

Optimization of Pelletizing Process of Sugarcane Bagasse Compost Using Response Surface Methodology and Evaluation of Release Rate of Nitrogen from Pellet

EHSAN SARLAKI¹, MOHAMMAD HOSSEIN KIANMEHR^{1*}, MARZIEH GHORBANI¹, BEHZAD AZADEGAN²

1. Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Department of Irrigation and Drainage, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

(Received: Dec. 19, 2020- Revised: Feb. 16, 2021- Accepted: Feb. 22, 2021)

ABSTRACT

To increase the applicability of compost for agricultural utilizations on a large scale as a sustainable slow-release nitrogen fertilizer, as well as reducing the limitations of their handling, transportation, and storage, it is important to improve their physical and mechanical properties, and pelletization is the most applicable process to achieve these goals. In the present study, the pelletizing process of sugarcane bagasse compost using a closed-end die within a single pelletizer unit was investigated. Composted hammer milled sugarcane bagasse with three particle size (1, 2.5, and 4 mm), three moisture content (8, 12, and 20 %) under three compaction pressure (50, 100, and 150 MPa) was densified and the effect of these factors on specific energy consumption, maximum breaking strength and density of produced pellets were evaluated and optimized by response surface methodology (RSM). The optimum value of specific energy consumption (2.11 MJ/t), maximum breaking strength (28.35 kg), and particle density (0.871 g/cm³) were suggested from BBD-RSM for pelletization of sugarcane bagasse compost under optimal conditions of using 4-mm particle size, 20 wb% moisture content and 50 MPa compaction pressure with desirability function of 0.706. Then, the rate of nitrogen release in soil and water for pelletized mixed sugarcane bagasse compost-urea fertilizer at a ratio of 1:1 wt% was investigated. The results of the nitrogen release rate showed that 61% of nitrogen was released into the water during five days while the release of nitrogen in soil was 80% during 98 days for pelletized mixed compost-urea fertilizer. In general, the findings of this study showed that the pelletized fertilizers produced from the compost-urea mixture are capable to supply nitrogen to the plant for a longer period relative to conventional nitrogen fertilizers such as urea. It could be deduced from this research that pelletized mixed compost-urea fertilizers have great potential for use in crop nutrition as a sustainable slow-release nitrogen fertilizer.

Keywords: Sugarcane Bagasse Compost; Pelletization; Specific Energy Consumption; Response Surface Methodology; Sustainable Slow-Release Nitrogen Fertilizer.

* Corresponding Author's Email: kianmehr@ut.ac.ir

بهینه‌سازی فرآیند پلت‌سازی کمپوست باگاس نیشکر به کمک روش سطح پاسخ و ارزیابی نرخ آزادسازی نیتروژن از پلت

احسان سرلکی^۱، محمد حسین کیانمهر^{۲*}، مرضیه قربانی^۱، بهزاد آزادگان^۲

۱. گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۲/۴)

چکیده

به منظور افزایش قابلیت کاربرد کمپوست برای مصارف کشاورزی در یک مقیاس وسیع به عنوان یک کود پایدار کند رهش نیتروژن و همچنین کاهش هزینه‌های مربوط به انبار و حمل و نقل، بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کمپوست اهمیت دارد و پلت‌سازی یکی از فرآیندهای کاربردی رایج برای تحقق این اهداف است. در این پژوهش فرآیند پلت‌سازی کمپوست باگاس نیشکر به روش قالب با انتهای بسته درون یک واحد پلت‌ساز منفرد مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر متغیرهای مستقل موثر بر فرآیند پلت‌سازی مانند اندازه ذرات (۱، ۲/۵ و ۴ میلی‌متر)، محتوای رطوبت (۸، ۱۲ و ۲۰ درصد) و فشار تراکم (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ مگاپاسکال) بر متغیرهای پاسخ از قبیل مصرف انرژی ویژه، حداکثر مقاومت شکست و چگالی پلت‌های تولید شده با استفاده از روش سطح پاسخ-طرح باکس بنکن (BBD-RSM) ارزیابی و بهینه‌سازی شد. نتایج بهینه‌سازی نشان دادند که در شرایط بهینه اندازه ذرات ۴ میلی‌متر، محتوای رطوبت ۲۰ درصد وزنی و فشار تراکم ۵۰ مگاپاسکال، کمینه مقدار مصرف انرژی ویژه ۲/۱۱۹ مگاژول بر تن و بیشینه مقادیر حداکثر مقاومت شکست و چگالی پلت به ترتیب ۲۸/۳۵ کیلوگرم و ۰/۸۷۱ گرم بر سانتیمتر مکعب با تابع مطلوبیت ۰/۷۰۶ پیشنهاد می‌شود. در ادامه، نرخ آزادسازی نیتروژن از پلت در محیط آب و خاک برای کود پلت کمپوست باگاس نیشکر در ترکیب با اوره با نسبت ۱:۱ درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نرخ آزادسازی نیتروژن نشان داد که مقدار ۶۱ درصد نیتروژن پلت به مدت پنج روز در محیط آب آزاد می‌شود در حالی که آزادسازی ۸۰ درصد نیتروژن از پلت به درون خاک ۹۸ روز به طول می‌انجامد. به طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان دادند که کود پلت تولید شده از ترکیب کمپوست باگاس نیشکر و اوره قادر است نیتروژن را برای یک دوره طولانی‌تری نسبت به کودهای متداول نیتروژنی مانند اوره برای گیاه تامین کند. از نتایج این پژوهش می‌توان استنباط نمود که کود پلت ترکیبی کمپوست-اوره به عنوان یک کود کند رهش نیتروژن، می‌تواند پتانسیل بسیار زیادی برای کاربرد در تغذیه گیاهان داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: کمپوست باگاس نیشکر، پلت‌سازی، مصرف انرژی ویژه، روش سطح پاسخ، کود پایدار کند رهش نیتروژن.

مقدمه

جامد لیگنوسلولزی کشاورزی تولید می‌شود. ایران یکی از کشورهای تولیدکننده نیشکر در سطح جهان است. در حال حاضر، سالیانه حدود ۱۹۰۰ میلیون تن نیشکر در جهان و ۱۰ میلیون تن نیشکر در ایران تولید می‌شود. به طور کلی، در فرآوری صنایع نیشکر حدود ۳۰ درصد از نیشکر به باگاس تبدیل می‌شود و پیش‌بینی می‌شود که در کشور سالیانه ۳ میلیون تن باگاس نیشکر تولید شود. باگاس نیشکر شامل ۶۷ درصد کربوهیدرات و ۲۲ درصد لیگنین با محتوای رطوبت بیش از ۵۰ درصد است. یکی از راه‌کارهای موثر در مدیریت سبز باگاس نیشکر فرآوری آنها به کودهای آلی مانند کمپوست می‌باشد (Zafari and Kianmehr., 2012). بر اساس گزارش مرکز تحقیقات

بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2019)، سالانه ۲/۰۱ میلیارد تن پسماندهای زیستی در جهان تولید می‌شوند و تخمین زده می‌شود که تولید پسماندهای زیستی تا سال ۲۰۵۰ به ۳/۴ میلیارد تن برسد (Rajabi Hamedani et al., 2019). از طرف دیگر، مطابق گزارش اتحادیه اروپا، ۲۵ درصد از پسماندهای زیستی شامل پسماندهای جامد لیگنوسلولزی کشاورزی و شهری دارای قابلیت برای تولید کمپوست هستند و در نتیجه انتظار می‌رود قابلیت تولید سالیانه ۵۰۰ میلیون تن کمپوست در جهان وجود داشته باشد (Martínez-Blanco et al., 2009). در ایران سالیانه بیش از ۲۱/۵ میلیون تن پسماندهای

(*et al.*, 2020). با توجه به مشکلات بیان شده، به نظر می‌رسد که ارزش‌گذاری محصولات توده‌ای به محصولات پلت‌شده یک راه حل موثر برای حل این مشکلات باشد که در مطالعات مختلفی محققان به این موضوع پرداخته‌اند (López-Mosquera *et al.*, 2008; Rao *et al.*, 2007; Valentinuzzi *et al.*, 2020).

از مزایای فشرده‌سازی می‌توان به کاهش مسائل زیست محیطی مرتبط با کمپوست‌ها، افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی، آزادسازی کند/کنترل مواد مغذی موجود در کود برای گیاه و بهبود انبارمانی، حمل و نقل و توزیع آنها توسط ماشین‌های کودپاش‌ها برای مصارف کشاورزی اشاره کرد (Moslehi Roodi *et al.*, 2018; Chew *et al.*, 2020). با این حال، زمانیکه تبدیل کمپوست به کود پلت‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، نیاز به تحقیقات بیشتری از دیدگاه فنی پلت‌سازی وجود دارد (Tumuluru, 2016). هر نوع محصول پلت شده بایستی الزامات مشتری و استانداردهای بازار را احراز کند و باید در برابر شرایط مختلف حمل و نقل و انبار مقاومت مطلوبی داشته باشد. به‌طور کلی نیروهایی که باعث آسیب رساندن به پلت‌ها (مانند گسیختگی، خراشیدگی و شکستگی) در حین انبار و حمل و نقل می‌شوند به سه گروه کلی فشرده‌گی، ضربه و برش^۱ تقسیم می‌شوند. نیروهای فشرده‌گی منجر به عمل خرد کردن^۲، نیروهای ضربه‌ای منجر به شکستن سطح^۳ پلت در امتداد صفحاتی که دارای ترک طبیعی هستند و نیروهای برشی منجر به خراشیدگی^۴ لبه‌ها و سطوح پلت می‌شوند (Pampuro *et al.*, 2017).

فرآیند پلت‌سازی محصولات کودی در چندین مطالعه ارزیابی شده است و نتایج محققان نشان داده‌اند که کودهای پلت شده یک محصول ایده‌آل برای تولید کودهای آلی تجدیدپذیر هستند و می‌توانند یک اقتصاد زیستی چرخه‌ای را برای کشاورزی آلی ایجاد کنند (Pampuro *et al.*, 2017; Romano *et al.*, 2014). به‌طور کلی، فرآیند پلت‌سازی شامل تهیه مواد اولیه (تمیز کردن، آسیاب، تنظیم رطوبت و افزودن مواد چسب)، تهیه، پلت‌سازی، خشک کردن، خنک‌سازی و بسته‌بندی می‌شود. هر یک از این عملیات‌ها می‌توانند بر کیفیت پلت‌های تولید شده تأثیر بگذارند (Kylili *et al.*, 2016; Takahashi *et al.*, 2016). روش‌های رایج پلت‌سازی شامل دستگاه‌های پلت‌ساز با قالب‌های تخت یا رینگ‌ی و اکسترودرهای پیچی هستند (Jackson *et al.*, 2016). به‌طور کلی، متغیرهای موثر در فرآیند پلت‌سازی شامل نوع قالب (قالب تخت یا حلقه‌ای)، ضخامت قالب، نسبت تراکم (نسبت طول به قطر (L/D) قالب پلت)، دمای قالب، فشار قالب و متغیرهای ماده

بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، تولید فعلی کودهای آلی در کشور حدود ۳۵ میلیون تن است و پتانسیل تولید ۱۰۰ میلیون تن کود آلی در کشور وجود دارد. استفاده از کمپوست به‌عنوان یک کود آلی و سبز برای مصارف کشاورزی می‌تواند از نظر فنی و زیست محیطی اثرات مفیدی را به‌همراه داشته باشد (Pampuro *et al.*, 2016). بر این اساس، برآورد شده است که کمپوست کردن ۱ تن پسماندهای کشاورزی به‌عنوان یک کود آلی طبیعی، ایمن و سازگار با محیط زیست از تولید ۸/۴ کیلوگرم کودهای شیمیایی NPK جلوگیری می‌کند و پتانسیل ترسیب CO₂ آنها ۴۸ کیلوگرم است (Martínez-Blanco *et al.*, 2009). یک مشکل اساسی استفاده از کمپوست‌ها برای مصارف کشاورزی این است که وقتی برای مدت طولانی در مزارع استفاده می‌شوند، به‌دلیل رطوبت بالا در معرض تجزیه زیستی از طریق باکتری‌ها یا قارچ‌ها قرار می‌گیرند و می‌تواند بسیاری از خطرات محیط زیستی را ایجاد کنند (Pampuro *et al.*, 2018). همچنین گرد و خاک ناشی از پخش کمپوست در سطح مزرعه نیز یکی دیگر از مشکلات کاربرد کمپوست است. علاوه بر این، محتوای مواد مغذی در کمپوست‌ها ثابت نیستند و به‌همین دلیل کاربرد آنها برای استفاده موثر برای تغذیه گیاه محدود می‌شود. از دیگر مشکلاتی که کاربردهای مستقیم استفاده از کمپوست‌ها را محدود می‌کند این است که آنها معمولاً دارای رطوبت و همچنین حجم زیادی بر واحد وزن (چگالی توده‌ای کم) هستند (Zafari and Kianmehr, 2013). بنابراین، نگهداری و حمل و نقل آنها دشوار و پرهزینه خواهد بود. مقدار معمول چگالی توده‌ای برای علف‌ها از ۴۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ۸۰-۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای زیست توده‌های کشاورزی و در حدود ۱۵۰-۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای زیست توده‌های چوبی است (Pradhan *et al.*, 2018). بر مبنای گزارش محققان، هزینه تولید، حمل و نقل، نگهداری و پیش‌فراوری مواد زیست توده حدود ۴۰-۶۰ درصد هزینه کل تولید محصول نهایی را تشکیل می‌دهند، در حالیکه هزینه حمل و نقل فقط ۱۳-۲۸ درصد از کل هزینه‌ها را شامل می‌شود (Pradhan *et al.*, 2018). برای درک بیشتر این موضوع دیگر محققان، گزارش دادند که هزینه ۵۰ کیلومتر حمل و نقل یک تن گاه و کلش ذرت ۱۰ برابر از گاه و کلش ذرت پلت شده بیشتر است (Mani *et al.*, 2006b). کاهش اندازه ذرات و فشرده‌سازی مواد اولیه زیست توده می‌تواند تا حدی بر این چالش‌ها غلبه کند. گزارش شده است که کاهش حجم و وزن کمپوست از ۵۰ تا ۹۰ درصد از طریق فشرده‌سازی با تولید پلت امکان‌پذیر است (Chia

جرم ماده خشک در نمونه (گرم) می‌باشند. از رابطه (۲)، برای آماده‌سازی کمپوست در سه سطح رطوبتی (۸، ۱۲ و ۱۶ درصد) بر مبنای تر برای انجام آسیاب توده کمپوست استفاده شد. به این ترتیب که آب مقطر با روش اسپری کردن به نمونه بر اساس استاندارد ASTM E-11-70, Part 41 اضافه شد (Alemi et al., 2010).

$$m_w (g) = \frac{m_i(M_{wf} - M_{wi})}{1 - M_{wf}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این رابطه m_w : جرم آب اضافه شده (گرم)، m_i : جرم اولیه مواد (گرم)، M_{wi} : رطوبت اولیه مواد بر مبنای تر (%)، M_{wf} : رطوبت نهایی مواد بر مبنای تر (%). پس از افزودن آب مقطر، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در کیسه‌های پلاستیکی دربسته در دمای ۴°C به منظور توزیع یکنواخت رطوبت نگهداری شد (TMECC^۲, 2002).

آسیاب کمپوست باگاس نیشکر

در این مطالعه، از یک آسیاب چکشی-سایشی (Retch KG 3057, Haan, Germany) واقع در پردیس ابوریحان گروه فنی کشاورزی برای کاهش اندازه ذرات استفاده شد. نمونه‌ها در رطوبت ۱۲ درصد وزنی بر پایه تر برای آسیاب کردن تهیه شد. در این آسیاب از سه صفحه به اندازه مش‌های ۱، ۲/۵ و ۴ میلی‌متر استفاده شد. آسیاب چکشی-سایشی دارای سه تیغه بود و به وسیله یک موتور تک فاز ۰/۵ اسب بخار و با سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه توان‌دهی می‌شد. میزان خوراک‌دهی کمپوست باگاس نیشکر به درون آسیاب ۰/۵ کیلوگرم بر دقیقه در نظر گرفته شد (Tajinia et al., 2020; Ghorbani et al., 2021a,b).

فرآیند پلت‌سازی

در این پژوهش، تبدیل کمپوست باگاس نیشکر به پلت به روش قالب با انتهای بسته^۳ انجام شد و کمپوست‌ها در شرایط عملیاتی مختلف پلت شدند. برای تهیه پلت از یک پرس هیدرولیکی به همراه پلت‌ساز منفرد استفاده شد (شکل ۱-الف). فشرده‌سازی در سه سطح رطوبتی (۸، ۱۴ و ۲۰ درصد وزنی بر پایه تر)، سه سطح فشار تراکم (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ مگاپاسکال) و سه سطح اندازه ذرات (۱، ۲/۵ و ۴ میلیمتر) انجام شد. بعد از تنظیم رطوبت نمونه‌ها، آنها را در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده و به مدت ۲۴ ساعت به منظور یکنواخت شدن رطوبت در تمام ماده در یخچال قرار داده شدند. برای تهیه پلت از یک قالب با قطر ۸ میلی‌متر (قطر پلت) استفاده شد (ASABE Standards S269.5).

مانند محتوای رطوبت، اندازه ذرات، نوع ماده اولیه و مواد اتصال دهنده یا افزودنی‌ها هستند (Oberberger and Thek, 2010; Sarlaki et al., 2017; Matkowski et al., 2020). بر مبنای گزارش‌های محققان، میزان رطوبت تأثیر زیادی بر دوام و تراکم پلت‌ها دارد (Alemi et al., 2010). درصد گزارش شده است (Alemi et al., 2010). بررسی مطالعات متعدد نشان می‌دهد که با افزایش میزان رطوبت، مقاومت فشاری و دوام پلت‌ها کاهش می‌یابد (Kaliyan and Morey, 2010; Labbé et al., 2020; Mani et al., 2006a; Tumuluru, 2015). با توجه به مرور مقالات، مطالعات اندکی در مورد فرآیند پلت‌سازی کودهای کمپوست‌شده برای تولید کود پلت‌شده برای کاربرد در مصارف زراعی وجود دارد. با توجه به مطالعات بی‌شماری که در مورد تولید کمپوست وجود دارد، تاکنون اطلاعاتی در مورد فرآیند پلت‌سازی تبدیل کمپوست باگاس نیشکر به پلت کودی موجود نیست. بنابراین، مطالعه حاضر در جهت بهینه‌سازی متغیرهای موثر در فرآیند پلت‌سازی کمپوست باگاس نیشکر با استفاده از یک دستگاه پلت‌ساز منفرد به روش سطح پاسخ و همچنین ارزیابی نرخ آزادسازی نیتروژن در محیط آب و خاک برای بررسی کند رهش شدن نیتروژن در پلت‌های تولیدشده در ترکیب با کود اوره هدف‌گذاری شده است.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه و آماده‌سازی

کمپوست باگاس نیشکر از گروه فنی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران جهت آسیاب و تولید پلت انتخاب شد. رطوبت اولیه کمپوست باگاس نیشکر ۵۵ درصد بر پایه تر بود. برای کاهش رطوبت، کمپوست باگاس نیشکر در هوای آزاد خشک و در نهایت به رطوبت تعادلی ۸ درصد رسید.

اندازه‌گیری میزان رطوبت

برای تعیین محتوای رطوبت کمپوست باگاس نیشکر، سه نمونه ۱۰۰ گرمی مطابق استاندارد (ASABE^۱ Standard S358.2 (FEB03, 2006)) در داخل آون با دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. محتوای رطوبت مطابق رابطه‌ی (۱) بر پایه تر سنجیده شد (Sarlaki et al., 2019a,b).

$$M_{w.b.} \% = \frac{W_w}{W_t} \times 100 = \frac{W_w}{W_w + W_d} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه $M_{w.b.}$ رطوبت نمونه بر پایه تر (%)، W_w : جرم آب موجود در نمونه (گرم)، W_t : جرم کل نمونه (گرم) و W_d

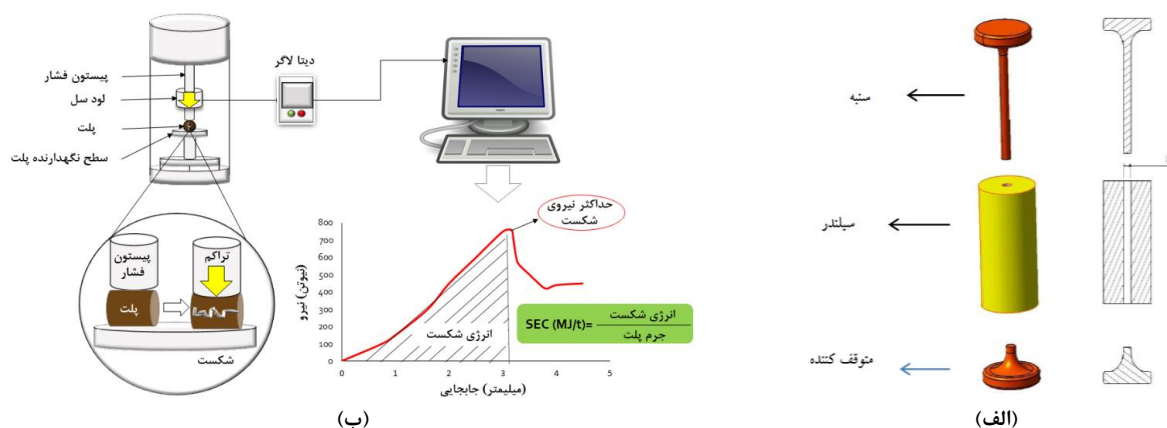
^۳ End closed die

^۱ American Society of Agricultural and Biological Engineers

^۲ Test Methods for the Examination of Composts and Composting

$$V_p = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (\text{رابطه ۴})$$

یکی از عوامل مهم در انبارداری و حمل و نقل محصولات پلت‌شده مقاومت به شکست آن می‌باشد، بنابراین برای اندازه‌گیری مقاومت به شکست از دستگاه آزمایش زیستی استفاده شد (ASABE, ASAE S269.4). این دستگاه قابلیت بارگذاری فشاری و کششی را روی محصولات زیستی مختلف دارد و با استفاده از آن می‌توان خواص مکانیکی همچون سختی، مدول الاستیک، تغییر شکل، حداکثر نیروی شکست^۱ و غیره را به دست آورد. در این سامانه داده‌خوان به صورت مستقیم نیروی شکست را به صورت داده خام در رایانه ذخیره می‌کند. تعداد داده‌های انتقالی در واحد زمان به رایانه اندازه‌گیری شد که در این آزمایش تعداد ۱۹ داده در ۱ ثانیه ثبت شد و با داشتن سرعت دورانی سیستم انتقال قدرت به پراب، سرعت خطی آن محاسبه می‌شود. با استفاده از نتایج آزمون مقاومت فشاری پلت‌ها و با استفاده از روش محاسبه مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی، میزان مصرف انرژی ویژه پلت‌ها بر حسب مگاژول بر تن (MJ/t) مطابق شکل (۱-ب) محاسبه شد (Mani et al., 2006b).



