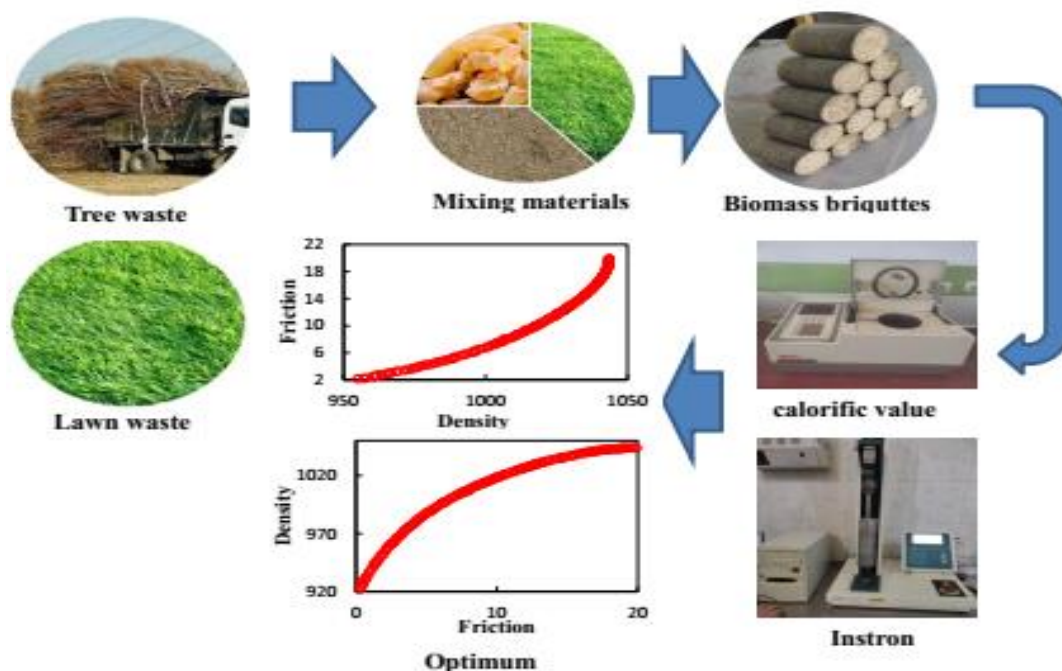


Optimizing the Production of Fuel Briquettes from Pruning Wastes of Urban Trees and Grass

Imanali Mamani¹, Mohammad Hossein Aghkhani^{1*}, Mahdi Khojastepour¹, Abbas Rohani¹

1. Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(Received: Feb. 19, 2022- Revised: June. 12, 2022- Accepted: Aug. 28, 2022)



Abstract: Conversion of tree and grass pruning wastes, as abundant and available lignocellulosic sources, into biofuels can be a viable alternative to fossil fuels that pollute the environment. In the present study, flammable briquettes were produced from the pruning remnants of urban trees including mulberry, elm, acacia and ash, as well as grass using a natural binder i.e. frankincense. Then, the optimal density and friction of the produced briquettes under the influence of pressure, moisture, temperature, mixing percentage and additive parameters were investigated using regression methods, support vector machine (SVM) and genetic algorithm. The results showed that with increasing moisture between 9 to 17%, the density of briquettes decreases. Also, the examination of mixing percentage showed that by decreasing the percentage of sawdust and increasing the percentage of grass, density and friction force decrease. The most optimal sample of this experiment was determined with a mixing percentage of 87.5% sawdust and frankincense 10% at a temperature of 100 °C, a pressure of 10 bar and a moisture content of 13%. In this case, the average density and friction force of the briquettes were 1020 kg/m³ and 44 N/mm respectively. The results showed that regression model of the density and friction test related variables are significant at 5% level. Hence, the variables are involved in the explanation of friction and density. According to the results, the high calorific value and low calorific value of briquettes produced from grass and sawdust are more, and the calorific value of additives has a significant impact on the process of briquette production due to the high sticking effect.

Keywords: Density, Friction, Briquette, Urban tree waste, Grass, Calorific value

بهینه‌سازی تولید بریکت سوختی از ضایعات هرس درختان شهری و

چمن

ایمانعلی مامانی^۱، محمد حسین آق‌خانی^{۲*}، مهدی خجسته‌پور^۳ و عباس روحانی^۴

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۶/۶)

چکیده: تبدیل ضایعات هرس درختان شهری و چمن به‌عنوان منابع لیگنوسلوزی فراوان و در دسترس به سوخت‌های جامد زیستی می‌توان جایگزین مناسبی برای منابع سوخت‌های فسیلی و آلاینده محیط زیستی باشد. در این مطالعه از باقی‌مانده هرس درختان شهری (توت، نارون، افاقیا و زبان‌گنجشک) و چمن با استفاده از پیونددهنده طبیعی (کندر) اقدام به تولید بریکت قابل اشتعال گردید. سپس چگالی و اصطکاک بهینه بریکت‌های تولیدشده تحت تأثیر پارامترهای فشار، رطوبت، دما، درصد اختلاط خاک اره و چمن، مواد افزودنی، به کمک روش‌های رگرسیون، ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش رطوبت بین ۹ تا ۱۷ درصد، چگالی بریکت‌ها کاهش می‌یابد. همچنین بررسی درصد اختلاط نشان داد که هر چه درصد خاک‌اره کمتر و درصد چمن بیشتر باشد، چگالی و اصطکاک کاهش می‌یابند. بهینه‌ترین نمونه با درصد اختلاط ۸۷/۵ درصد خاک‌اره، ۱۰ درصد کندر، با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۱۰ بار و رطوبت ۱۳ درصد تعیین گردید. در این حالت بریکت‌ها دارای ۱۰۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب چگالی و نیروی اصطکاک ۴۴ نیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. نتایج نشان داد که مدل رگرسیونی آزمون چگالی و اصطکاک مربوط به متغیرها در سطح ۵ درصد معنی‌دار هستند، از این رو، متغیرها در توضیح اصطکاک و چگالی دخیل هستند. بر طبق نتایج، ارزش حرارتی بالا و ارزش حرارتی پایین بریکت تولیدی از چمن و خاک‌اره بیشتر است. و ارزش حرارتی مواد افزودنی به دلیل اثر چسبندگی بالا تأثیر بسزایی در روند تولید بریکت داشته است.

واژه‌های کلیدی: چگالی، اصطکاک، بریکت، ضایعات درختان شهری، چمن، ارزش حرارتی

مقدمه

بر اساس استعلام فضای سبز شهرداری استان البرز، تعداد درختان شهری ۶۱۵۲۸۸ اصله درخت است که تعداد ۸۰۶۵۶ درخت توت، ۴۴۵۱۸ درخت نارون، ۹۰۵۲۳ درخت اقاچیا و ۵۵۹۹۷ درخت زبان گنجشک وجود دارد. از این تعداد ۱۰۵ هزار درخت در سال هرس می‌شوند و درجایی دور از شهر به حالت آزاد رها شده و نهایتاً توسط مردم و عوامل شهرداری سوزانده می‌شود (Alborz Municipality, 2022). همچنین در سطح شهرستان کرج به مساحت ۱۰۷/۸ هکتار چمن احداث شده و در طی ۲۴ دوره چمن زده می‌شود.

بر اساس مطالعات صورت گرفته و با توجه به کمبود چوب در ایران و همچنین بر اساس طرح صیانت از جنگل‌های شمال، کشور با کمبود چوب مواجه خواهد شد. در صورتی که مواد چوبی، بازیافت شده و به چرخه تولید بازگردند، نیاز به منابع چوبی بکر کاهش یافته و موجب برگشت سرمایه و صرفه اقتصادی می‌شود و هم از آلودگی محیط زیست و پراکنده شدن زباله‌های چوبی در محیط جلوگیری می‌کند. بنابراین بازیافت محصولات چوبی امری ضروری و غیرقابل انکار می‌باشد (Sadeghi, 2020). استفاده بهینه از چوب‌های هرس شده در صنایع، یکی از راه‌کارهای مؤثر در بازیافت چوب و کاهش نیاز به منابع چوبی بکر می‌باشد.

در ایران مقادیر عظیم پسماندهای زراعی و صنایع فرآوری، زمینه‌های گسترده‌ای را در راستای تحقیق و توسعه کاربرد سوخت‌های زیستی فراهم کرده است. استفاده از پسماندهای زیست‌توده به صورت عادی به دلیل حجم بالا و دانسیته پایین دارای مشکلاتی مانند دشواری و پرهزینه بودن حمل‌ونقل، انبارداری مشکل و ارزش حرارتی پایین‌تر می‌باشد (Tumuluru et al., 2011). سوخت‌های زیستی جامد یکی از انواع سوخت‌ها هستند که از متراکم زیست‌توده‌هایی همچون پسماندهای کشاورزی عمدتاً به دو شکل پلت و بریکت تولید می‌شوند (Kaliyan et al., 2010). بریکت محصول

فرآیند متراکم سازی و افزایش وزن در واحد حجم ضایعاتی مانند محصولات برداشت کشاورزی، تهیه زغال سنگ و فولاد است (Agarwal et al., 1999).

تولید بریکت های سوختی یک روش مستقیم و آسان به منظور استفاده از منابع انرژی زیستی است زیرا فقط نیاز به عملیات مکانیکی داشته و پیچیدگی‌های روش‌های ترموشیمیایی و بیوشیمیایی را ندارد (Wang et al., 2016). با تبدیل زیست‌توده به بریکت های متراکم برخی مشکلات زیست‌توده رفع شده و خصوصیات مکانیکی زیست‌توده اولیه بهبود می‌یابد به طوری که چگالی حجمی افزایش یافته، حمل‌ونقل و انبارداری راحت‌تر و ارزان‌تر شده و مقدار انرژی به ازای واحد حجم ماده افزایش می‌یابد. با این ترتیب یک محصول همگن از مخلوطی از مواد ناهمگن تولید می‌شود (Tumuluru et al., 2011; Department of Energy, 2018).

در این زمینه مطالعاتی انجام شده است که عمدتاً مربوط به محصول زراعی است. به طور مثال می‌توان به مطالعه‌ای در زمینه اثر نوع زیست‌توده (خاکاره صنوبر، کاه برنج و باگاس نیشکر) و کندر اشاره کرد که با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین تیمار انتخاب شده به منظور ساخت پلت سوختی، ترکیبی از باگاس نیشکر و کاه برنج به ترتیب با نسبت ۷۵ درصد به ۲۵ درصد کاه بود. این تیمار در ترکیب با کندر با نسبت ۱۵ درصد، با مقاومت ۱۳۱/۴۱ نیوتن بر سانتی‌متر بالاترین میزان مقاومت شکست و پایداری را داشت. در این حالت نمونه تولید شده ترکیبی از باگاس و کاه برنج با ارزش حرارتی ۱۰۲۶۱ کیلوژول بر گرم، دارای ارزش حرارتی بهتری بعد از پلت ساخته شده از خاکاره صنوبر بود (Sadeghi, 2020).

