

بهینه‌سازی مصرف انرژی ویژه در فرایند اکستروژن کود کمپوست به

روش سطح پاسخ

عابدین ظفری^۱، محمدحسین کیانمهر^{۲*} و اکبر عرب‌محمد حسینی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

۲، ۳. دانشیاران، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۲/۳۱)

چکیده

فشرده‌سازی مواد زیست‌توده، که اغلب چگالی پایینی دارند، روشی مناسب برای افزایش چگالی، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، تسهیل کاربرد، و انبارداری این قبیل مواد است. تولید پلت به کمک فرایند اکستروژن از متداول‌ترین روش‌های فشرده‌سازی محسوب می‌شود. هدف از این تحقیق، بهینه‌سازی مصرف انرژی ویژه فرایند اکستروژن با در نظر گرفتن اثر آن بر چگالی پلت‌های تولید شده است. با استفاده از یک پلت‌ساز و یک پرس هیدرولیکی پلت کود کمپوست تحت شرایط کنترل شده تولید شد. اثر پارامترهای مستقل شامل رطوبت (۳۵، ۴۰، و ۴۵ درصد)، سرعت پیستون (۲، ۶، و ۱۰ mm/s)، طول قالب (۸، ۱۰، و ۱۲ mm)، و اندازه ذرات (۳/۰، ۹/۰، و ۱/۵ mm) بر مصرف انرژی ویژه اکستروژن و چگالی پلت‌ها ارزیابی شد. به منظور بهینه‌سازی، آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ و در قالب طرح باکس بنکن طراحی شد. نتایج حاکی از آن است که تمام پارامترهای مستقل اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر پاسخ‌های مطالعه شده در این تحقیق داشتند. نتایج بهینه‌سازی فرایند نشان داد که محتوی رطوبت بهینه در محدوده ۴۵-۴۰ درصد قرار دارد. سرعت تقریبی ۲ mm/s، اندازه ذرات بین ۱-۰/۸ mm و طول قالب ۱۲-۱۰ mm محدوده سایر متغیرهای مستقل برای حصول پلت با بیشترین چگالی و صرف کمترین انرژی است.

کلیدواژه‌ها

اکستروژن، انرژی ویژه، بهینه‌سازی، پلت، روش سطح پاسخ.

مقدمه

(Gity, 2011) یکی از عوامل محدودکننده استفاده مناسب کمپوست، چگالی پایین این ماده است که حمل‌ونقل، ذخیره، و کاربرد آن را مشکل می‌کند و افزایش هزینه‌ها را به دنبال دارد. فشرده‌سازی و تولید پلت از کود کمپوست روشی مناسب برای رفع این مشکل‌ها محسوب می‌شود. استفاده از اکستروژن و فرایند اکستروژن از متداول‌ترین روش‌های تولید پلت در صنایع مختلف به‌شمار می‌آید. اکستروژن فرایندی است پیوسته که در آن مواد خام تحت تأثیر تغییرات دما و فشار قرار می‌گیرند و مواد اولیه با خروج از اکستروژن به محصول نهایی مطلوب تبدیل می‌شوند. هدف در این فرایند افزایش چگالی محصول نهایی، اختلاط ترکیبی از مواد گوناگون، و تولید محصول مطلوب است (Harper, 1987).

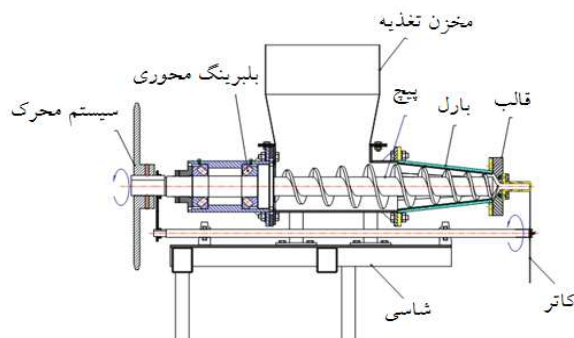
تولید حجم بالای زباله‌های شهری در ایران به بحران زیست‌محیطی تبدیل شده است. حدود ۷۰ درصد زباله‌های تولید شده در شهرهای ایران منشأ آلی داشته و قابلیت تبدیل به کمپوست را دارند (Gity, 2011). تولید کمپوست از زباله‌های آلی شهری روشی مناسب برای مدیریت زباله‌ها محسوب می‌شود. علاوه بر این، کمپوست ماده‌ای مؤثر در بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی، و بیولوژیکی خاک محسوب می‌شود که کاربرد آن در کاهش مصرف کودهای شیمیایی اهمیت دارد (Mavaddati

به‌طور مؤثری کاهش می‌یابد (Tabil and sokhansanj, 1997). تیراراتانان و همکاران در یک تحقیق کلی اثر پارامترهای فرایند اکستروژن بر چگالی پلت حاصل از انواع مختلفی از مواد زیست‌توده را مطالعه کردند (Theerarattananoon *et al.*, 2011).

با توجه به تأثیر مصرف انرژی بر چگالی پلت‌های تولیدشده، علاوه بر حفظ کیفیت پلت، بهینه‌کردن مصرف انرژی ویژه^۱ در طراحی فرایند اکستروژن نیز حائز اهمیت است. نیلسن و همکاران نشان دادند که با افزایش رطوبت انرژی فشرده‌گی خرده‌های چوب کاهش می‌یابد (Nilsen *et al.*, 2009). فابورود و کالاهان انرژی مورد نیاز برای فشرده‌سازی مواد فیبری کشاورزی را بررسی کردند (Faborode and O'Callaghan, 1987). آن‌ها گزارش دادند که مصرف انرژی ویژه برای تولید پلت کاه جو در حالت خردشده در مقایسه با کاه خردنشده بیشتر است. شاو نتایج متناقضی به‌دست آورد (Shaw, 2008). او اظهار کرد که افزایش اندازه ذرات کاه گندم احتمالاً به‌دلیل افزایش تغییر شکل پلاستیک ذرات به افزایش مصرف انرژی ویژه منجر می‌شود. از آنجا که در تحلیل فرایند اکستروژن مشخصه‌های گوناگونی مطرح است و معمولاً بهینه‌سازی چند هدف را در نظر دارد، روش سطح پاسخ^۲ روش مناسبی است که برای نیل به این هدف به ما کمک می‌کند. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای آنالیز و مدل‌سازی پاسخ‌های یک فرایند استفاده می‌شود و هدف نهایی آن بهینه‌سازی فرایند است (Myers and Montgomery, 1995). روش‌های مرکب مرکزی^۳، باکس بنکن (BBD)^۴، و دهلرت^۵ سه روش اصلی طراحی سطح پاسخ‌اند. روش باکس بنکن یک طراحی تجربی برای روش سطح پاسخ است که جورج باکس و دونالد بنکن ابداع کردند (باکس و بنکن، 1960). تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز در یک طرح BBD برای تحلیل فرایند برابر است با:

