان‌دهنده افزایش روند خارج شدن ترکیبات فرار، محصولات گازی و هیدروکربن‌های با وزن مولکولی کم می‌باشد. از این‌رو، افزایش درصد کربن ثابت به دلیل افزایش آزادسازی مواد فرار طی فرآیند تشکیل بریکت بوده است. درصد خاکستر و مواد فرار اثر مستقیمی بر میزان درصد کربن ثابت در بریکت‌های سوختی دارد. در واقع، ممکن است که کاهش محتوای فرار و افزایش کربن ثابت در اثر پیش‌تیمار از ناسیون به دلیل افزایش درصد تجزیه مواد استخراجی و لیگنین و جابجایی مکانی لیگنین‌های تجزیه‌شده در زیست‌توده و کاهش همی سلولزها و سلولز باشد (Biswas et al., 2011). در مورد نقش از ناسیون در کاهش خاکستر می‌توان به این نکته اشاره کرد که در اثر پیش‌تیمار از ندهی ساختار لیگنوسلولز زیست‌توده تا حد زیادی دچار تغییرات می‌شود. از این‌رو، بر اساس مشاهده عینی حین کار با دستگاه بریکت‌ساز، مواد معدنی موجود در زیست‌توده مرطوب در حین فرآیند فشردگی ممکن است به صورت فاز مایع محلول از قالب دستگاه بریکت آزاد و خارج شده باشند. بنابراین، کاهش محتوای خاکستر را می‌توان به عنوان اثر ترکیبی تغییرات ساختاری و سلولی شبکه لیگنوسلولز و فرآیند خارج شدن مواد معدنی از قالب دستگاه در اثر فشردگی در نظر گرفت. کاهش فلزات قلیایی و معدنی مانند پتاسیم، سدیم، فسفر و گوگرد در زیست‌توده در اثر پیش‌تیمار می‌تواند بر رفتار ذوب خاکستر، کاهش تشکیل آئروسول در حین احتراق و در نتیجه کاهش رسوب در بویلرها را در پی داشته باشد (Biswas et al., 2011). نتایج مشابهی در اثر پیش‌تیمار چوب سالیکس (Salix) با بخار برای تولید پلت سوختی مشاهده شده است (Biswas et al., 2011). تحقیقات نشان می‌دهد که بخش عمده تجزیه حرارتی زیست‌توده در دماهای بالاتر از ۲۰۰ درجه سلسیوس انجام می‌شود. بنابراین تشکیل بریکت در دماهای بین ۲۸۰ تا ۳۶۰ درجه سلسیوس سبب افزایش درصد کربن ثابت و کاهش مواد فرار می‌شود که تأثیر مثبتی بر کارایی بریکت سوختی دارد.



جدول ۵. نتایج مقادیر آنالیز تقریبی ماده اولیه باگاس و نمونه بریکت‌ها

نمونه	خاکستر	مواد فرار	کربن ثابت
باگاس <sup>۱</sup> *	۷/۷۸	۸۷/۷۸	۴/۴۴
بریکت بهینه <sup>۱</sup>	۵/۰۵	۸۲/۲۷	۱۲/۶۷
بریکت شاهد <sup>۱</sup>	۷/۹۱	۸۴/۸۶	۷/۲۳
بریکت بهینه <sup>۲</sup>	۴/۹۱	۷۹/۹	۱۲/۳۱
بریکت شاهد <sup>۲</sup>	۷/۶	۸۱/۵۶	۶/۹۵

<sup>۱</sup> داده‌ها بر مبنای ماده خشک، <sup>۲</sup> داده‌ها بر مبنای آزمایش‌های انجام شده در شرایط حقیقی  
\* داده از مرجع ایبض و همکاران (۱۳۹۸)

### نتایج حداکثر ارزش حرارتی

در این پژوهش برای ارزیابی حداکثر ارزش حرارتی بریکت، از معادلات تجربی صحت‌گذاری شده و نتایج آنالیز تقریبی استفاده شد. جدول ۶، نتایج حداکثر ارزش حرارتی ماده اولیه باگاس و بریکت تولید شده تحت پیش تیمار ازن در شرایط بهینه و بریکت تولید شده بدون پیش تیمار را نشان می‌دهد. داده‌ها نشان می‌دهد که اعمال پیش تیمار ازن منجر به افزایش حداکثر ارزش حرارتی بریکت باگاس از ۱۶/۶۱ به ۱۷/۸۵ مگاژول بر کیلوگرم گردید که معادل یک افزایش ۷/۴۷ درصدی است. نتایج مشابهی توسط (Rahman et al., 2017) در اثر ازناسیون زیست‌توده چوب با ۱ درصد وزنی ازن و نرخ جریان ۱/۴ لیتر بر دقیقه در حالت ازناسیون پیوسته در ماریچ مشاهده شد و آن‌ها ثابت کردند که ارزش حرارتی پلت‌های تولیدی از زیست‌توده چوب ازن‌دهی شده از مقدار ۱۸/۹۱ به ۱۹/۲۶ مگاژول بر کیلوگرم افزایش و مقدار خاکستر از ۰/۷۱ به مقدار ۰/۶۲ درصد کاهش پیدا می‌کند.