شکل ۱- طرح‌واره‌های (الف) تولید پلت به روش قالب بسته در یک واحد پلت‌ساز منفرد و (ب) تعیین میزان مصرف انرژی ویژه پلت‌ها با استفاده از روش محاسبه مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی (ب)

آزمایش‌ها انجام می‌شود. در این پژوهش از روش سطح پاسخ به-منظور بررسی ارتباط بین سه متغیر مستقل فشار تراکم (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ مگا پاسکال)، محتوای رطوبت (۸، ۱۴ و ۲۰ درصد وزنی بر پایه تر) و اندازه ذرات (۱، ۲/۵ و ۴ میلی‌متر) با متغیرهای پاسخ (وابسته) از قبیل مصرف انرژی ویژه، حداکثر مقاومت شکست و چگالی پلت‌ها استفاده شد (جدول ۱).

پارامترهای قابل کنترل پرس هیدرولیکی شامل فشار تراکم، سرعت پایین آمدن سنبه و مدت زمان نگهداری پلت تحت بار هستند. فشار تراکم با سرعت پایین آمدن سنبه به میزان ۴/۵ میلی‌متر بر دقیقه و مدت زمان نگهداری نمونه تحت بار ۶۰ ثانیه تنظیم شد. برای تهیه پلت ابتدا نمونه را در قالب ریخته و توسط سنبه مقداری با فشار دست فشرده شده به‌طوری‌که قالب تا حدی پر شده و سپس سنبه را روی آن قرار داده و این مجموعه تحت فشار پرس هیدرولیکی متراکم شده و مواد را در قالبی که انتهای آن بسته است را تحت فشار قرار می‌دهد. در مرحله بعد انتهای قالب را باز کرده و با اعمال فشار مجدد پرس نمونه، پلت تولید شده از داخل قالب خارج می‌شود. برای اندازه‌گیری چگالی پلت‌ها ابتدا طول (L) و قطر (d) پلت‌ها با استفاده از یک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ (Mastercraft, Miami FL, USA) اندازه‌گیری و سپس وزن آن‌ها با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم (GR200, A&D Inc. Tokyo, Japan) محاسبه شد. چگالی پلت‌ها با تقسیم جرم پلت‌ها (m_p) بر حجم (V_p) آنها به دست آمد. میانگین سه اندازه‌گیری به‌عنوان چگالی گزارش شد.

$$\rho = \frac{m_p}{V_p} \quad (\text{رابطه ۳})$$

طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

برازش سطوح پاسخ و بهینه‌سازی فرایند پلت‌سازی نمونه‌های کمپوست باگاس نیشکر با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۱ (Stat-Ease Inc., Minneapolis, MN, USA) با روش سطح پاسخ در قالب طرح باکس بنکن (BBD) مرکز وجه^۲ ($\alpha=1$) انجام شد. روش سطح پاسخ به‌منظور یافتن حالت بهینه برهمکنش عوامل و برآورد شرایط بهینه فرایند با کمترین تعداد

^۲. Face Centered

^۱ Maximum breaking strength

جدول ۱- متغیرهای مستقل و مقادیر واقعی و کد شده آن‌ها برای فرآیند

پلت‌سازی کمپوست باگاس نیشکر				
متغیر مستقل	نماد ریاضی	سطوح متغیر		
		-۱	۰	+۱
فشار تراکم (مگا پاسکال)	A	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
محتوای رطوبت (درصد وزنی)	B	۸	۱۴	۲۰
اندازه ذرات (میلی متر)	C	۱	۲/۵	۴

هر عامل در باکس بنکن مرکز وجه، با ۳ تکرار در نقطه مرکزی برای تخمین خطای آزمایش مطالعه شد. فضای طراحی در طرح BBD شامل ۳ نقطه مرکزی و ۱۲ نقطه IBFact به منظور فراهم آوردن اطلاعاتی در مورد مرزهای داخلی نواحی آزمایشی بود که باعث شد اثرات انحنایی^۱ نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین کیفیت مدل برازش شده با استفاده از آزمون معنی‌داری و تجزیه واریانس (ANOVA) ارزیابی شد. رابطه ۵ مدل پاسخ درجه دوم برازش شده را نشان می‌دهد.

$$Y_k = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j \quad (\text{رابطه } 5)$$

در رابطه ۵، Y_k متغیر وابسته یا پاسخ مدل، k تعداد متغیرها، β_0 ، β_i ، β_{ii} ، β_{ij} و β_{ij} به ترتیب، ضریب رگرسیون برای عامل ثابت (عرض از مبدأ)، ضرایب اثرات خطی، ضرایب اثرات درجه‌ی دوم، ضریب اثرات برهمکنش و X_i و X_j متغیرهای مستقل هستند (Sarlaki *et al.*, 2021a,b,c; Sharif Paghaleh *et al.*, 2017)

تعیین میزان آزادسازی نیتروژن از پلت در محیط آب و خاک میزان درصد انتشار نیتروژن از کود پلت باگاس نیشکر در ترکیب با اوره با نسبت ۱:۱ (درصد وزنی) طی پنج روز اندازه‌گیری شد. برای این کار ۱۰ گرم کود پلت‌شده درون یک بطری شیشه‌ای

حاوی ۵۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه با دمای ۳۰ درجه سلسیوس قرار داده شد و برای هر کدام از نمونه‌ها سه تکرار در نظر گرفته شد. این کار تا زمانی که ۸۰ درصد نیتروژن موجود در کود پلت آزاد شود، ادامه پیدا کرد. میزان نیتروژن موجود در نمونه‌ها با استفاده از روش کج‌دال اندازه‌گیری شد (Yang *et al.*, 2013).

همچنین، به منظور تعیین میزان انتشار نیتروژن پلت‌های تولید شده در خاک از روش کیسه‌ی دفن شده در خاک استفاده شد. بدین منظور نمونه‌های ۱۰ گرمی از پلت‌های تولید شده انتخاب و در کیسه‌های پلاستیکی ۵ × ۵ سانتی‌متر که دارای سوراخ‌هایی به قطر ۱ میلی‌متر بود، قرار داده شد. درب این کیسه‌ها توسط دوخت حرارتی بسته شد و کیسه‌ها در عمق ۱۰ سانتیمتری خاک گلدان قرار داده شد. سه کیسه به صورت تصادفی در روزهای مختلف (به مدت ۱۴ هفته) از خاک خارج شدند. به منظور حذف خاک از پلت‌ها، کیسه‌ها در آزمایشگاه با آب مقطر شسته شدند، سپس میزان آزادسازی نیتروژن با روش کج‌دال محاسبه شد (Chia *et al.*, 2020).

نتایج و بحث

بررسی فرآیند پلت‌سازی کمپوست باگاس نیشکر

بررسی آماری

بهینه‌سازی فرآیند پلت‌سازی کمپوست باگاس نیشکر با استفاده از روش BBD-RSM انجام شد. اثر متغیرهای مستقل شامل اندازه ذرات از ۱ تا ۴ میلی‌متر، محتوای رطوبت از ۸ تا ۲۰ درصد وزنی بر پایه تر و فشار تراکم از ۵۰ تا ۱۵۰ مگاپاسکال بر پاسخ‌های فرآیند شامل مصرف انرژی ویژه، حداکثر مقاومت شکست و چگالی بررسی شد و نتایج مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده آنها توسط طرح BBD-RSM در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- متغیرهای مستقل و نتایج مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ‌ها توسط روش BBD-RSM برای فرآیند پلت‌سازی کمپوست باگاس نیشکر

Std	شماره آزمایش	پاسخ‌های BBD-RSM									
		عامل ۱			عامل ۲			عامل ۳			چگالی
		A: اندازه ذرات (mm)			B: محتوای رطوبت (%wb)			C: فشار تراکم (MPa)			مقدار پیش‌بینی شده
		حد اکثر مقاومت شکست			مصرف انرژی ویژه			مقدار واقعی	مقدار واقعی	مقدار واقعی	مقدار واقعی
		مقدار پیش‌بینی شده	مقدار واقعی	مقدار واقعی	مقدار پیش‌بینی شده	مقدار واقعی	مقدار واقعی	مقدار واقعی	مقدار واقعی	مقدار واقعی	مقدار واقعی
۴	۴	۴	۲۰	۱۰۰	۵/۳۹	۵/۲۲	۵/۲۲	۱/۰۴۰۰	۴۱/۵۵	۴۱/۵۵	۱/۰۴۰۰
۱۳	۲	۲/۵	۱۴	۱۰۰	۵/۵۷	۵/۵۷	۵/۵۷	۰/۹۸۴۳	۱۴/۰۱	۱۴/۰۱	۱/۰۴۰۰
۸	۳	۴	۱۴	۱۵۰	۸/۹۹	۸/۶۲	۸/۶۲	۱/۱۲۰۰	۳۷/۴۸	۳۷/۴۸	۱/۱۲۰۰
۷	۴	۱	۱۴	۱۵۰	۸/۶۸	۹/۰۵	۹/۰۵	۱/۰۴۰۰	۱۷/۳۳	۱۷/۳۳	۱/۰۴۰۰
۶	۵	۴	۱۴	۵۰	۲/۴۵	۲/۸۲	۲/۸۲	۰/۸۵۲۶	۱۸/۶۳	۱۸/۶۳	۰/۸۵۲۶
۱۴	۶	۲/۵	۱۴	۱۰۰	۵/۵۷	۵/۵۷	۵/۵۷	۰/۹۸۴۳	۱۵/۰۶	۱۵/۰۶	۰/۹۸۴۳
۱۱	۷	۲/۵	۸	۱۵۰	۹/۳۴	۹/۳۴	۹/۳۴	۰/۹۴۴۹	۱۲/۲۵	۱۲/۲۵	۰/۹۴۴۹
۳	۸	۱۰	۲۰	۱۰۰	۵/۰۸	۵/۲۵	۵/۲۵	۱/۰۵۰۰	۲۸/۰۸	۲۸/۰۸	۱/۰۵۰۰
۱	۹	۱	۸	۱۰۰	۵/۷۵	۵/۵۷	۵/۵۷	۰/۸۸۳۷	۶/۵۸	۶/۵۸	۰/۸۸۳۷
۱۵	۱۰	۲/۵	۱۴	۱۰۰	۵/۵۷	۵/۵۷	۵/۵۷	۰/۹۸۴۳	۱۵/۰۴	۱۵/۰۴	۰/۹۸۴۳
۱۰	۱۱	۲/۵	۲۰	۵۰	۱/۹۷	۲/۱۵	۲/۱۵	۰/۸۹۱۱	۱۶/۸۷	۱۶/۸۷	۰/۸۹۱۱
۵	۱۲	۱	۱۴	۵۰	۲/۱۵	۱/۷۸	۱/۷۸	۰/۹۲۸۰	۱۲/۰۲	۱۲/۰۲	۰/۹۲۸۰
۲	۱۳	۴	۸	۱۰۰	۶/۰۵	۶/۲۲	۶/۲۲	۰/۹۱۴۶	۱۵/۰۳	۱۵/۰۳	۰/۹۱۴۶
۱۲	۱۴	۲/۵	۲۰	۱۵۰	۸/۵۰	۸/۳۲	۸/۳۲	۱/۰۹۰۰	۴۰/۰۰	۴۰/۰۰	۱/۰۹۰۰
۹	۱۵	۲/۵	۸	۵۰	۲/۶۳	۲/۴۵	۲/۴۵	۰/۷۵۰۸	۳/۱۴	۳/۱۴	۰/۷۵۰۸

مدل‌های رگرسیونی پیشنهادی برای پیش‌بینی تأثیر متغیرهای مستقل اندازه ذرات (A)، محتوای رطوبت (B) و فشار تراکم (C) بر پاسخ‌های مورد بررسی با حذف عوامل غیرمعنی‌دار با استفاده از فرم کاهش یافته مدل^۳ با استفاده از دستور گام به گام^۴، در جدول (۴) نشان داده شده است که در آن ضرایب به صورت کدگذاری شده هستند. لازم به ذکر است که با کاهش مدل از طریق دستور گام به گام، پیش‌بینی دقیق‌تر و قابل اعتمادتر داده‌ها با حذف ترم‌های غیرمعنی‌دار حاصل می‌شود. در معادلات حاصله علائم مثبت و منفی به ترتیب به اثرات افزایشنده یا افزایشی^۵ و اثر کاهنده یا کاهش^۶ بر پاسخ‌های مورد بررسی نسبت داده می‌شوند. از این دیدگاه، اندازه ذرات و فشار تراکم اثر افزایشی و محتوای رطوبت اثر کاهش^۶ بر مصرف انرژی ویژه داشته‌اند. همچنین هر سه متغیر مستقل اثرات افزایشی بر حداکثر مقاومت شکست و چگالی پلت داشتند. براساس موثر بودن اثرات اصلی هر عامل، فشار تراکم برای مصرف انرژی ویژه، محتوای رطوبت برای حداکثر مقاومت شکست و فشار تراکم برای چگالی پلت، موثرترین متغیرهای مستقل بر پاسخ بودند (جدول ۴).