1. Specific Energy Consumption
2. Response Surface Methodology
3. Central Composite Design
4. Box Behnken Design
5. Doehlert

اکسترودر شامل یک بارل است که مواد خام به‌کمک یک پیچ در داخل آن به جلو رانده می‌شود. سپس به‌وسیله قالب نصب‌شده در انتهای دستگاه به پلت تبدیل می‌شوند (شکل ۱).



شکل ۱. اجزای اصلی یک اکسترودر تک پیچ (Gonzalez-Valadez *et al.*, 2008)

پلت شدن مواد کود کمپوست به‌شدت به خواص فیزیکی ماده اولیه و پارامترهای فرایند وابسته است (Moraru & Kokini, 2003). رطوبت اولیه ماده خام، اندازه ذرات، و نرخ جریان مواد از داخل قالب و طول قالب از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت پلت محسوب می‌شوند. تحقیقات زیادی برای بررسی اثر این پارامترها بر چگالی محصول نهایی به‌عنوان مهم‌ترین مشخصه کیفی پلت انجام شده است. محتوی رطوبت اصلی‌ترین نقش در تعیین چگالی پلت را دارد. در فرایند فشرده‌سازی، رطوبت مانند یک فیلم بایندر برای تقویت و بهبود چسبیدن ذرات به‌یکدیگر عمل می‌کند (Mani *et al.*, 2003). به‌طور کلی هر نوع زیست‌توده یک محدوده بهینه از رطوبت برای دستیابی به بیشترین چگالی وجود دارد (Serrano *et al.*, 2011). پیکارد و همکاران (۱۹۶۱) ثابت کردند که پلت‌های تهیه‌شده از علوفه با رطوبت ۱۰ درصد کیفیت بالاتری در مقایسه با علوفه با رطوبت ۲۰ درصد دارند (Pickard *et al.*, 1961). مانی و همکاران اثر نیروی فشرده‌گی، و اندازه ذرات، و رطوبت را بر چگالی پلت کاه بررسی کردند و گزارش دادند که ذرات با اندازه ریز یا متوسط برای تولید پلت مطلوب‌ترند (Mani *et al.*, 2006). تبیل و سخن‌سنج نیز اثر رطوبت، اندازه ذرات، و هندسه قالب بر کیفیت پلت یونجه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش رطوبت و اندازه ذرات، چگالی پلت‌های تولیدشده

▪ مواد و روش‌ها

تهیه ماده اولیه

کود کمپوست استفاده‌شده در این تحقیق از کارخانه تولید کمپوست واقع در شهرستان کهریزک استان تهران تهیه شد. محتوی رطوبت کود کمپوست تهیه‌شده طبق استاندارد ASAE S358.2 سنجیده شد (ASAE standard, 1989). آنالیز محتوی رطوبت نمونه‌ها در سه تکرار انجام شد و میزان رطوبت $12 \pm 1\%$ بر پایه تر به‌دست آمد. برای کاهش اندازه ذرات، کود کمپوست با استفاده از یک آسیاب چکشی به مدت ۸ دقیقه آسیاب شد. برای بررسی اثر اندازه ذرات بر پارامترهای مطالعه‌شده در این تحقیق نمونه‌ها با استفاده از سه غربال ۰/۳، ۰/۹، و ۱/۵ میلی‌متری الک شدند. در رطوبت‌های کمتر از ۳۰ درصد کمپوست قابلیت تبدیل شدن به پلت را نداشت. برای تهیه نمونه با رطوبت مورد نظر (۳۵، ۴۰، و ۴۵ درصد بر پایه تر) با استفاده از یک آبپاش به نمونه‌ها آب مقطر اضافه شد. پس از اضافه‌شدن آب مقطر، نمونه‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۵ درجه سلسیوس در کیسه‌های پلاستیکی دربسته درون یخچال نگهداری شدند تا رطوبت یکنواخت در نمونه‌ها توزیع شود.

توزیع اندازه ذرات

استاندارد ASAE S319-2 برای ارزیابی توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها استفاده شد (ASAE, 1993). الک‌های استاندارد با مش‌های ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، و ۱۰۰ (استاندارد امریکایی) استفاده شد (جدول ۱). اساس انتخاب الک‌ها، گستره اندازه ذرات در نمونه‌ها بود. نمونه‌های ۱۰۰ گرمی از مواد بر روی الک‌ها که از سوراخ بزرگ تا کوچک روی هم چیده شده بودند قرار گرفت و به مدت ده دقیقه با استفاده از شیکر الک شدند. سپس نمونه باقیمانده بر روی هر الک وزن شد و قطر متوسط هندسی (d_{gw}) و خطای استاندارد قطر ذرات محاسبه شد (S_{gw}).

$$d_{gw} = \log^{-1} \left[\frac{\sum (w_i \log d_i)}{\sum w_i} \right] \quad \text{رابطه ۴}$$

$$s_{gw} = \log^{-1} \left[\frac{\sum w_i (\log d_i - \log d_{gw})}{\sum w_i} \right]^{0.5} \quad \text{رابطه ۵}$$

رابطه ۱)

$$n = 2k(k-1) + c_0$$

که در آن k برابر است با تعداد متغیرهای مستقل، و c_0 تعداد تکرار در نقطه مرکزی است. معمولاً در روش باکس بنکن متغیر پاسخ (y) توسط معادله درجه دوم زیر مدل می‌شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + \sum_{i < j}^m \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} x_i^2 \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن $\beta_{ij}, \beta_{ii}, \beta_i, \beta_j, m, x_i$ به ترتیب بیانگر متغیرها، تعداد متغیرها، ثابت مدل، ضرایب متغیرها، ضریب پارامتر درجه دو، و ضریب تقابل پارامترهاست. میرز و مونتگمری روشی چندپاسخه برای بهینه‌سازی چند هدف معرفی کردند و آن را رضایت‌مندی نامیدند (Myers and Montgomery, 1995). این روش تابع هدفی می‌سازد که تابع رضایت‌مندی، D ، (رابطه ۳) نام دارد و بیان‌کننده محدوده رضایت‌مندی برای هر پاسخ است (d_i). محدوده رضایت‌مندی از صفر تا یک تغییر می‌کند که عدد یک بیانگر حداکثر رضایت‌مندی است.