احتراق زیست‌توده‌ها شامل اکسیداسیون عناصر اصلی زیست‌توده و شکستن پیوندهای هیدروژنی تشکیل شده بین اتم‌های الکترون منفی (نیتروژن و اکسیژن) و اتم‌های الکترون مثبت (هیدروژن) است (Patil et al., 2021). در طی احتراق زیست‌توده، کربن‌ها اکسید و سپس کربن دی‌اکسید تشکیل و در نتیجه گرما آزاد می‌شود. هر چه درجه کاهش کربن آیش‌تر باشد، منجر به انتشار کربن دی‌اکسید و گرمای بیشتری می‌شود. در نتیجه، درجه کاهش کربن و نوع ساختار کریستالی زیست‌توده اثرات مهمی برای آزاد شدن انرژی حرارتی طی فرآیند احتراق دارند (Patil et al., 2021). گزارش شده است که سلولز و همی‌سلولز ۱۸/۶ مگاژول بر کیلوگرم، لیگنین بین ۲۳/۲۶ الی ۲۵/۵۸ مگاژول بر کیلوگرم و مواد استخراجی دارای بیش از ۳۰ مگاژول بر کیلوگرم حداکثر انرژی حرارتی هستند (Esteves et al., 2023). قابل ذکر است که حداکثر انرژی حرارتی دارای یک ضریب همبستگی ۰/۹۵ با لیگنین و ۰/۹۱۵ با مواد استخراجی موجود در زیست‌توده‌ها است (Demirbaş, 2001). این امکان وجود دارد که ازناسیون از طریق تأثیر بر ترکیبات اصلی زیست‌توده از قبیل کربن، اکسیژن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد (Patil et al., 2021) و همچنین تجزیه لیگنین و مواد استخراجی که در مطالعات پیشین محققان به اثبات رسیده است (Travaini et al., 2016)، بر ارزش حرارتی بریکت‌های سوختی تأثیر مثبتی گذاشته باشد (Demirbas, 2002). احتمال دیگری که می‌تواند شواهدی محکمی از اثرات ازناسیون بر حداکثر ارزش حرارتی بریکت‌های تولیدشده در اختیار ما بگذارد، در واقع، اثرات ازناسیون بر نوع ساختار کربن و گروه‌های عاملی است. در مطالعه (Tahir et al., 2019)، بیان شد که افزایش حداکثر ارزش حرارتی پلت‌های سوختی می‌تواند به بسط طول زنجیره کربن و کاهش تعداد پیوندهای دوگانه کربن (C=C) ارتباط داشته باشد. علاوه بر این، ازناسیون می‌تواند نوع کربن در زیست‌توده‌ها را به اشکال اکسیدشده<sup>۲</sup> و نوع کاهش یافته<sup>۳</sup> تغییر دهد. هنگامی که کربن به شکل اکسیدشده وجود داشته باشد، کاهش بیش‌تری در حداکثر ارزش حرارتی رخ می‌دهد. بر خلاف نوع اکسیدشده کربن، نوع کاهش یافته کربن این قابلیت را دارد که خود را اکسید کرده و اکسیژن را بیش‌تر کاهش دهد و از این طریق منجر به تشکیل کربن دی‌اکسید و آزادسازی گرمای بیشتر و در نتیجه افزایش حداکثر ارزش حرارتی می‌شود (Tahir et al., 2019). با اعمال ازناسیون، محتوای اکسیژن و گروه‌های عاملی اکسیژنی افزایش و نوع و پیوندهای دوگانه کربن شکسته و تعداد آن‌ها کاهش پیدا می‌کند که می‌تواند بر ارزش حرارتی تأثیرگذار باشد (Tahir et al., 2019). ارزش حرارتی یا به عبارت بهتر گرمای ویژه احتراق (کیلوژول بر مول) برای هر واحد ساختاری خاص در ساختارهای مولکولی هیدروکربن‌های آلیفاتیک و آروماتیک متفاوت است. وجود برخی پیوندهای منفرد و دوگانه کربن مانند C—OH و

