جنگل و فرآورده‌های چوب، مجلهٔ منابع طبیعی ایران
دورهٔ ۷۴، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۴۰۰
ص ۴۸۵-۴۹۹ (پژوهشی)

DOI: 10.22059/jfwp.2021.319654.1158

بهینه‌سازی فرآیند تولید بریکت از ترکیب باگاس و پوست گردو به روش سطح پاسخ و ارزش حرارتی آن

حسین شفاعی[۱]، علی‌ماشاءاله کرمانی[۲*]، محمدحسین کیانمهر[۳]، سیدرضا حسن‌بیگی[۳]

۱. دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران
۲. استادیار، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران
۳. استاد، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹

چکیده

متراکم کردن مواد زیست‌توده حجیم مانند بریکت‌کردن، موجب بهبود ویژگی‌های مدیریتی مواد مانند چگالی برای حمل و نقل، انبارداری و غیره می‌شود. این تحقیق به منظور تعیین شرایط بهینهٔ فرآیند تولید بریکت از ترکیب باگاس و پوست گردو با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیکی به روش سطح پاسخ انجام گرفت. اثر متغیرهای مستقل شامل اندازه ذرات باگاس، دمای فرآیند، رطوبت ذرات باگاس و درصد نسبی ترکیب پوست گردو به باگاس، همگی در سه سطح بر متغیرهای پاسخ چگالی و مقاومت کششی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار ارزش حرارتی بریکت از طریق معادلات تجربی خطی و غیرخطی صحه‌گذاری شده ارزش حرارت بالا با استفاده از نتایج آنالیز تقریبی شامل مواد فرار، کربن ثابت و محتوای خاکستر تعیین شد. نتایج نشان داد که با کاهش رطوبت ذرات باگاس چگالی و مقاومت کششی بریکت افزایش می‌یابد. افزودن پوست گردو در بریکت تولیدشده با اندازهٔ ذرات ریز باگاس موجب کاهش مقاومت کششی گردید. تولید بریکت سبب کاهش معنی‌دار درصد مواد فرار و افزایش درصد کربن تثبیت شد. افزایش ارزش حرارتی نمونهٔ مادهٔ اولیه نسبت به بریکت تولیدشده از ۱۶ به ۲۲ مگاژول بر کیلوگرم نشان‌دهندهٔ اثرات مثبت کاربرد فرآیند بریکت‌سازی است. شرایط بهینهٔ تولید بریکت در نسبت ترکیب پوست گردو به باگاس ۵ درصد، اندازهٔ ذرات باگاس کوچک‌تر از ۱/۱۸ میلی‌متر، رطوبت باگاس ۷ درصد بر پایهٔ تر و دمای قالب ۳۶۰ درجه سلسیوس تعیین شد. مقدار بهینهٔ پاسخ‌های چگالی و مقاومت کششی به‌ترتیب ۸۶۷/۸۴۷ کیلوگرم بر متر مکعب و ۱/۳۵۶ مگاپاسکال بود. در این شرایط ارزش حرارتی ۲۲ مگاژول بر کیلوگرم به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: ارزش حرارتی، باگاس، بریکت سوختی، پوست گردو، روش سطح پاسخ، مقاومت کششی.

مقدمه

در جهان امروز با توجه به تقاضای فزاینده و تأثیرات مخرب زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی، توسعهٔ چشم‌گیر سوخت‌های جایگزین از منابع تجدیدپذیر افزایش یافته است [۱]. از میان این منابع، زیست‌توده به دلیل ویژگی‌هایی مانند هزینهٔ تولید کم، گازهای گلخانه‌ای اندک و انتشار گازهای اسیدی کم، قابلیت خوبی برای استفاده به جای سوخت‌های فسیلی دارد و به منبع مهم انرژی تجدیدپذیر تبدیل شده است [۲]. در ایران مقادیر عظیم پسماندهای زراعی و صنایع فرآوری، زمینه‌های گسترده‌ای را در راستای تحقیق و توسعهٔ کاربرد سوخت‌های زیستی فراهم کرده

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۲۱-۳۶۰۴۰۶۱۴
Email: amkermani@ut.ac.ir

است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به‌طور متوسط حدود ٦٦ درصد از گردوی تولیدشده، شامل پسماندهای پوست سبز و چوبی است [۳]. با توجه به مقدار زیاد تولید پوست چوبی گردو در کشور، می‌توان از آن در تولید محصولات مختلف مانند بریکت‌های سوختی استفاده کرد. از دیگر منابع زیست‌توده، باگاس نیشکر است. باگاس بقایای خشک به‌دست‌آمده از ساقهٔ نیشکر پس از خردکردن و استخراج عصارهٔ نیشکر از آن است [٤]. در تحقیقی پتانسیل‌سنجی و ارزیابی اقتصادی تولید انرژی از باگاس به‌جای گاز طبیعی در کارخانهٔ شکر کارون ارزیابی شد. نتایج نشان داد که از ۲۷۰ هزار تن باگاس مازاد، توان تأمین ۱۵/۱٤ درصد کل انرژی کارخانه و کاهش ۲۹ هزار تن آلاینده در سال را دارد [۵]. در مورد زیست‌توده، اغلب فاصلهٔ زیاد بین محل اصلی زیست‌توده و محل استفاده از آن، به‌دلیل محتوای رطوبت زیاد، شکل نامنظم و چگالی کم زیست‌توده سبب افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود [٦]. همچنین احتراق مستقیم زیست‌توده با چالش‌های رطوبت زیاد، چگالی حجمی کم و پتانسیل انرژی اندک همراه است. این مشکلات مربوط به زیست‌توده را می‌توان از طریق متراکم‌سازی کاهش داد، فرآیندی که قادر به تولید سوخت جامد و متراکم با خواص یکنواخت است. فرآیند متراکم‌سازی با اعمال نیروی مکانیکی و در حضور دما از راه تشکیل پیوندهای بین ذره‌ای انجام می‌گیرد. افزون بر آن، بروز رفتار پلاستیکی و الاستیکی در حین فشردگی در اجزای مواد لیگنوسلولزی موجب اتصال بهتر محصول نهایی می‌شود. تولید بریکت‌های سوختی روشی مستقیم و آسان به منظور استفاده از منابع انرژی زیستی است، زیرا فقط به عملیات مکانیکی نیاز دارد و پیچیدگی‌های روش‌های ترموشیمیایی و بیوشیمیایی را ندارد [۷]. در این روش عوامل اتصال‌دهندهٔ طبیعی مانند لیگنین، پروتئین و نشاسته اثر مهمی دارد و با توجه به این‌که سازوکار احتمالی اتصال، 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 محتوای رطوبت زیست‌توده نیز در ژلاتینی شدن نشاسته، کاهش دمای شیشه‌ای لیگنین و تشکیل پل‌های مایع بین ذرات از طریق نیروهای موئینگی و کشش سطحی حیاتی و مهم است [۸]. تا کنون تحقیقات زیادی در زمینهٔ تولید بریکت‌های سوختی از ضایعات کشاورزی صورت گرفته است که بسیاری از آن‌ها مرتبط با مواد اولیهٔ دارای کاربرد، مواد اتصال‌دهنده[1] به‌کار رفته و همچنین پیش‌فرآوری مواد اولیه است. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینهٔ بریکت کردن مواد زیست‌توده انجام گرفته است. چو و همکاران تحقیقی را در تولید بریکت کاه برنج انجام دادند. آنان در این تحقیق تأثیر گذارترین عامل برای استحکام بریکت سوختی را اندازهٔ ذرات کاه برنج اعلام کردند [۹]. برند و همکاران در تحقیقی به بررسی کیفیت بریکت‌های تولیدشده با نسبت های مختلف پوسته برنج، کاه برنج و خاکستر پوستهٔ برنج پرداختند. آنان دریافتند که وارد کردن کاه برنج در مخلوط ها، تراکم توده را افزایش می‌دهد و افزودن خاکستر سبب افزایش مقاومت فشاری بریکت‌ها می‌شود [۱۰]. نتایج تحقیقی دربارهٔ اثر فشار پلت‌سازی بر چگالی نشان داد که با افزایش فشار، در ابتدا تراکم افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند و سپس افزایش تراکم تدریجی خواهد بود [٦]. در تحقیقی با هدف بهبود شاخص‌های فنی بریکت‌های سوختی حاصل از باگاس نیشکر، استفاده از اتصال‌دهنده‌های سلولزی در مقیاس میکرومتری و نانومتری بررسی شد. نتایج نشان داد که پارامترهای فنی بریکت‌های تقویت‌شده به‌وسیلهٔ بایندرهای نانوسلولزی بیشتر از نمونهٔ شاهد بود، به‌طوری که بیش‌ترین چگالی به میزان ۷۵۱ کیلوگرم بر متر مکعب برای نمونهٔ نانوسلولز ۹ درصد بود [۱۱]. در تحقیقی که شفاعی و همکاران به منظور تولید بریکت از ترکیب باگاس

