



## بهینه سازی فرآیند تولید پلت از ضایعات میوه سیب با استفاده از روش سطح پاسخ

علی قربانی<sup>۱</sup>، رضا امیری چایجان<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، [manochehr.5679@gmail.com](mailto:manochehr.5679@gmail.com)  
<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، [amirireza@basu.ac.ir](mailto:amirireza@basu.ac.ir)

### چکیده

یکی از روش‌های مدیریت پسماندهای کشاورزی با کمترین آسیب به محیط زیست، تبدیل آنها به موادی با ارزش افزوده و ماندگاری بیشتر می‌باشد. در این تحقیق از ضایعات سیب درختی برای پلت‌سازی استفاده شد. اثر شرایط مختلف پلت‌سازی بر روی چگالی ذره‌ای، مقاومت فشاری و چروکیدگی مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور پلت‌سازی از ضایعات سیب درختی با محتوای رطوبتی ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ (w.b.)، دمای مواد خام ورودی ۲۵، ۴۵ و ۶۵ °C، قطر قالب ۶، ۸ و ۱۰ mm و زمان آسایش تنش ۵، ۱۰ و ۱۵ s استفاده شد. در این تحقیق از روش سطح پاسخ به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی استفاده گردید. بیشترین مقدار چگالی ذره‌ای (۳۳۲۹/۸۷ kg/m<sup>3</sup>) در تولید پلت از ضایعات سیب در دمای مواد خام ورودی ۲۵ °C، زمان آسایش تنش ۵ s، محتوای رطوبتی ۳۰٪ و قطر قالب ۱۰ mm به دست آمد. بیشترین مقدار مقاومت فشاری (۳۳۱/۶۵ N) در دمای مواد خام ورودی ۲۵ °C، زمان آسایش تنش ۱۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰٪ و قطر قالب ۶ mm حاصل شد. بیشترین مقدار چروکیدگی (۵۹٪/۶) در دمای مواد خام ورودی ۲۵ °C، زمان آسایش تنش ۱۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰٪ و قطر قالب ۶ mm به دست آمد. نقطه بهینه فرآیند تولید پلت از ضایعات سیب در دمای مواد خام ورودی ۶۴/۹۵ °C، زمان آسایش تنش ۱۵ s، محتوای رطوبتی ۳۰٪ و قطر قالب ۹/۶۶ mm محاسبه شد. در این شرایط بهینه، مقادیر متغیرهای پاسخ چگالی ذره‌ای ۳۳۲۹/۸۸ kg/m<sup>3</sup>، مقاومت فشاری ۳۲۷/۲۴۶ N و چروکیدگی ۸/۴۳۸٪ برای پلت‌سازی از ضایعات سیب، حاصل شد.

کلمات کلیدی: پلت‌سازی، بهینه‌سازی، ضایعات سیب، چگالی ذره‌ای، مقاومت فشاری و چروکیدگی

\* نویسنده مسئول: رضا امیری چایجان، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم (تلفکس: ۰۸۱۳۴۴۲۵۴۰۲)



## Optimization of Pellet Production from Apple Waste using Response Surface Method

Ali Ghorbani<sup>1</sup>, Reza Amiri Chayjan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran, manochehr.5679@gmail.com

<sup>2</sup>Associate Prof., Department of Biosystems Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran, amirireza@basu.ac.ir

### ABSTRACT

One of the agricultural waste management methods with the least damage to the environment is to convert them into materials with more benefit and durability. In this research, apple fruit waste was used for pelletizing. The effect of different pelletizing conditions on particle density, compressive strength and shrinkage were studied. In order to pellet making from the apple waste, moisture content of 30, 40 and 50% (w.b.), the raw material input temperature of 25, 45 and 65 °C, the die diameter of 6, 8 and 10 mm, and the stress relaxation time of 5, 10 and 15 were used. In this research, the response surface method for data analyzing and optimizing was used. The highest value of particle density in the pellet production (3329.87 kg/m<sup>3</sup>) was obtained under the raw material input temperature of 25 °C, the stress relaxation time of 5s, the moisture content of 30% and the die diameter of 10 mm. The highest compressive strength (331.65N) in the pelletizing process was achieved at input temperature of 25 °C, the stress relaxation time of 15 seconds, the moisture content of 50% and the die diameter of 6 mm. The highest shrinkage value (59.6%) was obtained at the raw material temperature of 25 °C, the stress relaxation time of 15 seconds, the moisture content of 50% and the die diameter of 6 mm. The optimum condition of pellet production process was achieved at the raw material input temperature of 64.95 °C, the stress relaxation time of 15s, the moisture content of 30% and the die diameter of 9.66 mm. In these conditions, the optimum values of response variables for apple waste were estimated to be 3329.88 kg/m<sup>3</sup>, 327.246N and 8.438% for particle density, compressive strength and shrinkage, respectively.

**Keywords:** Pletting, Optimization, Apple waste, Particle density, Compressive strength, Shrinkage

### ۱- مقدمه

ضایعات کشاورزی به محصولات کشاورزی فاسد و غیر قابل مصرف که پس از کشت و زرع یا فعل و انفعالات دامی برجای می ماند گفته می-شوند (Waste management law, 2004). تفاله سیب از خوش خوراکی بالایی برخوردار است و بعنوان یک ماده انرژی زا و منبع خوب الیاف قابل هضم برای اغلب نشخوارکنندگان، جایگزین مطلوبی برای علوفه محسوب می شود و همچنین به دلیل بالابودن پکتین در تفاله سیب در صنایع غذایی و دارویی جایگاه ویژه ای دارد. حجم زیادی از ضایعات طی فرآیندهای مختلف فرآوری و پس از برداشت محصولات کشاورزی و باغی در کارخانه های صنایع غذایی، مزارع کشاورزی و میدان های میوه و تره بار برجای می ماند که زباله های کشاورزی نامیده می شود (Wan & Zainuddin, 2013). یکی از راه های مدیریت پسماندهای کشاورزی بدون آسیب رساندن به محیط زیست، تبدیل این مواد به موادی با ارزش افزوده بالا می باشد (Ahmed *et al.*, 2002). از جمله چالش های مهم در استفاده از این پسماندها، هزینه بالای حمل و نقل و ذخیره سازی آنها به دلیل چگالی کمی این مواد، جداسازی بخش فاسد و کپک زده مواد خام اولیه و عدم امکان استفاده از تجهیزات و ماشین های انتقال و تغذیه به دلیل شکل نامنظم این مواد است (Terrill *et al.*, 2007). به منظور حل این مشکلات، می توان با متراکم کردن این مواد طی فرآیند پلت سازی، چگالی حجمی آنها را بالا برد، همچنین با اعمال فرآیندهایی قبل از پلت سازی، مواد فاسد و کپک زده موجود در این مواد را از بین برد. از دیگر مزایای استفاده از پلت، کاهش آلودگی های محیطی به دلیل نداشتن ذرات ریز و گرد و غبار و افزایش ارزش غذایی به دلیل فشرده شدن است (Mahapatra *et al.*, 2010; Supriya *et al.*, 2012).