1. Carbon reduction degree  
2. Carbon oxidized state  
3. Carbon reduced state

—C=C— در ساختار مولکولی، می‌تواند ارزش حرارتی زیست‌توده‌ها را کاهش دهد. همچنین، گزارش شده است که تخریب ساختارهای کریستالی سلولز به ساختارهای آمورف در اثر ازناسیون (Patil et al., 2021)، باعث کاهش پایداری حرارتی اجزای زیست‌توده و کاهش نسبت‌های H/C و O/C و در نتیجه منجر به بهبود حداکثر ارزش حرارتی می‌شود (Tahir et al., 2019). اطلاعات بیش‌تر در مورد ارتباط بین گروه‌های عاملی و حداکثر ارزش حرارتی زیست‌توده‌ها در مطالعه (Patil et al., 2021) قابل استخراج است. به‌طور کلی، تمام فرضیه‌ها و احتمالات بالا نیاز به اثبات دارند و می‌توانند در مطالعات آینده از طریق آنالیزهای مختلف مانند آنالیز حرارت‌سنجی (TGA)، کالری‌متری تفاضلی روبشی (DSC)، آنالیز عناصر اصلی (CHNOS)، آنالیز رزونانس مغناطیسی هسته برای ایزوتوپ  $^{13}\text{C}$ -NMR و آنالیز کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی (GC/MS) مورد مطالعه دقیق قرار بگیرند. از طرف دیگر، افزایش ارزش حرارتی همچنین با توجه به رابطه (۸) که همبستگی مثبتی با افزایش درصد کربن ثابت و کاهش مواد فرار و خاکستر در فرآیند بریکت‌سازی با پیش‌تیمار ازن (جدول ۵) دارد، نیز مرتبط است. قابل ذکر است که ترکیبات غیراشباع مانند اسیدهای چرب و تارپن‌ها در حین ازناسیون زیست‌توده‌ها از بین می‌روند. این موضوع، بر کاهش مواد فرار ارتباط دارد و بیان شده است که در اثر ازناسیون زیست‌توده، تحت سازو کار ذکرشده، کاهش انتشار کربن مونواکسید در حین انبار پلت‌های سوختی رخ می‌دهد (Rahman et al., 2017).

جدول ۶. حداکثر ارزش حرارتی ماده اولیه باگاس و بریکت تولید شده در شرایط بهینه و بدون پیش‌تیمار

نمونه	باگاس نیشکر	بریکت با پیش‌تیمار ازن	بریکت بدون پیش‌تیمار
حداکثر ارزش حرارتی (MJ/kg)	۱۴/۹۱	۱۷/۸۵	۱۶/۶۱

### بهینه‌سازی فرآیند

به‌منظور افزایش کیفیت بریکت، اطلاع از شرایط و نقاط کاری بهینه فرآیند تولید بریکت، ضروری به نظر می‌رسد. از این رو بهینه‌سازی یکی از مهم‌ترین مراحل افزایش بازدهی به شمار می‌رود. قیود بهینه‌سازی در این پژوهش شامل تولید بریکت از باگاس ازن‌دهی شده بر مبنای بیش‌ترین مقدار چگالی و چقرمگی و همچنین کم‌ترین زمان ازن‌دهی و دما در نظر گرفته شد. با استفاده از تابع مطلوبیت نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، تعدادی نقطه بهینه با شاخص مطلوبیت بیش‌تر از ۰/۸ با هدف بیش‌ترین مقدار چگالی و چقرمگی، همچنین کم‌ترین زمان ازن‌دهی و دما ارائه شد (جدول ۷). در این نقطه بهینه مقدار پاسخ‌های چگالی ۹۸۲/۳۱ کیلوگرم بر مترمکعب و چقرمگی ۲۴۹/۹۳۴ کیلوپاسکال حاصل شد.

جدول ۷. نتایج بهینه‌سازی فرآیند تولید بریکت از باگاس ازن‌دهی شده با پرس هیدرولیکی به روش سطح پاسخ

ردیف	اندازه ذرات (mm)	رطوبت (%w.b.)	زمان ازن‌دهی (min)	دمای قالب (°C)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	چقرمگی (J/mm <sup>3</sup> )	شاخص مطلوبیت
۱	۱	۳۳/۴۴۸	۱۵	۲۸۰	۹۸۲/۳۱	۲۴۹/۹۳۴	۰/۸۰۹
۲	۱	۳۳/۳۸۳	۱۵	۲۸۰/۰۱	۹۸۱/۸۰۶	۲۵۰/۳۹۹	۰/۸۰۹
۳	۱	۳۳/۷۰۹	۱۵	۲۸۰	۹۸۴/۲۸۵	۲۴۸/۰۵۸	۰/۸۰۹

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی پارامترهای مؤثر در تولید بریکت سوختی از باگاس با پیش‌تیمار ازن با استفاده از پرس هیدرولیکی نشان داد که رطوبت ذرات باگاس بیش‌ترین تأثیر را بر چگالی و چقرمگی بریکت داشت. با افزایش رطوبت از ۲۰ تا ۳۵ درصد، بیش‌ترین تأثیر را بر چگالی و چقرمگی بریکت نشان داد. در این تحقیق بیش‌ترین مقدار چگالی و چقرمگی به ترتیب برابر با ۱۰۷۶ کیلوگرم بر مترمکعب و ۳۶۰ کیلوپاسکال بدست آمد. شرایط بهینه تولید بریکت از نظر استحکام و چگالی بریکت در مدت زمان ازن‌دهی ۱۵ دقیقه، اندازه ذرات باگاس کوچک‌تر از ۱/۱۸ میلی‌متر، رطوبت باگاس ۳۳/۴۴۸ درصد و دمای قالب ۲۸۰ درجه سلسیوس تعیین شد. همچنین نتایج نشان دادند که تشکیل بریکت با پیش‌تیمار ازن به‌طور غیر مستقیم سبب کاهش معنی‌دار درصد مواد فرار نسبت به زیست‌توده و افزایش درصد کربن ثابت می‌شود. با توجه به نتایج، تغییرات در میزان ارزش حرارتی بریکت‌های تولید شده، اثرات مثبت کاربرد فرآیند بریکت‌سازی با پیش‌تیمار ازن را نشان می‌دهد. ازناسیون از طریق تجزیه لیگنین و مواد استخراجی با ارزش حرارتی ذاتی بالا و همچنین افزایش گروه‌های عاملی،