1. Binder

و پوست گردو انجام دادند، نتایج نشان داد که با افزایش دما و کاهش رطوبت، چقرمگی بریکت افزایش پیدا می‌کند و بیشترین مقدار چقرمگی برابر با ۲۳۳ کیلوپاسکال به‌دست آمد [۱۲]. در تحقیقی با هدف تهیهٔ پلت سوختی از ضایعات هرس درختان پسته، از روش سطح پاسخ[1] (RSM) به‌منظور بررسی و بهینه‌سازی فرآیند استفاده شد و اثر رطوبت، اندازهٔ ذرات و دمای تشکیل بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی بریکت بررسی شد [۱۳].

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی مفید برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندهاست. این روش مبتنی بر رگرسیون برای برقراری ارتباط بین چند متغیر ورودی به‌طور بالقوه و پارامتر پاسخ است [۱٤]. از مزایای روش سطح پاسخ می‌توان به کاهش تعداد آزمایش‌ها، تبدیل مسئله‌ای پیچیده به مسئله‌ای ساده‌تر، مشخص کردن حساسیت پاسخ در برابر هر عامل، امکان تخمین نتایج در شرایط بهینه، امکان تخمین نتایج در سطوح دلخواه، تعیین سهم خطا و امکان دست‌یابی هم‌زمان به شرایط بهینه برای چند پاسخ اشاره کرد [۱۵].

با توجه به اهمیت به‌کارگیری پسماندهای کشاورزی در تهیهٔ سوخت‌های زیستی، هدف این پژوهش، بررسی اثر متغیرهای مختلف فرآیند بریکت‌سازی بر کیفیت و بررسی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی بریکت‌های سوختی و همچنین به‌دست آوردن شرایط بهینهٔ فرآیند متراکم‌سازی شامل بیشترین مقادیر چگالی و مقاومت کششی است.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی مواد

در این تحقیق، باگاس از شرکت کشت و صنعت هفت‌تپه تهیه شد. باگاس مورد نظر برای نگهداری مطلوب و تهیهٔ نمونه‌های با رطوبت مورد نظر خشک شدند. برای تهیهٔ مواد با رطوبت‌های مورد نظر، ابتدا رطوبت اولیهٔ مواد با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. پس از تعیین رطوبت مواد، با استفاده از رابطهٔ ۲ مقدار آب لازم برای هر سطح رطوبتی تعیین و به مقدار باگاس مشخص اضافه شد. نمونه‌های باگاس در کیسه‌های پلاستیکی بدون درز در یخچال در دمای ٤ درجهٔ سلسیوس به‌مدت ۷۲ ساعت نگهداری شد تا رطوبت به‌طور یکنواخت پخش شود.

$$\%M.C_{(w.b.)} = \frac{w_w}{w_t}\times 100 = \frac{w_w}{w_w + w_d}\times 100 \qquad (۱)$$

در این رابطه، $M.C._{(w.b.)}$ = رطوبت بر پایهٔ تر (٪)، W_t = وزن نمونهٔ اولیه باگاس (گرم)، و W_d = وزن نمونهٔ باگاس (گرم) بعد از ۲٤ ساعت قرار گرفتن در آون در دمای ۱۰۳ درجهٔ سلسیوس و W_w = وزن آب موجود در باگاس (گرم) است.

$$m_w = \frac{m(MC_f - MC_i)}{1 - MC_f} \qquad (۲)$$

در این رابطه، m_w = جرم آب اضافه‌شده (گرم)، m = جرم نمونهٔ باگاس (گرم)، MC_i = رطوبت اولیهٔ باگاس بر پایهٔ تر (٪)، MC_f = رطوبت نهایی بر پایهٔ تر (٪) است.

چگالی حجمی مواد اولیه

برای اندازه‌گیری چگالی حجمی[2] مواد اولیه، نمونهٔ باگاس خردشده درون ظرفی از جنس استیل به حجم ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب ریخته شد. سپس مقدار باگاس اضافی از لبهٔ ظرف تراشیده و وزن شد. وزن ظرف خالی از وزن کل کم شد تا جرم باگاس موجود در آن مشخص شود. سپس از تقسیم مقدار جرم به‌دست آمده بر حجم ظرف، چگالی حجمی محاسبه شد. جدول ۱ مقادیر چگالی حجمی باگاس در سه اندازهٔ ذرات مختلف را نشان می‌دهد. همچنین در این آزمایش مقدار چگالی حجمی پوست گردوی خردشده ۵۵۳ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دست آمد.

1. Response Surface Methodology (RSM)

2. Bulk density

جدول ۱. چگالی حجمی نمونهٔ باگاس با اندازهٔ ذرات مختلف

اندازهٔ ذرات (mm)	کم‌تر از ۱/۱۸	۱/۱۸-۲/۳۶	۲/۳۶-٤/۷۵
چگالی (kg/m^3)	۶۹/۹۸	۵۷/۲۱	۴۶/۵۸

طراحی آزمایش‌ها با نرم‌افزار Design Expert

در این تحقیق اثر متغیرهای درصد نسبی ترکیب پوست گردو به باگاس در سه سطح (۵، ۱۵ و ۲۵ درصد)، اندازهٔ ذرات باگاس در سه سطح (۱/۱۸، ۲/۳۶-۱/۱۸ و ٤/۷۵-۲/۳٦ میلی‌متر)، دما در سه سطح (۲۸۰، ۳۲۰ و ۳٦۰ درجهٔ سلسیوس) و رطوبت باگاس بر پایهٔ تر در سه سطح (۷، ۱۳ و ۱۹ درصد) بر کیفیت فیزیکی و مکانیکی بریکت بررسی شد. شایان ذکر است که همهٔ سطوح پیشنهادی بر اساس تولید بریکت در صنعت و به منظور بررسی شاخص‌های مختلف بر کیفیت بریکت انتخاب شده است. چنان‌که تولید بریکت در صنعت به دلیل نبود پیش تیمار و همچنین نوع دستگاه به‌کار رفته، در این محدودهٔ دمایی انتخاب می‌شود. از آن‌جا که عامل اتصال‌دهندهٔ طبیعی موجود در زیست‌توده یعنی لیگنین در دماهای زیاد شروع به جریان یافتن می‌کند، به علت نبود پیش‌تیمار، دمای لازم برای اتصال مواد و تولید بریکت زیاد در نظر گرفته شد. طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ با روش طرح مرکب مرکزی[1] (CCD) با بیشترین تکرار نقاط مرکزی طرح به تعداد شش تکرار در نرم‌افزار Design Expert v.11 انجام گرفت.