نتایج تحقیقی بر روی تولید پلت های کروی نشان داد، با تعیین شرایط بهینه ی متغیرهای موثر بر کیفیت پلت از جمله رطوبت مواد خام، سرعت دورانی قالب دستگاه پلت ساز، شرایط تهویه (نظیر بخاردهی) و دما، پلت ها در کیفیت مناسب تولید خواهند شد. مقاومت فشاری پلت های کروی، در آزمون دوام پلت کمتر بود (Roepert *et al.*, 2005). پلت سازی سبب افزایش چگالی توده درمواد زیست توده می شود. همچنین سبب



تسهیل در حمل‌ونقل و کاهش هزینه‌های انتقال می‌شود. پلت‌هایی که محتوای رطوبتی کمتری دارند برای ذخیره و انبارداری مناسب هستند و همچنین پلت‌هایی با چگالی حجمی بالا برای حمل‌ونقل و انبارداری مناسب می‌باشد. شکل زیست‌توده‌ها در طول فرآیند پلت‌سازی به خواص فیزیکی، اندازه ذرات مواد خام و متغیرهای فرآیند ساخت پلت مانند دما، فشار، قطر قالب و سرعت بارگذاری بستگی دارد. فرآیند فشرده‌سازی (پلت‌سازی) ترکیب اثر متقابل بین اندازه ذرات، نیرو و ترکیب اولیه مواد خام می‌باشد (Zafari & Kianmehr, 2013).

پلت به منظور ذخیره ایمن و جلوگیری از فساد آن در انبار باید دارای محتوای رطوبتی کم (حدود ۱۲٪ w.b.) و به منظور کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی، دارای چگالی حجمی بالا باشد (Mavaddati et al., 2010). مطالعه‌ای راجع به اثر نیروی فشاری، اندازه ذرات و محتوای رطوبتی بر روی خواص مکانیکی بیومس در تولید پلت از علف انجام شد. نتایج نشان داد که چگالی کاه جو و اندازه ذرات بر خواص مکانیکی تأثیر دارند (Mani et al., 2006). نوع ترکیب مواد اولیه و پیش‌تیمارهای اعمال شده قبل از فرآیند پلت‌سازی، روی ساختار شیمیایی پلت و قدرت این پیوندها تأثیرگذار است. ایجاد پیوندهای ضعیف بین ذرات مواد تشکیل شده از ضایعات کشاورزی از جمله کاه و کلش طی فرآیند پلت‌سازی سبب تشکیل پلت‌هایی با پایداری کم می‌شود (Adapa et al., 2013).

دوام یا پایداری پلت به مقاومت پلت در برابر نیروهای فشاری، برشی و ضربه طی مرحله جابجایی و حمل و نقل اطلاق می‌شود. برای طراحی سیستم‌های حمل و نقل مناسب نیاز است خواص فیزیکی از جمله مقاومت پلت تعیین گردد. از جمله مشکلاتی که در پایداری کم پلت اتفاق می‌افتد عبارتند از: اختلال در سیستم دستگاه‌های تغذیه، انتشار گرد و غبار و افزایش آتش سوزی و انفجار طی حمل و نقل و ذخیره‌سازی پلت است (Temmerman et al., 2006). مقاومت فشاری یکی از پارامتر سنجشی برای ارزیابی خواص فیزیکی محصول می‌باشد. همچنین معیار خوبی برای اندازه‌گیری سریع کیفیت پلت و بهینه کردن متغیرهای فرآیند پلت‌سازی برای افزایش کیفیت و پایداری پلت می‌باشد (Zafari & Kianmehr, 2013).

چروکیدگی یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی در ساختار بافت محصول طی خشک کردن می‌باشد که از همان مراحل اولیه فرآیند خشک کردن شروع می‌شود. چروکیدگی به ساختار بافت و مقدار رطوبت ماده غذایی و پارامترهای فرآیند مانند دما و سرعت خشک کردن وابسته است. همچنین مقدار چروکیدگی بر میزان تخلخل ماده خشک که یک پارامتر مهم در انتقال جرم و خواص مکانیکی می‌باشد، تأثیرگذار است. از دست دادن آب و گرم شدن سبب ایجاد تنش در ساختار سلولی مواد غذایی می‌گردد. در نتیجه باعث تغییر شکل و کاهش ابعاد آن می‌گردد. چروکیدگی در طول خشک کردن مواد غذایی، به طور مداوم اتفاق می‌افتد و تأثیری بر خواص فیزیکی و خواص ترموفیزیکی دارد. بنابراین چروکیدگی هم روی بافت محصول و هم روی کیفیت محصول اثر می‌گذارد (Schultz et al., 2007).

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است. این روش جهت توسعه و بهینه‌کردن فرآیندهایی به کار می‌رود که پاسخ موردنظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد و هدف آن مشخص کردن ارتباط بین پاسخ و متغیر مستقل است. همچنین این روش تأثیر متغیرها را به‌تنهایی و یا با یکدیگر بر روی پارامتر پاسخ نشان می‌دهد. در واقع سطح پاسخ با برازش مدل مناسبی بر روی داده‌ها، منحنی‌هایی را جهت یافتن پاسخ بهتر ارائه می‌دهد (Li et al., 2007).

با توجه به مطالب بیان شده، اهداف انجام این پژوهش عبارتند از: (۱) بررسی اثر محتوای رطوبتی بر خواص مکانیکی پلت‌های ساخته شده از تفاله سیب درختی، (۲) بررسی اثر قطر و طول قالب روی چگالی ذره و مقاومت فشاری پلت، (۳) تعیین دمای بهینه برای مواد ورودی به قالب به منظور دستیابی به بیشترین چگالی و مقاومت فشاری پلت و کمترین چروکیدگی و (۴) بررسی اثر زمان آسایش تنش طی فرآیند پلت‌سازی بر برگشت فنری پلت ساخته شده از ضایعات میوه سیب.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تهیه محصول

به منظور انجام این پژوهش، ضایعات سیب از میوه تره بار شهرستان همدان تهیه شد. پس از فرآیند آبگیری با استفاده از آبمیوه‌گیری (پارس خزر، مدل JW) جداسازی تفاله از آبمیوه انجام گرفت. تمامی نمونه‌ها جهت جلوگیری از تغییرات فیزیولوژیکی و شیمیایی در یخچال با دمای ۴ تا ۵ °C تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند. برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه ضایعات سیب، پنج نمونه ۲۰ گرمی از تفاله سیب در داخل آون با دمای ۱۰۵ °C به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد (AOAC, 1990). بعد از بدست آمدن وزن نهایی، رطوبت اولیه تفاله سیب بر مبنای وزن خشک محاسبه شد.

## ۲-۲- روش تولید پلت

به منظور ساخت پلت از یک دستگاه پرس و یک قالب پلت ساز استفاده شد (شکل ۱). مواد توسط یک پلانجر متصل شده به پرس درون قالب فشرده شد. پس از رسیدن فشار جک هیدرولیک به ۷۰ بار، جک برای مدت مشخصی (سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه) متوقف شده و سپس فشار جک از روی مواد برداشته شد. پس از شکل‌گیری مواد، پلت به آرامی از قالب جدا شد. در این تحقیق همچنین به منظور بررسی اثر شکل قالب بر خواص مکانیکی پلت از سه قالب با نسبت طول به قطرهای متفاوت استفاده شد. پس از ایجاد پلت‌ها برای رساندن رطوبت آنها به رطوبت مناسب (w.b.) ۱۲٪ برای انبارداری، با استفاده از آون در دمای ۲۵ °C اقدام کاهش رطوبت آنها شد (ASAE Standard, 2003). بعد از خشک شدن، جرم پلت‌ها با استفاده از ترازو اندازه‌گیری شد.

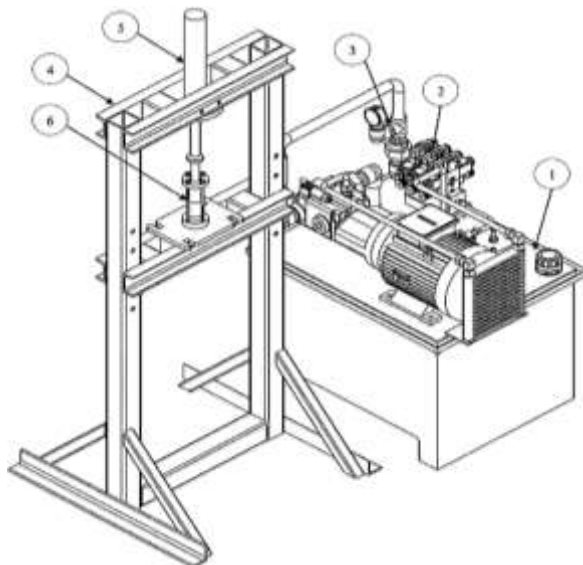


Figure 1- The laboratory hydraulic press fabricated for pellet production: 1- Power pack, 2- Flow control valve, 3- Pressure control valve, 4- Platform, 5- Hydraulic jack and 6- Die.