بریکت از میزان احتراق بالایی برخوردار بوده و میزان انتشارات دی‌اکسید کربن آن به گونه‌ای است که خنثی در نظر گرفته می‌شود. به عبارتی می‌توان بیان نمود که سوخت‌های تجدید پذیر با دارا بودن کربن

اثر تماس بهتر ذرات به همدیگر، کم کردن اتلاف مواد اولیه مورد استفاده در فرآیندهای مختلف با تبدیل نرمه مواد به بریکت می‌باشد.

مطالعه حاضر باهدف بررسی تولید بریکت با استفاده از تلفیق ضایعات هرس درختان شهری و چمن و با استفاده از ماده طبیعی کندر به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده صورت گرفت. در این تحقیق جهت تولید محصول، اثر متغیرهای دما، رطوبت، درصد اختلاط خاکاره و چمن، مواد افزودنی و فشار بر مواردی شامل ارزش حرارتی، چگالی و اصطکاک به‌عنوان معیار عملکرد بریکت ساخته‌شده، مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد

فرآیند تولید سوخت زیستی از ضایعات چمن و هرس درختان شهری در این تحقیق در شکل (۱) آورده شده است. مواد اولیه اصلی شامل چوب درختان توت (*Morus alba*) (۴۰ درصد)، نارون (*Ulmus carpinifolia*) (۳۰ درصد)، افاقیا (*Robinia pseudoacacia*) (۲۰ درصد)، زبان‌گنجشک (*Fraxinus excelsior*) (۱۰ درصد) و همچنین، چمن اسپورت (ورزشی) از فضای سبز شهرستان کرج تهیه گردید. همچنین از پیوند دهنده‌های طبیعی کندر در استحکام بخشیدن به سوخت‌های زیستی استفاده شد. ماده افزودنی کندر به‌صورت صنعتی از عطاری تهیه و پس از آسیاب کردن، به‌عنوان پیونددهنده طبیعی استفاده گردید.

مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها

مواد جمع‌آوری‌شده به مدت یک ماه در دمای محیط نگهداری شده تا رطوبت آن‌ها کاهش یابد. برای آسیاب کردن مواد اولیه از آسیاب چکشی استفاده گردید. توزیع مواد آسیاب شده با استفاده از الک با اندازه مش ۴۰ انجام گردید. برای حفظ رطوبت مواد اولیه آن‌ها در

خنثی، کربن را وارد اتمسفر نمی‌کنند و مسئله محیط‌زیستی به وجود نمی‌آورند (Masche et al., 2019). در مطالعه‌ای با استفاده از دو تکنیک آماری که شامل تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی و تحلیل مؤلفه‌ای اصلی، برای انتخاب مطلوب‌ترین زیست‌توده گیاهی برای تولید پلت‌های سوخت‌های زیستی استفاده شد. در این مطالعه، شش نوع زیست‌توده (چوب پینوس، چوب اکالیپتوس، باگاس، بامبو، سورگوم و علف چاودار) و سه مخلوط مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که پلت‌های تولیدشده دارای پیکانه‌اش حرارتی و همچنین تراکم انرژی بالاتری هستند (Garcia et al., 2019). تحقیق ما بر استفاده از ضایعات هرس درختان شهری و تبدیل آن به ارزش افزوده بالا می‌باشد. اگر چنانچه قیمت محصول نهایی در وبسایت‌های خارجی ملاحظه شود، متوجه خواهید شد نوآوری تحقیق افزایش ارزش افزوده یک ماده کم‌ارزش به یک ماده پرارزش با زمینه صادرات به کشورهای دیگر مانند کشورهای استقلال‌یافته شوروی سابق که همچنان سوخت چوب یکی از انرژی‌های پرمصرف آن‌ها می‌باشد استفاده خواهد شد. نوع آوری دیگر چمن نیز زودتر از چوب شعله‌ور می‌شود و به سوختن چوب کمک می‌کند تا سریع‌تر قابل اشتعال گردد. و کندر به دلیل عامل هپتان موجود در برخی از گونه سبب اشتعال می‌شود، در هنگام سوختن بریکت بوی مطبوعی خوبی از آن استشمام می‌شود و خطری شامل آلودگی نخواهد داشت.

مطابق آنچه بیان شد، بریکت قابل اشتعال از انواع مواد اولیه مختلف تولید می‌شود. از جمله خواص بریکت شکل و فرم آن است که باعث تسهیل در حمل‌ونقل آن گشته و دلیل استفاده از این مواد متنوع می‌توان به سطح ویژه پایین، چگالی و استحکام مکانیکی بالا و مقاومت مطلوب در برابر اکسیداسیون، استحکام مواد تشکیل دهنده، مقاومت به خوردگی به‌ویژه در حمل‌ونقل در مسافت‌های طولانی، سینتیک واکنش‌های شیمیایی در

۱۹ سانتی متر (سیلندر) و پیستونی به قطر خارجی ۴ طول ۱۳/۵ سانتی متر برای تولید نمونه های آزمایش طراحی و ساخته شد.

کیسه های پلاستیکی به صورت مهروموم شده نگهداری شد. همان طور که در شکل (۲-ت) نشان داده شده است، قالبی با استفاده از آلومینیوم به قطر داخلی ۴ و طول



شکل ۱- فرآیند تولید سوخت زیستی از ضایعات چمن و هرس درختان در این مطالعه
Figure 1- Biofuel production process from grass waste and tree pruning in this study

پلاستیکی مهروموم ذخیره شد.

دستگاه پرس

در این مطالعه، از دستگاه پرس BURKLE ساخت کشور آلمان (شکل ۲-الف) استفاده شد. این دستگاه دارای محدوده فشار ۱۰ بار (کیلو پاسکال) تا ۴۰۰ کیلو پاسکال و محدوده دمایی ۴۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد می باشد.

محدودیت های تحقیق

محدودیت های تحقیق شامل قالب، خروج بریکت از

۷۰ گرم مخلوطی از مواد اولیه (خاکاره هرس

درختان، چمن و کندر) به نسبت های تعیین شده در تیمارهای آزمایش با یکدیگر مخلوط شدند. رطوبت مواد اولیه در این تحقیق بر اساس سه نسبت تعیین شده به همراه دما و فشار که هر کدام در سه سطح می باشند بر مواد اولیه که در قالب بارگیری شده است اعمال گردید. لازم به ذکر است که پس از پرس و خارج نمونه و تولید بریکت، بلافاصله ابعاد نمونه ها (وزن، قطر و ارتفاع) اندازه گیری گردید و جهت آزمایش بیشتر در کیسه

بریکت به عنوان اصطکاک بر حسب نیوتن بر میلی متر در نظر گرفته شد (Nguyen *et al.*, 2015). لازم به ذکر است که جهت خروج بریکت از درون سیلندر، از یک پیستون با سرعت ۲۵/۴ میلی متر بر دقیقه استفاده شد تعیین ارزش حرارتی

ارزش حرارتی بریکت ها توسط بمب کالری متری اندازه گیری شدند (شکل ۲-پ). بمب کالری متری برای تعیین دقیق ارزش حرارتی هیدروکربن های جامد و مایع و سایر سوخت ها به کار می رود. این روش به عنوان روش مستقیم اندازه گیری ارزش حرارتی ناخالص مطرح هست. ارزش حرارتی بریکت ها بر اساس استاندارد ASTM E711-87 و استفاده از رابطه (۲) تعیین گردید.

$$Q = (C_{water} + C_{cal}) (T_2 - T_1) / WF \quad (\text{رابطه ۲})$$

در معادله بالا Q میزان ارزش حرارتی C_{water} ، (Kj/kg) ظرفیت حرارتی آب C_{cal} ، (Kj/kg $^{\circ}$ C) ظرفیت حرارتی بمب کالری متری (Kj/kg $^{\circ}$ C)، WF (وزن اولیه نمونه و $(T_2 - T_1)$ اختلاف درجه حرارت می باشد (ASTM E711-87).

تجزیه و تحلیل آماری

در مرحله اول آزمایش، به کمک نرم افزار دیزاین اکسپرت ۴۱ تیمار برای ترکیب دو ماده خاکاره هرس درختان و ضایعات چمن در سه تکرار تعیین گردید. از سه نسبت خاکاره هرس درختان و ضایعات چمن به همراه سه نسبت درصد مواد افزودنی (کندر) برای تولید سوخت های زیستی استفاده شد. همچنین سه متغیر دما، فشار و رطوبت نیز در سه سطح در نظر گرفته شد (شکل ۳). متغیرهای وابسته آزمایش شامل چگالی، اصطکاک و ارزش حرارتی بریکت ها بود.

در این مطالعه، از نرم افزار Excel 2020 به منظور ثبت و ذخیره داده ها استفاده شد. همچنین، از آنالیز تجزیه واریانس و مدل رگرسیونی به منظور مقایسه داده های چگالی و اصطکاک استفاده گردید. کلیه آنالیزها در نرم افزار MATLAB انجام پذیرفت.

قالب، ارتفاع بریکت، محدودیت صفحه دستگاه پرس بود. در این مطالعه از قالب های مختلفی استفاده شد که تنها قالب آلومینیوم از نظر زمان و دما تا حدودی برای انجام آزمایش مناسب ارزیابی شد. خارج کردن بریکت از قالب، دیگر تحقیق بود. برای حل این مسئله از قالبی با جنس گالوانیزه به ابعاد ۶ سانتی متر در انتهای سیلندر استفاده شد. همچنین با قرار دادن یک پیستون به ابعاد ۶ سانتی متری در بخش فوقانی، خروج بریکت انجام شد. محدودیت ارتفاع بریکت و صفحه دستگاه پرس به دلیل اینکه ارتفاع دو صفحه بالا و پایین دستگاه پرس ۳۰ سانتی متر بود و امکان تولید بریکت به ابعاد بزرگ تر امکان پذیر نبود و همچنین با ابعاد کمتر مرتفع گردید.