$$D = (d_1 * d_2 * \dots * d_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{رابطه ۳}$$

که n نماینده تعداد پاسخ‌هاست. اگر هر کدام از پاسخ‌ها یا متغیرهای مستقل خارج از محدوده رضایت‌مندی قرار گیرند، تابع صفر می‌شود. در بهینه‌سازی بر اساس تابع رضایت‌مندی، برای هر متغیر و هر پاسخ می‌توان هدفی تعیین کرد. در این تحقیق، به‌منظور بررسی فرایند اکستروژن، پلت کود کمپوست با استفاده از یک قالب باز و یک پیستون تحت فشار ناشی از یک پرس هیدرولیکی تولید شد. اثر پارامترهای ماده خام شامل محتوی رطوبت اولیه کود کمپوست (۳۵، ۴۰، و ۴۵ درصد)، اندازه ذرات (۰/۳، ۰/۹، و ۱/۵ mm)، و پارامترهای فرایند شامل سرعت پیستون (۲، ۶، و ۱۰ mm/s) و طول قالب (۸، ۱۰، و ۱۲ mm) بر چگالی و مصرف انرژی ویژه اکستروژن بررسی شد. هدف از این تحقیق بهینه‌سازی مصرف انرژی ویژه در فرایند تولید پلت کود کمپوست با توجه به لزوم چگالی مطلوب پلت به کمک روش سطح پاسخ است.

۱۸ میلی‌متر بود. در انتهای محفظهٔ پیش‌تراکم، قالب با قطر داخلی ۶ میلی‌متر قرار می‌گیرد. با تعویض قالب‌ها طول قالب تغییرپذیر است. به‌منظور تأمین حرکت پیستون از یک پرس هیدرولیکی استفاده شد. این دستگاه از یک فک ثابت (محل قرارگیری پلت‌ساز) و یک فک متحرک (سیلندر هیدرولیک) تشکیل شده است که به‌وسیلهٔ جک هیدرولیکی فشار را به پیستون وارد می‌کند. عملکرد دستگاه بدین صورت است که یک پمپ هیدرولیک مستقر در پکیج هیدرولیک، سرعت و فشار لازم برای حرکت پیستون در داخل محفظهٔ پیش‌تراکم پلت‌ساز را تأمین می‌کند. لودسل (حسگر نیرو) و خط‌کش دیجیتال (خط‌کش اهمی) تعبیه‌شده در دستگاه اطلاعات را به داده‌خوان ارسال و در رایانه به‌صورت یک فایل متنی ثبت می‌کند. در هر آزمایش مقدار تقریبی چهار گرم از مواد اولیه به پلت‌ساز تغذیه و تحت فشار قرار داده شد. با حرکت پیستون، مواد از قسمت پیش‌تراکم به سمت قالب حرکت کرده و با حرکت مواد به‌سمت پایین به‌دلیل اصطکاک بین مواد و دیوارهٔ پلت‌ساز و سایر نیروهای مخالف در مقابل جریان مواد، عمل تراکم مواد صورت گرفته و با عبور مواد از قسمت انتهایی پلت‌ساز (قالب) شکل نهایی پلت ایجاد شد (شکل‌های ۲ و ۳).

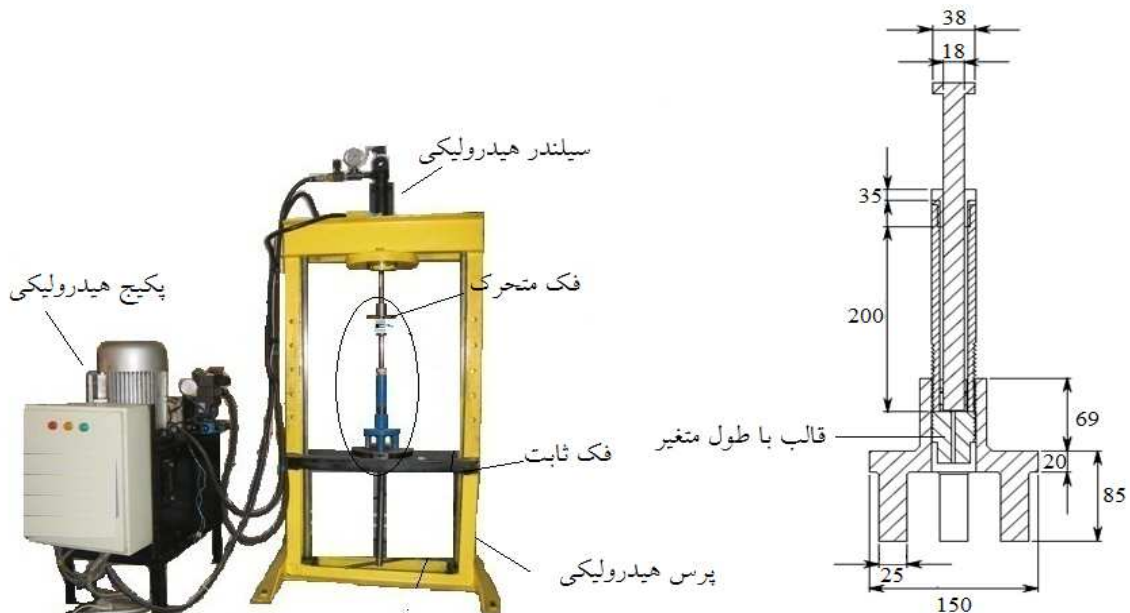
d_i ، قطر الک i ام در ستون الک‌ها و W_i ، وزن نمونه روی الک i ام است.