شکل ۱- پرس هیدرولیکی ساخته شده برای تولید پلت: (۱) منبع توان، (۲) سوپاپ کنترل جریان، (۳) سوپاپ کنترل فشار، (۴) شاسی، (۵) جک هیدرولیک، (۶) قالب پلت.

## ۲-۳- انتخاب متغیرها و روش بهینه‌سازی

متغیرهای مستقل در این پژوهش عبارت بودند از: محتوای رطوبتی مواد خام اولیه در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰ (w.b.)؛ دمای مواد ورودی به قالب در سه سطح ۲۵، ۴۵ و ۶۵°C؛ اندازه قطر قالب در سه سطح ۶، ۸ و ۱۰ mm و زمان آسایش تنش در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ s. به منظور رساندن رطوبت اولیه مواد به رطوبت مورد آزمایش، نیاز به انجام فرآیند خشک کردن بود. به منظور رساندن دمای مواد درون قالب به دمای مورد آزمایش، مواد درون یک ظرف دربسته (ظرفی که با محیط بیرون تبادل هوا ندارد) قرار گرفت و در آون قرار داده شد و چندین حسگر دما نیز درون این ظرف و در تماس با مواد به منظور بررسی سه سطح دمای ۲۵، ۴۵ و ۶۵°C قرار گرفت. به محض رسیدن دمای مواد به دمای مورد نظر، مواد برای ورود به درون قالب پلت آماده شد.

متغیرهای پاسخ برای بهینه‌سازی عبارت بودند از: چگالی ذره‌ای، مقاومت فشاری و چروکیدگی

برای اندازه‌گیری چگالی ذره‌ای پلت، یک عدد پلت درون استوانه مدرج که داخلش مقدار مشخصی آب بود، انداخته شد. حجم و وزن استوانه مشخص بود. سپس حجم و وزن پلت‌ها با استفاده از استوانه مدرج و ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شد. چگالی ذره‌ای از رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$\rho_p = \frac{m}{V_p} \quad (1)$$

$\rho_p$  چگالی ذره‌ای پلت ( $g/mm^3$ )،  $m$  وزن پلت (g) و  $V_p$  حجم ذره‌ای پلت ( $mm^3$ ) است.

به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری، پلت‌های آماده با استفاده از دستگاه تست مواد اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری استحکام پلت‌های تولید شده از ضایعات سیب از دستگاه تست مواد شرکت Hounsfield مدل K-S H50 ساخت انگلستان استفاده گردید. روش آزمایش بدین صورت بود که یک عدد پلت توسط گیره روی پایه ثابت دستگاه نگه داشته می‌شد. سپس فک متحرک که با سرعت ثابت ۱۰ mm/min میلی متر



## یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



بر دقیقه به سمت پایین حرکت کرده و پلت را فشرده می‌کند. حداکثر نیرویی که توسط نیروسنج برای شکستن پلت لازم بود اندازه‌گیری و در حافظه نیروسنج ثبت می‌شود. در این آزمایش، حداکثر نیروی لازم برای شکستن پلت‌ها به عنوان استحکام پلت‌ها در نظر گرفته شد. این آزمایش برای هر محتوای رطوبتی سه نوبت تکرار شد.

برای اندازه‌گیری میزان چروکیدگی محصول، پلت‌های تشکیل شده در ابتدا و انتهای فرآیند خشک شدن توسط کولیس دیجیتال، قطر بزرگ، متوسط و کوچک نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. در نتیجه قطر میانگین هندسی پلت از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$D = (A \times B \times C)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

که آن D قطر میانگین هندسی (mm) و A، B و C به ترتیب قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک (mm) می‌باشند. حجم پلت قبل از خشک شدن از معادله (۳) به دست آمد:

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \quad (3)$$

برای محاسبه درصد چروکیدگی پلت از معادله (۴) استفاده شد.

$$S_0 = \left(1 - \frac{V}{V_0}\right) \times 100 \quad (4)$$

که در رابطه بالا  $S_0$  درصد چروکیدگی پلت،  $V_0$  حجم اولیه پلت ( $\text{mm}^3$ ) قبل از خشک کردن و  $V$  حجم ثانویه پلت ( $\text{mm}^3$ ) پس از فرآیند خشک شدن است.

به منظور بهینه‌سازی تولید پلت، روش به کار گرفته شده در این پژوهش، روش سطح پاسخ بود. برای بهینه‌سازی با این روش، آزمایش‌ها در قالب طرح مربع مرکزی در نرم‌افزار Desing Expert 7.0.0 انجام شد. طرح مربع مرکزی دارای سه نوع نقطه (اصلی، محوری و مرکزی) است که تعداد آزمایش‌ها از رابطه (۵) به دست آمد.

$$N = 2^u + 2u + C_0 \quad (5)$$

که در آن N تعداد آزمایش‌ها، u تعداد پارامترهای مستقل،  $2^u$  تعداد آزمایش‌های نقاط اصلی، 2u تعداد آزمایش‌های نقاط محوری و  $C_0$  تعداد آزمایش‌های نقاط مرکزی است که برای محاسبه خطا به کار رفت. در این پژوهش پس از مشخص شدن متغیرهای مستقل، ۳۰ آزمون تعیین شد که شامل شش تکرار در نقطه مرکزی بود. برای بهینه‌سازی از مدل درجه دوم به شکل زیر استفاده شد:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (6)$$

در این رابطه  $\beta_0$  عرض از مبدأ و  $\beta_i$ ،  $\beta_{ii}$  و  $\beta_{ij}$  ضرایب رگرسیونی به ترتیب خطی، درجه دوم و برهم‌کنش و  $x_i$  و  $x_j$  متغیرهای مستقل کدبندی شده هستند. ضرایب مدل با استفاده از یک تکنیک رگرسیونی چندگانه به نام روش حداقل مربعات میانگین محاسبه می‌گردند (Rouissi et al., 2013).

در تولید پلت مورد مطالعه، دمای مواد خام ورودی ( $^{\circ}\text{C}$ )، محتوای رطوبتی (%)، زمان آسیایش تنش (s) و اندازه قالب (mm) به‌عنوان متغیرهای مستقل و چگالی ذره‌ای ( $\rho_p$ )، مقاومت فشاری (N) و چروکیدگی (%). به‌عنوان متغیرهای وابسته (متغیرهای پاسخ) تعریف شدند. سطوح متغیرهای مستقل و مقادیر کدبندی شده پلت‌های تولید شده از ضایعات سیب در جدول ۱ نشان داده شده است. طرح آزمایش‌های تولید پلت از ضایعات سیب در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش، تولید پلت از ضایعات سیب درختی با کمترین تغییر در ویژگی‌های آنها است. بنابراین بهینه‌سازی پلت-سازی بر مبنای بیشترین مقدار چگالی و مقاومت فشاری و کمترین مقدار چروکیدگی در نظر گرفته شد.

جدول ۱- متغیرهای مستقل فرآیند و مقادیر مربوطه در پلت‌سازی ضایعات میوه سیب.