آزمون های مورد استفاده

چگالی

چگالی مطابق با استاندارد ASAE S269.4 اندازه گیری شد. چگالی بریکت که نسبت جرم به حجم بود، محاسبه گردید. وزن نمونه ها با ترازوی الکترونیکی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه گیری شد. همچنین قطر و ارتفاع نمونه توسط کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی متر اندازه گیری گردید. چگالی نمونه ها با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد.

$$\rho = m/v = m/\pi r^2 h \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه اخیر، ρ چگالی بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، m جرم بر حسب کیلوگرم، v حجم استوانه بر حسب مترمکعب، r شعاع استوانه بر حسب متر و h ارتفاع استوانه بر حسب متر هستند.

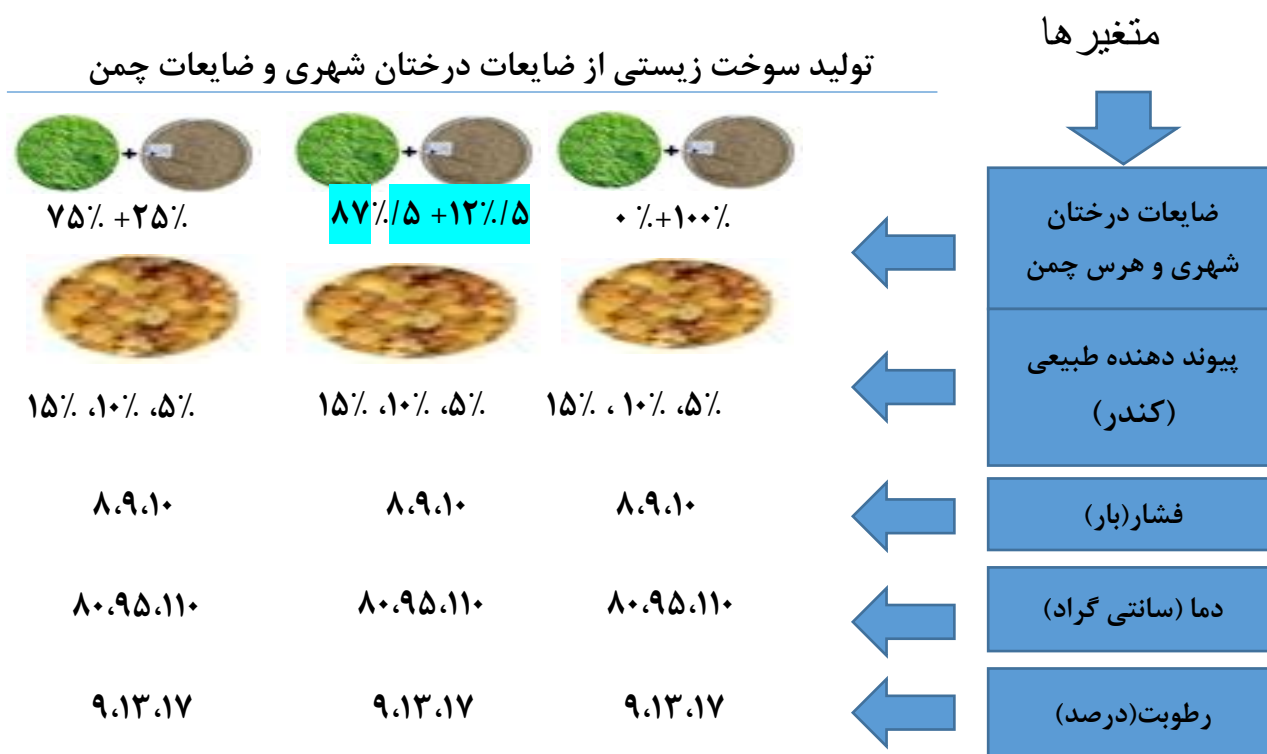
اصطکاک

نیروی مورد نیاز برای بیرون آوردن بریکت تولید شده از قالب (اصطکاک بین بریکت های تولیدی و سیلندر قالب پرس) به عنوان یکی از فاکتورهای طراحی مطرح است. به این منظور نیرو مورد نیاز برای بیرون آوردن بریکت تولید شده از قالب با استفاده از دستگاه اینسترون اندازه گیری شد (شکل ۲-ب). نسبت این نیرو به طول



شکل ۲- نمایی از دستگاه‌های مورد استفاده شامل الف) دستگاه پرس، ب) دستگاه اینسترون، پ) دستگاه اندازه‌گیری تعیین ارزش حرارتی و ت) طرح قالب تولید نمونه‌های سوخت زیستی.

Figure 2- A view of the devices used. a) press machine, b) Instron machine, c) calorific value measuring machine, d) biofuel sample production template design



شکل ۳- نسبت مختلف متغیرهای تحقیق
Figure 3- The ratio of different research variables

بریکت دارند. لذا نیاز به مدل سازی آن ها هست تا بتوان بهترین اثرات را بررسی کرد. در سایر پژوهش های صورت گرفته، مقادیر اصطکاک و چگالی پلت های ساخته شده، به ترتیب در محدوده ۴/۵ تا ۱۲/۱ نیوتن بر میلی متر و ۹۱۱/۱ تا ۱۱۲۸/۹ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شده اند. نتایج دیگران نشان داد که افزایش دما و رطوبت، موجب کاهش قابل توجه چگالی و اصطکاک شده است (Ramezanzade, 2017). به طور کلی نقش دما و رطوبت در کاهش اصطکاک را می توان مربوط به انتقال مواد استخراجی چوب به سطح پلت دانست (Stelte et al., 2011b).

طراحی مدل رگرسیونی چگالی و اصطکاک بریکت برای پیش بینی تغییرات چگالی و اصطکاک بریکت برحسب پنج متغیر مستقل مورد مطالعه شامل درصد رطوبت، درصد اختلاط خاکاره و چمن، مواد افزودنی، دما و فشار از تکنیک رگرسیون استفاده شد. در جدول ۱، مقادیر معیارهای ارزیابی مدل رگرسیونی شامل سه نوع ضریب تبیین شامل R^2 , R^{2Adj} , R^{2Pre} آورده شده است. بر اساس نتایج حاصل شده، مدل رگرسیونی درجه دوم کامل برای هر دو معیار عملکردی بریکت شامل چگالی و اصطکاک بهترین شکل مدل رگرسیونی هستند. بعلاوه بر این اساس نیز استفاده از تغییر متغیر جذر برای هر دو متغیر وابسته و مستقل بهترین نتیجه را نشان داد. لذا برای پیش بینی تغییرات چگالی و اصطکاک بریکت از مدل رگرسیونی درجه دوم با تغییر متغیر جذر استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل های رگرسیون از ضریب تبیین (R^2) استفاده می شود. این ضریب به تنهایی نشان دهنده یک برازش خوب نیست و این ضریب تحت تأثیر پارامترهای قرار می گیرد. هرچه تعداد پارامترها زیاد شود ضریب تبیین افزایش می یابد و این ضریب تبیین تابعی غیر کاهنده از متغیرهای مستقل مدل است به دلیل اضافه شدن تعداد متغیرهای مستقل مجموع مربعات جملات خطا کاهش می یابد و ضریب تبیین افزایش می یابد. به منظور اینکه افزودن متغیرهای مستقل نامربوط موجب افزایش ضریب تبیین نگردد و به

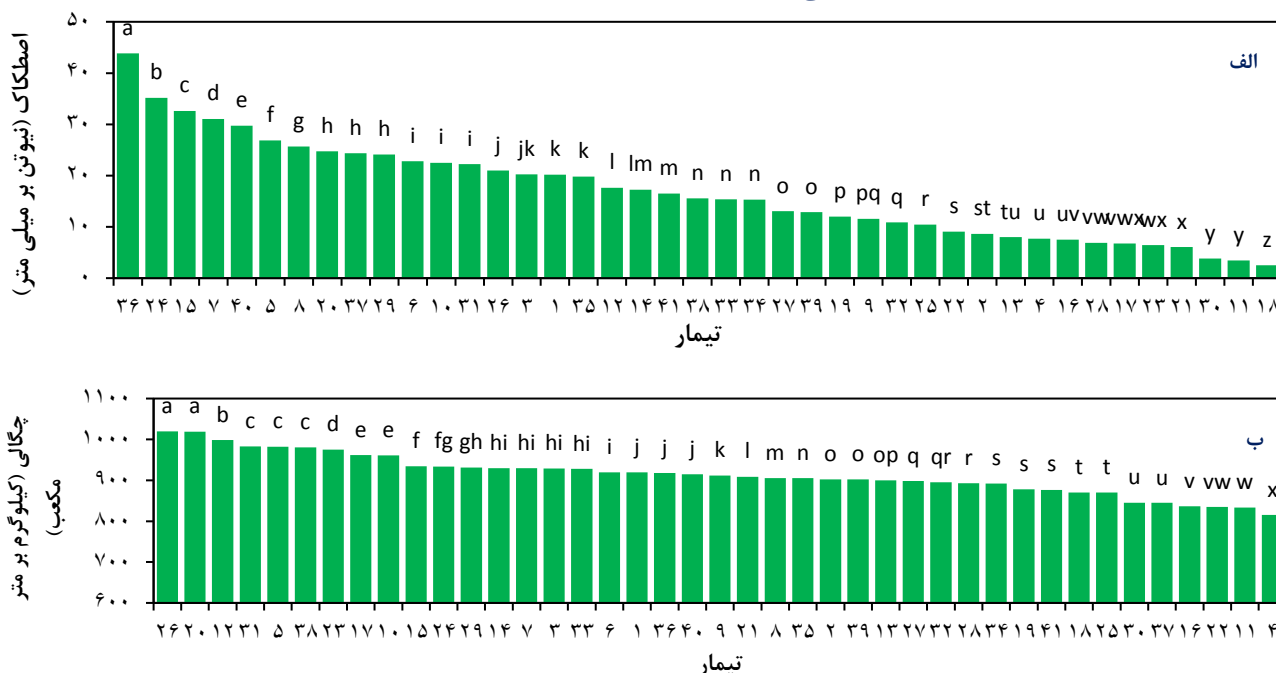
ابتدا به کمک مقایسه میانگین، سطوح فاکتورهای تولید بریکت ها از نظر دو معیار چگالی و اصطکاک بررسی شد. در ادامه، نتایج مدل سازی چگالی و اصطکاک بریکت ها به کمک دو روش رگرسیونی و ماشین بردار پشتیبان آورده می شود. در انتها نیز به کمک روش الگوریتم ژنتیک، سطوح بهینه فاکتورهای تولید بریکت تعیین می گردد.