تهیهٔ بریکت با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیکی

به منظور فشرده‌سازی و تهیهٔ بریکت‌های سوختی با شرایط مورد نظر طبق طراحی آزمایش‌ها، از دستگاه پرس هیدرولیکی (شکل ۱ الف) استفاده شد. این دستگاه از یک فک ثابت که محل قرارگیری قالب است و یک فک متحرک سیلندر هیدرولیک و واحد محرکهٔ هیدرولیکی و تابلوی کنترل تشکیل شده است. برای تولید بریکت از یک سیلندر و پیستون به عنوان قالب (شکل ۱ الف) استفاده شد که قطر داخلی و ارتفاع آن به‌ترتیب ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بود. همچنین از یک کمربند حرارتی با توان ۱۰۰۰ وات استفاده شد که با قرار گرفتن در اطراف سیلندر، گرمای مورد نیاز را تأمین می‌کرد. با استفاده از واحد کنترل دما (شکل ۱ الف) سطح دمای مورد نظر تنظیم شد. برای تولید بریکت پس از تعادل دمایی قالب و سطح دمای تنظیم شده در حدود ۱۲ گرم از تیمار مورد نظر درون سیلندر قالب ریخته شد و سپس پرس هیدرولیکی به مدت ٤۵ ثانیه مواد درون سیلندر را تحت فشار قرار داد. سپس بریکت‌های تولید شده از درون سیلندر خارج شد. در این آزمایش قطر بریکت‌های تولیدی ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع آن‌ها بسته به تیمارهای مختلف از حدود ۹ تا ۲۰ میلی‌متر بود. در همهٔ آزمایش‌ها فشرده‌سازی باگاس در سطح فشار سیلندر هیدرولیک ۵۰ بار و در یک تکرار انجام گرفت. شکل ۱ ب نمونهٔ بریکت‌های تولید شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

شاخص‌های ارزیابی بریکت تولیدشده

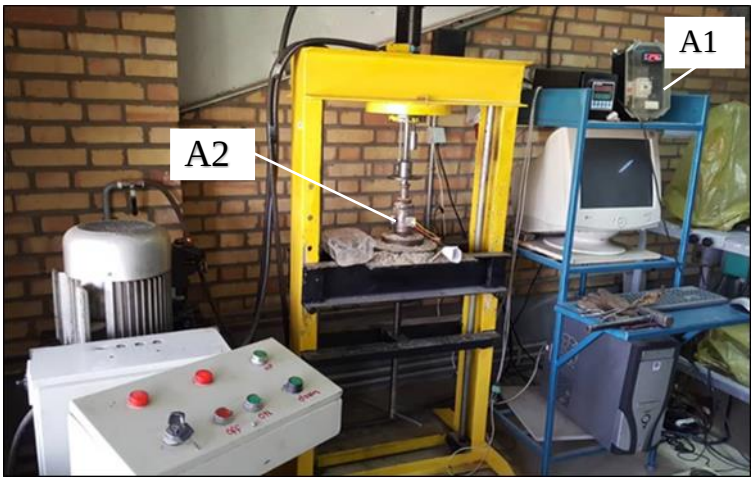
تعیین چگالی

برای اندازه‌گیری چگالی بریکت‌ها ابعاد طول (l) و قطر (d) بریکت‌ها با استفاده از یک کولیس با دقت ۰/۱ میلی‌متر و جرم آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. سپس چگالی بریکت‌ها با استفاده از رابطهٔ ۳ محاسبه شد [۱٦].

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 l} \qquad (۳)$$

در این رابطه: ρ = چگالی بریکت (کیلوگرم بر متر مکعب)، m = جرم بریکت (کیلوگرم)، d = قطر داخلی قالب (متر)، l = طول بریکت (متر) است.

1. Central Composite Design (CCD)



(الف)

(ب)

شکل ۱. فرآیند تولید بریکت؛ الف) پرس هیدرولیکی: (A1) واحد کنترل دما، و (A2) قالب تهیهٔ بریکت شامل سیلندر و پیستون به‌همراه کمربند حرارتی؛ ب) نمونهٔ بریکت‌های تولیدشده در این تحقیق.

تعیین مقاومت کششی

این آزمایش به‌منظور تعیین استحکام بریکت‌های تولیدی و درهم‌رفتگی مکانیکی و ایجاد پیوند بین ذرات انجام گرفت. مقاومت کششی توسط آزمون فشار قطری[1] و بارگذاری شبه‌استاتیک با استفاده از دستگاه آزمون مواد بیولوژیکی[2] انجام گرفت (شکل ۲ الف). در این آزمون نمونهٔ بریکت در وضعیت به پهلو روی فک پائینی و ثابت دستگاه قرار داده شد، سپس فک متحرک دستگاه که نیروسنج[3] به آن متصل است با سرعت ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین حرکت کرد و بیشینهٔ نیروی لازم برای شکستن بریکت‌ها توسط منحنی نیرو- جابه‌جایی بریکت (شکل ۲ ب) تعیین شد [۱۷]. در این آزمایش شکست در نتیجهٔ ترک‌خوردگی یا شکستن نمونه‌ها به دو نیمه در امتداد محور بارگذاری اتفاق افتاد. با استفاده از حداکثر نیروی لازم برای شکستن بریکت‌ها طبق رابطهٔ ٤ مقاومت کششی محاسبه شد [۱۷].

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi dl} \qquad (٤)$$

در این رابطه: σ_t = مقاومت کششی (مگاپاسکال)، F = نیروی شکست (نیوتن)، d = قطر بریکت (میلی‌متر) و l = طول بریکت (میلی‌متر) است.

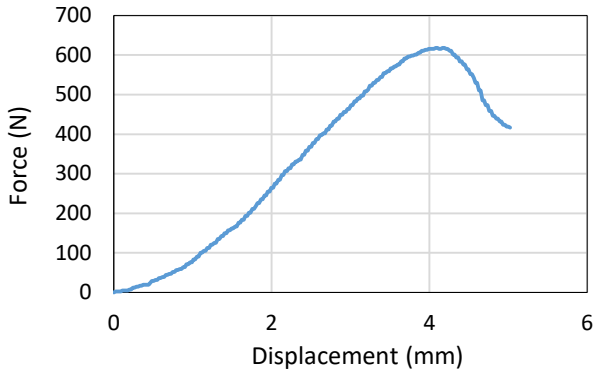
خواص حرارتی بریکت‌ها

آنالیز تقریبی[4]

آنالیز تقریبی شامل آزمون‌هایی است که بر اندازه‌گیری عناصر اصلی تشکیل‌دهندهٔ زیست‌توده تمرکز می‌کند که اثر مستقیمی بر خصوصیات سوختی دارند. میزان شعله‌وری و آتش‌گیری در فرآیند سوختن زیست‌توده به مقدار مواد فرار آلی و کربن ثابت بستگی دارد که اثرگذاری شدیدی بر میزان ارزش حرارتی می‌گذارند. برای اندازه‌گیری درصد مواد فرار، بریکت به مدت یک ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجهٔ سلسیوس قرار داده شد تا به وزن ثابت برسد و سپس درصد رطوبت تعیین شد. نمونهٔ خشک در کورهٔ الکتریکی با دمای ۵۵۰ درجهٔ

1. Diametral compressinon test
2. Biological Material Testing Machine
3. Load cell
4. Proximate analysis

(الف)



(ب)

شکل ۲. آزمون فشار قطری بریکت؛ الف) دستگاه آزمون مواد بیولوژیکی، و ب) نمونه منحنی نیرو – جابه‌جایی.