Table 1. Independent variables and their levels in apple waste pelleting.

| Independent variables                      | Coded variables | Levels |     |     |
|--|-----------------|--------|-----|-----|
|  |                 | -1     | 0   | +1  |
| Product temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) | X <sub>1</sub>  | 25     | 45  | 65  |
| Moisture content (% w.b.)                  | X <sub>2</sub>  | 270    | 450 | 630 |
| Stress relaxation time (s)                 | X <sub>3</sub>  | 5      | 10  | 15  |
| Die diameter (mm)                          | X <sub>4</sub>  | 6      | 8   | 10  |



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک  
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



جدول ۲- آزمایش‌های مختلف بر اساس طرح مربع مرکزی برای پلت‌سازی ضایعات میوه سیب.

Table 2. Design of experiments using central composite design (CCD) for apple waste pelleting.

| Exp. run | Actual values (Coded values) |                           |                            |                   | Replication |
|----------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|-------------|
|          | Product temperature (°C)     | Moisture content (% w.b.) | Stress relaxation time (s) | Die diameter (mm) |             |
| 1        | 45 (0)                       | 40 (0)                    | 10 (0)                     | 8 (0)             | 6           |
| 2        | 25 (-1)                      | 50 (+1)                   | 5 (-1)                     | 6 (-1)            | 1           |
| 3        | 25 (-1)                      | 30 (-1)                   | 5 (-1)                     | 10 (+1)           | 1           |
| 4        | 45 (0)                       | 50 (+1)                   | 15 (+1)                    | 8 (0)             | 1           |
| 5        | 65 (+1)                      | 30 (-1)                   | 15 (+1)                    | 6 (-1)            | 1           |
| 6        | 25 (-1)                      | 50 (+1)                   | 15 (+1)                    | 10 (+1)           | 1           |
| 7        | 45 (0)                       | 40 (0)                    | 15 (+1)                    | 8 (0)             | 1           |
| 8        | 25 (-1)                      | 30 (-1)                   | 15 (+1)                    | 6 (0)             | 1           |
| 9        | 25 (-1)                      | 40 (0)                    | 10 (0)                     | 8 (0)             | 1           |
| 10       | 25 (-1)                      | 50 (+1)                   | 5 (-1)                     | 10 (+1)           | 1           |
| 11       | 65 (+1)                      | 50 (1)                    | 15 (+1)                    | 6 (-1)            | 1           |
| 12       | 65 (+1)                      | 30 (-1)                   | 5 (-1)                     | 6 (-1)            | 1           |
| 13       | 65 (+1)                      | 30 (-1)                   | 5 (-1)                     | 10 (+1)           | 1           |
| 14       | 65 (+1)                      | 30 (-1)                   | 5 (+1)                     | 6 (-1)            | 1           |
| 15       | 65 (+1)                      | 30 (-1)                   | 15 (+1)                    | 10 (+1)           | 1           |
| 16       | 65 (+1)                      | 50 (+1)                   | 5 (-1)                     | 10 (+1)           | 1           |
| 17       | 45 (0)                       | 40 (0)                    | 5 (-1)                     | 8 (0)             | 1           |
| 18       | 45 (0)                       | 30 (-1)                   | 10 (0)                     | 8 (0)             | 1           |
| 19       | 45 (0)                       | 40 (0)                    | 10 (0)                     | 6 (-1)            | 1           |
| 20       | 25 (-1)                      | 30 (-1)                   | 15 (+1)                    | 10 (+1)           | 1           |
| 21       | 65 (+1)                      | 50 (+1)                   | 5 (-1)                     | 6 (-1)            | 1           |
| 22       | 45 (0)                       | 40 (0)                    | 10 (0)                     | 8 (0)             | 1           |
| 23       | 25 (-1)                      | 30 (-1)                   | 5 (-1)                     | 6 (-1)            | 1           |
| 24       | 65 (+1)                      | 40 (0)                    | 10 (0)                     | 8 (0)             | 1           |
| 25       | 25 (-1)                      | 50 (+1)                   | 15 (+1)                    | 6 (-1)            | 1           |



۳-۱- چگالی ذره‌ای پلت ضایعات سیب

بیشترین مقدار چگالی ذره‌ای ( $3329/87 \text{ kg/m}^3$ ) در پلت‌سازی از ضایعات سیب درختی در دمای مواد خام ورودی  $25^\circ\text{C}$ ، زمان آسایش تنش 5 s، محتوای رطوبتی 30٪ و قطر قالب 10 mm و کمترین مقدار آن ( $436/42 \text{ kg/m}^3$ ) در دمای مواد خام ورودی  $25^\circ\text{C}$ ، زمان آسایش تنش 5 s، محتوای رطوبتی 50٪ و قطر قالب 6 mm به دست آمد. جدول 3 نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دمای مواد خام ورودی، زمان آسایش تنش، محتوای رطوبتی و قطر قالب را بر مقدار چگالی ذره‌ای پلت از ضایعات سیب درختی نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر متغیر مستقل دمای مواد خام ورودی، محتوای رطوبتی و قطر قالب در سطح 1٪ بر مقدار چگالی پلت معنادار بود و پارامترهای دیگر اثر معناداری بر چگالی پلت نداشت. همچنین اثر متقابل دمای مواد خام ورودی  $\times$  محتوای رطوبتی در سطح 5٪ و اثر متقابل دمای مواد خام ورودی  $\times$  قطر قالب و محتوای رطوبتی  $\times$  قطر قالب در سطح 1٪ بر مقدار چگالی معنی‌دار بود. مقادیر p-Value نشان دهنده این بود که مدل از نظر آماری معنی‌دار می‌باشد و هر چه مقدار F بیشتر باشد به این مفهوم است که بسیاری از تغییرات در پاسخ را می‌توان توسط مدل رگرسیون پیش‌بینی کرد و مقدار p-Value، بزرگ بودن مقدار F را تأیید می‌کند. هرچه این مقدار کمتر بدست می‌آید نشان‌دهنده این است که اختلاف معنی‌داری میان سطوح وجود دارد و همین اختلاف در متغیر پاسخ تأثیرگذار می‌باشد. عامل عدم برازش مربوط به داده‌های اطراف مدل برازش شده است و اگر مقدار آن معنی‌دار شود به این مفهوم است که مدل داده‌های آزمایش را به خوبی برازش نمی‌کند.

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ پلت تولیدشده از ضایعات میوه سیب.

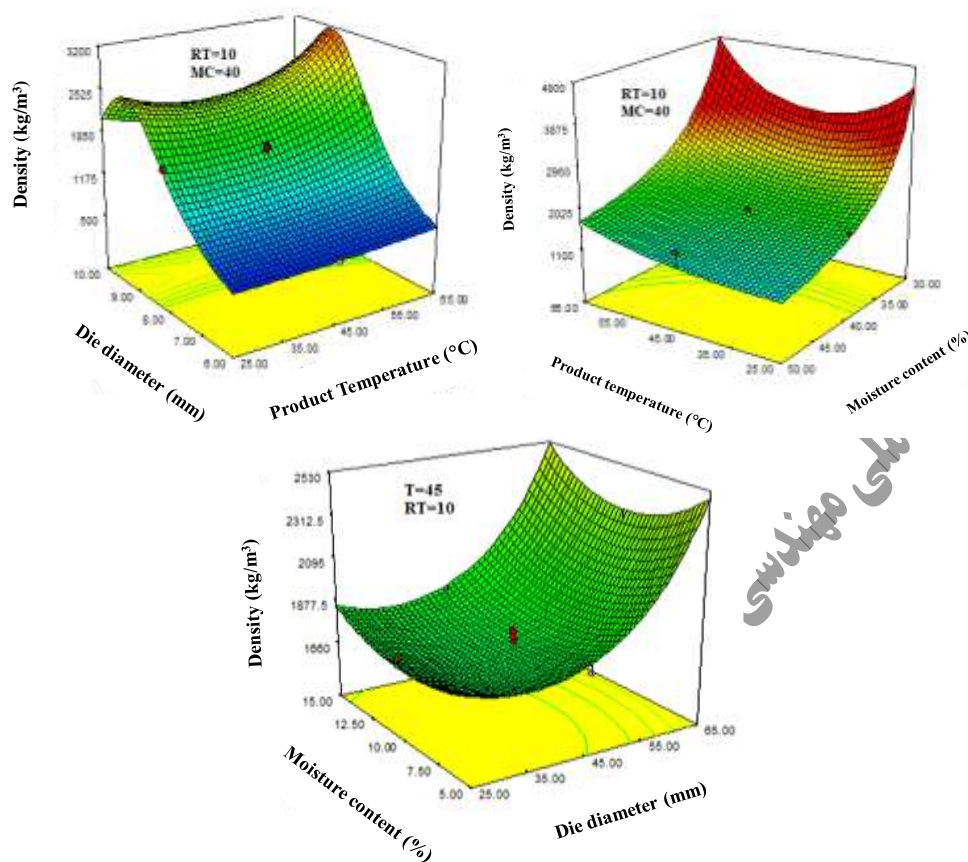
**Table 1. The analysis of variance of independent variables on response variables of pellets produced from apple fruit waste.**