در این پژوهش برای سه پاسخ مصرف انرژی ویژه، حداکثر مقاومت شکست و چگالی، به ترتیب مدل‌های خطی، مرتبه دوم و مرتبه دوم با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین انحراف معیار و ضریب تغییرات توسط نرم‌افزار پیشنهاد شد (جدول ۳). مقدار ضریب همبستگی (بالای ۰/۹۷)، انحراف معیار (کمتر از ۱/۸۵) و ضریب تغییرات (کمتر از ۹/۴۸)، بیانگر اعتبار بالای مدل‌های پیشنهادی برای هر سه پاسخ مورد بررسی توسط نرم‌افزار است. از طرف دیگر برای هر سه پاسخ، بین ضریب همبستگی اصلاح شده با ضریب همبستگی پیش‌بینی شده تطابق مناسبی ایجاد شد به طوری که اختلاف آنها کمتر از ۰/۲ بود. دقت موثر^۱، بیانگر اختلاف مقدار پاسخ پیش‌بینی شده مدل با مقدار متوسط خطای پیش‌بینی می‌باشد و مقادیر بیش از ۴ بیانگر کفایت مدل است. در واقع این معیار، شاخصی از نسبت سیگنال به اغتشاش^۲ می‌باشد و مقدار بزرگتر از ۴ نشان می‌دهد که مدل‌های پیش‌بینی کننده از طرح BBD تبعیت می‌کند. در این مطالعه برای هر سه پاسخ این مقدار بیش از ۴ بدست آمد. در نتیجه می‌توان بیان داشت که این مدل‌های پیشنهادی می‌توانند برای هدایت فضای طراحی (طرح BBD-RSM) مورد استفاده قرار بگیرند.

جدول ۳- نتایج آماره‌های بهترین مدل برازش یافته پیشنهادی با روش BBD-RSM برای پاسخ‌های بررسی شده

پاسخ	نوع مدل	انحراف معیار	میانگین	ضریب تغییرات (%)	ضریب همبستگی	ضریب همبستگی اصلاح شده	ضریب همبستگی پیش-بینی شده	دقت موثر	مجموع مربعات باقیمانده پیش-بینی شده
مصرف انرژی ویژه	خطی	۰/۲۷	۵/۵۷	۴/۷۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۵۲/۳۵	۱/۶۷
حداکثر مقاومت شکست	مرتبه دوم	۱/۸۵	۱۹/۵۴	۹/۴۸	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۸۶	۲۵/۱۳	۲۶۴/۴۱
چگالی	مرتبه دوم	۰/۰۳	۰/۹۶	۲/۶۴	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۸۰	۱۸/۴۲	۰/۰۳

جدول ۴- مدل رگرسیون پیش‌بینی اثرات متغیرهای مستقل بر پاسخ‌های مورد بررسی

پارامتر	مدل رگرسیونی
مصرف انرژی ویژه (MJ/t)	Specific energy consumption = +5.57 + 0.1519A - 0.3315B + 3.27C
حداکثر مقاومت شکست (kg)	Maximum breaking strength = +14.70 + 6.08A + 11.19B + 7.05C + 1.26AB + 3.39AC + 3.50BC + 5.70A ² + 2.40B ² + 0.9568C ²
چگالی (g/cm ³)	Density = +0.9843 + 0.0052A + 0.0711B + 0.0981C - 0.0102AB + 0.0429AC + 0.0010BC + 0.0276A ² - 0.0417B ² - 0.0236C ²

نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای مدل خطی مصرف انرژی ویژه در جدول (۵)، ارائه شده است. مقدار بالای ضریب همبستگی ($R^2 = 0.99$) نشان دهنده این است که معادله برازش شده به خوبی رفتار سیستم را پیش‌بینی کرده است. همچنین از نتایج تجزیه واریانس می‌توان اثرات اصلی و اثرات متقابل

نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای مدل خطی مصرف انرژی ویژه در جدول (۵)، ارائه شده است. مقدار بالای ضریب همبستگی ($R^2 = 0.99$) نشان دهنده این است که معادله برازش شده به خوبی رفتار سیستم را پیش‌بینی کرده است. همچنین از نتایج تجزیه واریانس می‌توان اثرات اصلی و اثرات متقابل

۴ Stepwise

۵ Synergic effect

۶ Antagonistic effect

۱ Adeq Precision

۲ Signal to Noise ratio

۳ Reduced model

است. همچنین نتایج جدول نشان می‌دهند که اندازه ذرات بر مصرف انرژی ویژه پلت‌سازی تاثیر معنی‌دار نداشته است. در این جدول همچنین مدل مرتبه دوم برای حداکثر مقاومت شکست پلت با F-value برابر با ۶۲/۵۸ بر معنی‌داری مدل تاکید می‌کند. زیرا تنها فقط ۰/۰۱ درصد احتمال وجود دارد که مدلی با F-value بالا بتواند به دلیل اغتشاش ایجاد شده باشد.

اغتشاش فقط ۰/۰۱ درصد است. در واقع، قابلیت اطمینان و معنی‌داری بیشتر مدل به ترتیب با F-value بیشتر و P-value کمتر به دست می‌آید. بر این اساس، برای مطالعه حاضر، تنها اثرات اصلی محتوای رطوبت (B) و فشار تراکم (C) از نظر آماری بر مصرف انرژی ویژه پلت‌سازی معنی‌دار بودند. فشار تراکم به دلیل داشتن F-value بیشتر (۱۲۰۵/۰۵) و P-value کمتر (۰/۰۰۰۱) (> بیشترین تاثیر را در میان پارامترها بر مصرف انرژی ویژه داشته

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس برای متغیرهای پاسخ در فرآیند تولید پلت از کمپوست باگاس نیشکر

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value	معنی‌داری
مدل (خطی)	۳	۲۸/۸۳	۴۰۶/۶۹	< ۰/۰۰۰۱	**
A- اندازه ذرات	۱	۰/۱۸۴۶	۲/۶۰	۰/۱۳۴۹	ns
B- محتوای رطوبت	۱	۰/۸۷۹۱	۱۲/۴۰	۰/۰۰۴۸	**
C- فشار تراکم	۱	۸۵/۴۱	۱۲۰۵/۰۵	< ۰/۰۰۰۱	**
باقیمانده	۱۱	۰/۰۷۰۹			
عدم برازش	۹	۰/۰۸۶۶			
خطای خالص	۲	۰/۰۰۰			
کل	۱۴				
منبع	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value	معنی‌داری
مدل (درجه دوم)	۹	۲۱۴/۵۹	۶۲/۵۸	۰/۰۰۰۱	**
A- اندازه ذرات	۱	۲۹۶/۱۰	۸۶/۳۵	۰/۰۰۰۲	**
B- محتوای رطوبت	۱	۱۰۰۱/۳۳	۲۹۲/۰۱	< ۰/۰۰۰۱	**
C- فشار تراکم	۱	۳۹۷/۶۵	۱۱۵/۹۶	۰/۰۰۰۱	**
AB	۱	۶/۳۰	۱/۸۴	۰/۲۳۳۳	ns
AC	۱	۴۵/۸۳	۱۳/۳۷	۰/۰۱۴۷	*
BC	۱	۴۹/۱۳	۱۴/۳۳	۰/۰۱۲۸	*
A ²	۱	۱۲۰/۰۶	۳۵/۰۱	۰/۰۰۲۰	**
B ²	۱	۲۱/۳۴	۶/۲۲	۰/۰۵۴۸	ns
C ²	۱	۳/۳۸	۰/۹۸۵۸	۰/۳۶۶۴	ns
باقیمانده	۵	۳/۴۳			
عدم برازش	۳	۵/۴۷	۱۵/۱۸	۰/۰۶۲۴	ns
خطای خالص	۲	۰/۳۶۰۶			
کل	۱۴				
منبع	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value	معنی‌داری
مدل (درجه دوم)	۹	۰/۰۱۵۳	۲۳/۴۵	۰/۰۰۱۴	**
A- اندازه ذرات	۱	۰/۰۰۰۲	۰/۳۳۱۱	۰/۵۹۰۰	ns
B- محتوای رطوبت	۱	۰/۰۴۰۵	۶۲/۲۴	۰/۰۰۰۵	**
C- فشار تراکم	۱	۰/۰۷۶۹	۱۱۸/۳۰	۰/۰۰۰۱	**
AB	۱	۰/۰۰۰۴	۰/۶۴۶۳	۰/۴۵۷۹	ns
AC	۱	۰/۰۰۷۴	۱۱/۳۱	۰/۰۲۰۰	*
BC	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۶۲	۰/۹۴۰۵	ns
A ²	۱	۰/۰۰۲۸	۴/۳۴	۰/۰۹۱۷	ns
B ²	۱	۰/۰۰۶۴	۹/۸۹	۰/۰۲۵۵	*
C ²	۱	۰/۰۰۲۱	۳/۱۶	۰/۱۳۵۴	ns
باقیمانده	۵	۰/۰۰۰۷			
عدم برازش	۳	۰/۰۰۰۵	۰/۵۵۶۱	۰/۶۹۳۳	ns
خطای خالص	۲	۰/۰۰۰۹			
کل	۱۴				

ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری، معنی‌دار در سطح پنج درصد و معنی‌داری در سطح یک درصد می‌باشند.

محتوای رطوبت (B) و فشار تراکم دارای اثرات خطی با اثر افزایشی فشار تراکم و اثر کاهشی محتوای رطوبت بر مصرف انرژی ویژه هستند. علاوه بر این خط نسبتاً صاف متغیر اندازه ذرات (A) تاثیر غیر معنی‌دار آن را بر مصرف انرژی ویژه به وضوح نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۱) مشاهده می‌شود با افزایش فشار تراکم از ۵۰ به ۱۵۰ مگاپاسکال در نقاط مرکزی دیگر پارامترها یعنی در شرایط محتوای رطوبت ۱۴ درصد وزنی و اندازه مش ۲/۵ میلی‌متر، مقدار مصرف انرژی ویژه از ۱/۷۸ به ۹/۳۴ مگاژول بر تن افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش محتوای رطوبت از ۸ به ۲۰ درصد وزنی، مقدار مصرف انرژی ویژه پلت‌سازی از ۶/۲۲ مگاژول بر تن به ۵/۲۲ مگاژول بر تن کاهش پیدا کرده است.