سلسیوس به مدت ۱۰ دقیقه نگهداری و پس از خنک‌شدن توزین و درصد مواد فرار با استفاده از رابطهٔ ۵ محاسبه شد [۱۸]. برای اندازه‌گیری درصد خاکستر مواد، نمونه در کوره با دمای ۵۵۰ درجهٔ سلسیوس به مدت چهار ساعت قرار داده شد و پس از خنک‌شدن توزین شد [۱۸]. سپس درصد خاکستر مواد با استفاده از رابطهٔ ٦ محاسبه شد. مقدار کربن ثابت شامل باقی‌ماندهٔ جامد قابل سوختن یک ماده پس از خارج شدن مواد فرار آن است. کربن ثابت با کسر مجموع درصد رطوبت، مواد فرار و خاکستر از ۱۰۰ طبق رابطهٔ ۷ محاسبه شد.

$$PVM = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (۵)$$

$$PAC = \frac{C}{A} \times 100 \quad (٦)$$

$$PFC = 100\% - (PMC + PVM + PAC) \quad (۷)$$

در این رابطه‌ها: PMC = درصد رطوبت، PVM = درصد مواد فرار، PAC = درصد خاکستر، PFC = درصد کربن ثابت، A = وزن نمونهٔ آون خشک‌شده (گرم)، B = وزن نمونه (گرم) پس از ۱۰ دقیقه در کوره با دمای ۵۵۰ درجهٔ سلسیوس، و C = وزن نمونه (گرم) پس از چهار ساعت در کوره با دمای ۵۵۰ درجهٔ سلسیوس است.

اندازه‌گیری ارزش حرارتی[1]

یکی از ویژگی‌های مهم در ارزیابی کیفی بریکت سوختی تعیین ارزش حرارتی آن است که به شرایط فرآیندی از جمله دمای فرآیند متراکم‌سازی، اندازهٔ ذرات مواد زیست‌توده، فشار فشرده‌سازی بستگی دارد. در این تحقیق برای اندازه‌گیری ارزش حرارتی طبق رابطه‌های ۸ و ۹ از نتایج آنالیز تقریبی مانند مواد فرار، کربن ثابت و محتوای خاکستر برای پیش‌بینی ارزش حرارتی بالا بریکت از طریق برخی معادله‌های تجربی خطی و غیرخطی استفاده شده است [۱۹]. در نهایت با استفاده از میانگین گرفتن از نتایج دو معادلهٔ حاضر ارزش حرارتی تقریبی به‌دست آمد. برای بررسی صحت نتایج از تحقیقات قبلی در زمینهٔ تولید بریکت از باگاس استفاده شد و با جای‌گذاری نتایج آنالیز تقریبی در معادله‌های حاضر همبستگی نزدیکی با نتایج تحقیقات پیشین نشان داده شد.

$$HHV = 167.2 - 1.449\,VM - 1.562\,FC - 1.846\,A \quad (۸)$$

$$HHV = -18.37 - 0.8469\,FC - 1.1251\,A + \frac{4420}{VM} \quad (۹)$$

1. Calorific value

در این رابطه‌ها: HHV = ارزش حرارتی بیشتر (مگاژول بر کیلوگرم)، A = محتوای خاکستر (درصد)، VM = مواد فرار (درصد)، و FC = کربن ثابت (درصد) است.

نتایج و بحث

تجزیهٔ واریانس و تحلیل رگرسیون برازش مدل پاسخ

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس در جدول ۲ نشان داده شده است. در این آزمایش با توجه به آنکه درصد نسبت ترکیب پوست گردو به باگاس برحسب وزنی است، مقدار پوست گردوی موجود در ترکیب نسبت به حجم کل بریکت کم است؛ از این‌رو تأثیر آن در چگالی معنی‌دار نشده است. اثر متقابل نسبت پوست گردو به باگاس، با اندازهٔ ذرات و رطوبت به‌دلیل تأثیر این دو متغیر در تشکیل پیوند بین ذرات بر مقاومت کششی معنی‌دار است. معادله‌های ۱۰ و ۱۱ مدل رگرسیون با ضرایب جملات مربوط را به‌ترتیب برای پیش‌بینی چگالی و مقاومت کششی بریکت با استفاده از متغیرهای فرآیند تولید بریکت ارائه می‌کنند. این مدل سطح پاسخ توانایی پیش‌بینی اثرهای متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته را دارد و رفتار سیستم را برای پاسخ پیش‌بینی می‌کند.

جدول ۲. تجزیهٔ واریانس برای متغیرهای پاسخ چگالی و مقاومت کششی بریکت

چگالی			مقاومت کششی		
منابع تغییرات	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات	منابع تغییرات	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات
مدل درجه دوم	۶	۳۳۷۷۳/۸۶**	مدل اثر متقابل	۸	۰/۱۶۴۷**
اندازه ذرات (B)	۱	۲۹۳۶۲/۷۲**	نسبت ترکیب (A)	۱	۰/۰۰۳۰^{ns}
دما (C)	۱	۵۲۴۸۸/۰۰**	اندازه ذرات (B)	۱	۰/۰۰۱۹^{ns}
رطوبت (D)	۱	۱۰۹۲۰۰**	دما (C)	۱	۰/۳۱۰۸**
A×D	۱	۲۶۵۲/۲۵^{ns}	رطوبت (D)	۱	۰/۵۸۹۱**
B×D	۱	۶۲۴۱/۰۰**	A×B	۱	۰/۰۶۳۵**
A^2	۱	۲۶۹۸/۹۴^{ns}	A×D	۱	۰/۱۲۱۱**
باقی‌مانده	۲۳	۷۲۸/۲۲	B×D	۱	۰/۰۴۵۰*
نبود برازش	۱۸	۷۴۰/۴۴^{ns}	C×D	۱	۰/۰۵۵۲**
خطای خالص	۵	۶۸۴/۲۷	باقی‌مانده	۱۹	۰/۰۰۶۶
جمع کل	۲۹		نبود برازش	۱۴	۰/۰۰۶۶^{ns}
			خطای خالص	۵	۰/۰۰۶۸
			جمع کل	۲۷	

** معنی‌داری در سطح ۱٪، * معنی‌داری در سطح ۵٪، ns معنی‌دار نبودن در سطح ۵٪.

$$\text{Density} = 683.08 - 40.39\times(B) + 54.00\times(C) - 77.89\times(D) + 12.88\times(A\times D) - 19.75\times(B\times D) + 19.36\times(A^2) \quad (۱۰)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\text{Tensile Strength}}} = 2.88710 + 0.0286\times(A) - 0.0161\times(B) - 0.0068\times(C) - 0.0423\times(D) - 0.0033\times(A\times B) - 0.0015\times(A\times D) + 0.0046\times(B\times D) + 0.00025\times(C\times D) \quad (۱۱)$$

بر اساس جدول ۳ زیاد بودن R2 تعدیل‌شده (۰/۹۰) برای متغیر پاسخ چگالی نشان می‌دهد که عامل غیرمعنی‌داری در مدل وجود ندارد. همچنین با توجه به مقدار زیاد ضریب تعیین تعدیل شده (Adj. R2 = 0.90) برای متغیر پاسخ چگالی، مجموعه متغیرهای ورودی حاضر در معادلهٔ رگرسیون توانسته است ۹۰ درصد از تغییرات آن را تبیین کنند. ضریب تغییرات[1] که بیان‌کنندهٔ نقاط داده‌های تجربی از مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل است برابر ۳/۸۸ درصد بود.