| Source of variation        | p-Values         |                      |           |
|----------------------------|------------------|----------------------|-----------|
|                            | Particle density | compressive strength | Shrinkage |
| Model                      | <0.0001**        | 0.0027**             | <0.0001** |
| Material temperature (A)   | 0.0045**         | 0.0029**             | <0.0001** |
| Stress relaxation time (B) | 0.5268           | 0.0307*              | 0.1655    |
| Moisture content (C)       | <0.0001**        | 0.0009**             | <0.0001** |
| Die diameter (D)           | <0.0001**        | 0.2683               | 0.0073**  |
| A×B                        | 0.9128           | 0.7608               | 0.2125    |
| A×C                        | 0.012*           | 0.0045**             | <0.0001** |
| A×D                        | 0.0044**         | 0.0025**             | 0.0305*   |
| B×C                        | 0.8433           | 0.9159               | 0.2102    |
| B×D                        | 0.4902           | 0.7217               | 0.7297    |
| C×D                        | <0.0001**        | 0.3225               | 0.001**   |
| A <sup>2</sup>             | 0.2346           | 0.4498               | 0.0027**  |
| B <sup>2</sup>             | 0.5607           | 0.8990               | 0.5639    |
| C <sup>2</sup>             | 0.4743           | 0.4443               | 0.0006**  |
| D <sup>2</sup>             | <0.0001**        | 0.7003               | 0.098     |
| Lack of Fit (p-Value)      | <0.0001**        | 0.1296               | 0.01**    |

\*\* Highly significant at 1% level; \* Significant at 5% level



شکل ۲ اثرات متقابل دمای مواد خام ورودی × محتوای رطوبتی، دمای مواد خام ورودی × قطر قالب و محتوای رطوبتی × قطر قالب را بر مقدار چگالی ذره‌ای پلت‌های تشکیل شده از ضایعات سیب را نشان می‌دهد.



**Figure 2- Interaction effect of different variables on particle density of plates produced from apple wastes (RT= stress relaxation time, MC= moisture content, D= die diameter and T= product temperature)**

شکل ۲- اثرات متقابل متغیرهای مختلف بر چگالی ذره‌ای پلت‌های ساخته شده از ضایعات میوه سیب (RT= زمان آسایش تنش، MC= محتوای رطوبتی، D= قطر قالب و T= دمای مواد خام ورودی)

همانطور که در شکل ۲ مشاهده شد با افزایش هم‌زمان دمای مواد خام ورودی و کاهش محتوای رطوبتی مقادیر چگالی ذره‌ای افزایش یافت. زیرا با افزایش مواد خام ورودی و کاهش محتوای رطوبتی، حرارت بالا رفته و سبب افزایش تنش‌های حرارتی و کاهش تخلخل شده و در نتیجه چگالی ذره‌ای افزایش یافت. (Fasina et al., 2008) در بررسی خواص فیزیکی پلت تولید شده از پوست بادام زمینی به این نتیجه رسیدند که با افزایش رطوبت از ۴ به ۲۱ درصد چگالی توده پلت‌های تولید شده از پوست بادام زمینی از ۶۴۰ به ۶۰۰ kg/m<sup>3</sup> کاهش یافت که این نتایج با نتیجه پژوهش حاضر همخوانی دارد. (Rezaeifar, 2007) بررسی خواص فیزیکی کود گاو پلت شده را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند با افزایش میزان رطوبت از ۶ به ۲۰ درصد چگالی ذره به طور خطی از ۱۰۹۵ به ۱۵۸۳ kg/m<sup>3</sup> افزایش می‌یابد. با افزایش هم‌زمان دمای مواد خام ورودی و قطر قالب مقادیر چگالی ذره‌ای افزایش یافت. با افزایش دمای مواد خام ورودی و قطر قالب، مواد نرم‌تر شده و مقدار زیادی مواد درون قالب قرار گرفته در نتیجه چگالی ذره‌ای افزایش یافت. با افزایش دمای ورودی مواد خام، با اعمال حرارت‌های بالا، تنش‌های داخلی افزایش می‌یابد و خشک شدن سریع منجر به تثبیت مکانیکی سطح می‌شود و باعث افزایش چگالی توده می‌شود (Lewicki et al., 2004). با افزایش هم‌زمان قطر قالب و کاهش محتوای رطوبتی مقادیر چگالی ذره‌ای افزایش یافت. زیرا با افزایش قطر قالب و کاهش محتوای رطوبتی، مقدار مواد جامد موجود در پلت بیشتر شده و فضای خالی بین ذرات کم شده در نتیجه چگالی ذره‌ای افزایش یافت.

معادله‌های نهایی بر مبنای متغیرهای مستقل واقعی برای پیش‌بینی مقدار چگالی ذره‌ای از پلت‌سازی از ضایعات سیب به صورت زیر است:

$$(\rho)^{-1} = 7.024 \times 10^{-3} + 1.031 \times 10^{-5} T + 1.470 \times 10^{-4} MC - 2.234 \times 10^{-3} D - 3.15 \times 10^{-7} T \times MC + 1.825 \times 10^{-6} T \times D - 9.145 \times 10^{-6} MC \times D + 1.381 \times 10^{-4} D^2 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.9862$$