در بررسی اثرات اصلی متغیرهای فرایند پلت‌سازی بر حداکثر مقاومت شکست بر اساس شکل (۲) متوجه می‌شویم که هر سه پارامتر دارای اثر افزایشی بر حداکثر مقاومت شکست هستند. شیب تند افزایشی خط محتوای رطوبت (B) بیشترین تاثیر را بر حداکثر مقاومت شکست داشته است. در بررسی اثر اندازه ذرات بر حداکثر مقاومت شکست می‌توان گفت که با افزایش اندازه ذرات از ۱ میلی‌متر به ۲/۵، مقدار حداکثر مقاومت شکست پلت تغییر چندانی نکرده است (۱۲/۰۲ به ۱۴/۰۱)، ولی با افزایش اندازه ذرات از ۲/۵ به ۴ میلیمتر، مقدار حداکثر مقاومت شکست پلت از ۱۴/۰۱ به ۲۸/۰۸ کیلوگرم افزایش پیدا کرده است. با افزایش محتوای رطوبت از ۸ به ۲۰ درصد وزنی، مقدار حداکثر مقاومت شکست پلت‌ها از ۶/۵۸ به ۲۸/۰۸ کیلوگرم افزایش پیدا کرده است. با افزایش فشار تراکم از ۵۰ به ۱۵۰ مگاپاسکال، مقدار حداکثر مقاومت شکست ۱۲/۰۲ به ۱۷/۳۳ کیلوگرم افزایش پیدا کرده است.

همچنین نتایج بررسی اثرات اصلی متغیرهای مستقل بر چگالی پلت در شکل (۳) متوجه می‌شویم که محتوای رطوبت و فشار تراکم بر چگالی پلت اثر افزایشی و اندازه ذرات دارای اثر غیر معنی‌دار است. با افزایش محتوای رطوبت از ۸ به ۱۴ درصد وزنی، ابتدا مقدار چگالی پلت از ۰/۸۷ به ۰/۹۵ گرم بر سانتیمتر مکعب افزایش و سپس با افزایش مجدد رطوبت از ۱۴ به ۲۰ درصد وزنی، تغییر چندانی بر چگالی پلت مشاهده نشد. با افزایش فشار تراکم از ۵۰ به ۱۵۰ مگاپاسکال، چگالی ذره پلت از ۰/۸۴ به ۱/۰۵ گرم

به‌طور کلی، برای بررسی معنی‌داری اثر هر پارامتر در جدول تجزیه واریانس می‌توان P-value آن را ارزیابی کرد به‌طوریکه P-value کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر پارامتر است. بر این اساس، با توجه به جدول، هر سه متغیر مستقل (A, B و C) دارای اثر معنی‌دار بر حداکثر مقاومت شکست پلت بودند. همچنین اثر متقابل پارامترهای اندازه ذرات و فشار تراکم (AC) و محتوای رطوبت و فشار تراکم (BC) و همچنین اثر درجه دوم اندازه ذرات (A^2) بر حداکثر مقاومت شکست پلت اثر معنی‌داری داشتند. F-value برای عدم برازش^۱ ۱۵/۱۸ غیر معنی‌دار شده و دلالت بر این موضوع دارد که دقت بالایی در تکرارپذیری نقاط میانی طرح وجود داشته است.

در تحلیل تجزیه واریانس چگالی پلت، F-value برابر با ۲۳/۴۵، معنی‌داری مدل را تایید کرد. بدین معنی که تنها ۰/۱۴ درصد احتمال وجود دارد که این F-value بالا ناشی از ایجاد اغتشاش باشد. از لحاظ آماری با توجه به P-value جدول، اثرات اصلی محتوای رطوبت (B) و فشار تراکم (C) و همچنین اثر متقابل اندازه ذرات-فشار تراکم (AC) و اثر مرتبه دوم محتوای رطوبت (B^2) ترم‌های معنی‌دار بر چگالی پلت بودند. مقادیر بزرگتر از ۰/۱ نشان می‌دهد که مدل معنی‌دار نیست و از این لحاظ اندازه ذرات با P-value برابر ۰/۵۹ بر چگالی پلت اثر معنی‌دار نداشته است. F-value عدم برازش برابر با ۰/۵۶ نشان می‌دهد که عدم برازش نسبت به خطای خالص معنی‌دار نیست. بر این اساس، یک احتمال ۶۹/۳۳ درصدی وجود دارد که مقدار بالای F-value برای عدم برازش ناشی از اغتشاش بوده باشد.

بررسی پارامتری

بررسی تاثیر اثرات اصلی

نمودار پرشیدگی^۲ متغیرهای مستقل و اثر آنها بر پاسخ‌های سیستم در شکل (۲)، آورده شده است. شیب یا انحنای خط در هر نمودار نشان‌دهنده حساس بودن هر پاسخ به هر متغیر مستقل مورد نظر است. هر چه شیب خط تندتر باشد، پاسخ نسبت به متغیر مستقل حساس‌تر است و خط نسبتاً صاف، غیرحساس بودن پاسخ را به تغییر آن متغیر مستقل خاص نشان می‌دهد (Sarlaki et al., 2020). همچنین از شکل (۱) به‌وضوح مشاهده می‌شود که تمام متغیرهای مستقل شامل اندازه ذرات (A)،

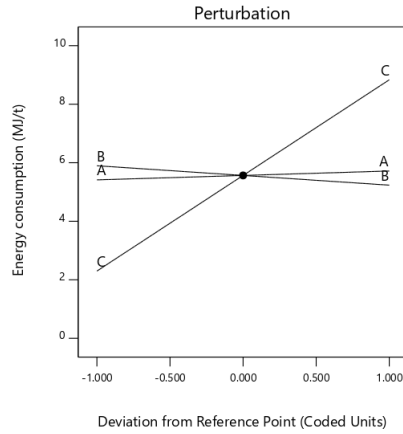
^۲ Perturbation^۱ Lack of Fit

بر سانتیمتر مکعب افزایش یافت. در اثر تغییرات اندازه ذرات نیز، تغییرات معنی داری بر چگالی پلت مشاهده نشد.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Energy consumption (MJ/t)

Actual Factors
A: Particle size = 2.5
B: Moisture content = 14
C: Compaction pressure = 100

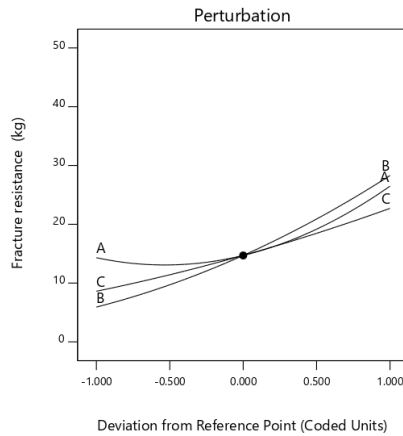


(الف)

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Fracture resistance (kg)

Actual Factors
A: Particle size = 2.5
B: Moisture content = 14
C: Compaction pressure = 100

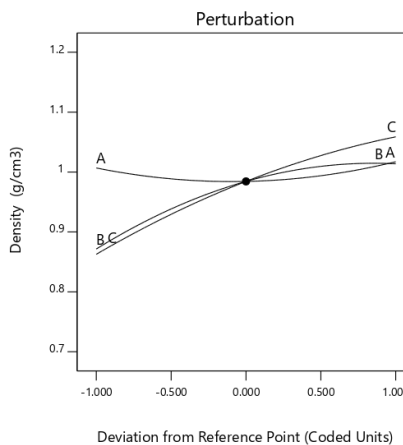


(ب)

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Density (g/cm³)

Actual Factors
A: Particle size = 2.5
B: Moisture content = 14
C: Compaction pressure = 100



(ج)

شکل ۲- اثرات اصلی متغیرهای فرآیند پلت سازی بر مصرف انرژی ویژه (الف)، حداکثر مقاومت شکست (ب) و چگالی پلت (ج)

رگرسیون، تجزیه واریانس ANOVA و طراحی آزمایشها مورد استفاده قرار می گیرند. اثر متقابل در واقع اثر همزمان دو یا چند

بررسی اثرات متقابل اثرات متقابل هنگامی رخ می دهند که تأثیر یک متغیر به مقدار متغیر دیگر بستگی داشته باشد. اثرات متقابل در تجزیه و تحلیل

پلت و مصرف انرژی در هنگام پلت‌سازی تأثیر می‌گذارد. رطوبت موجود در زیست توده مقادیر ژلاتینه‌سازی ناشاسته^۴، ضعیف‌سازی (بی‌نطفه کردن) ساختار پروتئین^۳ و حلالیت الیاف^۴ را در طی پلت‌سازی تسهیل می‌کند (Pradhan *et al.*, 2018).

در بررسی اندازه ذرات، هرچه اندازه ذرات ریزتر شود، دوام پلت بیشتر می‌شود زیرا ذرات کوچکتر در هنگام پلت‌سازی سطح تماس بیشتری دارند و منجر به کاهش انبساط شعاعی و طولی کمتری در پلت‌های تولیدی می‌شوند. ذرات ریز همچنین رطوبت بیشتری را نسبت به ذرات بزرگ می‌پذیرند و بنابراین دارای درجه بالاتری از فرآیندپذیری هستند. با این حال، گزارش شده است که اندازه ذرات بسیار کوچک می‌تواند منجر به ایجاد قفل شدن دستگاه پلت‌ساز شود و می‌تواند بر ظرفیت تولید دستگاه تأثیر بگذارد. به‌طور ترکیبی از اندازه ذرات (هم بزرگ و هم کوچک) کیفیت پلت تولیدی را بهینه می‌کنند زیرا ترکیب ذرات باعث ایجاد پیوند بین ذرات می‌شود و تقریباً هیچ فضایی بین ذرات وجود ندارد. اما در طرف مقابل، اندازه ذرات بزرگ در زیست توده به‌عنوان نقاط شکست در پلت عمل می‌کنند. در فرآیندهای تولید پلت، فشار پلت‌سازی با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. تولید پلت با قطر ۶ میلی‌متر به اندازه ذرات کمتر از ۴ میلی‌متر نیاز دارد، در غیر این صورت، اثرات افزایش اندازه ذرات منجر به مصرف انرژی بیشتر در هنگام پلت‌سازی می‌شود. ذرات بزرگتر به‌دلیل اصطکاک بیشتر در کانال پرس، منجر به مصرف انرژی بیشتر در فرآیند پلت‌سازی می‌شوند (Pradhan *et al.*, 2021).