1. Coefficient of Variation (C.V.)

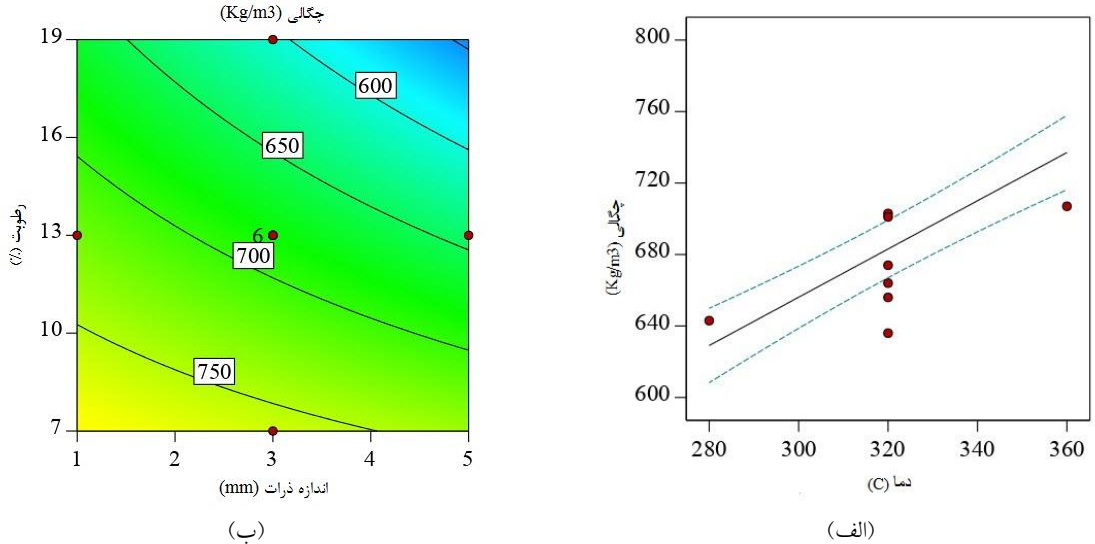
جدول ۳. آماره‌های تناسب به‌شکل کاهیده برای تخمین متغیرهای پاسخ

متغیرهای پاسخ	انحراف معیار	میانگین	ضریب تغییرات (C.V.)	R^2	Adj. R^2	Predicted R^2
چگالی	۲۶/۹۹	۶۹۴/۷۰	٪۳/۸۸	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۸۸
مقاومت کششی	۰/۰۸۱۵	۱/۳۴	٪۶/۱۰	۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۸۰

اثر متغیرها و نمودارهای سطح پاسخ چگالی

نتایج حاصل از اثر دمای قالب در فرآیند بر چگالی بریکت در شکل ۳ الف نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش دمای فرآیند بریکت‌سازی در محدوده ۲۸۰ تا ۳۶۰ درجهٔ سلسیوس، چگالی افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دما موجب جریان یافتن لیگنین موجود در دیوارهٔ سلولی و در نتیجه موجب چسبندگی ذرات به هم شده است [۲۰]. همچنین با افزایش دما، مقاومت ذرات در برابر بار کاهش می‌یابد که موجب افزایش چگالی می‌شود. اسمیت و همکاران دریافتند که در فشار مشخص، افزایش دما موجب افزایش فشردگی و دوام بریکت‌های تولیدشده از کاه گندم شد [۲۱].

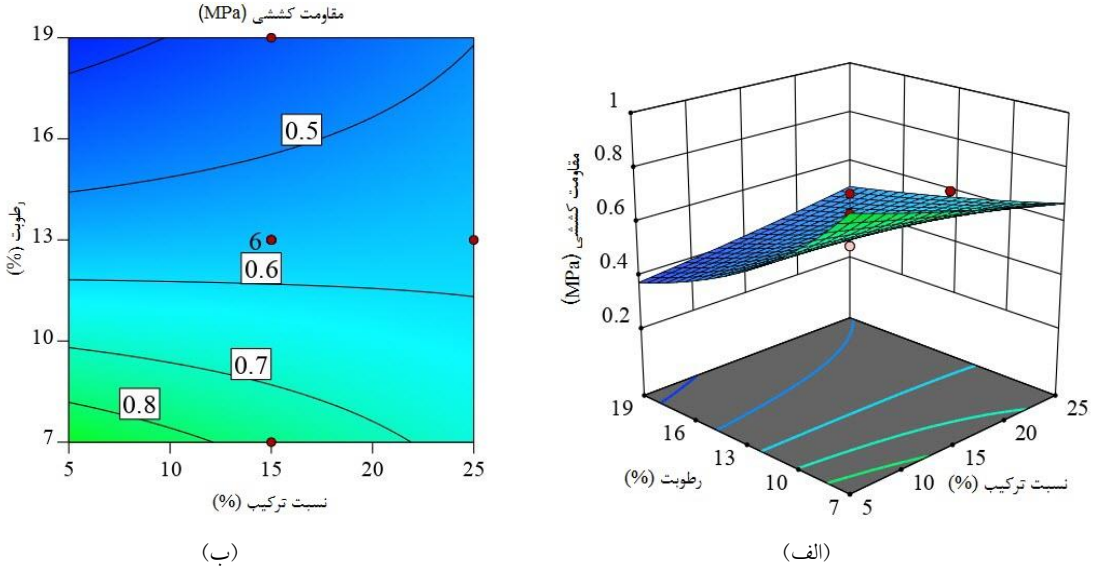
اثر متقابل اندازهٔ ذرات و رطوبت باگاس بر چگالی بریکت‌ها در شکل ۳ ب نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش اندازهٔ ذرات در محدودهٔ ذکرشده، سطح تماس آن‌ها افزایش می‌یابد و همچنین ذرات ریزتر، خلل و فرج‌ها را پر می‌کنند که سبب کاهش برگشت‌پذیری الیاف در مادهٔ اولیه و افزایش چگالی می‌شود. دربارهٔ رطوبت می‌توان نتیجه گرفت که رطوبت زیاد موجب انبساط حجم بریکت پس از خارج‌سازی از قالب، به‌علت فشار تبخیر رطوبت در دمای زیاد می‌شود که چگالی را کاهش می‌دهد [۲۲]. تحقیقات نشان داده است که رطوبت می‌تواند همچون اتصال‌دهنده عمل کرده و اتصال بین ذرات را در محدودهٔ مناسبی تقویت کند. به‌عبارتی رطوبت موجود در زیست‌توده همراه با دما و فشارهای اعمال‌شده سبب نزدیک شدن ذرات به هم شده و نفوذ ذرات در هم، موجب تشکیل پل‌های جامد می‌شود [۱۲]. اوکات و همکاران در تحقیق دربارهٔ کیفیت بریکت تولیدشده از چوب بلال دریافتند که با افزایش دما و فشار فشرده‌سازی، چگالی و چقرمگی بریکت‌ها افزایش می‌یابد. همچنین افزایش رطوبت و اندازهٔ ذرات، موجب کاهش مقادیر چگالی و چقرمگی بریکت‌ها می‌شود [۲۳].



شکل ۳. الف) اثر دمای فرآیند بریکت‌سازی بر چگالی، و ب) منحنی تراز اثر متقابل اندازهٔ ذرات و رطوبت باگاس بر چگالی بریکت.

اثر متغیرها و نمودارهای سطح پاسخ مقاومت کششی

نتایج بررسی اثر متقابل نسبت ترکیب مواد و رطوبت باگاس بر مقاومت کششی در شکل ٤ نشان می‌دهد که با کاهش مقدار رطوبت، مقاومت کششی افزایش می‌یابد و این افزایش مقاومت برای درصد نسبی ترکیب پوست گردو به باگاس کم، بیشتر خواهد بود، زیرا با کاهش رطوبت، شکاف‌های ناشی از بخار آب در دمای زیاد کاهش می‌یابد که به افزایش چگالی و اتصال ذرات بریکت می‌انجامد. رطوبت اولیهٔ زیاد باگاس سبب انبساط حجم بریکت پس از خارج‌سازی از قالب در اثر فشار بخار رطوبت در دمای زیاد می‌شود که در نتیجه چگالی و استحکام بریکت را کاهش می‌دهد.