نتایج و بحث

بررسی نتایج مقایسه میانگین چگالی و اصطکاک بریکت های تولید شده

تجزیه واریانس دو معیار ارزیابی بریکت ها شامل چگالی و اصطکاک به کمک طرح فاکتوریل انجام شد. همچنین به روش LSD در سطح معنی داری ۵ درصد، میانگین آن ها با یکدیگر مقایسه شدند (شکل ۴). نتایج نشان داد که میانگین دو تیمار شماره ۲۰ ($P=10$ ، $T=80$ ، $A=10$)، $M=87/5$ ، $H=13$ و ۲۶ ($P=10$ ، $T=95$ ، $A=15$) با اختلاف معنی داری نسبت به بقیه تیمارهای تولید بریکت از چگالی بالاتری برخوردار هستند ($\rho=1020 \text{ Kg.m}^{-3}$). در مقابل تیمار شماره ۴ ($P=8$ ، $T=95$ ، $A=10$ ، $M=87/5$ ، $H=9$) از کمترین مقدار چگالی برخوردار است ($\rho=815 \text{ Kg.m}^{-3}$). بعلاوه نتایج مقایسه میانگین اصطکاک تیمارهای تولید شده بریکت نشان داد که تیمار شماره ۳۶ با اختلاف معنی داری ($P=9$ ، $T=80$ ، $A=10$ ، $M=87/5$ ، $H=17$) از بیشترین مقدار اصطکاک برابر با حدود ۴۴ نیوتن بر میلی متر برخوردار است. در مقابل تیمار شماره ۱۸ ($P=9$ ، $T=110$ ، $A=5$ ، $M=87/5$ ، $H=13$) با اختلاف معنی داری از کمترین اصطکاک (۲/۵۳) برخوردار بود. لذا هرچه نیروی اصطکاک جهت خارج نمودن بریکت کمتر باشد، بهترین اصطکاک خواهد بود ($P=9$ ، $T=110$ ، $A=5$ ، $M=87/5$ ، $H=13$). نتایج نشان می دهد که پنج فاکتور تولید مورد بررسی شامل درصد رطوبت، درصد اختلاط (خاکاره و چمن)، مواد افزودنی، دما و فشار اثر معنی دار متقابلی بر ویژگی اصطکاک و چگالی

گزارش‌های غلط منجر نشود، از معیار دیگری که تحت عنوان "ضریب تعیین تعدیل شده" شناخته می‌شود، استفاده می‌کنند (Carley et al., 2004)



شکل ۴- مقایسه میانگین تیمارهای تولید بریکت برحسب دو معیار (الف) اصطکاک (نیوتن بر میلی‌متر) و (ب) چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب) در سطح معنی‌داری ۵ درصد به کمک آزمون LSD. حروف ناهمسان وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهند.

Figure 4- Comparison of the average of briquette production treatments in terms of a) density(kg/m3) and b) friction (N/mm) at a significance level of 5% using LSD test. Different letters indicate a significant difference at the 5% probability level.

جدول ۱- نتایج ارزیابی انواع مدل‌های رگرسیونی و تبدیل متغیرها برای پیش‌بینی چگالی و اصطکاک بریکت

Table 1- Evaluation results of various regression models and conversion of variables to predict briquette density and friction

روش کار	متغیر	مدل	ضریب تبیین	ضریب تعیین تعدیل یافته	ضریب تبیین پیش‌بینی			
رگرسیونی	چگالی	خطی	%۹۳/۵۴	%۹۳/۲۷	%۹۵/۸۵			
		اثرات متقابل	%۹۴/۴۷	%۹۳/۹۸	%۹۳/۳۴			
		درجه دوم کاهش یافته	%۹۴/۸۹	%۹۴/۵۴	%۹۴/۰۵			
		درجه دوم کامل	%۹۵/۸۳	%۹۵/۳۳	%۹۴/۶۱			
اصطکاک	اصطکاک	خطی	%۴۴/۹۸	%۴۳/۵۹	%۴۱/۲۵			
		اثرات متقابل	%۶۰/۸۰	%۵۸/۰۵	%۵۳/۸۹			
		درجه دوم کاهش یافته	%۶۹/۵۶	%۶۷/۳۱	%۶۳/۹۲			
		درجه دوم کامل	%۸۶/۳۱	%۸۴/۳۹	%۸۱/۹۱			
	تبدیل ریاضی (تغییر متغیر)	چگالی	$y = f(x)$	%۹۵/۸۳	%۹۵/۳۳	%۹۴/۶۱		
			$\ln(y) = f(x)$	%۹۵/۵۰	%۹۵/۰۵	%۹۴/۴۱		
			$\ln(y) = f(\ln(x))$	%۹۵/۸۶	%۹۵/۳۷	%۹۴/۶۸		
			$\sqrt{y} = f(x)$	%۹۵/۷۳	%۹۵/۲۲	%۹۴/۴۸		
			$\sqrt{y} = f(\sqrt{x})$	%۹۶/۰۷	%۹۵/۴۳	%۹۴/۶۲		
			$1/y = f(x)$	%۹۵/۳۴	%۹۴/۸۸	%۹۴/۱۹		
			اصطکاک	اصطکاک	$y = f(x)$	%۸۶/۳۱	%۸۴/۳۹	%۸۱/۹۱
					$\ln(y) = f(x)$	%۸۲/۵۹	%۸۰/۱۵	%۷۷/۴۰
$\ln(y) = f(\ln(x))$	%۸۵/۲۷	%۸۳/۰۵			%۸۱/۰۷			
$\sqrt{y} = f(x)$	%۸۶/۳۱	%۸۴/۳۹			%۸۲/۱۸			
		$\sqrt{y} = f(\sqrt{x})$	%۸۷/۸۲	%۸۵/۸۵	%۸۳/۹۶			
		$1/y = f(x)$	%۶۲/۵۳	%۵۸/۸۲	%۵۲/۷۸			

تجزیه و تحلیل داده‌های چگالی و اصطکاک بر

اساس جدول ANOVA

جدول ۲ نتایج مربوط به برازش مدل رگرسیونی برای متغیرهای اصطکاک و چگالی را نشان می‌دهد. مقدار آماره F برای مدل رگرسیون برآورده شده در خصوص چگالی حاکی از آن است که متغیرهای موجود در مدل مزبور در سطح خطای ۱ درصد، متغیر وابسته را توضیح می‌دهند و بنابراین مدل به‌طور کامل بر داده‌ها برازش دارد. این موضوع در مدل رگرسیونی مربوط به اصطکاک نیز مصداق بود. در مدل رگرسیونی مربوط به چگالی، متغیرهای درصد اختلاط خاک‌اره، دما، رطوبت، فشار و مواد افزودنی، دما در سطح خطای ۵ درصد معنی‌دار هستند؛ بنابراین، ضریب رگرسیونی مربوط به این متغیرها به‌طور چشمگیری از مقدار صفر متفاوت است. اثرات متقابل رطوبت و فشار مورد بررسی برای چگالی حاکی از آن است که متغیر رطوبت و فشار ($F=8.080$) در سطح خطای ۵ درصد اثر معنی‌داری بر سطح چگالی دارد. این متغیر سهم اندکی (۰/۰۵ درصد) در تبیین تغییرات متغیر وابسته (چگالی) دارد. در مدل رگرسیونی مربوط به اصطکاک نیز، متغیر رطوبت در سطح خطای ۵ درصد معنی‌دار هستند؛ بنابراین، ضریب رگرسیونی مربوط به این متغیرها به‌طور چشمگیری از مقدار صفر متفاوت است و می‌توان گفت که این متغیرها در توضیح اصطکاک دخیل هستند. با توجه به جدول ۲، چگالی، متغیرهای رطوبت و دما معنی‌دار است. دما و رطوبت باعث نرم شدن ساختار ذرات شده و در نتیجه دریک نیروی فشرده‌سازی، ذرات نرم شده بیشتر فشرده شده و چگالی افزایش می‌یابد؛ اما در مورد کاهش چگالی در سطح بالاتر علاوه تأثیر منفی رطوبت در مقابل دما، با تراکم ناپذیر بودن آب و افزایش حجم پلت اشاره شده است (Theerarattananon et al., 2011; Kaliyan and Morey., 2009). بر اساس جدول ۲، اصطکاک، متغیرهای رطوبت، دما و مواد افزودنی

معنی‌دار شده است. طی تحقیقات به‌عمل آمده بیان شد که برای افزایش استحکام پلت‌های ساخته شده از مواد جنگلی و کشاورزی می‌توان از پیوند دهنده‌های طبیعی استفاده نمود (Jamradloedluk et al., 2017). پیونددهنده طبیعی کندر با افزایش سطح ترکیب از ۵ تا ۱۵ درصد، بهترین پیونددهنده در بین دو نوع دیگر می‌باشد. این مواد شامل ۵۰ تا ۷۰ درصد رزین می‌باشد (Krohn et al., 2001).

طراحی مدل ماشین بردار پشتیبان چگالی و اصطکاک بریکت از تکنیک ماشین بردار پشتیبان (SVM) نیز به‌عنوان یکی دیگر از ابزارهای مدل‌سازی چگالی و اصطکاک بریکت برحسب پنج متغیر مستقل مورد مطالعه شامل درصد رطوبت، درصد اختلاط خاک‌اره و چمن، مواد افزودنی، دما و فشار استفاده شد. در این تکنیک برخلاف روش رگرسیونی، برای طراحی مدل تنها از ۸۰ درصد مجموعه داده‌ها به شکل تصادفی استفاده شد. همچنین، از ۲۰ درصد داده‌های باقی‌مانده نیز برای آزمایش مدل بهره گرفته شد. یکی از فاکتورهای مهم در طراحی مدل SVM نوع تابع هسته‌ای است. در جدول ۳، نتایج به‌کارگیری چهار نوع تابع هسته‌ای در دو مرحله آموزش و آزمون و نیز کل داده‌ها برحسب دو معیار میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، آورده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، استفاده از نوع تابع rbf در طراحی مدل SVM بهترین نتیجه را به همراه دارد؛ زیرا استفاده از آن همراه با کمترین مقادیر RMSE و MAPE است. در تحقیقی باهدف بهبود خصوصیات فنی بریکت‌های سوختنی حاصل از باگاس نیشکر، استفاده از بایندر سلولزی در مقیاس میکرومتری و نانومتری بررسی شد. نتایج نشان داد که پارامترهای فنی بریکت‌های تقویت‌شده به‌وسیله بایندها نمونه شاهد بیشترین چگالی به میزان ۷۵۱ کیلوگرم بر مترمکعب برای نمونه نانو سلولز بود (Abyaz et al., 2020).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس برای تیمارهای اصطکاک (بالا) و چگالی (پایین)

Table 2 - Results of analysis of variance for friction (top) and density (bottom) treatments