در مطالعه‌ای محققان، اثر اندازه ذرات را بر چگالی پلت تولید شده در یک واحد پلت‌کننده منفرد^۵ برای چهار نمونه زیست توده شامل کاه گندم، کاه جو، کاه و کلش ذرت و گیاه علف را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش چگالی پلت با کاهش اندازه ذرات از ۳/۲ به ۰/۸ میلی‌متر حاصل می‌شود (Mani *et al.*, 2006a). همچنین دیگر محققان، پلت را با استفاده از یک پلت‌ساز منفرد با مواد اولیه تراشه‌های چوب صنوبر و آسیاب کاه گندم تولید کردند و نتایج آنها نشان داد که افزایش کیفیت فیزیکی پلت‌های تولید شده با کاهش اندازه ذرات (از ۳/۲ به ۰/۸ میلی‌متر) همراه است (Shaw *et al.*, 2009). به‌طور مشابه، افزایش چگالی و دوام پلت‌های زیست توده تولید شده از ضایعات هرس درختان را در اندازه ذرات (۱، ۲ و ۴ میلی‌متر) مشاهده شده است. آنها گزارش دادند که تاثیر اندازه ذرات معنی‌دار است اما با اهمیت کمتری نسبت به دیگر پارامترها مانند رطوبت و دما عمل می‌کند

متغیر مستقل بر حداقل یک متغیر وابسته است که در آن اثر مشترک آنها به‌طور معنی‌داری بیشتر (یا به‌طور معنی‌داری کمتر) از مجموع اجزا است. وجود اثرات متقابل در هر نوع تحقیق مهم است زیرا به محققان می‌گوید که چگونه دو یا چند متغیر مستقل با هم کار می‌کنند تا بر متغیر وابسته تأثیر بگذارند. گنجاندن اثرات برهمکنش در یک مدل تحلیلی، ارائه و درک بهتری از رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل را برای محقق فراهم می‌کند. بر این اساس، در بررسی اثر متقابل اندازه ذرات و فشار تراکم (AC) در نقطه مرکزی محتوای رطوبت ۱۴ درصد وزنی در می‌یابیم که در حداقل سطوح این دو پارامتر، مقدار حداکثر مقاومت شکست پلت ۱۲/۰۲ کیلوگرم است و با افزایش همزمان هر دو پارامتر مقدار حداکثر مقاومت شکست پلت به ۳۷/۴۷۵ کیلوگرم افزایش یافته است (شکل ۳). همچنین با توجه به شکل (۴)، در می‌یابیم که در حداقل سطوح دو پارامتر محتوای رطوبت و فشار تراکم در نقطه مرکزی اندازه ذرات ۲/۵ میلی‌متر، مقدار حداکثر مقاومت شکست پلت ۳/۱۳۸ کیلوگرم است. درحالی‌که با افزایش همزمان پارامترهای محتوای رطوبت و فشار تراکم تا مقدار حداکثری خود، مقدار حداکثر مقاومت شکست پلت به ۴۰ کیلوگرم افزایش می‌یابد. در بررسی اثر متقابل بین اندازه ذرات و فشار تراکم (AC) در نقطه مرکزی محتوای رطوبت ۱۴ درصد وزنی بر چگالی پلت در می‌یابیم که کمترین چگالی پلت به مقدار ۰/۸۴ گرم بر سانتیمتر مکعب در حداکثر اندازه ذرات ۴ میلی‌متر و کمترین فشار تراکم ۵۰ مگاسکال حاصل می‌شود. همچنین حداکثر چگالی پلت ۱/۱۲ گرم بر سانتیمتر مکعب در حداکثر اندازه ذرات ۴ میلی‌متر و حداکثر فشار تراکم ۱۵۰ مگاپاسکال حاصل می‌شود (شکل ۵). به‌طور کلی رطوبت موجود در زیست توده در طی فرآیند پلت‌سازی به‌عنوان یک ماده چسباننده عمل می‌کند و پیوند بین ذرات را توسط نیروهای فان در والز^۱ افزایش می‌دهد. همچنین کاهش دمای انتقال شیشه‌ای و ایجاد یک سازه پل جامد در بین ذرات به اثرات رطوبت نسبت داده شده‌اند. در محتوای کم رطوبتی زیست توده، پلت‌ها به‌دلیل جذب رطوبت از محیط، طی چند روز شکننده می‌شوند. گرمای مورد نیاز برای تبخیر در مقدار رطوبت کم کاهش می‌یابد و بنابراین مقدار بیشتری برای فرآیند پلت‌سازی در دسترس خواهد بود. در مقابل، افزایش میزان رطوبت باعث افزایش تحرک مولکولی پلیمرهای آمورف (لیگنین و همی سلولز) و سایر مواد استخراجی با انتقال شیشه‌ای کم می‌شود، در نتیجه اصطکاک ساکن را کاهش می‌دهد که به نوبه خود بر کیفیت

۴ Fibre Solubilisation

۵ Single Pellet Unit

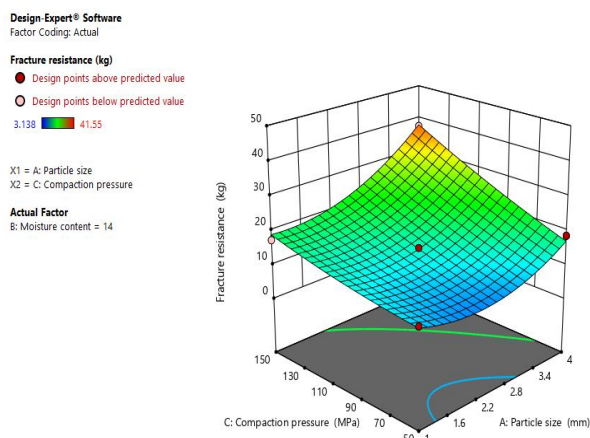
۱ Van der Waal's forces

۲ Starch Gelatinisation

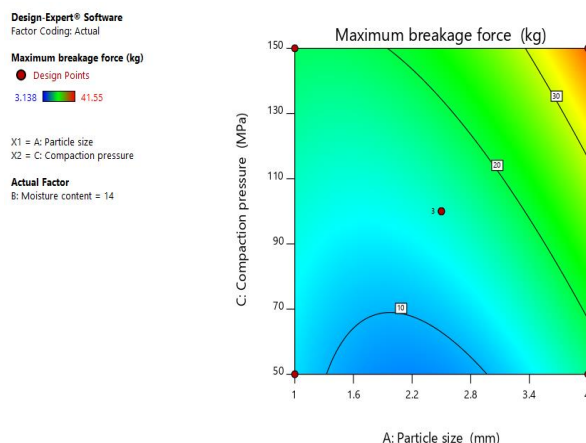
۳ Protein Denaturation

بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که هر دو فشار تراکم و زمان اعمال فشار به‌طور معنی‌داری بر چگالی پلت تأثیر می‌گذارد. با این حال آنها گزارش دادند که مصرف انرژی ویژه فقط تحت تأثیر فشار تراکم قرار می‌گیرد. همچنین، آنها گزارش کردند که مقدار مصرف انرژی ویژه تولید پلت کمپوست (۳۲-۶ کیلوژول بر کیلوگرم) به‌طور معنی‌داری کمتر از مصرف انرژی ویژه برای تولید پلت کمپوست در ترکیب با مواد اولیه زیست توده (۱۹-۹۰ کیلوژول بر کیلوگرم) است (Pampuro et al., 2013). دیگر محققان، مصرف انرژی ویژه برای تولید پلت از کاه و کلس ذرت را بین ۱۲ الی ۳۰ مگاژول بر تن گزارش دادند. آنها همچنین گزارش دادند که در کمترین فشار (۵ مگاپاسکال)، انرژی مورد نیاز برای بیرون‌اندازی پلت از کانال قالب از انرژی تراکم در تمام رطوبت‌ها کمتر بود درحالی‌که در فشارهای بالاتر (۱۰ و ۱۵ مگاپاسکال)، انرژی مورد نیاز برای بیرون‌اندازی پلت از کانال قالب برابر با انرژی مورد نیاز برای تراکم نمونه‌ها بود (Mani et al., 2006a).

(Carone et al., 2011). محققان دیگر، افزایش فشار پلت‌سازی را در اندازه ذرات کوچکتر (از ۲/۸ میلیمتر به کمتر از ۰/۵ میلی‌متر) به دلیل افزایش اصطکاک مشاهده کردند. آنها گزارش دادند که افزایش فشار پلت‌سازی منجر به افزایش چگالی پلت می‌شود. با این حال، افزایش بیشتر فشار تراکم (بیشتر از ۲۰۰ مگاپاسکال) منجر به افزایش جزئی چگالی پلت شد. محققان بر این اعتقاد بودند که کاهش اندازه ذرات باعث افزایش سطح تماس بیشتر بین پلت و دیواره‌های پلت‌ساز و در نتیجه اصطکاک بیشتری ایجاد می‌شود (Stelte et al., 2011). دیگر محققان بر این اعتقاد بودند که با افزایش اندازه صفحه آسیاب چکشی-سایشی از ۱/۶ به ۳/۲ میلیمتر، چگالی و دوام پلت‌های تولید شده از آسیاب کاه گندم به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (Kashaninejad et al., 2014). در بررسی تولید پلت کودی از کمپوست کود دامی، محققان اثر فشار تراکم (۲۰-۱۱۰ مگاپاسکال) و زمان اعمال فشار (۵-۱۲۰ ثانیه) را بر خصوصیات پلت کمپوست حاصل از کود دامی مورد

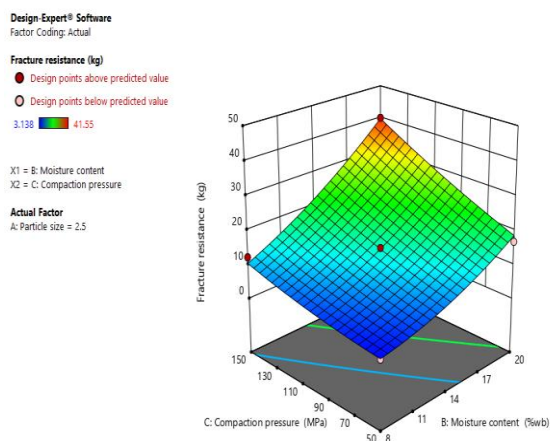


(ب)

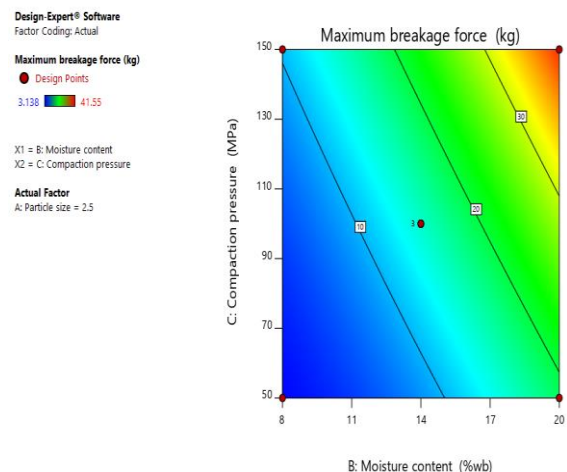


(الف)

شکل ۳- کانتورهای اثر متقابل (الف) و پلات سه بعدی (ب) برای حداکثر مقاومت شکست پلت براساس برهمکنش بین اندازه ذرات و فشار تراکم (AC)

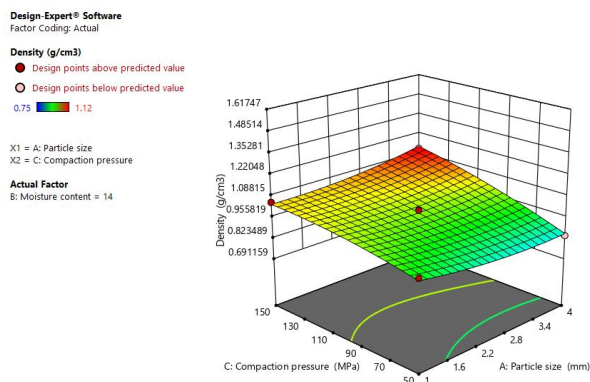


(ب)

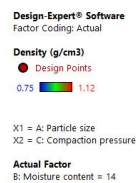


(الف)

شکل ۴- کانتورهای اثر متقابل (الف) و پلات سه بعدی (ب) برای حداکثر مقاومت شکست پلت براساس برهمکنش بین محتوای رطوبت و فشار تراکم (BC)



(ب)



(الف)

شکل ۵- کانتورهای اثر متقابل (الف) و پلات سه بعدی (ب) برای چگالی پلت براساس برهمکنش بین اندازه ذرات و فشار تراکم (AC)

داشتن شاخص مطلوبیت انجام شد. تحت این شرایط در شرایط اندازه ذرات ۴ میلیمتر، محتوای رطوبت ۲۰ درصد وزنی و فشار تراکم ۵۰ مگاپاسکال، حداقل مصرف انرژی ویژه ۲/۱۱۹ مگاژول بر تن و حداکثر مقاومت شکست و چگالی پلت به ترتیب ۲۸/۳۵ کیلوگرم و ۰/۸۷۱ گرم بر سانتیمتر مکعب با تابع مطلوبیت ۰/۷۰۶ پیشنهاد شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار مصرف انرژی ویژه تولید پلت کمپوست باگاس نیشکر در این مطالعه (۲/۱۱۹) مگاژول بر تن) بسیار کمتر از مطالعات دیگر برای تولید پلت کود دامی ۳۲-۶ مگاژول بر تن (Pampuro et al., 2013) و یا ۴/۴۱ مگاژول بر تن برای پلت بیوجار (Jiao et al., 2020) و ۱۲-۳۰ مگاژول بر تن برای پلت کاه و کلش ذرت (Mani et al., 2006a) می‌باشد که علت آن ممکن است به دلیل بافت نرم کمپوست باگاس نیشکر باشد. با این حال، مقدار چگالی و حداکثر نیروی شکست پلت تولید شده در محدوده دیگر مطالعات به دست آمد (Moslehi Roodi et al., 2020).