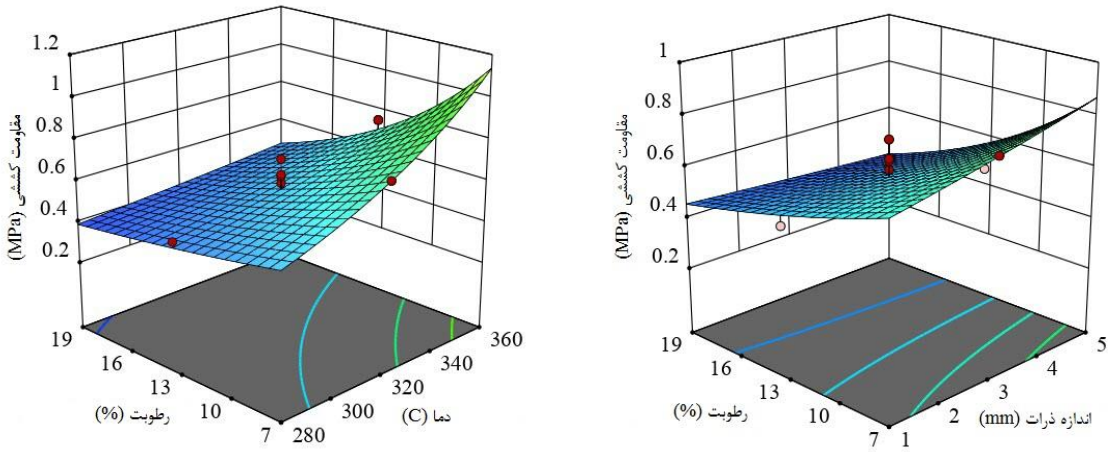


شکل ٤. اثر متقابل نسبت ترکیب و رطوبت بر مقاومت کششی بریکت؛ الف) منحنی رویه سطح پاسخ، و ب) منحنی تراز.

نتایج اثر متقابل رطوبت و اندازهٔ ذرات باگاس بر مقاومت کششی بریکت در شکل ۵ الف نشان می‌دهد که با کاهش رطوبت و افزایش اندازهٔ ذرات مقاومت کششی افزایش می‌یابد. در بریکت‌های با اندازهٔ ذرات درشت‌تر به‌دلیل آنکه اندازهٔ ذرات باگاسو پوست گردو یکنواخت‌تر بوده است، درهم‌رفتگی و اتصال بین ذرات در فرآیند فشرده‌سازی بهتر صورت گرفته است. از این‌رو، به‌هنگام بارگذاری فشار قطری، تمرکز تنش‌های کششی بر پوست گردو کم‌تر شد که در نتیجه استحکام بیشتری از بریکت‌های با اندازهٔ ذرات ریزتر نشان داد. این ویژگی سبب افزایش مقاومت کششی شد. تحقیقات نشان می‌دهد که در بریکت‌ها ذرات زیست‌توده توسط لایه‌ای از اتصال‌دهنده‌های طبیعی پوشیده می‌شوند، به‌طوری که این پوشش همچون پل عمل می‌کند و سبب اتصال ذرات در سوخت جامد زیستی می‌شود [٢٤]. دلیل اصلی مقاومت بریکت تحت بارهای واردشده، ایجاد پیوندهای ناشی از درهم‌رفتگی مواد و پیوندهای الکترواستاتیکی است. تحقیقات نشان داده است که ذرات ریز و حالت پودری باگاس آسیاب‌شده نمی‌تواند سبب ایجاد پیوند از طریق درهم‌رفتگی مکانیکی شود. همچنین عملیات آسیاب کردن سبب ایجاد لایه‌های مرزی ضعیف مکانیکی در اثر نیروهای برشی در ذرات باگاس می‌شود؛ از این‌رو در این حالت بریکت نهایی ساختار محکمی ندارد و با کم‌ترین تنش دچار شکست در لایه‌های بریکت می‌شود [۱۱]. اندازهٔ ذرات خیلی ریز در بریکت سبب می‌شود که در عین ایجاد سطح پیوند زیاد به دلیل ضعف پیوندهای در هم رفتگی مکانیکی، بریکت ساختار و چارچوب محکمی نداشته باشد و ذرات روی هم بلغزند؛ چنان‌که ممکن است

با اولین تنش دچار شکست برشی در لایه‌های مختلف شود [۱۱].

شکل ۵ ب اثر متقابل دما و رطوبت باگاس بر مقاومت کششی بریکت را نشان می‌دهد. می‌توان چنین بیان کرد که افزایش دما موجب جریان یافتن لیگنین موجود در دیوارهٔ سلولی و در نتیجه موجب چسبندگی ذرات به هم می‌شود [٦]. همچنین در فشار معین، افزایش دما موجب افزایش چگالی و پیوند بین ذرات بریکت می‌شود که افزایش مقاومت کششی را در پی دارد. همچنین با کاهش رطوبت، شکاف‌های ناشی از بخار آب در دمای زیاد کاهش می‌یابد که سبب افزایش پیوند بین ذرات بریکت می‌شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که آب به‌صورت یک لایه فیلم نازک سبب استحکام و بهبود پیوند بین ذرات ناشی از نیروهای بین‌مولکولی واندروالسی در اثر افزایش سطوح تماس بین ذرات می‌شود. رطوبت موجود در مواد زیست‌توده نیز به‌همراه حرارت در فرآیند تولید بریکت موجب تغییرات فیزیکی و شیمیایی از جمله نرم‌شدگی حرارتی الیاف، ژلاتینی شدن محتوای نشاسته و حل‌شوندگی و کریستالی شدن مجدد قندها می‌شود [۱۱].



شکل ۵. منحنی‌های رویه سطح پاسخ اثرهای متقابل؛ الف) اندازهٔ ذرات و رطوبت باگاس، و ب) دمای قالب و رطوبت باگاس بر مقاومت کششی بریکت.