تیمار اصطکاک							
۰/۰۱۵	۶/۱۱۰	۱/۱۲۲	۱/۱۲۲	%۰/۰۹	۰/۱۵۸	۱	رطوبت
**۰/۰۰۱	۱۱/۱۷۰	۲/۲۳۴	۲/۲۳۴	%۰/۱۲	۰/۲۱۰	۱	درصد اختلاط خاکاره
**۰/۰۰۰	۲۶/۰۹۰	۵/۲۱۸	۵/۲۱۸	%۱۱/۷۸	۲۰/۳۲۷	۱	مواد افزودنی
**۰/۰۰۸	۷/۴۲۰	۱/۴۸۴	۱/۴۸۴	%۲۶/۸۶	۴۶/۳۲۴	۱	دما
۰/۵۴۸ ns	۰/۳۶۰	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	%۸/۷۱	۱۵/۰۲۷	۱	فشار
**۰/۰۰۱	۱۲/۵۱۰	۲/۵۰۲	۲/۵۰۲	۱/۴۴	۲/۴۹۰	۱	رطوبت و مواد افزودنی
**۰/۰۰۰	۴۳/۴۷۰	۸/۶۹۵	۸/۶۹۵	%۵/۰۵	۸/۷۱۲	۱	رطوبت و دما
**۰/۰۰۰	۴۱/۷۴۰	۸/۳۴۹	۸/۳۴۸	%۴/۸۵	۸/۳۶۱	۱	رطوبت و فشار
۰/۱۶۹ ns	۱/۹۲۰	۰/۸۴۱	۰/۳۸۴	%۰/۲۲	۰/۳۸۳	۱	درصد اختلاط خاکاره و مواد افزودنی
**۰/۰۰۰	۱۶/۹۹۰	۳/۳۹۹	۳/۳۹۹	%۱/۹۷	۳/۴۰۳	۱	مواد افزودنی و دما
**۰/۰۰۳	۹/۵۹۰	۱/۹۱۹	۱/۹۱۹	%۱/۱۲	۱/۹۲۵	۱	مواد افزودنی و فشار
**۰/۰۰۰	۱۴/۳۹۰	۲/۸۷۹	۲/۸۷۹	%۱/۶۷	۲/۸۷۹	۱	دما و فشار
		۰/۲۰۰	۲۱/۰۰۲	%۱۲/۱۸	۲۱/۰۰۲	۱۰۵	خطا
				%۱۰۰/۰۰	۱۷۲/۴۸۶	۱۲۲	کل
تیمار چگالی							
**۰/۰۰۳	۹/۵۰۰	۰/۲۹۲	۰/۲۹۲	%۰/۲۲	۰/۱۸۳	۱	رطوبت
۰/۷۲۶ ns	۰/۱۲۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	%۰/۴۶	۰/۳۷۸	۱	درصد اختلاط خاکاره
**۰/۰۰۳	۹/۵۶۰	۰/۲۹۴	۰/۲۹۴	%۲/۶۳	۲/۱۵۷	۱	مواد افزودنی
**۰/۰۰۰	۱۹/۸۹۰	۰/۶۱۲	۰/۶۱۲	%۶/۰۴	۴/۹۶۲	۱	دما
۰/۵۶۵ ns	۰/۳۳۰	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	%۸۴/۰۲	۶۹/۰۰۲	۱	فشار
۰/۹۶۸ ns	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	%۰/۰۰	۰/۰۰۰	۱	رطوبت و درصد اختلاط خاکاره
۰/۱۸۸ ns	۱/۷۵۰	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	%۰/۰۷	۰/۰۵۴	۱	رطوبت و مواد افزودنی
**۰/۰۰۵	۸/۰۸۰	۰/۲۴۸	۰/۲۴۸	%۰/۳۰	۰/۲۴۹	۱	رطوبت و فشار
۰/۱۷۲ ns	۱/۸۹۰	۰/۰۵۸	۰/۰۵۸	%۰/۰۷	۰/۰۵۸	۱	درصد اختلاط خاکاره و مواد افزودنی
**۰/۰۴۱	۴/۳۰۰	۰/۱۳۲	۰/۱۳۲	%۰/۱۶	۰/۱۳۲	۱	درصد اختلاط خاکاره و دما
**۰/۰۲۳	۵/۳۶۰	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵	%۰/۲۰	۰/۱۶۵	۱	درصد اختلاط خاکاره و فشار
**۰/۰۱۰	۶/۹۲۰	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	%۰/۲۶	۰/۲۱۳	۱	مواد افزودنی و دما
۰/۰۷۲ ns	۳/۳۱۰	۰/۱۰۲	۰/۱۰۲	%۰/۱۲	۰/۱۰۲	۱	مواد افزودنی و فشار
		۰/۰۳۱	۳/۲۲۹	%۳/۹۳	۳/۲۲۹	۱۰۵	خطا
				%۱۰۰/۰۰	۸۲/۱۲۹	۱۲۲	کل

(**): معنی داری در سطح ۱ درصد، (*): معنی داری در سطح ۵ درصد، (ns): عدم معنی داری
 (**: significance at 1% level), (*: significance at 5% level), (ns: not significant)

¹ Adjusted Mean Squared
² Adjusted Sum of Squares
³ Contribution
⁴ Sum of Squares
⁵ Degree of Freedom

جدول ۳- نتایج ارزیابی انواع توابع هسته‌ای در ساخت مدل SVM برای پیش‌بینی چگالی و اصطکاک بریکت

Table 3 - Results of evaluation of types of core functions in the construction of SVM model to predict briquette density and friction

میانگین درصد خطای مطلق				مجذور میانگین مربعات خطا			
کل	آزمون	آموزش	کل	آزمون	آموزش	تابع هسته	متغیر
۱/۰۹۰	۱/۱۶۱	۱/۰۸۸	۱۲/۹۳۷	۱۳/۷۳۳	۱۲/۷۲۹	Poly1	چگالی
۰/۸۴۴	۱/۱۶۶	۰/۷۶۶	۱۰/۷۱۰	۱۳/۶۴۴	۹/۸۲۲	Poly2	
۰/۴۸۸	۰/۶۹۰	۰/۴۲۰	۷/۹۰۱	۱۰/۲۶۶	۷/۱۸۸	Poly3	
۰/۲۴۴	۰/۲۶۴	۰/۲۵۴	۲/۵۷۷	۲/۷۷۳	۲/۲۵۵	rbf	
۵۶/۱۵	۴۹/۲۱۵	۴۵/۳۲۲	۷/۲۶۶	۷/۱۲۲	۷/۳۰۱	Poly1	اصطکاک
۲۱/۴۶۹	۲۵/۳۱۷	۲۰/۴۸۰	۳/۷۰۱	۳/۲۷۰	۳/۸۰۷	Poly2	
۱۰/۸۴۴	۱۲/۷۶۶	۱۰/۳۵۰	۱/۵۵۸	۱/۸۱۱	۱/۴۸۸	Poly3	
۸/۳۴۰	۸/۰۷۷	۸/۴۱۲	۰/۹۵۴	۰/۹۱۰	۰/۹۶۰	rbf	

پیش‌بینی توسط مدل است (Shafaie et al., 2021). در نتیجه، چگالی و اصطکاک از مقایسه رگرسیون و ماشین بردار پشتیبان بین دو مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده ($R^2=0.99$) حاصل شده که بهترین نتیجه را نیز در برداشته است.

بررسی قابلیت تعمیم‌پذیری مدل SVM برای اطمینان از نتایج پیش‌بینی‌های مدل SVM در مدل‌سازی دو ویژگی اصطکاک و چگالی بریکت، قابلیت تعمیم‌پذیری آن مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۴). برای ارزیابی قابلیت تعمیم‌پذیری، مقادیر RMSE و MAPE مدل SVM برای اندازه مجموعه آموزش ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد در دو مرحله آموزش، آزمون و کل محاسبه شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با کاهش اندازه مجموعه داده آموزش تا حدود ۶۰ درصد برای هر دو ویژگی چگالی و اصطکاک بریکت، مقادیر RMSE و MAPE اگرچه افزایش داشته است، ولی می‌تواند قابل قبول باشد؛ بنابراین مدل SVM توانست با اندازه ۶۰ درصد مجموعه داده، نتایج قابل قبولی در مرحله آموزش و آزمون داشته باشد. لذا قابلیت تعمیم‌پذیری مدل SVM طراحی شده مورد تأیید قرار می‌گیرد. حداکثر مقدار خطای پیش‌بینی مدل SVM به ترتیب برای چگالی و اصطکاک برای اندازه مجموعه آموزش کمتر از ۶۰ درصد برابر با ۰/۲۹۸ و ۸/۶۲۲ درصد شد. ذرات با اندازه ۱ میلی‌متر اصطکاک بالاتری نسبت به دو سطح اندازه دیگر نشان دادند. این تفاوت در سطح رطوبت و

مقایسه دو مدل رگرسیون (MLR) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) در پیش‌بینی چگالی و اصطکاک بریکت در شکل ۵ در قسمت بالا، نتیجه پیش‌بینی تغییرات چگالی و اصطکاک بریکت در برابر تغییرات پنج متغیر تولید در دو مدل SVM و MLR آورده شده است. بر این اساس هرچقدر مقدار R^2 به یک نزدیک باشد و پراکندگی نقاط نزدیک خط ۴۵ درجه باشد ($y=x+0$)، بهترین نتیجه حاصل می‌شود. مقایسه نتایج حاصل از شکل ۵ نشان می‌دهد که مدل SVM علی‌رغم آنکه تنها از ۸۰ درصد داده‌ها در مرحله آموزش استفاده کرده است، ولی باین وجود، نتیجه بسیار بهتری در مقایسه با مدل MLR به ارمغان آورده است، زیرا علاوه بر آنکه نتایج مرحله آموزش قابل قبول است، در مرحله آزمون نیز نتایج قابل قبولی را از خود نشان داده است و توافق بسیار خوبی بین دو مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده مشاهده شد ($R^2=0.99$). بنابراین، در ادامه تنها به نتایج مدل‌سازی به کمک SVM پرداخته خواهد شد. شفاعی و همکاران در تحقیقی تولید بریکت با استفاده از ترکیب باگاس و پوست گردو برای متغیر پاسخ چگالی نشان می‌دهد R^2 تعدیل‌شده (۰/۹۰) معنی‌دار شده است همچنین با توجه به ضریب تعیین تعدیل‌شده ۹۰ درصد برای متغیر چگالی، مجموعه متغیرهای ورودی حاضر در معادله رگرسیون توانسته است ۹۰ درصد از تغییرات آن را تبیین کند. ضریب تغییرات بیان‌کننده نقاط داده‌های تجربی و مقادیر

تولید شامل فشار (P)، دما (T)، درصد مواد افزودنی (A)، درصد رطوبت (H) و درصد اختلاط خاکاره و چمن (M) بیشترین تا کمترین تأثیر را در چگالی бриکت تولیدشده دارد، زیرا به ترتیب حذف کردن هر یک از آن‌ها باعث افزایش خطای مدل SVM برای چگالی خواهد شد. همچنین به ترتیب متغیرهای دما (T)، فشار (P)، درصد مواد افزودنی (A)، درصد اختلاط خاکاره چمن (H) و درصد رطوبت (M) بیشترین تا کمترین تأثیر را در اصطکاک бриکت تولیدشده دارد؛ بنابراین دو متغیر دما و فشار در فرآیند تولید бриکت می‌توان در مقایسه با سایر متغیرها از اهمیت بالاتری برخوردار باشند. جیانگ و همکاران گزارش کردند که با افزایش دمای پلت خاصیت الاستیسیته ذرات کمتر شده و ماده پلت انعطاف‌پذیر می‌شود و در نتیجه فضای خالی بین درون ذرات کاهش یافته و چگالی افزایش یافته است. (Jiang et al., 2016). در نتیجه دما بیشترین تأثیر در چگالی و اصطکاک در تولید бриکت داشته است.