جدول ۱. مشخصات الک‌ها مطابق استاندارد ASTM

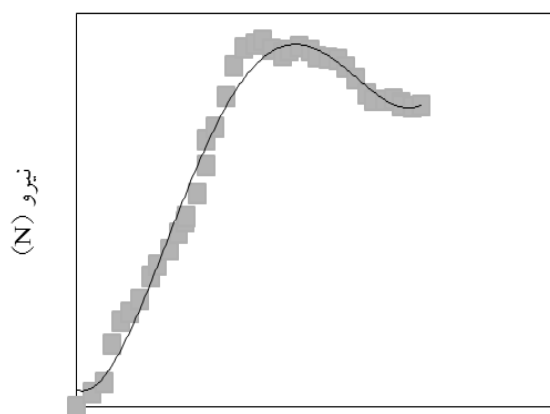
شماره مش	قطر سوراخ (میکرون)
۶	۳۳۶۰
۸	۲۳۸۰
۱۰	۲۰۰۰
۱۲	۱۶۸۰
۱۶	۱۱۹۱
۲۰	۸۴۱
۳۰	۵۹۴
۵۰	۲۹۷
۷۰	۲۱۲
۱۰۰	۱۵۰

تولید پلت

برای تولید پلت تحت شرایط کنترل‌شده یک پلت‌ساز آزمایشگاهی (شامل یک قالب استوانه‌ای و یک پیستون) طراحی و ساخته شد (شکل ۲). پلت‌ساز دارای یک محفظهٔ پیش‌تراکم با ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی



شکل ۲. تجهیزات آزمایشگاهی استفاده‌شده برای تولید پلت



شکل ۴. منحنی نیرو-جابه‌جایی فرایند اکستروژن



شکل ۳. نمونه‌ای از پلت‌های تولیدشده

مصرف انرژی ویژه

در طول فرایند اکستروژن داده‌های نیرو و جابه‌جایی ثبت و مصرف انرژی ویژه مطابق روش مانی و همکاران تعیین شد (مانی و دیگران، ۲۰۰۶). سطح زیر منحنی نیرو-جابه‌جایی (شکل ۴) به‌دست‌آمده از اکستروژن پلت محاسبه شد و با ترکیب آن با جرم پلت، مصرف انرژی ویژه برای اکستروژن به‌دست آمد. در واقع، مصرف انرژی ویژه برابر با انرژی مصرف‌شده در طول فرایند اکستروژن تقسیم بر جرم پلت تولیدشده است. فرایند اکستروژن برای هر نمونه در سه تکرار انجام شد.

آنالیز و بهینه‌سازی

در این تحقیق، برای بررسی اثر پارامترهای مستقل، آنالیز و مدل‌سازی پاسخ‌های فرایند اکستروژن، و در نهایت بهینه‌سازی فرایند، از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شد. سطوح پارامترهای مستقل همراه با مقادیر کد آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. طراحی آزمایش‌ها (شامل ۲۹ تیمار و پنج تکرار در نقطه مرکزی) با استفاده از روش باکس بنکن و نرم‌افزار Design Expert 8 انجام گرفت.

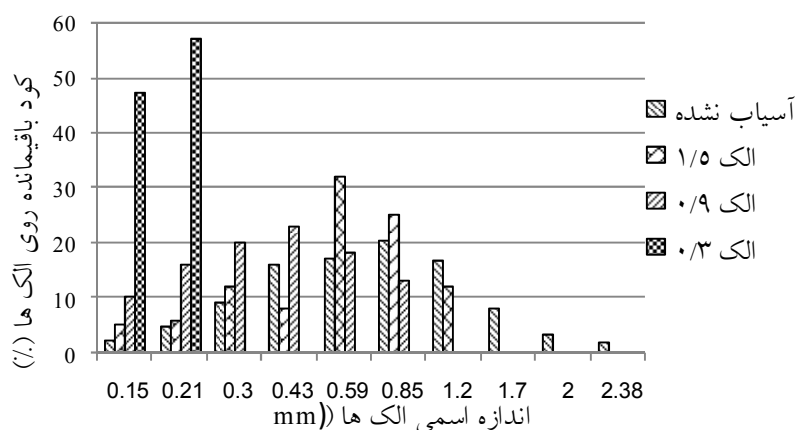
جدول ۲. سطوح و مقادیر کد متغیرهای مستقل

سطوح و مقادیر کد			نماد	متغیرهای مستقل
-۱	۰	۱		
۳۵	۴۰	۴۵	X ₁	رطوبت (%)
۲	۶	۱۰	X ₂	سرعت پیستون (mm/s)
۸	۱۰	۱۲	X ₃	طول قالب (mm)
۰/۳	۰/۹	۱/۵	X ₄	اندازه ذرات (mm)

نتایج و بحث

در شکل ۵ و جدول ۳ نشان داده شده است.

توزیع اندازه ذرات کود قبل و بعد از آسیاب‌شدن، و قطر متوسط هندسی و انحراف استاندارد قطر ذرات به ترتیب



شکل ۵. توزیع اندازه ذرات کود قبل و بعد از آسیاب شدن

جدول ۳. نتایج حاصل از آنالیز توزیع اندازه ذرات

انحراف استاندارد (mm)	قطر متوسط هندسی (mm)	اندازه غربال (mm)
۰/۰۰۲	۰/۸۶۹	آسیاب نشده
۰/۰۰۱۵	۰/۶۸۹	۱/۵
۰/۰۰۱	۰/۴۶۷	۰/۹
۰/۰۰۰۵	۰/۲۲۲	۰/۳

مدل‌های ارائه شده براساس داده‌های تجربی برای چگالی (P) و مصرف انرژی ویژه (SEC) در روابط ۶ و ۷ آورده شده است. مقدار بالای ضریب تبیین (R²) مدل‌های ارائه شده بیانگر دقت مدل‌ها در پیش‌بینی پاسخ‌هاست.

نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر اساس طراحی روش باکس بنکن در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده چگالی و مصرف انرژی ویژه در شکل ۶ نمایش داده شده است.

$$\rho = 126/22 + 46/58 X_1 + 16/63 X_2 + 27/92 X_4 - 1/17 X_2 X_3 - 0/596 X_1^2 - 60/702 X_4^2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

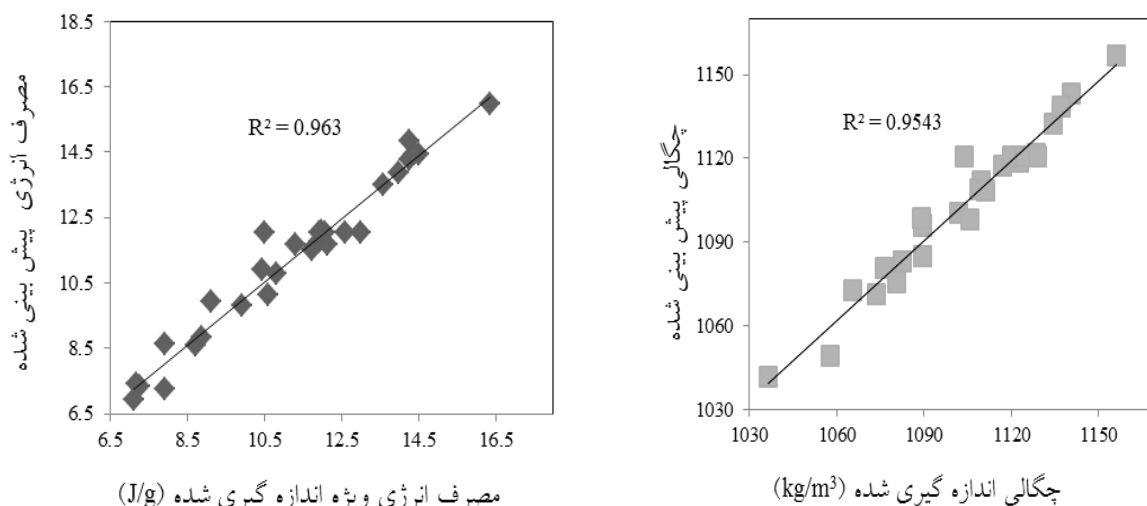
$$SEC = 34/59 + 0/5059 X_1 - 0/3084 X_2 - 25/2 X_3 - 20/32 X_4 + 0/374 X_1 X_2 + 0/076 X_1 X_3 + 0/4256 X_1 X_4 - 0/147 X_2 X_3 + 0/888 X_2 X_4 - 0/309 X_1^2 - 0/594 X_2^2 \quad (\text{رابطه ۷})$$

پارامترهای مستقل مطالعه شده در این تحقیق اثر معنی‌داری بر چگالی و مصرف انرژی ویژه داشتند.

نتایج حاصل از آنالیز واریانس اثر چهار پارامتر مستقل بر چگالی و مصرف انرژی ویژه در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده، همه

جدول ۴. نتایج حاصل از اثر پارامترهای مستقل بر چگالی و مصرف انرژی ویژه

SEC (J/g)	ρ (kg/m ³)	X ₄ (mm)	X ₃ (mm)	X ₂ (mm/s)	X ₁ (%)	شماره آزمایش
۱۰/۵۲	۱۱۱۷	۰/۹	۱۰	۶	۴۰	۱
۱۳	۱۱۴۰/۴۸	۰/۹	۱۰	۶	۴۰	۲
۱۲/۶	۱۰۷۳/۷۶	۰/۹	۱۰	۶	۴۰	۳
۱۱/۹۲	۱۰۸۲/۶	۰/۹	۱۰	۶	۴۰	۴
۱۲/۰۶	۱۱۲۲/۸	۰/۹	۱۰	۶	۴۰	۵
۱۴/۲۶	۱۱۲۸/۵	۰/۹	۱۰	۲	۳۵	۶
۷/۲۶	۱۰۶۵/۳۵	۰/۹	۱۰	۲	۴۵	۷
۱۱/۹۳	۱۰۷۶/۳	۰/۹	۱۰	۱۰	۳۵	۸
۷/۹۲	۱۱۰۲/۱	۰/۹	۱۰	۱۰	۴۵	۹
۱۱/۳۰	۱۱۰۹/۶۷	۰/۳	۸	۶	۴۰	۱۰
۱۳/۶	۱۰۵۷/۹	۰/۳	۱۲	۶	۴۰	۱۱
۱۰/۸	۱۰۸۰/۷	۱/۵	۸	۶	۴۰	۱۲
۱۲/۱۳	۱۱۳۴/۶۱	۱/۵	۱۲	۶	۴۰	۱۳
۱۶/۳۶	۱۱۰۵/۸۹	۰/۳	۱۰	۶	۳۵	۱۴
۷/۱۸	۱۱۵۵/۹۸	۰/۳	۱۰	۶	۴۵	۱۵
۱۲	۱۰۸۹/۶۷	۱/۵	۱۰	۶	۳۵	۱۶
۷/۹۳	۱۰۸۹/۶۷	۱/۵	۱۰	۶	۴۵	۱۷
۱۰/۶	۱۱۰۸/۸	۰/۹	۸	۲	۴۰	۱۸
۱۰/۴۴	۱۰۸۹/۷	۰/۹	۸	۱۰	۴۰	۱۹
۱۴	۱۱۲۰/۶۲	۰/۹	۱۲	۲	۴۰	۲۰
۹/۱۳	۱۱۳۷/۱۷	۰/۹	۱۲	۱۰	۴۰	۲۱
۱۴/۵۲	۱۰۸۹/۲	۰/۹	۸	۶	۳۵	۲۲
۷/۱۲	۱۱۱۱/۲	۰/۹	۸	۶	۴۵	۲۳
۱۴/۲۶	۱۰۳۶/۴۷	۰/۹	۱۲	۶	۳۵	۲۴
۹/۹۳	۱۱۲۰/۲	۰/۹	۱۲	۶	۴۵	۲۵
۱۴/۴	۱۱۲۶/۸	۰/۳	۱۰	۲	۴۰	۲۶
۸/۷۳	۱۱۰۳/۷۵	۰/۳	۱۰	۱۰	۴۰	۲۷
۸/۸۶	۱۱۲۴/۵	۱/۵	۱۰	۲	۴۰	۲۸
۱۱/۷۳	۱۱۲۹/۱	۱/۵	۱۰	۱۰	۴۰	۲۹



شکل ۶. مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای الف) چگالی و ب) مصرف انرژی ویژه