کاهش پیوندهای دوگانه کربن و تبدیل کربن به فرم کاهش یافته می تواند ارزش حرارتی بریکت های سوختی را افزایش دهد. همچنین استفاده از معادلات تجربی برای ارزیابی ارزش حرارتی نشان داد که می توان از این روش برای محاسبه ارزش حرارتی زیست توده ها با تقریب مناسبی استفاده کرد. برای مطالعات آتی، توصیه می شود تحقیقات ازناسیون زیست توده ها به طور عمیق تر و دقیق تر مورد مطالعه قرار بگیرد. از جمله ارتباط ازناسیون با تغییرات ساختاری زیست توده (تعیین تغییرات در مواد استخراجی، لیگنین، سلولز و همی سلولز)، تغییرات گروه های عاملی و عناصر زیست توده (کربن، نیتروژن، هیدروژن، اکسیژن و گوگرد) و تغییرات در محتوای مواد معدنی، فلزات قلیایی و فلزات سنگین می تواند شناخت بیش تری از پیش تیمار ازن و اثرات آن بر ویژگی های بریکت های سوختی دهد. همچنین اثرات ازناسیون بر پارامترهای احتراق بریکت های تولیدی، مقدار و کیفیت خاکستر باقیمانده از احتراق و گازهای منتشر شده از احتراق زیست توده بایستی به طور دقیق مورد مطالعه قرار بگیرند. یکی دیگر از چالش های بریکت های سوختی تولید شده، مبحث انبارمانی و ذخیره آن هاست، زیرا در حین انبار بریکت ها در سوله های بسیار بزرگ نشت گازهایی مانند کربن مونواکسید می تواند خطرات انفجار را در پی داشته باشد. لذا، اثرات ازناسیون بر مفهوم گاز زدایی (off-gassing) بریکت های سوختی در انبار می تواند تمرکز تحقیق در مطالعات آینده باشند.

## منابع

- ابیض، علی؛ افرا، الیاس؛ سرانیان، احمد رضا. (۱۳۹۸). تولید بریکت های سوختی باگاس تقویت شده به وسیله اتصال دهنده های نانوسلولز و نانولیکنوسلولز. *مجله جنگل و فرآورده های چوب*، ۷۲ (۴)، ۳۶۵-۳۷۶.
- افر، نازنین؛ عجب شیرچی، یحیی؛ سرشار، محمد؛ علوی، سید سعید. (۱۳۹۴). مقایسه اثر پیش تیمار ازن دهی با پرتو دهی میکروویو بر هیدرولیز آنزیمی باگاس نیشکر. *نشریه ماشین های کشاورزی*، ۵ (۹)، ۳۵-۴۳.
- حسنکی، ناهید؛ منصور، یعقوب؛ و عساکره، عباس. (۱۳۹۹). پتانسیل جایگزینی باگاس به جای گاز طبیعی در کارخانه قند کارون و ارزیابی اقتصادی آن. *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۱ (۱)، ۱۱-۲۱.
- سرلکی، احسان؛ کیان مهر، محمد حسین؛ قربانی، مرضیه. (۱۴۰۰). روش های تحلیلی برای ارزیابی کیفیت کمپوست باگاس نیشکر و بهبود ویژگی های فیزیکی مکانیکی جهت فشرده سازی. *علوم محیطی*، ۱۹ (۴)، ۱۰۷-۱۳۰.
- شفاعی، حسین؛ کرمانی، علی ماشاء الله؛ کیان مهر، محمد حسین؛ حسن بیگی، سید رضا. (۱۴۰۰). بهینه سازی فرآیند تولید بریکت از ترکیب باگاس و پوست گردو با استفاده از روش سطح پاسخ و ارزش حرارتی آن. *مجله جنگل و فرآورده های چوبی*، ۷۴ (۴)، ۴۸۵-۴۹۹. صادقی، حسین؛ طباطبائی کلور، رضا؛ متولی، علی. (۱۴۰۱). بررسی ترکیب زیست توده های باگاس نیشکر و کاه برنج با مواد پیوند دهنده طبیعی بر خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت های سوختی. *مجله مکانیزاسیون کشاورزی*، ۷ (۴)، ۱-۱۰.
- قربانی، مرضیه؛ کیان مهر، محمد حسین؛ عرب حسینی، اکبر؛ اسدی الموتی، علی؛ صادقی، رضا. (۱۳۹۸). ازن کافت: یک تکنیک اکسیداسیون نوین و مؤثر برای پیش فرآوری زیست توده های لیگنوسلولزی. *مجموعه مقالات دوازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران*، ۱۶-۱۸ بهمن، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران.
- قربانی، مرضیه؛ کیان مهر، محمد حسین؛ عرب حسینی، اکبر؛ اسدی الموتی، علی؛ صادقی، رضا. (۱۴۰۰). پیش فرآوری ازن کافت کاه گندم با هدف بهبود لیگنین زدایی: استفاده از روش سطح پاسخ برای مدل سازی و بهینه سازی فرآیند. *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۲ (۱)، ۳۷-۵۳.
- کریمی، اکبر؛ معزی، عبدالامیر؛ چرم، مصطفی؛ عنایتی ضمیر، نعیمه. (۱۳۹۸). بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی بیوچارهای حاصل از بقایای ذرت و باگاس نیشکر در دماهای مختلف پیرولیز. *مجله تحقیقات خاک و آب ایران*، ۵۰ (۳)، ۷۲۵-۷۳۹.