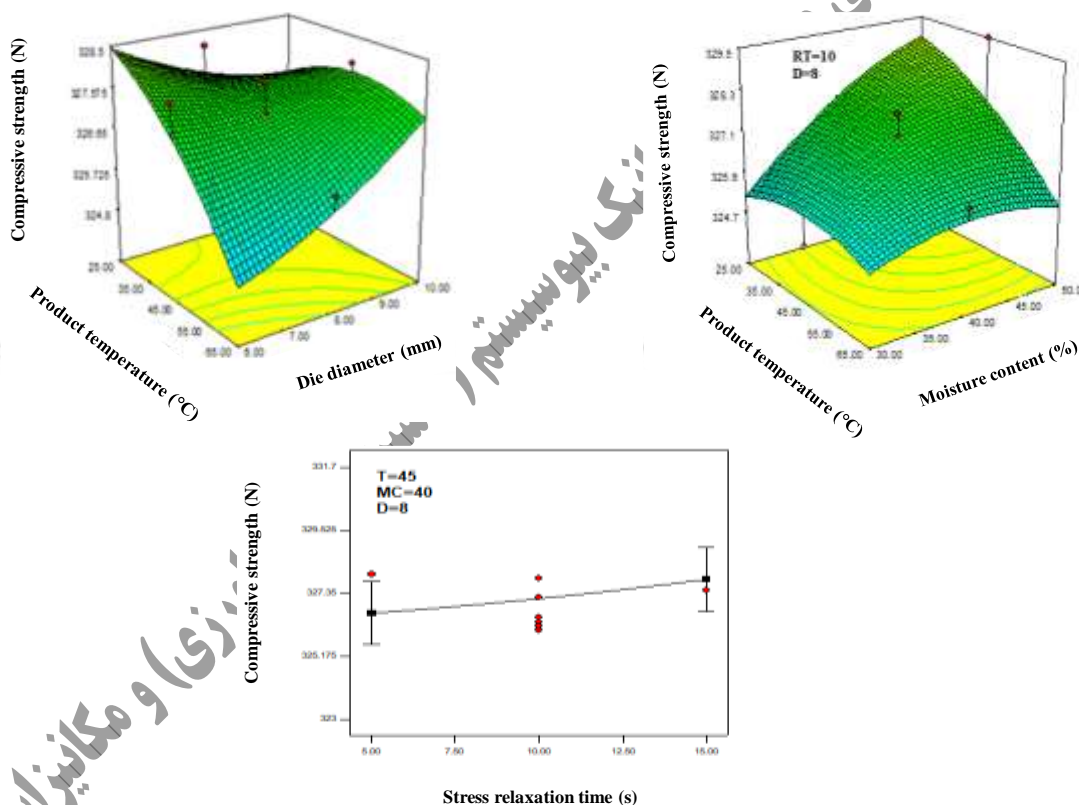
که در رابطه (7) T دمای مواد خام ورودی (°C)، RT زمان آسایش تنش (S)، MC محتوای رطوبتی (%). و D قطر قالب (mm) می‌باشد.



۳-۲- مقاومت فشاری پلت‌های ساخته شده از ضایعات سیب

بیشترین مقدار مقاومت فشاری (۳۳۱/۶۵ N) در پلت‌سازی از ضایعات میوه سیب در دمای مواد خام ورودی ۲۵ °C، زمان آسایش تنش ۱۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰٪ و قطر قالب ۶ mm و کمترین مقدار آن (۳۲۳/۰۷۴ N) در دمای مواد خام ورودی ۶۵ °C، زمان آسایش تنش ۵ s، محتوای رطوبتی ۳۰٪ و قطر قالب ۶ mm به دست آمد.

جدول ۳ نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دمای مواد خام ورودی، زمان آسایش تنش، محتوای رطوبتی و قطر قالب را بر مقدار مقاومت فشاری پلت از ضایعات میوه سیب نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر متغیر مستقل دمای مواد خام ورودی و محتوای رطوبتی در سطح ۱٪ و اثر متغیر مستقل زمان آسایش تنش در سطح ۵٪ بر مقدار مقاومت فشاری پلت‌های ساخته شده از ضایعات سیب درختی معنادار بود و پارامترهای دیگر اثر معناداری بر مقاومت فشاری پلت نداشت و همچنین اثر متقابل دمای مواد خام ورودی × محتوای رطوبتی و دمای مواد خام ورودی × قطر قالب در سطح ۱٪ بر مقدار مقاومت فشاری پلت معنادار بود. مقدار p-Value عامل عدم برازش برای مقاومت فشاری ۰/۱۲۹۶ به دست آمد و نشان‌دهنده‌ی این بود که مدل پیش بینی شده توسط روش سطح پاسخ به خوبی داده‌های واقعی ضریب را برازش می‌کند. شکل ۳ اثرات متقابل دمای مواد خام ورودی × قطر قالب، دمای مواد خام ورودی × محتوای رطوبتی و اثر مستقل متغیر زمان آسایش تنش را بر مقدار مقاومت فشاری پلت‌های ساخته شده از ضایعات سیب درختی نشان می‌دهد.



شکل ۳- اثرات متقابل و مستقل متغیرهای مختلف بر مقاومت فشاری پلت‌های تشکیل شده از ضایعات میوه سیب (RT= زمان آسایش تنش، MC= محتوای رطوبتی، D= قطر قالب و T= دمای مواد خام ورودی)

**Figure 3- Interaction effect of different variables on compressive strength of plates produced from apple wastes (RT= stress relaxation time, MC= moisture content, D= die diameter and T= product temperature)**

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با کاهش هم زمان دمای مواد خام ورودی و افزایش محتوای رطوبتی، مقادیر مقاومت فشاری افزایش یافت. زیرا با کاهش مواد خام ورودی و افزایش محتوای رطوبتی، ساختار مواد تشکیل دهنده تفاله سیب حفظ شده و مواد نرم شده و بهم چسبیده‌تر و تشکیل پیوندهای محکم‌تر و در نتیجه مقاومت فشاری افزایش یافت. با کاهش هم زمان دمای مواد خام ورودی و افزایش محتوای رطوبتی، مقادیر مقاومت فشاری افزایش یافت. زیرا با کاهش مواد خام ورودی و افزایش قطر قالب، مواد زیادی وارد قالب شده و کاهش تخلخل باعث افزایش مقاومت فشاری شد و همچنین با افزایش زمان آسایش تنش مقاومت فشاری زیاد شد. زیرا با افزایش زمان ماندگاری مواد داخل قالب،



## یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



فشرده‌گی بیشتر شده و مواد بهم چسبیده‌تر و تخلخل کاهش یافته و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری شد. (Monedero et al., 2015) با بررسی اثر ترکیبات مواد، محتوای رطوبتی و فشار قطر قالب بر روی کیفیت پلت‌های ساخته شده از ترکیبات خاک اره صنوبر و کاج دریافتند که با افزایش قطر قالب از ۱۷ تا ۲۱ mm مقاومت فشاری و چگالی پلت بهبود می‌یابد. همچنین قطر قالب در ۲۱ mm دارای چگالی توده و مقاومت بالایی دارد. معادله نهایی بر مبنای متغیرهای مستقل واقعی برای پیش بینی مقدار مقاومت فشاری پلت‌سازی از ضایعات میوه سیب در رابطه (۸) ارائه شده است:

$$(Force)^{-1} = 3.194 \times 10^{-3} - 4.272 \times 10^{-7} T - 1.042 \times 10^{-6} RT - 7.550 \times 10^{-6} MC + 4.042 \times 10^{-8} T \times MC - 2.199 \times 10^{-7} T \times D$$

$$R^2 = 0.8133 \quad (8)$$

### ۳-۳- ارزیابی چروکیدگی

بیشترین مقدار چروکیدگی (۵۹٪/۶۳۷) در پلت‌سازی از ضایعات میوه سیب در دمای مواد خام ورودی ۲۵ °C، زمان آسایش تنش ۱۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰٪ و قطر قالب ۶ mm و کمترین مقدار آن (۶٪/۵۶۱) در دمای مواد خام ورودی ۶۵ °C، زمان آسایش تنش ۵ s، محتوای رطوبتی ۳۰٪ و قطر قالب ۶ mm به دست آمد. جدول ۳ نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دمای مواد خام ورودی، زمان آسایش تنش، محتوای رطوبتی و قطر قالب را بر مقدار چروکیدگی تولید پلت از ضایعات میوه سیب نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر متغیرهای مستقل دمای مواد خام ورودی، محتوای رطوبتی و قطر قالب در سطح ۱٪ بر مقدار چروکیدگی پلت‌های ساخته شده از ضایعات سیب درختی معنادار بود و پارامترهای دیگر اثر معناداری بر چروکیدگی پلت نداشت و همچنین اثر متقابل دمای مواد خام ورودی × محتوای رطوبتی و محتوای رطوبتی × قطر قالب در سطح ۱٪ و اثر متقابل دمای مواد خام ورودی × قطر قالب در سطح ۵٪ بر مقدار چروکیدگی پلت معنادار بود. شکل ۴ اثرات متقابل دمای مواد خام ورودی × محتوای رطوبتی، دمای مواد خام ورودی × قطر قالب و محتوای رطوبتی × قطر قالب بر مقدار چروکیدگی پلت‌های ساخته شده از ضایعات میوه سیب را نشان می‌دهد.