جدول ۵. جدول آنالیز واریانس مدل‌های برازش داده شده بر چگالی و مصرف انرژی ویژه

مصرف انرژی ویژه			چگالی			منابع تغییرات
p-value	F value	ضرایب	p-value	F value	ضرایب	
< ۰/۰۰۰۰۱	۲۲۹/۶۹	۰/۵۰	۰/۰۰۱۵	۱۵/۳۷	۴۶/۵۸	X_1 رطوبت،
۰/۰۰۱۳	۱۵/۹۹	-۰/۳۱	< ۰/۰۰۰۱	۱۲۲/۸۴	۱۶/۶۳	X_2 سرعت پیستون،
۰/۰۰۳۶	۱۲/۱۴	-۲/۲۵	۰/۲۶۰۸	۱/۳۷	-۱/۵۶	X_3 طول قالب،
۰/۰۰۴۱	۱۱/۷	-۲۰/۳۲	< ۰/۰۰۰۱	۸۲/۶۴	۲۷/۹۲	X_4 اندازه ذرات،
۰/۰۴۶۵	۴/۷۷	۰/۰۴	۰/۳۹۲۶	۰/۷۸	-۰/۱۸	X_1X_2
۰/۰۴۲۰	۵/۰۱	۰/۰۷۶	۰/۴۹۰۹	۰/۵۰	۰/۲۹	X_1X_3
۰/۰۰۲۳	۱۳/۸۸	۰/۴۲	۰/۳۷۴۷	۰/۸۴	۱/۲۶	X_1X_4
۰/۰۰۴۰	۱۱/۸۳	-۰/۱۵	۰/۰۴۰۱	۵/۱۲	-۱/۱۷	X_2X_3
< ۰/۰۰۰۰۱	۳۸/۷۶	۰/۸۸	۰/۱۲۹۷	۲/۵۹	-۲/۷۸	X_2X_4
۰/۴۹۵۲	۰/۴۹	-۰/۲	۰/۷۵۶۰	۰/۱۰	۱/۰۹	X_3X_4
۰/۰۱۲۱	۸/۲۹	-۰/۰۳۱	۰/۰۰۰۴	۲۰/۸۸	-۰/۵۹	X_1^2
۰/۰۰۳۳	۱۲/۴۸	-۰/۰۶	۰/۴۹۸۵	۰/۴۸	-۰/۱۴	X_2^2
۰/۶۶۶۷	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۸۷۰۱	۰/۰۲۸	-۰/۱۴	X_3^2
۰/۴۰۲۲	۰/۷۵	-۰/۶	< ۰/۰۰۰۱	۴۴/۹۱	-۶۰/۷	X_4^2

اثر رطوبت

بر اساس تحقیقات صورت گرفته رطوبت بهینه در فرایند فشرده سازی بسته به نوع زیست توده و شرایط فرایند متفاوت خواهد بود. نتایج نشان داد که با افزایش رطوبت از ۳۵ تا ۴۵ درصد چگالی پلتها افزایش پیدا می کند تا به مقدار بیشینه خود برسد؛ پس از آن با افزایش بیشتر رطوبت، چگالی کاهش پیدا می کند. رطوبت عامل مهمی در فرایند اکستروژن است که در محدوده بهینه خود به صورت یک فیلم بایندر عمل می کند و نیروهای جاذبه بین مولکولی، چسبندگی و دگرچسبی بین ذرات و نهایتاً چگالی پلت های تولید شده را نیز تحت تأثیر قرار می دهد.

در فرایند اکستروژن بخش عمده ای از انرژی صرف غلبه بر اصطکاک و سایر نیروهای مقاوم در مقابل جریان می شود. نتایج نشان داد که افزایش محتوی رطوبت، باعث کاهش مصرف انرژی می شود، زیرا رطوبت همانند یک روان ساز عمل کرده و باعث کاهش اصطکاک می شود. نتایج تحقیق مانی و همکاران نیز در بررسی مصرف انرژی ویژه برای فشرده سازی کاه ذرت نشان داد که با افزایش رطوبت مصرف انرژی ویژه کاهش پیدا می کند (Mani et al., 2006).

اثر اندازه ذرات

نتایج حاکی از آن است که کاهش اندازه ذرات باعث افزایش چگالی پلت های تولید شده می شود. با کاهش اندازه ذرات سطح تماس و نیروهای جاذبه بین مولکولی ذرات افزایش پیدا می کند، از طرفی ذرات ریزتر سطح تماس بزرگ تری را برای اضافه کردن رطوبت فراهم می کنند و سطح بیشتری جهت چسبندگی در اختیار یکدیگر قرار می دهند. علاوه براین، حذف فضاهای خالی بین ذرات از دیگر عوامل افزایش چگالی پلتها با کاهش اندازه ذرات است. نتایج این تحقیق موافق با نتایج به دست آمده از تحقیق ژو و همکاران بود (ژو و دیگران، ۲۰۰۸). آن ها نشان دادند که چگالی پلت های کاه ذرت با افزایش اندازه ذرات کاهش می یابد. روند مشابهی از رابطه چگالی و اندازه ذرات برای کاه گندم و سوئیچ گراس نیز مشاهده شد (لام و دیگران، ۲۰۰۸). کاهش اندازه ذرات باعث افزایش سطح تماس

ذرات با دیواره قالب می گردد که افزایش نیروی اصطکاک را به دنبال دارد، بنابراین انتظار می رود که با کاهش اندازه ذرات مصرف انرژی ویژه اکستروژن افزایش پیدا کند نتایج نشان داد که با کاهش اندازه ذرات از ۱/۵ به ۰/۳ میلی متر مصرف انرژی ویژه اکستروژن ۲۰ درصد افزایش پیدا می کند. نتایج تحقیق کالین نیز مشخص کرد که کاهش اندازه ذرات ذرت علوفه ای از ۰/۸ میلی متر به ۰/۶۶ میلی متر مصرف انرژی ویژه را از ۰/۸ به ۱/۳ مگاژول بر تن افزایش می دهد (کالین، ۲۰۰۸).