## REFERENCES

- Abyaz, A., Afra, E., & Saraeyan, A. (2020). Production of bagasse biofuel briquettes reinforced by nanocellulose and nanolignocellulose binders. *Journal of Forest and Wood Products*, 72(4), 365-376. (In Persian).
- Ali, A., Kumari, M., Manisha, Tiwari, S., Kumar, M., Chhabra, D., & Sahdev, R. K. (2024). Insight into the biomass-based briquette generation from agro-residues: challenges, perspectives, and innovations. *BioEnergy Research*, 1-41.
- Atan, N. A., Nazari, M. M., & Azizan, F. A. (2018). Effect of torrefaction pre-treatment on physical and combustion characteristics of biomass composite briquette from rice husk and banana residue. *MATEC Web of Conferences*, 150, 06011.
- Baig, K. S., Wu, J., Turcotte, G., & Doan, H. D. (2015). Novel ozonation technique to delignify wheat straw for biofuel production. *Energy and Environment*, 26(3), 303-318.



- Ben'ko, E. M., Manisova, O. R., & Lunin, V. V. (2017). Effect of moisture content on the interaction between lignocellulosic materials and ozone. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 91, 1190-1196.
- Biswas, A. K., Yang, W., & Blasiak, W. (2011). Steam pretreatment of Salix to upgrade biomass fuel for wood pellet production. *Fuel Processing Technology*, 92(9), 1711-1717.
- Brandt, A., Grasvik, J., Hallett, J. P., & Welton, T. (2013). Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids. *Green Chemistry*, 15(3), 550-583.
- Choi, H., Lim, H. N., Kim, J., Hwang, T. M. & Kang, J. W. (2002). Transport characteristics of gas phase ozone in unsaturated porous media for in-situ chemical oxidation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 57, 81-98.
- Chou, C. -S., Lin, S. -H., & Lu, W. -C. (2009). The optimum conditions for preparing solid fuel briquette of rice straw by a piston-mold process using the Taguchi method. *Fuel Processing Technology*, 90(7-8), 1041-1046.
- Demirbaş, A. (2001). Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy conversion and management*, 42(2), 183-188.
- Demirbas, A. (2002). Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energy exploration & exploitation*, 20(1), 105-111.
- Eqra, N., Ajabshirchi, Y., Sarshar, M., & Alavi, S. S. (2015). Comparison of microwave and ozonolysis effect as pretreatment on sugarcane bagasse enzymatic hydrolysis. *Journal of Agricultural Machinery*, 5(1), 35-43. (In Persian).
- Esteves, B., Sen, U., & Pereira, H. (2023). Influence of chemical composition on heating value of biomass: A review and bibliometric analysis. *Energies*, 16(10), 4226.
- European Environment Agency. (2015). Trends and projections in Europe 2015: tracking progress towards europe's climate and energy targets. Publications Office of the European Union.
- García-Cubero, M. T., González-Benito, G., Indacoechea, I., Coca, M., & Bolado, S. (2009). Effect of ozonolysis pretreatment on enzymatic digestibility of wheat and rye straw. *Bioresource technology*, 100(4), 1608-1613.
- Gendeka, A., Aniszewska, M., Malatk, J., & Velebil, J. (2018). Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. *Biomass and Bioenergy*, 117, 173-179.
- Ghorbani, M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A., Asadi Alamouti, A., & Sadeghi, R. (2021). Ozonolysis pretreatment of wheat straw for enhanced delignification: applying rsm technique for modeling and optimizing process. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 52(1), 37-53. (In Persian).
- Ghorbani, M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A., Sarlaki, E., Asadi Alamouti, A., & Sadeghi, R. (2020, February). Ozonolysis: a novel and effective oxidation technique for lignocellulosic biomass pretreatment. In *Proceedings of 12th National Congress on Biosystems Engineering and Agricultural Mechanization, 5-7 February 2020, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan, Iran*. (In Persian).
- Ghorbani, M., Kianmehr, M. H., Sarlaki, E., Angelidaki, I., Yang, Y., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2023). Ozonation-pelleting of nitrogen-enriched wheat straw: Towards improved pellet properties, enhanced digestibility, and reduced methane emissions. *Science of The Total Environment*, 892, 164526.
- Ghorbani, M., Li, Q., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A., Sarlaki, E., Vakilian, K. A., & Tabatabaei, M. (2022). Highly digestible nitrogen-enriched straw upgraded by ozone-urea pretreatment: digestibility metrics and energy-economic analysis. *Bioresource Technology*, 360, 127576.
- Granado, M. P. P., Gadelha, A. M. T., Rodrigues, D. S., Antonio, G. C., & De Conti, A. C. (2023). Effect of torrefaction on the properties of briquettes produced from agricultural waste. *Bioresource Technology Reports*, 21, 101340.
- Granado, M. P. P., Suhogusoff, Y. V. M., Santos, L. R. O., Yamaji, F. M., & Conti, A. C. D. (2021). Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. *Renewable Energy*, 167, 306-312.
- Hasanaki, N., Mansoori, Y., & Asakereh, A. (2020). Potential of substituting bagasse for natural gas in Karun sugar factory and its economic evaluation. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 51(1), 11-21. (In Persian).
- He, H., Wang, Y., Sun, Y., Sun, W., & Wu, K. (2024). From raw material powder to solid fuel pellet: A state-of-the-art review of biomass densification. *Biomass and Bioenergy*, 186, 107271.
- Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2019). Investigation of physicochemical characteristics of biochars derived from corn residue and sugarcane bagasse in different pyrolysis temperatures. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(3), 725-739. (In Persian).