دمای پایین مشهودتر است. به احتمال زیاد تراکم نزدیک‌تر و سطح تماس بیشتر ذرات ریز با دیواره سیلندر باعث افزایش اصطکاک می‌شود (Stelte et al., 2011a). در مطالعه‌ای دیگر، با کاهش اندازه ذرات چوب افرا اصطکاک بین پلت و قالب افزایش یافت (Nguyen et al., 2015).

نتیجه تحلیل حساسیت مدل SVM

همان‌طور که قبلاً گفته شد، در این مطالعه، اثر پنج متغیر مستقل شامل درصد رطوبت، درصد اختلاط خاکاره و چمن، مواد افزودنی، دما و فشار در تولید бриکت بررسی شد. به کمک تحلیل حساسیت می‌توان دریافت کرد که کدامیک از متغیرها تأثیر بیشتر و یا کمتری در تغییرات چگالی و اصطکاک бриکت دارد. نتایج تحلیل حساسیت مدل SVM برای دو معیار چگالی و اصطکاک бриکت در (جدول ۴) آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به ترتیب متغیرهای

جدول ۴- نتایج ارزیابی قابلیت تعمیم‌پذیری (بالا) و حساسیت مدل SVM (پایین) برای پیش‌بینی چگالی و اصطکاک бриکت

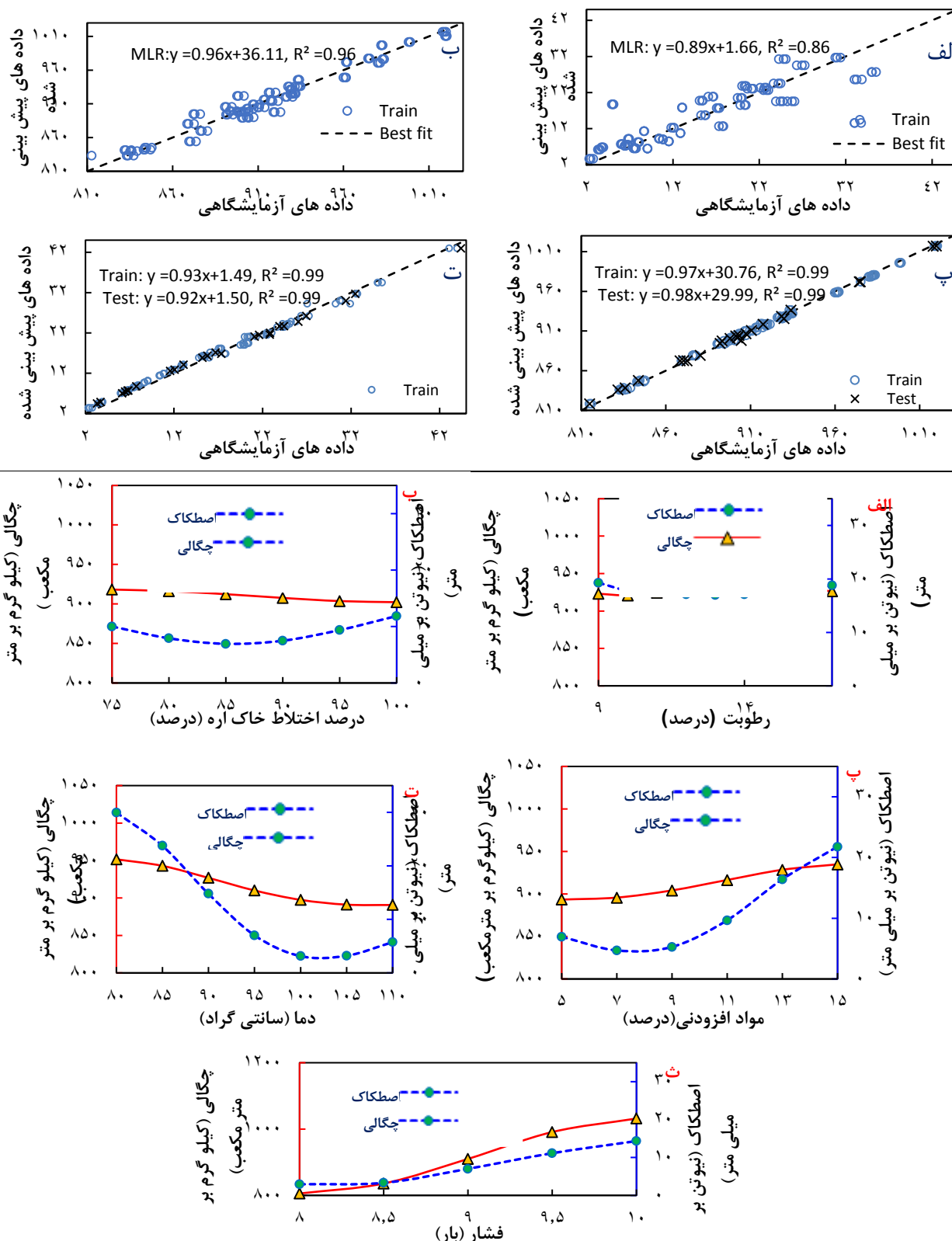
Table 4 – The results of evaluating the scalability (top) and sensitivity of the SVM model (bottom) for predicting briquette density and friction

میانگین درصد خطای مطلق			مجدور میانگین مربعات خطا				متغیر	
کل	آزمون	آموزش	کل	آزمون	آموزش	Training size		
۰/۲۵۱	۰/۲۶۰	۰/۲۵۴	۲/۵۷۰	۲/۷۷۴	۲/۵۲۲	۸۰	چگالی	
۰/۲۵۱	۰/۲۵۵	۰/۲۵۰	۲/۵۳۳	۲/۶۸۳	۲/۴۷۰	۷۰		
۰/۲۹۸	۰/۳۲۰	۰/۲۶۹	۲/۹۷۰	۳/۴۶۰	۲/۵۹۹	۶۰		
۰/۴۰۰	۰/۴۲۳	۰/۳۸۳	۴/۰۳۳	۴/۳۴۴	۳/۶۹۹	۵۰		
۸/۳۴۴	۸/۰۷۷	۰/۴۱۱	۰/۹۵۰	۰/۹۱۱	۰/۹۶۶	۸۰	اصطکاک	
۸/۴۳۳	۸/۱۱۱	۸/۵۶۰	۰/۹۷۳	۰/۹۵۰	۰/۹۸۰	۷۰		
۸/۶۲۲	۷/۵۲۵	۹/۳۵۵	۱/۰۲۰	۱/۰۲۰	۱/۰۳۳	۶۰		
۱۰/۸۲۲	۱۴/۳۴۸	۷/۴۶۵	۱/۳۵۵	۱/۶۹۹	۰/۹۰۰	۵۰		
میانگین درصد خطای مطلق			مجدور میانگین مربعات خطا				متغیرها	متغیر
کل	آزمون	آموزش	کل	آزمون	آموزش			
۰/۲۵۵	۰/۲۶۶	۰/۲۵۵	۲/۵۷۷	۲/۷۷۷	۲/۵۲۲	All	چگالی	
۰/۵۴۴	۰/۶۳۰	۰/۵۲۰	۷/۶۲۲	۸/۶۱۰	۷/۳۴۷	All exclude H		
۰/۴۷۷	۰/۶۸۸	۰/۴۱۱	۶/۳۲۰	۹/۳۳۳	۵/۲۸۸	All exclude M		
۰/۷۲۲	۰/۹۶۶	۰/۶۶۶	۱۲/۲۶۶	۱۵/۱۵۵	۱۱/۴۰۰	All exclude A		
۱/۰۰	۱/۳۳۱	۰/۹۳۳	۱۴/۱۲۲	۲۰/۸۸۸	۱۶/۰۳۳	All exclude T		
۳/۲۵۵	۲/۹۴۴	۳/۳۴۴	۴۶/۴۵۱	۴۴/۹۲۲	۴۶/۸۴۹	All exclude P		
۸/۳۴۴	۸/۰۷۷	۸/۴۱۱	۰/۹۵۵	۰/۹۱۱	۰/۹۶۶	All	اصطکاک	
۱۹/۹۴۴	۲۹/۱۰۰	۱۷/۶۰۰	۵/۲۳۸	۶/۸۴۴	۴/۷۳۳	All exclude H		
۱۰/۰۹۰	۱۱/۰۷۷	۹/۸۴۱	۱/۳۸۸	۱/۳۶۴	۱/۳۹۰	All exclude M		
۲۲/۰۷۷	۲۵/۰۳۴	۲۱/۳۱۱	۳/۹۴۰	۳/۷۸۰	۳/۹۸۸	All exclude A		
۵۲/۵۸۸	۸۸/۲۲۲	۴۳/۴۹۰	۸/۱۱۰	۱۱/۷۲۰	۶/۹۰۰	All exclude T		
۲۹/۸۰۰	۳۸/۹۲۲	۲۷/۴۷۷	۴/۳۲۲	۴/۴۸۸	۴/۱۹۹	All exclude P		