اثر سرعت پیستون و طول قالب

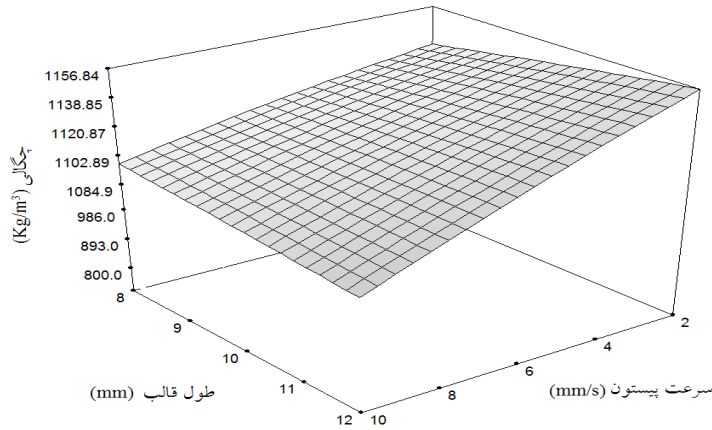
سرعت پیستون نرخ جریان مواد و زمان توقف مواد در داخل قالب را تحت تأثیر قرار می دهد. در سرعت های پایین مواد زمان بیشتری را در قالب سپری می کنند، همین امر سبب می گردد که ذرات فرصت بیشتری برای اتصال به یکدیگر، شکل گیری، و انسجام به فرم پلت را داشته باشند. نتایج تحقیق ما نیز نشان داد که با کاهش سرعت پیستون چگالی پلت های تولید شده به طور معنی داری افزایش پیدا می کند. این نتایج موافق با نتایج به دست آمده لی و لیو در فرآوری خاک اره بلوط بود (Li & Liu, 2000).

با کاهش سرعت پیستون و افزایش زمان تماس مواد با دیواره قالب نیروی اصطکاک افزایش یافته و صرف انرژی بیشتری برای غلبه به نیروهای مقاوم در مقابل جریان نیاز دارد.

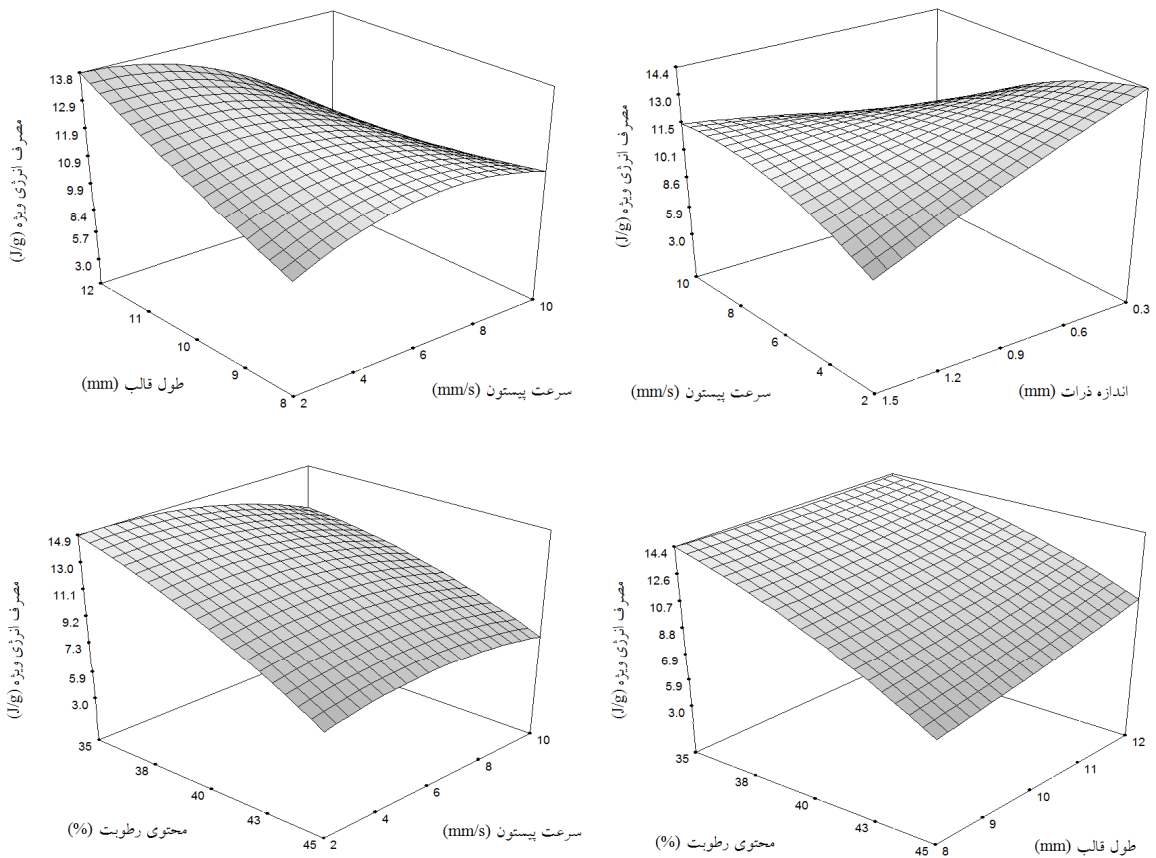
نتایج نشان داد که با افزایش طول قالب چگالی پلتها و مصرف انرژی ویژه اکستروژن به صورت معنی داری افزایش پیدا می کند. با افزایش طول قالب زمان تماس مواد با دیواره قالب، نیروی اصطکاک، و نیروی برشی افزایش پیدا می کند. افزایش نیروی اصطکاک به عنوان نیروی مقاوم در مقابل جریان باعث بهبود کیفیت پلت و از طرفی افزایش مصرف انرژی می شود. افزایش نیروی برشی نیز امکان اختلاط بهتر مواد و افزایش چگالی پلت را فراهم می کند. پیش از این نیز اثر هندسه قالب بر فرایند اکستروژن نه لزوماً مصرف انرژی، توسط محققان دیگر بررسی شده است (Theerarattananoon et al, 2012; Li and Liu, 2000).

داشتند. این در حالی بود که فقط اثر متقابل سرعت پیستون و طول قالب بر چگالی پلت‌های تولیدشده معنی‌دار بود. برای تجسم اثر متقابل پارامترها نمونه‌ای از آن‌ها در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده‌اند.

نتایج آنالیز واریانس مدل‌های برازش‌شده بر چگالی و مصرف انرژی ویژه جدول ۵ حاکی از آن است که اثر متقابل همه پارامترهای مستقل به جز اثر متقابل طول قالب و اندازه ذرات اثر معنی‌داری بر مصرف انرژی ویژه



شکل ۷. اثر متقابل سرعت و طول قالب بر چگالی



شکل ۸. اثر متقابل پارامترهای مستقل بر مصرف انرژی ویژه

فرایند جدول ۶ محتوی رطوبت بهینه در محدوده ۴۰-۴۵ درصد قرار دارد، سرعت تقریبی ۲ mm/s، اندازه ذرات بین ۰/۸ mm - ۱ و طول قالب ۱۰-۱۲ mm محدوده سایر متغیرهای مستقل برای حصول پلت با بیشترین چگالی و صرف کمترین انرژی است. برای مقایسه مقدار آزمایشگاهی و مقدار پیش‌بینی شده، آزمایش با شرایط بهینه به دست آمده با بالاترین درجه رضایتمندی تکرار شد. چگالی و مصرف انرژی ویژه به ترتیب 1149 kg/m^3 و $7/51 \text{ J/g}$ به دست آمد که بیانگر قابلیت مدل در پیش‌بینی نتایج است.