آنالیز تقریبی

نتایج مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ مواد فرار، خاکستر و کربن ثابت بریکت تولیدشده در شرایط بهینهٔ این تحقیق و نیز مادهٔ اولیهٔ باگاس براساس داده‌های تحقیقات گذشته [۲۵] در جدول ٤ نشان داده شده است. در این جدول به منظور مقایسهٔ نتایج آنالیز تقریبی بریکت تولیدشده با داده‌های منابع موجود مقادیر درصد مواد براساس مادهٔ خشک و داده‌های حاصل از روابط مربوط ارائه شده است. داده‌ها نشان می‌دهد که تشکیل بریکت سبب کاهش معنی‌دار درصد مواد فرار نسبت به زیست‌تودهٔ آن‌ها شده است. ازآنجا که بخش زیادی از بقایای گیاهی از ترکیبات همی‌سلولزی و سلولزی تشکیل شده و این ترکیبات در محدودهٔ دمایی ۱۸۰ تا ۳۵۰ درجهٔ سلسیوس تجزیه می‌شوند، فرآیند حرارت‌دهی در طی فرآیند تشکیل بریکت در این تحقیق در محدودهٔ دمایی ۲۸۰ تا ۳٦۰ درجهٔ سلسیوس سبب تجزیهٔ بخش عمدهٔ آن‌ها شده است. کاهش مواد فرار بر اثر افزایش دما، نشان‌دهندهٔ افزایش روند خارج شدن ترکیبات فرار، محصولات گازی و هیدروکربن‌های با وزن مولکولی کم می‌شود. از این‌رو، افزایش درصد کربن تثبیت شده 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، به طوری که در بریکت‌های تولیدشده از باگاس و پوست گردو در تحقیق حاضر درصد کربن ثابت روند افزایشی را نسبت به مواد اولیه نشان می‌دهد که می‌تواند بر قابلیت زغالی شدن بریکت و کارایی احتراق در دستگاه‌های سوخت اثر گذار باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بخش عمدهٔ تجزیهٔ حرارتی زیست‌توده در دماهای بیشتر از ۲۰۰ درجهٔ سلسیوس صورت می‌گیرد، بنابراین تشکیل بریکت در دماهای بین ۲۸۰ تا ۳۶۰ درجهٔ سلسیوس، سبب افزایش درصد کربن تثبیت‌شده و کاهش مقدار مواد فرار می‌شود که تأثیر مثبتی بر کارایی بریکت سوختی دارد. در تحقیقی در زمینهٔ تولید بریکت از باگاس با استفاده از اتصال‌دهنده‌های سلولزی، مقایسهٔ کلاسه‌های مادهٔ اولیه نشان داد که درصد مواد فرار باگاس آسیاب‌شده کم‌تر از خرده باگاس است که اثر مستقیمی بر خصوصیات سوختی دارند [۲۲].

جدول ٤. مقادیر آنالیز تقریبی درصد مادهٔ اولیهٔ باگاس و نمونهٔ بریکت در شرایط بهینه

نمونه	خاکستر	مواد فرار	کربن ثابت
باگاس [۲۵]	۷/۷۸	۸۷/۷۸	۴/۴۴
بریکت[۱]	۵/۴۳	۷۹/۳۶	۱۵/۲۱
بریکت[۲]	۵/۲۵	۷۶/۸	۱۴/۷۲

[۱] داده‌های برمبنای مادهٔ خشک، [۲] داده‌های محاسبه‌شده.

ارزش حرارتی

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سوخت، ارزش حرارتی آن است، یعنی مقدار انرژی در هر کیلوگرم سوخت که هنگام احتراق حاصل می‌شود. جدول ۵ نتایج ارزش حرارتی دو نوع مواد اولیهٔ باگاس خردشده و آسیاب‌شده [۱۱] و بریکت بهینه تولیدشده در این تحقیق را نشان می‌دهد. داده ها نشان می‌دهد که ارزش حرارتی نمونه های مادهٔ اولیه و بریکت تولیدشده شایان توجه بوده و از ۱۷-۱۶ به ۲۲ مگاژول بر کیلوگرم یعنی بیش از ۳۷ درصد افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که فرآیند بریکت کردن و تولید بریکت‌های سوختی سبب افزایش ارزش حرارتی زیست‌تودهٔ باگاس شده است. در این تحقیق برای ارزیابی ارزش حرارتی بریکت از معادله‌های تجربی خطی و غیرخطی صحه‌گذاری‌شده با استفاده از نتایج آنالیز تقریبی استفاده شد. نتایج این تحقیق همبستگی نزدیکی با تحقیقات دیگر نشان داد [۱۱]. از این‌رو می‌توان از این روش برای محاسبهٔ ارزش حرارتی زیست‌توده‌ها با تقریب خوبی استفاده کرد. ویژگی‌های فیزیکی بریکت شامل چگالی بر میزان ارزش حرارتی آن مؤثر است. به‌طور کلی بریکت‌هایی که در آن‌ها فرآیند فشرده‌سازی بهتر انجام می‌گیرد و چگالی بیشتری دارند ارزش حرارتی بیشتری نیز خواهند داشت [۲۶]. مقایسهٔ میزان ارزش حرارتی دو نوع باگاس خرده و آسیاب‌شده (جدول ۵) نشان می‌دهد که با کاهش اندازهٔ ذرات و افزایش چگالی، مقدار آن افزایش می‌یابد. بنابراین فرآیند بریکت کردن که در راستای افزایش چگالی مواد اولیه انجام می‌گیرد، تأثیر بسزایی بر افزایش ارزش حرارتی مواد اولیه دارد. این موضوع به افزایش درصد کربن ثابت و کاهش مواد فرار در فرآیند بریکت‌سازی (جدول ٤) نیز مرتبط است. همچنین فرآیند بریکت کردن موجب اتصال بهتر ذرات در مواد اولیه به‌دلیل در هم‌رفتگی‌های مکانیکی و پیوندهای بین ذرات می‌شود که افزایش چگالی و ارزش حرارتی را در پی دارد.

جدول ۵. ارزش حرارتی مواد اولیهٔ دو نوع باگاس و بریکت تولیدشده در شرایط بهینه

نمونه	خرده باگاس [۱۱]	باگاس آسیاب‌شده [۱۱]	بریکت
ارزش حرارتی (MJ/kg)	۱۶	۱۷	۲۲

بهینه‌سازی

به منظور افزایش کیفیت بریکت، اطلاع از شرایط و نقاط کاری بهینهٔ دستگاه ضروری است. همچنین یافتن روابط بین عوامل مؤثر و محصول نهایی برای محققان بسیار ارزشمند است. به همین دلیل بهینه‌سازی از مهم‌ترین مراحل افزایش بازدهی به شمار می‌رود. با توجه به این‌که هدف این پژوهش تولید بریکت از پوست گردو و باگاس بود، بهینه‌سازی بر مبنای بیش‌ترین مقدار چگالی بریکت و بیش‌ترین مقدار مقاومت کششی در نظر گرفته شد. با استفاده از تابع مطلوبیت نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، چند نقطهٔ بهینه با شاخص مطلوبیت بزرگ‌تر از ۰/۹۰ با هدف بیش‌ترین مقادیر متغیرهای پاسخ چگالی و مقاومت کششی بریکت ارائه شد (جدول ٦). در این نقطهٔ بهینه مقدار پاسخ‌های چگالی ۸٦۷/۸٤۷ کیلوگرم بر متر مکعب و مقاومت کششی ۱/۳٥٦ مگاپاسکال حاصل شد.

جدول ٦. نتایج بهینه‌سازی فرآیند تولید بریکت از پوست گردو و باگاس با دستگاه پرس هیدرولیکی به روش سطح پاسخ

شمارهٔ ردیف بهینه	نسبت‌ترکیب (%)	اندازهٔ ذرات (mm)	دمای قالب (°C)	رطوبت (%w.b.)	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (kg/m^3)	شاخص مطلوبیت
۱	۵	۱	۳۶۰	۷	۱/۳۵۶	۸۶۷/۸۴۷	۰/۹۰۱
۲	۵/۰۰۱	۱/۰۲۰	۳۶۰	۷	۱/۳۵۶	۸۶۷/۶۴۱	۰/۹۰۱
۳	۵	۱/۱۰	۳۵۹/۹۹۶	۷	۱/۳۵۶	۸۶۶/۸۰۵	۰/۹۰۱

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی پارامترهای مؤثر در تولید بریکت سوختی از ترکیب باگاس نیشکر و پوست گردو با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیکی نشان می‌داد که رطوبت ذرات باگاس بیشترین تأثیر را بر چگالی و مقاومت کششی بریکت دارد و با کاهش مقدار آن چگالی و مقاومت کششی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که افزودن پوست گردو در بریکت تولیدشده با اندازهٔ ذرات ریز موجب افزایش تمرکز تنش روی پوست گردو می‌شود که سبب می‌شود مقاومت کششی کاهش یابد. در این تحقیق بیشترین مقدار چگالی و مقاومت کششی به‌ترتیب ۸۷۳ کیلوگرم بر متر مکعب و ۱/۳٥٦ مگاپاسکال به‌دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که تشکیل بریکت سبب کاهش معنی‌دار درصد مواد فرار نسبت به زیست‌تودهٔ آن‌ها و افزایش درصد کربن تثبیت شده می‌شود. در مورد ارزش حرارتی نتایج نشان داد که تغییرات در میزان ارزش حرارتی بین نمونه‌های مادهٔ اولیه و بریکت تولیدشده شایان توجه بوده و بین ١٦ تا ٢٢ مگاژول بر کیلوگرم متغیر است که نشان‌دهندهٔ تأثیر مثبت کاربرد فرآیند بریکت‌سازی بر افزایش ارزش حرارتی بریکت‌های سوختی است. همچنین استفاده از معادلات تجربی خطی و غیرخطی برای ارزیابی ارزش حرارتی نشان داد که می‌توان از این روش برای محاسبهٔ ارزش حرارتی زیست‌توده‌ها با تقریب خوبی استفاده کرد.