بررسی سطح پاسخ چگالی و اصطکاک بریکت به کمک مدل SVM در شکل ۵ قسمت پایین، تغییرات چگالی و اصطکاک بریکت در مقابل تغییرات متغیرهای مستقل شامل درصد رطوبت، درصد اختلاط خاکاره و چمن، مواد افزودنی، دما و فشار به کمک مدل SVM نشان داده شده است. برای مطالعه بهتر، مقیاس محور عمودی چگالی و اصطکاک برای همه نمودارها یکسان فرض شد و تغییرات در مقابل متوسط سایر متغیرها ترسیم شد. همان طور که نتایج نشان می‌دهد، افزایش رطوبت تا حدود ۱۵ درصد باعث افزایش چگالی و بعدازآن روند تغییرات آن نزولی می‌شود؛ اما این روند تغییرات برای اصطکاک برعکس می‌باشد، به طوری که تا رطوبت حدود ۱۴ درصد روند نزولی دارد و بعدازآن افزایش می‌یابد (شکل ۵-الف). افزایش درصد اختلاط خاکاره باعث کاهش چگالی بریکت شد و در مقابل تا افزایش حدود ۸۵ درصد منجر به کاهش اصطکاک و بعدازآن روند تغییرات آن صعودی شد (شکل ۵-ب). افزایش مقدار ماده افزودنی همواره باعث افزایش اصطکاک و چگالی بریکت تولیدشده می‌شود (شکل ۵-پ). افزایش دمای فرآیند تولید بریکت نیز باعث کاهش چگالی و اصطکاک می‌شود (شکل ۵-ت). بعلاوه تأثیر دما در تغییرات اصطکاک بیشتر از چگالی می‌باشد. فشار در طول فرآیند تولید همواره باعث افزایش چگالی و اصطکاک بریکت می‌شود (شکل ۵-ث). همچنین این نتایج تأیید می‌کند که فشار تأثیر بیشتری بر تغییرات افزایش چگالی در مقایسه با اصطکاک بریکت دارد. رمضانزاده در تحقیقی گزارش کردند اصطکاک با افزایش دما و رطوبت در هر سه سطح اندازه ذرات به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. افزایش دما تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد به میزان

قابل توجهی کاهش می‌یابد، اما در محدوده دمایی $^{\circ}\text{C}$ ۱۰۰-۷۵ و به‌ویژه در سطوح رطوبتی ۱۲ و ۱۶ درصد تأثیر قابل توجهی نداشته است و افزایش اصطکاک در این محدوده را می‌توان به دلیل نرم شدن زیاد و خمیری شدن و در نتیجه افزایش سطح تماس پلت و دیواره قالب دانست. در نتیجه اصطکاک در دمای ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و از دمای $^{\circ}\text{C}$ ۱۰۵-۱۰۰ تأثیر قابل توجهی نداشته است و سپس تا دمای $^{\circ}\text{C}$ ۱۱۰ با افزایش همراه بوده است (Ramezanzade, 2017).

بهینه‌سازی فاکتورهای تولید بریکت به کمک الگوریتم ژنتیک همان طور که نتایج قبلی این مطالعه نشان داد، اعتبار مدل SVM به‌عنوان یک تخمین گر چگالی و اصطکاک بریکت تولیدشده تأیید شد؛ بنابراین از SVM طراحی شده به‌عنوان تابع شایستگی در الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده شد. از بین پاسخ‌های ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک حالت بهینه تولید بریکت شامل رطوبت حدود ۱۳ درصد، ۸۷/۵ درصد اختلاط خاکاره و چمن، ۱۰ درصد ماده افزودنی، دمای حدود $^{\circ}\text{C}$ ۱۰۰ و فشار حدود ۱۰ بار به‌عنوان بهترین راه‌حل انتخاب شد. این انتخاب از متغیرهای مستقل تولید منجر به دستیابی چگالی ۱۰۰۷ و اصطکاک حدود ۸ بریکت شد. رمضانزاده در تحقیقی با استفاده روش تابع مطلوبیت و فرآیند بهینه‌سازی با در نظر گرفتن زمان و انرژی موردنیاز برای تهیه پلت به‌گونه‌ای از خصوصیات ارزیابی شده در بهینه‌ترین شرایط ممکن قرار گرفتند و مشخص شده‌اند دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، رطوبت ۱۱/۷ درصد، چگالی ۱۰۸۵/۷ کیلوگرم بر مترمکعب و اصطکاک ۴/۹۶ نیوتن بر میلی‌متر به‌عنوان شرایط بهینه تولید بریکت مشخص شد (Ramezanzade, 2017).



شکل ۵- بالا) نتایج بررسی توافق بین دو مجموعه داده آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط دو مدل **MLR** چگالی (الف) و **MLR** اصطکاک (ب) برای (پ) **SVM** چگالی (kg/m^3) و (ت) **SVM** اصطکاک (N/mm) بریکت؛ پایین) نمودارهای پاسخ تغییرات چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب) و اصطکاک (نیوتن بر میلی‌متر) بریکت در مقابل تغییرات متغیرهای مستقل شامل درصد رطوبت (الف)، درصد اختلاط خاک‌اره (ب)، درصد مواد افزودنی (پ)، دما (ت) و فشار (ت) **Figure 5- Top** The results of examining the agreement between two experimental data sets and predicted by two **MLR** density (a) and **MLR** friction (b) models for (c) **SVM** density (kg/m^3) and (d) **SVM** friction (N/mm) of briquettes; bottom) Response diagrams of changes in briquette density (kg/m^3) and friction (N/mm) versus changes in independent variables including moisture percentage (a), sawdust mixing percentage (b), additive percentage (c), temperature (d) and pressure (e)

و با آن‌ها رابطه مستقیم دارد (Atli et al., 2018). با توجه به نتایج جدول ۵، درصد کربن و هیدروژن موجود در ساختار بریکت، خاکاره و چمن به ترتیب بیشترین و کم‌ترین درصد کربن می‌باشد. در نتیجه میزان ارزش حرارتی بالا بریکت نسبت به چمن و خاکاره بیشتر است. در مورد کندر می‌توان گفت ارزش حرارتی بالا و ارزش حرارتی پایین به دلیل چسبندگی بالا تأثیر بسزایی در روند تولید بریکت داشته است؛ و مقادیر ارزش حرارتی بالا و پایین مقدار کندر نیز به ترتیب برابر ۳۰/۹۰۰ و ۲۹/۶۸۰ مگاژول است.

مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی بریکت، ارزش حرارتی آن است. بریکت تولیدشده دارای ارزش حرارتی بالاتری نسبت به آزمون چگالی و اصطکاک است؛ بنابراین، آنالیز عدم قطعیت به اثبات می‌رسد.

خصوصیات تعیین ارزش حرارتی در جدول ۵ ارزش حرارتی بالا و پایین نمونه بریکت و اجزای آن در نقطه بهینه آزمون اصطکاک و چگالی نمایش داده شده است. ارزش حرارتی بالا مقدار کل انرژی حاصل از احتراق کامل جسم است و ارزش حرارتی پایین، حداکثر میزان حرارت تولیدشده به استثنای گرمای تبخیر آب موجود می‌باشد. طبق نتایج، مقادیر ارزش حرارتی بالا و ارزش حرارتی پایین بریکت به ترتیب برابر ۲۰/۳۰۰ و ۱۹/۴۴۰ مگاژول از چمن و خاکاره بیشتر است. مقادیر ارزش حرارتی بالا خاکاره و چمن به ترتیب برابر ۱۹/۷۰۰ و ۱۷/۳۰۰ مگاژول بر کیلوگرم است. و مقادیر ارزش حرارتی پایین خاکاره و چمن به ترتیب برابر ۱۸/۹۲۰ و ۱۶/۷۵۰ مگاژول بر کیلوگرم است. ارزش حرارتی هر جسم به عناصر تشکیل‌دهنده جسم به خصوص کربن و هیدروژن بستگی

جدول ۵ - مقایسه ارزش حرارتی بالا و پایین و درصد کربن و هیدروژن در تیمارها و متغیرهای مورد آزمایش (MJ/kg)

Table 5- Comparison of high calorific value, low calorific value and percentage of hydrogen and carbon in studied treatments (MJ/kg)

رديف	محصول	ارزش حرارتی پایین	ارزش حرارتی پایین	کربن	هیدروژن
۱	بریکت	۲۰/۳۰۰	۱۹/۴۴۰	۴۷/۶۳۰	۳/۹۱۶
۲	خاکاره	۱۹/۷۰۰	۱۸/۹۲۰	۴۶/۵۱۰	۳/۵۴۱
۳	چمن	۱۷/۳۰۰	۱۶/۷۵۰	۴۰/۵۲۰	۲/۹۶۵
۴	کندر	۳۰/۹۰۰	۲۹/۶۸۰	۶۵/۱۶	۵/۵۶۱

SVM و در مرحله آموزش و آزمون، توافق خوبی در پیش‌بینی این دو خصوصیت مشاهده شد ($R^2=0.99$). در بهینه‌سازی فاکتور تولید به کمک الگوریتم ژنتیک، بهترین متغیرها شامل رطوبت حدود ۱۳ درصد، ۸۷/۵ درصد اختلاط خاکاره و چمن، ۱۰ درصد ماده افزودنی، دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار حدود ۱۰ بار انتخاب شد. اندازه‌گیری ارزش حرارتی بالا و ارزش حرارتی پایین بریکت، چمن و خاکاره این نتیجه حاصل شد که بالاترین میزان ارزش حرارتی مربوط به بریکت است.