■ بهینه‌سازی مصرف انرژی ویژه اکستروژن

هدف از روش سطح پاسخ یافتن مقادیر مناسب هر یک از متغیرها برای رسیدن به مطلوب‌ترین پاسخ‌هاست. برای بهینه‌سازی فرایند اکستروژن مقدار بیشینه برای چگالی پلت‌ها یک پارامتر کیفی مهم و مقدار کمینه برای مصرف انرژی ویژه در شکل پاسخ‌های مطلوب در نظر گرفته شد. نتایج بهینه‌سازی عددی، مقادیر پارامترهای مستقل برای رسیدن به این اهداف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی

جدول ۶. نتایج حاصل از بهینه‌سازی عددی فرایند اکستروژن

رضایتمندی	پاسخ‌ها		متغیرهای مستقل			
	SEC (J/g)	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	X ₄ (mm)	X ₃ (mm)	X ₂ (mm/s)	X ₁ (%)
۰/۸۳۸	۷/۴۶	۱۱۴۴/۰۹	۰/۸۶	۱۰/۰۱	۲	۴۳
۰/۸۳۸	۷/۳۷	۱۱۴۳/۵۸	۰/۸۶	۹/۹۵	۲	۴۳/۴
۰/۸۳۷	۷/۶	۱۱۴۴/۹۲	۰/۸۹	۱۰/۱۸	۲	۴۴
۰/۸۳۶	۷/۴۹	۱۱۴۴/۱	۰/۸۶	۹/۹۹	۲	۴۴/۸۵
۰/۸۳۵	۷/۱۲	۱۱۴۱/۹۵	۰/۸۹	۹/۷۹	۲/۰۱	۴۴/۱
۰/۸۳۴	۷/۱۲	۱۱۴۱/۹۴	۰/۸۴	۹/۷۹	۲/۰۲	۴۵
۰/۸۳۱	۷/۸	۱۱۴۵/۶	۰/۹۵	۱۰/۴۵	۲	۴۵
۰/۸۲۵	۷/۱۲	۱۱۴۱/۱۳	۰/۷۲	۹/۵۱	۲	۴۵
۰/۷۱۹	۹/۶۹	۱۱۵۱/۸	۱/۰۵	۱۲	۲/۲۳	۴۵
۰/۷۰۲	۸/۷۵	۱۱۴۰/۶۴	۱/۳۱	۱۲	۲	۴۵

بود. همچنین حاکی از آن است که استفاده از قالب با طول بزرگ‌تر و کاهش سرعت عبور مواد از داخل قالب می‌تواند راهبرد مناسبی برای افزایش چگالی پلت باشد. نتایج نشان داد که روش سطح پاسخ روشی مناسب برای پیش‌بینی و مدل کردن اثر پارامترهای مستقل بر پاسخ‌های مورد نظر است و نتایج این تحقیق می‌تواند برای طراحی و بهبود ماشین‌های پلت‌ساز به کار گرفته شود.

■ نتیجه گیری

نتایج حاصل از بررسی اثر رطوبت، سرعت پیستون، طول قالب، و اندازه ذرات بر چگالی و مصرف انرژی ویژه نشان داد که همه پارامترهای مستقل اثر معنی‌داری بر پارامترهای مطالعه شده در این تحقیق داشتند. نتایج مؤید وجود یک حد بهینه رطوبت در فرایند اکستروژن

REFERENCES

1. ASAE Standards. (1998). S269.4 Cubes, Pellets and Crumbles-Definitions and Methods for Determining Density, Durability and Moisture Content ASAE DEC96. Standard S358.2 Moisture Measurement-forages. ASAE, St. Joseph, MI.
2. Faborode, M.O., Ocallaghan, J.R. (1987). Optimizing the compression/briquetting of fibrous agricultural materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 38, 245-262.
3. Gity, A. (2011). Sustainable management of soil and compost refining environment, first printing, Tehran University Press. P 113. (In Farsi).
4. Gonzalez-Valadez, M., Munoz-Hernandez, G., Sanchez-Lopez, R. (2008). Design and evaluation of an extruder to convert crop residues to animal feed. *Biosystem Engineering*, 100: 66-78.
5. Harper, j. M. (1987). Extrusion processing of food. *Fd. Technol.* 32(7): 67-72.
6. Mani, S., Tabil, L. G., and Sokhansanj, S.(2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*. 30(7), 648-654.
7. Mavaddati, S., Kianmehr. M. H., Allahdadi, I. and Chegini, G. R. (2010). Preparation of Pellets by Urban Waste Compost. *Int. J. Environ. Res* 4(4), 665.
8. Moraru, C.I., Kokini, J. L. (2003). Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 4, 120-128.
9. Myers, R. H., Montgomery, D. C.(1995). Response Surface Methodology. *John Wiley and Sons*. New York.
10. Nielsen, N.P.K., Gardner, D.J., Poulsen, T. (2009). Importance of Temperature, Moisture Content, and Species for the Conversion Process of Wood Residues into Fuel Pellets. *Wood and Fiber Science*. 41(4), 414-415.
11. Pickard, G.E., W.M. Roll, and J.H. Ramser. (1961). Fundamentals of hay wafering. *Trans. ASAE* 4(1):65-68.
12. Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., and Portero, H.(2011). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*. 92(3), 699-706.
13. Shaw, M. (2008). Feedstock and process variables influencing biomass densification, Master of Science thesis, Department of Agricultural and Bioresource Engineering University of Saskatchewan.
14. Tabil, L. G., and Sokhansanj, S.(1997). Bulk properties of alfalfa grind related to its compaction characteristics. *Applied Engineering in Agriculture*. 13(4), 499-505.
15. Theerarattananoon, K., Xu, F., Wilson, J., Ballard, R., McKinney, L., Staggenborg, S., Vadlani, P., Pei, Z.J., and Wang, D. (2011). Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, hwaet straw and big bluestem. *Industrial Crops and Products*. 33, 325-332.