بهینه‌سازی فرآیند پلت‌سازی کمپوست

با استفاده از روش تابع مطلوبیت نرم‌افزار، ده راه‌حل برتر برای تعیین شرایط بهینه با مقدار شاخص مطلوبیت ۰/۷۰۶ برای داده‌های آزمایشی حاصله ارائه شد (جدول ۶). راه‌حل اول پیشنهاد شده با استفاده از تابع مطلوبیت نشان داد که بهترین شرایط پلت‌سازی باگاس نیشکر در مقدار اندازه ذرات ۴ میلیمتر، محتوای رطوبت ۵۰ درصد وزنی و فشار تراکم ۵۰ مگاپاسکال بدست آمد. نرم‌افزار شرایط بهینه را بر اساس اهداف مورد نظر (حداقل‌سازی یا حداکثر‌سازی) پاسخ‌های مورد بررسی تعیین کرد و در این پژوهش، شرایط بهینه با در نظر گرفتن حداقل مصرف انرژی ویژه، حداکثر مقادیر حداکثر مقاومت شکست و چگالی پلت تعیین شد. متغیرهای مستقل (اندازه ذرات، محتوای رطوبت و فشار تراکم) در محدوده In-range قرار گرفتند. در واقع تعیین شرایط بهینه با توجه به هدف اصلی پژوهش بر مبنای حداکثر چگالی پلت با حداکثر مقاومت شکست در کمترین مصرف انرژی ویژه و بالا نگه

جدول ۶- نقاط بهینه‌سازی برای ۱۰ راه‌حل برتر پاسخ‌های پلت‌سازی کمپوست باگاس نیشکر با روش BBD-RSM

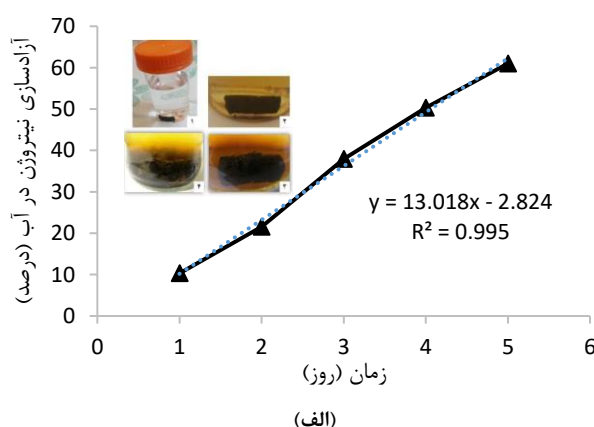
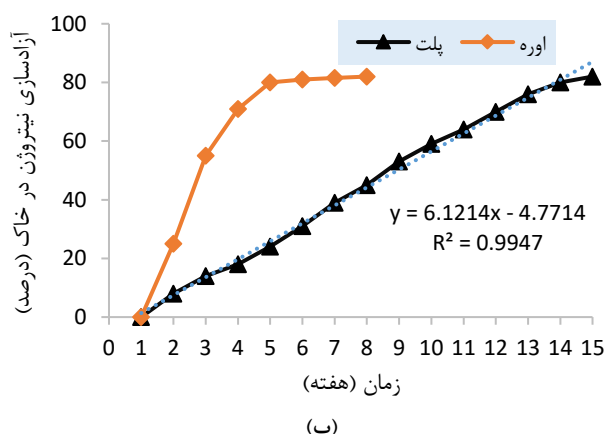
شماره	اندازه ذرات (mm)	محتوای رطوبت (%wb)	فشار تراکم (MPa)	مصرف انرژی ویژه (MJ/t)	حداکثر مقاومت شکست (kg)	چگالی (g/cm ³)	مطلوبیت	ملاحظه
۱	۴/۰۰۰	۲۰/۰۰۰	۵۰/۰۰۰	۲/۱۱۹	۲۸/۳۵۳	۰/۸۷۱	۰/۷۰۶	انتخاب شده
۲	۳/۹۸۹	۱۹/۹۱۶	۵۰/۰۴۷	۲/۱۲۱	۲۸/۲۵۱	۰/۸۷۱	۰/۷۰۵	
۳	۳/۹۹۷	۱۹/۹۹۷	۵۰/۰۰۰	۲/۱۲۳	۲۸/۱۳۳	۰/۸۷۱	۰/۷۰۴	
۴	۴/۰۰۰	۱۹/۸۹۸	۵۰/۷۷۱	۲/۱۶۹	۲۸/۵۳۲	۰/۸۷۴	۰/۷۰۴	
۵	۴/۰۰۰	۲۰/۰۰۰	۵۰/۰۰۰	۲/۱۲۴	۲۸/۱۲۱	۰/۸۷۱	۰/۷۰۴	
۶	۳/۹۶۲	۲۰/۰۰۰	۵۰/۰۰۲	۲/۱۱۵	۲۷/۹۶۵	۰/۸۷۱	۰/۷۰۳	
۷	۴/۰۰۰	۲۰/۰۰۰	۵۱/۲۰۶	۲/۱۹۸	۲۸/۶۴۴	۰/۸۷۵	۰/۷۰۲	
۸	۳/۹۴۰	۲۰/۰۰۰	۵۰/۰۰۰	۲/۱۱۳	۲۷/۷۴۴	۰/۸۷۱	۰/۷۰۱	
۹	۴/۰۰۰	۲۰/۰۰۰	۵۱/۹۱۸	۲/۲۴۴	۲۸/۱۱۶	۰/۸۷۸	۰/۷۰۰	
۱۰	۳/۹۲۵	۲۰/۰۰۰	۵۰/۰۰۰	۲/۱۱۱	۲۷/۵۹۵	۰/۸۷۰	۰/۷۰۰	

اندازه‌گیری مقدار آزادسازی نیتروژن در محیط آب از پلت‌های

بررسی آزادسازی نیتروژن در محیط آب و خاک

آزادسازی نیتروژن برای تقاضای تغذیه‌ای اکثر محصولات زراعی همخوانی ندارد، بنابراین نه تنها منجر به اتلاف نیتروژن از طریق شستشو و تبخیر^۱، بلکه همچنین باعث کمبود نیتروژن^۲ در محصولات زراعی در مرحله رشد آنها خواهد شد (Jiao et al., 2019). به‌طور مقایسه‌ای، در مدت زمان ۲۸ روز نسبت به کود اوره، کود پلت شده حدود ۱۸ درصد از نیتروژن خود را آزاد کرده است. نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر نشان داد که کود ترکیبی پلت کمپوست باگاس نیشکر و اوره می‌تواند حدود ۸۰ درصد از نیتروژن خود را به‌مدت ۱۴ هفته به آهستگی در خاک آزاد کند، بنابراین می‌تواند عناصر غذایی مغذی را برای یک دوره طولانی‌تری برای گیاه تامین کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کود ترکیبی پلت کمپوست باگاس نیشکر و اوره می‌تواند پتانسیل بسیار زیادی برای استفاده به‌عنوان کود کند رهش^۳ در کاربردهای زراعی داشته باشد.

کمپوست باگاس نیشکر در دمای ۳۰ درجه سلسیوس با قطر پلت ۶ میلی‌متر و با نسبت اوره به کمپوست ۱:۱ انجام شد. شکل (۶- الف)، نحوه آزادسازی نیتروژن پلت کمپوست باگاس نیشکر به‌مدت پنج روز متوالی را در دمای ۳۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود پلت کمپوست باگاس نیشکر با نسبت اوره ۱:۱ دارای مقدار آزادسازی نیتروژن در محیط آب به مقدار ۶۱ درصد در پایان پنج روز بود. به‌منظور تعیین میزان انتشار نیتروژن پلت‌های تولید شده در خاک هر هفته از کیسه‌های دفن شده در داخل خاک گلدان نمونه برداری شد و میزان رهایش نیتروژن با روش کجلدال محاسبه شد و نهایتاً به‌صورت تجمعی نمودار رهایش نیتروژن از پلت کمپوست باگاس نیشکر در اکسل رسم شد (شکل ۶- ب). با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که کود اوره به‌عنوان یک کود متداول نیتروژنی در مدت ۲۸ روز بیشتر نیتروژن خود را (۸۰ درصد) به‌سرعت در محیط خاک آزاد کرده است که این مقدار



شکل ۶- آزادسازی نیتروژن در محیط آب (الف) و در محیط خاک (ب) برای کود پلت کمپوست باگاس نیشکر و اوره

مصرف انرژی ویژه تولید پلت کمپوست باگاس نیشکر در این مطالعه (۲/۱۱۹ مگاژول بر تن) بسیار کمتر از مطالعات دیگر برای تولید پلت کود دامی (۶-۳۲ مگاژول بر تن) و یا ۴/۴۱ مگاژول بر تن برای پلت بیوجار و ۳۰-۱۲ مگاژول بر تن برای پلت کاه و کلش ذرت بود که علت آن ممکن است به‌دلیل بافت نرم کمپوست باگاس نیشکر باشد. از مزایای پلت‌سازی کمپوست می‌توان به کاهش تشکیل ذرات ریز و در نتیجه کاهش آلودگی‌های محیط زیستی، کنترل بهتر آزادسازی مواد مغذی کود، انتقال راحت‌تر و ماندگاری بیشتر برای انبار و همچنین قابلیت اضافه کردن مواد افزودنی مغذی برای بهبود کیفیت پلت برای مصارف کشاورزی

نتیجه‌گیری

فناوری پلت‌سازی بایستی از نظر بازده مصرف انرژی و شرایط عملیاتی مورد ارزیابی و بهینه‌سازی قرار بگیرد، زیرا تولید پلت از طریق فرآیندهای فشرده‌سازی انرژی بر است. نتایج بهینه‌سازی فرآیند پلت‌سازی در این پژوهش نشان داد که در شرایط بهینه اندازه ذرات ۴ میلی‌متر، محتوای رطوبت ۲۰ درصد وزنی و فشار تراکم ۵۰ مگاپاسکال، حداقل مصرف انرژی ویژه ۲/۱۱۹ مگاژول بر تن و حداکثر مقاومت شکست و چگالی پلت به ترتیب ۲۸/۳۵ کیلوگرم و ۰/۸۷۱ گرم بر سانتیمتر مکعب با تابع مطلوبیت ۰/۷۰۶ توسط روش سطح پاسخ پیشنهاد می‌شود. بر این اساس، مقدار