- Kheiralipour, K., Khoobakht, M., & Karimi, M. (2024). Effect of biodiesel on environmental impacts of diesel mechanical power generation by life cycle assessment. *Energy*, 289, 129948.
- Li, C., Wang, L., Chen, Z., Li, Y. Y., Wang, R., Luo, X., Cai, G., Yu, Q., & Lu, J. (2015). Ozonolysis pretreatment of maize stover: the interactive effect of sample particle size and moisture on ozonolysis process. *Bioresource Technology*, 183, 240-247.
- Li, W., Yu, R., Luo, L., & Shi, H. (2024). Process optimization of pellet manufacturing from mixed materials in ultrasonic vibration-assisted pelleting. *Energies*, 17(9), 2087.
- Li, Y., Chen, M. Q., Li, Q. H., & Huang, Y. W. (2018). Effect of microwave pretreatment on the combustion behavior of lignite/solid waste briquettes. *Energy*, 149, 730-740.
- Liu, J., Jiang, X., Li, Z., Li, N., & Li, T. (2024). Parametric studies on pretreatment of lignocellulosic biomass via deep eutectic solvents: Enhancing densified pellet quality. *Industrial Crops and Products*, 208, 117850.
- Lubwama, M., Yiga, V. A., Muhairwe, F., & Kihedu, J. (2020). Physical and combustion properties of agricultural residue bio-char bio-composite briquettes as sustainable domestic energy sources. *Renewable Energy*, 148, 1002-1016.
- Maia, E. P., & Colodette, J. L. (2003). Effect of residual lignin content and nature on the efficiency and selectivity of ozone bleaching. *Brazilian Journal of Forest Science*, 27, 217-232. (In Portuguese).
- Mamleeva, N. A., Autlov, S. A., Bazarnova, N. G., & Lunin, V. V. (2009). Delignification of softwood by ozonation. *Pure and Applied Chemistry*, 81, 2081-2091.
- Mohammadi, M., Alian, M., Dale, B., Ubanwa, B., & Balan, V. (2024). Multifaced application of AFEX-pretreated biomass in producing second-generation biofuels, ruminant animal feed, and value-added bioproducts. *Biotechnology Advances*, 108341.
- Navalta, C. J. L. G., Banaag, K. G. C., Raboy, V. A. O., Go, A. W., Cabatingan, L. K., & Ju, Y. H. (2020). Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran. *Renewable Energy*, 147, 1941-1958.
- Nhuchhen, D. R., & Salam, P. A. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*, 99, 55-63.
- Okot, D. K., Bilsborrow, P. E., & Phan, A. N. (2018). Effects of operating parameters on maize COB briquette quality. *Biomass and Bioenergy*, 112, 61-72.
- Patil, R., Cimon, C., Eskicioglu, C., & Goud, V. (2021). Effect of ozonolysis and thermal pre-treatment on rice straw hydrolysis for the enhancement of biomethane production. *Renewable Energy*, 179, 467-474.
- Peretz, R., Gerchman, Y., & Mamane, H. (2017). Ozonation of tannic acid to model biomass pretreatment for bioethanol production. *Bioresource Technology*, 241, 1060-1066.
- Poddar, S., Kamruzzaman, M., Sujan, S. M. A., Hossain, M., Jamal, M. S., Gafur, M. A., & Khanam, M. (2014). Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. *Fuel*, 131, 43-48.
- Pongsak, J. (2015). Physical and thermal properties of briquette fuels from rice straw and sugarcane leaves by mixing molasses. *Energy Procedia*, 79, 2-9.
- Rahimi Ajdadi, F., & Esmaili, M. (2020). The effect of combined chemical-hydrothermal pretreatments on enhancing lignin removal of forest waste to biogas production, *12th National Congress of Mechanical Biosystems Engineering and Mechanization of Iran*, 5 February 2020, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Persian).
- Rahman, M. A., Squizzato, S., Luscombe-Mills, R., Curran, P., & Hopke, P. K. (2017). Continuous ozonolysis process to produce non-CO off-gassing wood pellets. *Energy & Fuels*, 31(8), 8228-8234.
- Sadeghi, H., Tabatabaekolour, R., & Motevali, A. (2023). Investigating the composition of sugarcane bagasse and rice straw biomass with natural binders on the mechanical and thermal properties of fuel pellets. *Journal of Agricultural Mechanization*, 7(4), 1-10. (In Persian).
- Sarker, T. R., Nanda, S., Meda, V., & Dalai, A. K. (2023). Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 231-264.
- Sarlaki, E., & Hassan-Beygi, S. R. (2019). Production potentials and technical barriers facing the development and utilization of renewable energies in Iran. *Journal of renewable and new energy*, 6(1), 14-25.
- Sarlaki, E., Kermani, A. M., Kianmehr, M. H., Vakilian, K. A., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Ma, N. L., & Lam, S. S. (2021). Improving sustainability and mitigating environmental impacts of agro-biowaste compost fertilizer by pelletizing-drying. *Environmental Pollution*, 285, 117412.
- Sarlaki, E., Kianmehr, M. H., & Ghorbani, M. (2021). Analytical methods for assessing the quality of sugarcane bagasse compost and improving the physicomechanical properties toward densification. *Environmental Sciences*, 19(4), 107-130. (In Persian).