References

[1]. Kumar, S., Singh, J., Nanoti, S.M., and Garg, M. O. (2012). A comprehensive life cycle assessment (LCA) of Jatropha biodiesel production in India. *Bioresource Technology*, 110: 723-729.

[2]. Brandt, A., Grasvik, J., Hallett, J. P., and Welton, T. (2013). Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids. *Green Chemistry*, 15(3): 550-583.

[3]. Banaei, N. (2010). Energy estimation of walnut waste and its recycling strategies. National Conference on Agricultural Waste and Effluent Management, 28-29 December 2010, Tehran, Iran. (In Farsi)

[4]. Golestan, M. B. (2005). Bagasse: the national capital that is smoked. 5th Symposium of Iranian Society of Environmentalists, 06 March 2005, Tehran, Iran. (In Farsi)

[5]. Hasanaki, N., Mansoori, Y., and 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 Farsi)

[6]. Poddar, S., Kamruzzaman, M., Sujan, S. M. A., Hossain, M., Jamal, M. S., Gafur, M. A., and Khanam, M. (2014). Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. *Fuel*, 131: 43-48.

[7]. Wang, Y., Wu, K., and 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.

[8]. Soleimani, M., Tabil, X. L., Grewal, R., and Tabil, L. G. (2017). Carbohydrates as binders in biomass densification for biochemical and thermochemical processes. Fuel, 193: 134-141.

[9]. Chou, C. -S., Lin, S. -H., and 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.

[10]. Brand, M. A., Jacinto, R. C., Antunes, R., and Bayestorff da Cunha, A. (2017). Production of briquettes as a tool to optimize the use of waste from rice cultivation and industrial processing. Renewable Energy, 111: 116-123.

[11]. Abyaz, A., Afra, E., and 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 Farsi)

[12]. Shafaie, H., Kermani, A. M., Kianmehr, M. H., and Hassanbeygi, S. R. (2020). Investigating of effective parameters on the production process of briquettes from bagasse and walnut shell. 12th National Congress of Mechanical Biosystems Engineering and Mechanization of Iran, 5 February 2020, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Farsi)

[13]. Ramazanzade, M. (2017). Production of fuel pellets from pruning residues of pistachio trees and evaluation some physical, mechanical and thermal properties of them. Master of Science Thesis, Department of Mechanics of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman. (In Farsi)

[14]. Ghanizadeh, A. R., Yarmahmoudi, A., Abbaslou, H., and Dadkani, S. (2019). Proposing a model for prediction of compaction parameters of clay subgrade soil stabilized with Portland cement and iron ore mine tailing by means of RSM method. Road Journal, 2019, 26(97): 97-110. (In Farsi)

[15]. Solatifar, N., Azadedel, R., Khalili, M., and Rahbarnia, M. (2019). Optimization of rutting parameter for crumb rubber modified binder using response surface methodology (RSM). Journal of Transportation Research, 16(1), 245-258. (In Farsi)

[16]. Gendeka, A., Aniszewska, M., Malatk, J., and 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.

[17]. Sprenger, C. J., Tabil, L. G., Soleimani, M., Agnew, J., and Harrison, A. (2018). Pelletization of refuse-derived fuel fluff to produce high quality feedstock. Journal of Energy Resources Technology, 140(4): 042003.

[18]. Pongsak, J. (2015). Physical and thermal properties of briquette fuels from rice straw and sugarcane leaves by mixing molasses. Energy Procedia, 79: 2-9.

[19]. Özyuguran, A., and Yaman, S. (2016). Prediction of calorific value of biomass from proximate analysis. 3rd International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2016, 7-11 September 2016, Barcelona, Spain.

[20]. Rezvani, Z., Arabhosseini, A., Chegini, G. R., and Kianmehr, M. H. (2012). Investigation of the effect of rice straw briquetting parameters on briquettes quality. 7th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization, 4-6 September 2012, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Farsi)

[21]. Smith, I. E., Probert, S. D., Stokes, R. E., and Hansford, R. J. (1977). The briquetting of wheat straw. Journal of Agricultural Engineering Research, 22(2): 105-111.

[22]. Stelte, W. (2014). Optimization of product specific processing parameters for the production of fuel pellets from torrefied biomass. Taastrup, Denmark: Center for Biomass and Biorefinery, Danish Technological Institute.

[23]. Okot, D. K., Bilsborrow, P. E., and Phan, A. N. (2018). Effects of operating parameters on maize COB briquette quality. Biomass and Bioenergy, 112: 61-72.

[24]. Kaliyan, N., and Morey, R. V. (2010). Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. Bioresource Technology, 101: 1082–1090.

[25]. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., and 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 Farsi)

[26]. Tumuluru, J., 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: 683-707.

Optimization of the briquette production process from the composition of bagasse and walnut shell using the response surface methodology (RSM) and its calorific value

H. Shafaie; Graduated Student of M.Sc., Biosystem Mechanical Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, I.R. Iran

A.M. Kermani*; Assis., Prof., Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, I.R. Iran

M.H. Kianmehr; Prof., Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, I.R. Iran

S.R. Hassanbeygi; Prof., Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, I.R. Iran

(Received: 28 Mars 2021, Accepted: 10 July 2021)

ABSTRACT

Densification of biomass materials such as briquette improves the management properties of materials for transportation, storage, and so on. This study aimed to determine the optimal conditions of the briquette production process using a hydraulic press from the combination of bagasse and walnut shell using response surface methodology. The effects of independent variables including bagasse particle size (PS), process temperature (PT), bagasse moisture content (MC), and the composition ratio percentage of the walnut shell to bagasse (CR) were evaluated at three levels on the response variables of the density and tensile strength. The calorific value of the briquette was determined through validated linear and nonlinear equations of the high heat value using the proximate analysis of volatiles, fixed carbon, and ash. The results showed that by decreasing the moisture content of bagasse particles, the density and tensile strength of the briquette increased. Adding walnut shell particles to the briquette produced with the size of fine particles reduces tensile strength. The briquette production significantly reduced the percentage of volatile materials relative to their biomass and increased the percentage of fixed carbon. The calorific value of the raw material sample relative to the briquette produced increased from 16 to 22 MJ/kg. The optimal values of the density and tensile strength of briquettes were equal to 867.847 kg/m^3 and 1.356 MPa, respectively at the CR of 5%, PS less than 1.18 mm, MC content of 7%, and PT of 360 °C. At this condition, the calorific value of 22 MJ/kg was obtained.

Keywords: Bagasse, Calorific value, Fuel briquette, Response Surface methodology, Tensile strength, Walnut shell.

* Corresponding Author, Email: amkermani@ut.ac.ir, Tel: +982136040614