^۳ Slow-Release Fertilizer

^۱ Leaching and Volatilization

^۲ Nitrogen Starvation

افزایش جذب نیتروژن برای گیاه در یک دوره طولانی‌تر رشد آن شود و همچنین آلاینده‌های زیست محیطی کاربرد پلت کمپوست را می‌تواند از طریق کاهش انتشار نیتروز اکسید و آبشویی نیترات بهبود بخشد و در نتیجه انتظار می‌رود که تاثیرات مثبتی را بر رشد گیاه و سلامت خاک و انسان داشته باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Alemi, H., Kianmehr, M.H., Borghae, A.M. (2010). Effect of pellet processing of fertilizer on slow-release nitrogen in soil. *Asian Journal of Plant Sciences*, 9, 74-80. <https://doi.org/10.3923/ajps.2010.74.80>.
- ASABE Standards S269.5. Densified Products for Bulk Handling – Definitions and Method. St. Joseph, MI, ASABE, 2012.
- ASABE, ASAE S269.4 – cubes, pellets, and crumbles – definitions and methods for determining density, durability, and moisture content, American Society of Agricultural and Biological Engineers Standards, St. Joseph, MI, USA 2007, pp. 624-626.
- ASAE Standard S358.2 FEB03, (2006). Moisture measurement-forages. In: ASABE Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan, USA, pp. 1-2.
- Carone, MT, Pantaleo A, Pellerano A. (2011). Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea L.* *Biomass and Bioenergy*, 35, 402-10. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>.
- Chew, K.W., Chia, S.R., Yap, Y.J., Ling, T.C., Tao, Y., Show, P.L. (2018). Densification of food waste compost: Effects of moisture content and dairy powder waste additives on pellet quality. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 780-786. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.016>.
- Chia, W.Y., Chew, K.W., Le, C.F., Lam, S.S., Chee, C.S.C., Ooi, M.S.L., Show, P.L. (2020). Sustainable utilization of biowaste compost for renewable energy and soil amendments. *Environmental Pollution*, 267, 115662. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115662>.
- Ghorbani, M., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A., Sarlaki, E., Aghashahi, A., Assadi-Alamouti, A. (2021b). Improving the nutritive value of wheat straw by applying the combined chemical - oxidation treatment in-vitro for use as ruminant feed. *Animal Production Research*, In press, In press.
- Ghorbani, M., Kianmehr, M.H., Sarlaki, E., Ahrari, R., Azadegan, B. (2021a). Improving sustainability and slow-releasing attributes of pelletized agro-biowaste compost fertilizer assisted by biodegradable coating. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, In press, In press.
- Jackson, J., Turner, A., Mark, T., Montross, M. (2016). Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill. *Fuel Processing Technology*, 148, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.024>.
- Jiao, G-J., Peng, P., Sun, S-L., Geng, Z-C., She, D. (2019). Amination of biorefinery technical lignin by Mannich reaction for preparing highly efficient nitrogen fertilizer. *International Journal of Biological Macromolecules*, 127 (15): 544-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.01.076>.
- Jiao, W., Tabil, L., Xin, M., Song, Y., Chi, B., Wu, L., Chen, T., Meng, J., and Bai, X. (2020). Optimization of process variables for briquetting of biochar from corn stover. *BioResources*, 15 (3): 6811-6825.
- Kashaninejad, M., Tabil, L.G., Knox, R. (2014). Effect of compressive load and particle size on compression characteristics of selected varieties of wheat straw grinds. *Biomass and Bioenergy*, 60, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.017>.
- Kylili, A., Christoforou, E., Fokaidis, P.A. (2016). Environmental evaluation of biomass pelleting using life cycle assessment. *Biomass and Bioenergy*, 84, 107-117 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.018>.
- Labbé, R., Paczkowski, S., Knappe, V., Russ, M., Wöhler, M., Pelz, S. (2020). Effect of feedstock particle size distribution and feedstock moisture content on pellet production efficiency, pellet quality, transport and combustion emissions. *Fuel*, 263, 116662. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116662>.
- López-Mosquera, M.E., Cabaleiro, F., Sainz, M.J., López-Fabal, A., Carral, E. (2008). Fertilizing value of broiler litter: Effects of drying and pelletizing. *Bioresource Technology*, 99 (13): 5626-5633. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.034>.
- Mani, S., Tabil, L.G., Sokhansanj, S. (2006a). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30, 648-654. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2005.01.004>.
- Mani, S., Tabil, L.G., Sokhansanj, S. (2006b). Specific energy requirement for compacting corn stover.

- Bioresource Technology*, 97, 1420–1426. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.06.019>.
- Matkowski, P., Lisowski, A., Świętochowski, A. (2020). Pelletising pure wheat straw and blends of straw with calcium carbonate or cassava starch at different moisture, temperature, and die height values: Modelling and optimisation. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122955. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122955>.
- Moslehi Roodi, S., Abbaspour-Fard, M.H., Aghkhani, M.H. (2020). Improvement of Centrifugal Spreader Performance in order to Spread the Pellet Fertilizer. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 20, 93–112. <https://doi.org/10.22092/erams.2019.123748.1278>.
- Obernberger, I., Thek, G. (2010). The pellet handbook: The production and thermal utilisation of biomass pellets, Earthscan Ltd.
- Pampuro, N., Bagagiolo, G., Priarone, P.C., Cavallo, E. (2017). Effects of pelletizing pressure and the addition of woody bulking agents on the physical and mechanical properties of pellets made from composted pig solid fraction. *Powder Technology*, 311, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.092>.
- Pampuro, N., Caffaro, F., Cavallo, E. (2018). Reuse of animal manure: A case study on stakeholders' perceptions about pelletized compost in Northwestern Italy. *Sustainability*, 10 (6), 2028. <https://doi.org/10.3390/su10062028>.
- Pampuro, N., Dinuccio, E., Balsari, P., Cavallo, E. (2016). Evaluation of two composting strategies for making pig slurry solid fraction suitable for pelletizing. *Atmospheric Pollution Research*, 7 (2): 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.001>.
- Pampuro, N., Facello, A., Cavallo, E. (2013). Pressure and specific energy requirements for densification of compost derived from swine solid fraction. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 3, 678–684. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013113-4062>.
- Pradhan, P., Mahajani, S.M., Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: a review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215–32. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>.
- Pradhan, P., Mahajani, S.M., Arora, A. (2021). Pilot scale production of fuel pellets from waste biomass leaves: Effect of milling size on pelletization process and pellet quality. *Fuel*, 181, 215–32. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119145>.
- Rajabi Hamedani, S., Colantoni, A., Gallucci, F., Salerno, M., Silvestri, C., Villarini, M. (2019). Comparative energy and environmental analysis of agro-pellet production from orchard woody biomass. *Biomass and Bioenergy*, 129, 105334. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2019.105334>.
- Rao, J.R., Watabe, M., Stewart, T.A., Millar, B.C., Moore, J.E. (2007). Pelleted organo-mineral fertilisers from composted pig slurry solids, animal wastes and spent mushroom compost for amenity grasslands. *Waste Management*, 27, 1117–1128. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2006.06.010>
- Romano, E., Brambilla, M., Bisaglia, C., Pampuro, N., Pedretti, E.F., Cavallo, E. (2014). Pelletization of composted swine manure solid fraction with different organic co-formulates: effect of pellet physical properties on rotating spreader distribution patterns. *International journal of recycling organic waste in agriculture*, 3, 101–111. <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0070-2>.
- Sarlaki, E., Kermani, A.M., Kianmehr, M.H., Asefpour Vakilian, K., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Ma, N.L., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Lam, S.S., (2021a). Improving sustainability and mitigating environmental impacts of agro-biowaste compost fertilizer by pelletizing-drying. *Environ. Pollut.* 285, 117412. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117412>
- Sarlaki, E., Kianmehr, M.H., Ghorbani, M. (2021c). Analytical methods for assessing the quality of sugarcane bagasse compost and improving the physicochemical properties toward densification. *Environmental Sciences*, In press, In press.
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H., Asefpour Vakilian, K. (2021b). Valorization of lignite wastes into humic acids: Process optimization, energy efficiency and structural features analysis. *Renewable Energy*, 163, 105–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.096>.
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H., Asefpour Vakilian, K. (2019a). Extraction and purification of humic acids from lignite wastes using alkaline treatment and membrane ultrafiltration. *Journal of Cleaner Production*, 235, 712–23. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.028>.
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H., Asefpour Vakilian, K. (2020). Chemical, Spectral and Morphological Characterization of Humic Acids Extracted and Membrane Purified from Lignite. *Chemical & Chemistry Technology*, 14:353–61. <https://doi.org/10.23939/chcht14.03.353>.
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H., Mirsaedghazi, H. (2017). Effect of processing temperature on membrane ultrafiltration of lignite coals-derived humic alkaline extracts, membrane performance and humic acid purity. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 48:475–89. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.63813>.
- Sarlaki, E., Sokhandan Toomaj, M., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H., Nikousefat, O. (2019b). Extraction of humic acid from lignite coals using

- stirred tank reactors (STRs): Assessment of process parameters and final product characterization. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50:1111–25. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.260201.667947>.
- Sharif Paghaleh, A., Sarlaki, E., Kianmehr, M.H., Shakiba, N. (2017). Study of spectral, structural and chemical characteristics of humic acids isolated from coalfield of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48:1145–58. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.228746.667639>.
- Shaw, M.D., Karunakaran, C., Tabil, L.G. (2009). Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds. *Biosystems Engineering*; 103, 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.012>.
- Stelte, W., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B. (2011). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90, 3285–90. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>.
- Tajinia, R., Kianmehr, M.H., Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Mirsaedghazi, H. (2020). Extracting humic acids from spend mushroom compost (SMC) by alkaline treatment and membrane ultrafiltration. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50, 847–61. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.269856.665118>.
- Takahashi, S., Ihara, H., Karasawa, T. (2016). Compost in pellet form and compost moisture content affect phosphorus fractions of soil and compost. *Soil Sci. Plant Nutrition*, 62, 399–404. <https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1198680>.
- TMECC, (2002). Test Methods for the Examination of Composts and Composting. US Compost. Council.
- Tumuluru, J.S. (2015). High moisture corn stover pelleting in a flat die pellet mill fitted with a 6 mm die: physical properties and specific energy consumption. *Energy Science & Engineering*, 3, 327–341. <https://doi.org/10.1002/ese3.74>.
- Tumuluru, J.S. (2016). Specific energy consumption and quality of wood pellets produced using high-moisture lodgepole pine grind in a flat die pellet mill. *Chemical Engineering Research and Design*, 110:82–97. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.04.007>.
- Valentinuzzi, F., Cavani, L., Porfido, C., Terzano, R., Pii, Y., Cesco, S., Marzadori, C., Mimmo, T. (2020). The fertilising potential of manure-based biogas fermentation residues: pelleted vs. liquid digestate. *Heliyon*, 6, (2): e03325. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03325>.
- Yang, Y.C., Tong, Z.H., Geng, Y.Q., Li, Y.C., Zhang, M. (2013). Biobased polymer composites derived from corn stover and feather meals as double-coating materials for controlled-release and water retention urea fertilizers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61 (34), 8166–8174. <http://dx.doi.org/10.1021/jf402519t>.
- Zafari, A. and Kianmehr, M.H. (2012). Effect of temperature, pressure and moisture content on durability of cattle manure pellet in open-end die method, *Journal of Agricultural Science*, 5, 203–208, <http://dx.doi.org/10.5539/jasv4n5p203>.
- Zafari, A. and Kianmehr, M.H. (2013). Application of densification process in organic waste management, *Waste Management Research*, 31, 684–691, <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X13484191>.