- Setter, C., & Oliveira, T. J. P. (2022). Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis. *Renewable Energy*, 189, 1007-1019.
- Shafaie, H., Kermani, A. M., Kianmehr, M. H., & Hassanbeygi, S. R. (2022). Optimization of the briquette production process from the composition of bagasse and walnut shell using the response surface methodology (RSM) and its calorific value. *Journal of Forest and Wood Products*, 74(4), 485-499. (In Persian).
- Smith, I. E., Probert, S. D., Stokes, R. E., & Hansford, R. J. (1977). The briquetting of wheat straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(2), 105-111.
- Soleimani, M., Tabil, X. L., Grewal, R., & Tabil, L. G. (2017). Carbohydrates as binders in biomass densification for biochemical and thermochemical processes. *Fuel*, 193, 134-141.
- Song, X., Zhang, S., Wu, Y., & Cao, Z. (2020). Investigation on the properties of the bio-briquette fuel prepared from hydrothermal pretreated cotton stalk and wood sawdust. *Renewable Energy*, 151, 184-191.
- Sprenger, C. J., Tabil, L. G., Soleimani, M., Agnew, J., & Harrison, A. (2018). Pelletization of refuse-derived fuel fluff to produce high quality feedstock. *Journal of Energy Resources Technology*, 140(4), 042003.
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B., & Sanadi, A. R. (2012). Fuel pellets from wheat straw: the effect of lignin glass transition and surface waxes on pelletizing properties. *BioEnergy Research*, 5, 450-458.
- Sundaram, V., & Muthukumarappan, K. (2016). Impact of AFEX™ pretreatment and extrusion pelleting on pellet physical properties and sugar recovery from corn stover, prairie cord grass, and switchgrass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 179, 202-219.
- Tahir, M. H., Zhao, Z., Ren, J., Naqvi, M., Ahmed, M. S., Shen, B., Elkamel, A., Irfan, R. M., & Rahman, A. (2019). Fundamental investigation of the effect of functional groups on the variations of higher heating value. *Fuel*, 253, 881-886.
- Tanase-Opedal, M., Ghoreishi, S., Hermundsgård, D. H., Barth, T., Moe, S. T., & Brusletto, R. (2024). Steam explosion of lignocellulosic residues for co-production of value-added chemicals and high-quality pellets. *Biomass and Bioenergy*, 181, 107037.
- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. *Biomass and bioenergy*, 35(5), 1663-1667.
- Travaini, R., Marangon-Jardim, C., Colodette, J. L., Morales-Otero, M. D., & Bolado-Rodríguez, S. (2014). Pretreatment of biomass-processes and technologies, In: *Pandey, A., Negi, S., Binod, P. and Larroche, C. (Eds.)*, (pp, 105-135), Academic Press, USA.
- Travaini, R., Martín-Juárez, J., Lorenzo-Hernando, A., & Bolado-Rodríguez, S. (2016). Ozonolysis: An advantageous pretreatment for lignocellulosic biomass revisited. *Bioresource Technology*, 199, 2-12.
- Vidal, P. F., & Molinier, J. (1988). Ozonolysis of lignin - improvement of in vitro digestibility of poplar sawdust. *Biomass*, 16(1), 1-17.
- Wang, Y., Wu, K., & Sun, Y. (2018). Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw. *Journal of the Energy Institute*, 91(1), 153-162.
- Xia, X., Zhang, K., Xiao, H., Xiao, S., Song, Z., & Yang, Z. (2019). Effects of additives and hydrothermal pretreatment on the pelleting process of rice straw: Energy consumption and pellets quality. *Industrial Crops and Products*, 133, 178-184.
- Zhang, G., Sun, Y., & Xu, Y. (2018). Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 477-487.