Madiouli et al. (2007) تعیین روش برای تغییرات تخلخل با استفاده از منحنی‌های چروکیدگی از مواد قابل انعطاف مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پلت‌های ساخته شده از مواد با قطر بیشتر متأثر از تخلخل ضعیف است، بنابراین در طول خشک شدن تغییرات حجم بیشتری رخ می‌دهد. انقباض بیشتر در دماهای بالاتر به دلیل انتقال سریع‌تر جرم ایجاد می‌شود که فضای آزاد باعث ایجاد تنش در ساختار پلت می‌شود و بنابراین پلت با چین و چروک بیشتر تولید می‌شود (Kurozawa et al., 2012). معادله‌های نهایی بر مبنای متغیرهای مستقل واقعی برای پیش بینی مقدار مقاومت فشاری از پلت‌های ساخته شده از ضایعات میوه سیب در رابطه (۹) است:

$$(Shrinkage)^{-1} = 0.335 + 1.753 \times 10^{-3} T - 0.0169 MC + 0.0181 D - 8.55 \times 10^{-5} T \times MC - 9.907 \times 10^{-5} T \times D + 3.381 \times 10^{-4} MC \times D + 3.695 \times 10^{-3} T^2 + 1.787 \times 10^{-4} MC^2$$

$$R^2 = 0.9837 \quad (9)$$

### ۳-۴- بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ

برای بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ از نرم افزار Desing Expert 7.0.0 استفاده شد. در این نرم افزار نقاط بهینه و شاخص مطلوبیت بر اساس بیشترین چگالی ذره‌ای و مقاومت فشاری و کمترین چروکیدگی انتخاب شد. در جدول ۴ نتایج بهینه‌سازی فرآیند تولید پلت‌سازی از ضایعات میوه سیب با روش سطح پاسخ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در پلت‌سازی، اولین پاسخ بهینه برای تولید پلت از ضایعات سیب درختی دارای شاخص مطلوبیت ۰/۷۳۴ بود. در این نقطه، دمای مواد خام ورودی ۶۴/۹۵ °C، زمان آسایش تنش ۱۵ s، محتوای رطوبتی ۳۰٪ و قطر قالب ۹/۶۶ mm به دست آمد. نقطه بهینه، مقدار پاسخ‌های چگالی ذره‌ای ۳۳۲۹/۸۸ kg/m<sup>3</sup>، مقاومت فشاری ۳۲۷/۲۴۶ N و چروکیدگی ۸/۴۳۸٪ حاصل شد.

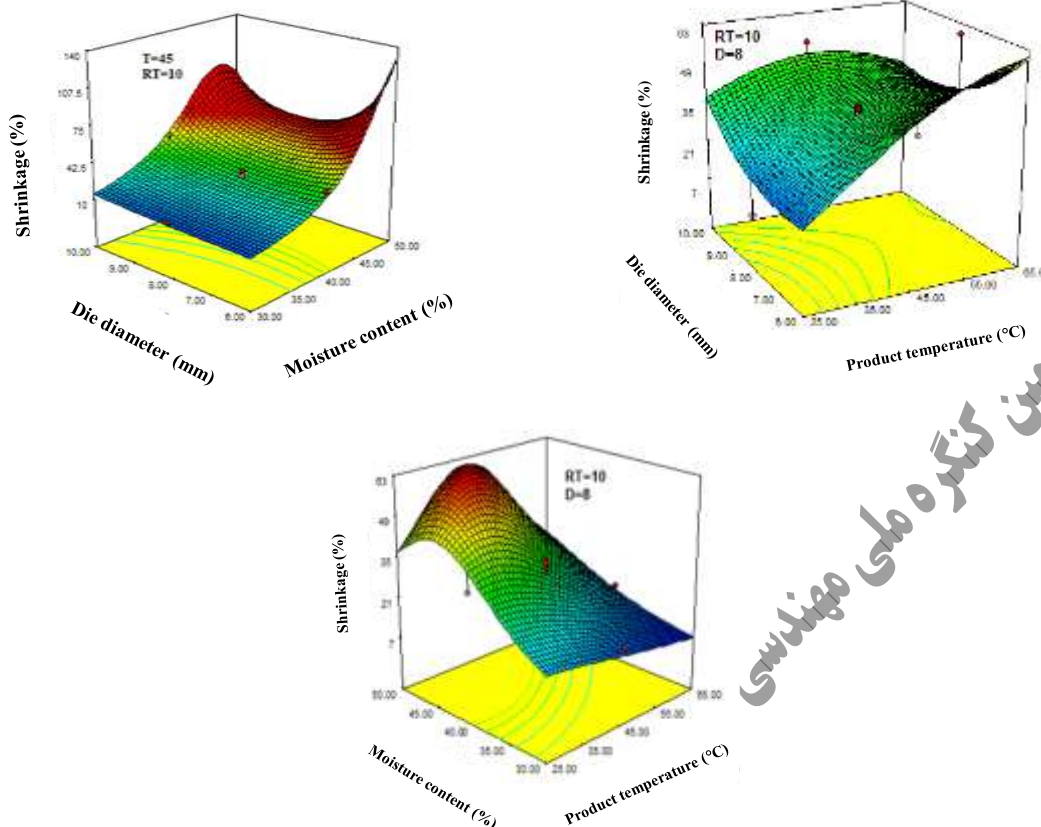


Figure 4- Interaction effect of different variables on shrinkage of plates produced from apple wastes (RT= stress relaxation time, MC= moisture content, D= die diameter and T= product temperature)  
شکل ۴- اثرات متقابل متغیرهای مختلف بر چروکیدگی پلت‌های ساخته شده از ضایعات میوه سیب (RT= زمان آسایش تنش، MC= محتوای رطوبتی، D= قطر قالب و T= دمای مواد خام ورودی)

جدول ۴- نتایج بهینه سازی فرآیند تولید پلت از ضایعات میوه سیب به روش سطح پاسخ.

Figure 4- Optimization results of pellet production process from apple waste using response surface method.

| شماره جواب | دمای مواد خام ورودی (°C) | زمان آسایش تنش (s) | محتوای رطوبتی (%) | قطر قالب (mm) | چگالی (kg/m <sup>3</sup> ) | مقاومت فشاری (N) | چروکیدگی (%) | شاخص مطلوبیت |
|------------|--------------------------|--------------------|-------------------|---------------|----------------------------|------------------|--------------|--------------|
| ۱          | ۶۴/۹۵                    | ۱۵                 | ۳۰                | ۹/۶۶          | ۳۳۲۹/۸۸                    | ۳۲۷/۲۴           | ۸/۴۳         | ۰/۷۳۴۵       |
| ۲          | ۶۴/۶۱                    | ۱۵                 | ۳۰                | ۹/۶۵          | ۳۳۳۰/۰۶                    | ۳۲۷/۲۴           | ۸/۵۱         | ۰/۷۳۲۳       |
| ۳          | ۶۴/۰۷                    | ۱۵                 | ۳۰                | ۹/۶۵          | ۳۳۳۰/۰۱                    | ۳۲۷/۲۱           | ۸/۶۳         | ۰/۷۲۹۱       |
| ۴          | ۶۵                       | ۱۴/۴۵              | ۳۰/۰۱             | ۹/۶۴          | ۳۳۳۰/۴۶                    | ۳۲۷/۱۴           | ۸/۴۲         | ۰/۷۲۸۵       |
| ۵          | ۶۵                       | ۱۵                 | ۳۰/۶۶             | ۹/۶۳          | ۳۳۲۹/۹۳                    | ۳۲۷/۲۸           | ۸/۷۷         | ۰/۷۲۸۵       |

شکل ۵ اثر متقابل دمای مواد خام ورودی و زمان آسایش تنش را بر اساس شاخص مطلوبیت نشان می دهد. مطابق شکل ۵ با افزایش هم- زمان دمای مواد خام ورودی و زمان آسایش تنش، شاخص مطلوبیت افزایش یافت. دمای مواد خام ورودی بیشترین تاثیر را در شاخص مطلوبیت داشت زیرا باعث ایجاد حرارت شده و تنش‌های رطوبتی در مواد ایجاد می کند.