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده در این مطالعه، بریکت سوختنی از ضایعات درختان شهری توت، نارون، افاقیا، زبان‌گنجشک و چمن ورزشی تهیه و تأثیر پارامترهای دما، فشار و مواد افزودنی بر مقادیر اصطکاک و چگالی آن‌ها بررسی شد نتایج نشان داد که با افزایش دما، فشار و مواد افزودنی، میزان چگالی افزایش یافت. ولی افزایش رطوبت تأثیر عکس بر روی میزان چگالی بریکت داشت. همچنین با افزایش دمای فرایند، میزان اصطکاک برای خروج بریکت از سیلندر کاهش یافت. نتیجه بررسی تغییرات چگالی و اصطکاک بریکت تولیدی در مدل

فهرست اختصارات

ردیف	عبارت اختصار	توضیحات	ردیف	عبارت اختصار	توضیحات
۱	GS	چمن ورزشی (Grass sport)	۱۶	LSD	آزمون فیشر (fisher)
۲	CV	ارزش حرارتی (calorific value)	۱۷	RMSE	معیار میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error)
۳	SVM	ماشین بردار پشتیبان (Support vector machine)	۱۸	MAPE	معیار میانگین درصد خطای مطلق (The Mean Absolute Percentage Error)
۴	F	کندر (Frankincense)	۱۹	Rbf	تابع هسته‌ای (Radial-Basis Function)
۵	D	چگالی (Density)	۲۰	poly	تابع هسته‌ای (Polynesion)
۶	F	اصطکاک (Friction)	۲۱		آموزش (Train)
۷	L	رگرسیون مدل خطی (Linear)	۲۲		آزمون (Test)
۸	FI	اثرات متقابل (2FI)	۲۳	AEA	متغیر مواد افزودنی (All exclude A)
۹	RQ	مدل درجه دوم کاهش یافته (RedQuad)	۲۴	AET	متغیر دما (All exclude T)
۱۰	Q	مدل درجه دوم کامل (Quad)	۲۵	AEH	متغیر رطوبت (All exclude H)
۱۱		مدل توابع تبدیل ریاضی ($y=f(x)$)	۲۶	AEM	متغیر درصد اختلاط (All exclude M)
۱۲		مدل توابع تبدیل ریاضی ($\ln(y)=f(x)$)	۲۷	AEP	متغیر فشار (All exclude P)
۱۳		مدل توابع تبدیل ریاضی ($y^{0.5}=f(x)$)	۲۸	GA	الگوریتم ژنتیک (genetic algorithm)
۱۴		مدل توابع تبدیل ریاضی ($y^{0.5}=f(x^{.5})$)	۲۹	MLR	Multiple Linear Regression
۱۵		مدل توابع تبدیل ریاضی ($1/y=f(x)$)	۳۰	PF	بهینه‌سازی چند هدفه (جبهه پارتو)

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 Farsi)
- Agarwal, A. K., & Agarwala, G. D. (1999). Recent technologies for the conversion of biomass into energy, New Delhi: Indian Institute of Technology.
- Alborz Province Municipality. (2020). *Sima Manzar Green Space of Alborz Province*. Retrieved January 18, 2020, from <https://www.karaj.ir>.
- Artemio, C., Maginot, N., Serafin, C., & Rahim, F. (2018). Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *Journal PeerJ*, 6:5504: 1-18.
- Atli, A., Candelier, K., & Alteyrac, J. (2018). Mechanical, thermal and biodegradable properties of bioplast-spruce green wood polymer composites. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 12(5), 226.
- Carley, K.M., Kamneva, N.Y., & Reminga, J. (2004). Response surface methodology. CASOS Technical Report. *Institute for Software Research International*, (pp.32).
- Cesprini, E., Resente, G., Causin, V., Urso, T., Cavalli, R., & Zanetti, M. (2020). Energy recovery of glued wood waste – A review. *Journal of Fuel*, 262, 1-12.
- Chen, W.S., Chang, F.C., Shen, Y.H., & Tsai, M.S. (2011). The characteristics of organic sludge/sawdust derived fuel. *Bioresource Technology*, 102(9), 5406-5410.
- Chen, W.H. (2015). Torrefaction. In *Pretreatment of Biomass – Processes and Technologies*, ed. A. Pandey, S. Negi, P. Binod and C. Larroche. (Vol. 1). (pp. 173-189). Netherlands.
- Department of Energy. (2018). Bioenergy Technologies Office, Algae biomass summit: U.S. department of energy biomass program. Retrieved March 27, 2018, from <https://www.karaj.ir>. <https://www.energy.gov>.
- Ebrahimi Meymand, H., Rahimi, M., & Bagheri Marashi, M. (2014). Possibility of using pistachio waste as fuel in Rafsanjan city. *Third Annual Clean Energy*, 3, 1-10.

- Falemara, B., Joshua, V., Aina, O., & Nuhu, R. (2018). Performance evaluation of the physical and combustion properties of briquettes produced from agro-wastes and wood residues. *Journals Recycling*, 3, 10-21.
- Fiorineschi, L., Cascini, G., Rotini, F., & Tonarelli, A. (2020). Versatile Grinder Technology for the Production of Wood Biofuels. *Fuel Processing and Technology*, 197, 106217.
- Garcia, D., Caraschi, J., Ventrone, G., Vieira, F., & Protasio, T. (2019). Assessment of plant biomass for pellet production using multivariate statistics (PCA and HCA). *Journal of Renewable Energy*, 139, 796-805.
- Hosseini, M., Ghazanfari Moghadam, A., Hashemipour Rafsanjani, H., & Ataei, A. (2017). Investigation and modeling of thermal decomposition kinetics of pistachio leaves and wood in order to produce biofuels. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(2), 429-439.
- Handra, N., & Hafni. (2017). Effect of binder on combustion quality on EFB bio-briquettes. *International Conference on Environmental and Technology*, 97, 1-7.
- Jamradloedluk, J., & Lertsatitthanakorn, C. (2017). Influence of mixing ratios and binder types on properties of biomass pellets. *Energy Procedia*, 138, 1147-1152.
- Jiang, L., Yuan, X., Xiao, Z., Liang, J., Li, H., Cao, L., & Zeng, G. (2016). A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: Energy input and pellet properties. *Energy Conversion and Management*, 126, 509-515.
- Kaliyan, N., & Morey, R.V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337-359.
- Kaliyan, N., & 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.
- Krohn, K., & Paschke, R. (2001). Progress in understanding the etiology of thyroid autonomy. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 86(7), 3336-3345.
- Mir Emadi, T., & Rahimi Rad, Z. (2016). Identification of system failures in the analysis of biofuel technological innovation system in Iran. *Journal of Science and Technology Policy*, 8(1): 27-41.
- Madadian, E., Akbarzadeh, A., & Lefsrud, M. (2018). Pelletized Composite Wood Fiber Mixed with Plastic as Advanced Solid Biofuels: Thermo-Chemical Analysis. *Waste and Biomass Valorization*, 9(9), 1629-1643.
- Masche, M., Puig-Arnabat, M., Jensen, P., & Holm, J. (2019). From wood chips to pellets to milled pellets: The mechanical processing pathway of Austrian pine and European beech. *Journals Powder Technology*, 350, 134-145.
- Millward-Hopkins, J., & Purnell, P. (2019). Circulating blame in the circular economy: The case of wood-waste biofuels and coal ash. *Journal Energy Policy*, 129, 168-172.
- Najafzadeh, A., Tabatabai Nasab, Z., & Dehghan Tafti, M. (2014). Health and environmental effects in the process of pellet production and combustion. In: Proceedings of 1th national conference on new and clean energy management, 14-16 Oct., Hegmataneh Environmental Assessors Associatio, Shahid Mofteh College, Hamedan, Iran, pp. 122-133. (In Farsi)
- Najafzadeh, A., Tabatabai, Z., & Dehghan Tafti, M. (2014). Production of pellet fuel using wood and agricultural waste. In: Proceedings of National Conference on Agricultural Science and Technology. 22-23 Nov., Malayer University, Malayer, Iran. pp. 14-25. (In Farsi)
- Nguyen, Q. N., Cloutier, A., Achim, A., & Stevanovic, T. (2015). Effect of process parameters and raw material characteristics on physical and mechanical properties of wood pellets made from sugar maple particles. *Biomass and Bioenergy*, 80, 338-349.
- Pattiya, A., & Suttibak, S. (2012). Production of bio-oil via fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations in a fluidised-bed reactor with a hot vapour filtration unit. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 95, 227-235.

- Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215-232.
- Ramezanzade, 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)
- Rezaei, M., Livani, A., & Haghparast Kashani, A. (2013). Estimation of pellet production potential from wood biomass sources in Iran. In: Proceedings of 3th National Conference on Fuel, Energy and Environment, 28-30 Oct., *Material and Energy Research Center, Tehran, Iran*, pp. 1-11. (In Farsi)
- Rashidi Kia, M. & Moradi, M. (2016). Biofuel for optimal use of agricultural waste and its role in sustainable development. *Shabak Monthly*, 3(3), 28-17. (In Farsi)
- Russell, A., Larsson, S., Shekhar, S., Solomon, I., Salehi, H., & Subirana, J. (2020). Deformation and breakage of biofuel wood. *Journal Chemical Engineering Research and Design*, 153, 419–426.
- Rudolfsson, M., Agar, D., Lestander, T., & Larsson, S. (2020). Energy savings through late-steam injection – A new technique for improving wood pellet production. *Journal of Cleaner Production*, 254(1): 120099.
- Ríos-Badrán, I., Luzardo-Ocampo, I., García-Trejo, J., Santos-Cruz, J., & Gutierrez-Antonio, C. (2020). Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. *Journal Renewable Energy*, 145, 500-5 07.
- Sadeghi, S. (2020). Investigation of the effect of biomass composition and natural binders on mechanical and thermal properties of fuel pellets. M.Sc. dissertation, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Agricultural Engineering, Sari, Iran. (In Farsi)
- Shafaie, H., Kermani, A. M., Kianmehr, M. H., & 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)
- Rajput, S., Jadhav, S., & Thorat, B. (2020). Methods to improve properties of fuel pellets obtained from different biomass sources: Effect of biomass blends and binders. *Fuel Processing and Technology*, 199, 106255.
- Samiei, L., Jalali, R., Shakeri, A., & Nikokhtar, M. (2014). Potential assessment of the provinces in the field of using agricultural waste to produce fuel pellets. In: Proceedings of 3th International Conference on New Approaches to Energy Conservation, 15-16 Dec., University of Tehran, Tehran, Iran, pp. 1-12. (In Farsi)
- Ståhl, M., Frodeson, S., Berghel, J., & Olsson, S. (2019). Using Secondary Pea Starch in Full-Scale Wood Fuel Pellet Production Decreases the Use of Steam Conditioning. *Proceedings of the World Sustainable Energy Days*, 1, 1-12.
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011a). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90(11), 3285-3290.
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., Henriksen U. B., & Sanadi A.R. (2011b). Thermal transitions of the amorphous polymers in wheat straw. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 1053-1056.
- Stelte, W., Barsberg, S., Clemons, C., & Morais, J. (2019). Coir Fibers as Valuable Raw Material for Biofuel Pellet Production. *Waste and Biomass Valorization*, 10(11), 3535–3543.
- Theerarattananoon, K., Xu, F., Wilson, J., Ballard, R., Mckinney, L., Staggenborg, S., & Wang, D. (2011). Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 325-332.
- Tumuluru, J., Wright, C.T., Hess, J.R., & 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.

Wang, Y., Wu, K., & Sun, Y. (2016). Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw. *Journal of the Energy Institute*, 91(1), 1-10.

Whalen, J., Xu C., Shen F., Kumar A., Eklund M., & Yan J. (2017). Sustainable biofuel production from forestry, agricultural and waste biomass feedstocks. *Applied Energy* 198, 281–283.