## Effect of ozone pretreatment and densification parameters on the physical, mechanical, and fuel characteristics of bagasse briquettes

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

Among renewable energy resources, biomass has the potential to serve as a sustainable alternative to fossil fuels. However, the significant distance between the source of biomass and its point of use results in high transportation costs due to factors such as high moisture content, irregular shapes, and low density. Additionally, the direct combustion of biomass presents challenges related to its high moisture content, low volumetric density, and limited energy potential. These issues can be mitigated through densification into briquettes, a process that produces a solid and dense fuel with consistent properties. To enhance the physical, chemical, and thermal characteristics of lignocellulosic biomass for biofuel production, pretreatment is often necessary. Ozone, being a powerful oxidant, can be utilized for biomass pretreatment due to its ability to cleave carbon-carbon double and triple bonds, such as those found in lignin. This study aims to examine the effects of various ozonation pretreatment variables and the densification process on the quality of briquettes while also assessing their physical, mechanical, and chemical properties.

#### Materials and Methods

The sugarcane bagasse used in this study was provided by Haft Tappeh Sugarcane Agro-Industry Co., located in Khuzestan province, Iran. Optimizing the effect of ozonation pretreatment in the production of briquettes was performed using a hydraulic press. The independent variables were the size of bagasse particles ( $\leq 1.18$ , 1.18-2.36, and 2.36-4.75 mm), the mold temperature (280, 320, and 360 °C), the moisture content of bagasse in ozonation reactor (20, 35, and 50% w.b.) and time duration of ozonation (15, 25, and 35 minutes). The dependent variables were the toughness and relaxed density of briquettes. The experiments were designed using the response surface methodology (RSM) based on a central composite design (CCD) in Design Expert v.11 software. The ozonation process was performed in a fixed bed cylindrical reactor made of transparent plexiglas on a laboratory scale. For each treatment, a 6 g bagasse sample was placed in a stainless-steel container inside the reactor. Oxygen concentrator with 93% high purity, and the output ozone concentration was 30 g/h. Based on proximate analysis and measurement of moisture content, volatile matter, ash, and fixed-carbon content have been used to predict the higher calorific value of briquettes through validated experimental equations.

#### Results

The results showed that by decreasing the particle size, the density of the produced briquettes increased. Ozone pretreatment showed a significant effect on briquette quality, especially density. The maximum value of the briquette density of ozone-pretreated bagasse was 1076 kg/m<sup>3</sup>, higher than the corresponding amount without pretreatment was 873 kg/m<sup>3</sup>. The results showed that by increasing the moisture content of bagasse up to 30% in the ozonation process, the toughness of the briquettes increased. After that, the toughness decreased when the moisture content increased to 50%. The ozone pretreatment enhanced the calorific value of bagasse briquettes produced compared to briquettes without pretreatment. The results showed that ozonation pretreatment in the briquette production process increased its calorific value from 16.61 to 17.85 MJ/kg. This issue concerns increasing the percentage of fixed carbon and reducing volatile matter in the ozonation pretreatment process. Previous research has shown that the physical properties of briquettes, including density, affect their calorific value. Generally, the briquettes with a better compression process and higher density will have a higher calorific value. Briquette production was favored at higher values of density and toughness, and at lower values of ozonation time duration and mold temperature. Using the desirability function-based optimization, optimal points with the highest desirability value ( $\geq 0.8$ ) were determined. At the optimal point, the density and toughness were 982.31 kg/m<sup>3</sup> and 249.934 kPa, respectively.

#### Conclusions

The assessment of the operating parameters of ozone pretreatment in producing fuel briquettes showed that the moisture content and particle size of bagasse had the most effects on the density and toughness of briquettes. Optimum briquette production conditions were determined at 15 minutes of ozonation, bagasse particle size smaller than 1.18 mm, moisture content 33.448% (w.b.) and brequetting temperature 280 °C. The optimal values of briquette density and toughness responses were obtained as 982.310 kg/m<sup>3</sup> and 249.934 kPa, respectively. In general, ozone pretreatment improved the properties of sugarcane bagasse fuel briquettes. The calorific value of fuel briquettes produced from ozone-treated bagasse under optimal conditions was 17.85



MJ/kg, while this value was 16.61 MJ/kg for no pretreatment.

**CRedit authorship contribution statement**

Hussain Shafaie: Writing – original draft, Methodology, Data curation, Software, Formal analysis; Ali Mashaallah Kermani: Writing – review and editing, Conceptualization, Supervision, Project administration, Methodology, Visualization, Investigation, Validation; Ehsan Sarlaki: Writing – review and editing, Formal analysis, Investigation, Data curation, Validation, Resources; Mohammad Hossein Kianmehr: Supervision, Project administration, Methodology, Resources.

**Data Availability Statement**

Data available on request from the authors. All the data used in this original research are presented throughout the text and in the form of Tables and Figures.

**Ethical considerations**

The authors avoided from data fabrication and falsification.

**Acknowledgments**

The authors extend their sincere appreciation to the University of Tehran for their support throughout this project.

**Funding**

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

**Declaration of competing interest**

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.