Zafari, (2013) بهینه‌سازی مصرف انرژی ویژه در فرآیند اکسترون کود کمپوست را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شاخص



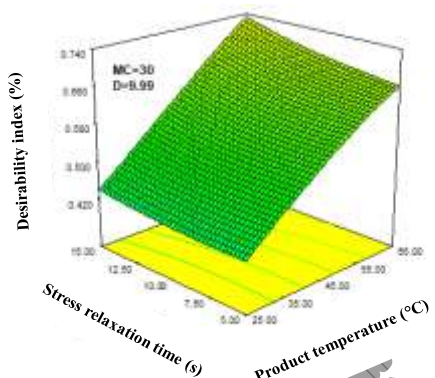
## یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



مطلوبیت ۰/۸۳ شد. نقاط بهینه برای کمترین انرژی در محتوای رطوبتی ۰/۴۰، سرعت پیستون ۶ mm/s، اندازه ذرات ۰/۳ mm و طول قالب ۱۰ mm بدست آمد.

### نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر محتوای رطوبتی مواد خام، دمای مواد خام ورودی به قالب، قطر قالب و زمان آسایش تنش بر مقادیر چگالی ذره‌ای، استحکام فشاری و چروکیدگی پلت فشرده سبب مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین شرایط بهینه فرآیند پلت‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ به منظور دستیابی به بهترین خواص فیزیکی و مکانیکی تعیین شد. در شرایط بهینه فرآیند پلت‌سازی از ضایعات سیب، مقادیر متغیرهای پاسخ برای پلت‌سازی از ضایعات سیب، چگالی ذره‌ای  $3329/88 \text{ kg/m}^3$ ، مقاومت فشاری  $327/246 \text{ N}$  و چروکیدگی  $8/438$  حاصل شد. در این شرایط دمای مواد خام ورودی  $64/95 \text{ }^\circ\text{C}$ ، زمان آسایش تنش ۱۵ s، محتوای رطوبتی ۰/۳۰ و قطر قالب ۹/۶۶ mm به دست آمد.



شکل ۵- اثر متقابل دمای مواد خام ورودی و زمان آسایش تنش بر شاخص مطلوبیت نقطه بهینه پلت‌سازی از ضایعات میوه سیب (MC=محتوای رطوبتی و D=قطر قالب)

**Figure 5- Interaction effect of material temperature and stress relaxation time on desirability index of pellets produced from apple wastes (MC= moisture content, D= die diameter)**

### مراجع

- Adapa, P.K., Tabil, L.G. and Schoenau, G.J. (2013). Factors affecting the quality of biomass pellet for biofuel and energy analysis of pelleting process. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6(2): 1-12.
- Ahmed, O.H., Husni, M.H.A., Noor, A.A. & Hanafi, M.M. (2002). The removal and burning of pineapple residue in pineapple cultivation on tropical peat: an economic viability comparison. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 25(1), 47-52.
- AOAC. 1990. Official methods of analysis (16th ed.). Arlington, VA, USA
- ASAE Standards. 2003. ASAE S358.2: Moisture measurement- Forages (50th ed.). St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers.
- Beck, S. M., Sabarez, H., Gaukel, V., & Knoerzer, K. (2014). Enhancement of convective drying by application of airborne ultrasound – a response surface approach. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21: 2144–2150.
- Fasina, O.O. 2008. Physical properties of peanut hull pellets. *Bioresource Technology*, 99(5), 1259-1266.
- Kurozawa, L.E., Hubinger, M.D. & Park, K.J. (2012). Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. *Journal of Food Engineering*, 108(1): 43-50.
- Lewicki, P.P. & Jakubczyk, E. (2004). Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering*, 64(3), pp.307-314.
- Li, J.W., Ding, S.D. & Ding, X.L. (2007). Optimization of the ultrasonically assisted extraction of polysaccharides from *Zizyphus jujuba* cv. jinsixiaozao. *Journal of food engineering*, 80(1): 176-183.
- Madiouli, J., Lecomte, D., Nganya, T., Chavez, S., Sghaier, J. & Sammouda, H. (2007). A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials. *Drying Technology*, 25(4): 621-628
- Mahapatra, A.K., Harris, D.L., Durham, D.L., Lucas, S., Terrill, T.H., Kouakou, B. & Kannan, G. (2010). Effects of moisture change on the physical and thermal properties of sericea lespedeza pellets. *International Agricultural Engineering Journal*, 19(3), 23-29.
- Mani, S., Tabil, L.G. & 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.
- Mavaddati, S., Kianmehr, M.H., Allahdadi, I. & Chegini, G.R. (2010). Preparation of pellets by urban waste compost. *International Journal Environmental Research*, 4: 665–672.
- Monedero, E., Portero, H. & Lapuerta, M. (2015). Pellet blends of poplar and pine sawdust: Effects of material composition, additive, moisture content and compression die on pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 132: 15-23.
- Rezaeifar, J. (2007). Investigating the Physical Properties of Pellet Cow Manure. MSc Thesis of Agricultural Technical Engineering, Tehran University, Abourayhan Campus.



- Roeper, H., Khan, S., Koerner, I. & Stegmann, R. (2005). Low-tech options for chicken manure treatment and application possibilities in agriculture. In Proceedings Sardinia, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium (pp. 3-7).
- Rouissi, T., Mahmoudi, A., Tyagi, R.D., Brar, S.K., PreVost, D., & Surampalli, R.Y. (2013). Optimisation of spray drying by response surface methodology for the production of *Sinorhizobium meliloti* powder formulation by using starch industry wastewater. *Biosystems Engineering*, 114(3): 334-343.
- Schultz, E.L., Mazzuco, M.M., Machado, R.A.F., Bolzan, A., Quadri, M.B. & Quadri, M.G.N. (2007). Effect of pre-treatments on drying, density and shrinkage of apple slices. *Journal of Food Engineering*, 78(3): 1103-1110.
- Supriya, P., Rajni, B. & Rana, A.C. (2012). Pelletization techniques: a literature review. *International Research Journal of Pharmacy*, 3(3), 43-47.
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P.D., Hartmann, H. & Böhm, T. (2006). Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 964-972.
- Terrill, T.H., Mosjidis, J.A., Moore, D.A., Shaik, S.A., Miller, J.E., Burke, J.M., Muir, J.P. & Wolfe, R. (2007). Effect of pelleting on efficacy of sericea lespedeza hay as a natural dewormer in goats. *Veterinary Parasitology*, 146(1-2), 117-122.
- Waste management law. (2004). Agricultural wastes, Article 2, Section B, No. 4. The law passed by the Islamic Consultative Parliament.
- Wan, M.A. & Zainuddin, Z. (2013). Pineapple leaf fibre (PALF): From Western to wealth. *JURUTERA Bulletin*, 18-20.
- Zafari, A. & Kianmehr, M.H. (2013). Factors affecting mechanical properties of biomass pellet from compost. *Environmental Technology*, 35(4): 478-486.
- Zafari, A. (2013). Optimization of specific energy consumption in composting extrusion process by response surface method. MSc Thesis of Agricultural Technical Engineering, Tehran University, Abourayhan Campous.