

Optimization of Tablet Making Apparatus Operation for Production of Tomato Tablet Using Response Surface Method

REZA TORKASHVAND¹, REZA AMIRI CHAYJAN^{2*}, ALI GHASEMI³

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
(Received: Oct. 23, 2019- Revised: Nov. 22, 2010- Accepted: Dec. 22, 2019)

ABSTRACT

In this study, the effect of effective variables of moisture content, particle size, type of adhesive and tablet shape on the qualitative properties (difference of color indices ΔL^* , Δa^* and Δb^*), physical (unit density and shrinkage) and mechanical (diffusion force) indices of compressed tablets made from tomato powder were studied. Independent variables were including three levels of particle size of tomato powder (particles smaller than 0.3 mm, particles ranging from 0.3 to 0.75 mm and particles larger than 0.75 mm), three levels of moisture content (18, 36 and d.b. 54%), three forms of compressed pills (spherical, cylindrical and cubic), three types of adhesive (55% fructose syrup, water and sugar). For optimization, the surface response and Di-optimal method were used. The results showed that optimum spot was obtained for compressed pills consisting of tomato powder with a moisture content of %33.4 db, particle size of fructose 0.3 mm, and cylindrical tablet form, dried in oven at 60 ° C. Under these conditions, the desirability index was 0.826, and the optimal value of the independent variables ΔL^* , Δa^* and Δb^* (the difference of color indices with fresh tomatoes), penetration force, unit density and shrinkage were 35.89, 15.6, 23.23, 267.2 N, 2299 kg/m³ and %12.2, respectively.

Keywords: Optimization, Tomato compressed tablets, Moisture content, Particle size.

بهینه‌سازی عملکرد دستگاه قرص‌ساز غیر پیوسته برای تولید قرص گوجه‌فرنگی به روش سطح پاسخ

رضا ترکاشوند^۱، رضا امیری چایجان^{۲*}، علی قاسمی^۳

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۹/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۰/۹

چکیده

در این پژوهش اثر متغیرهای مؤثر محتوای رطوبتی، اندازه ذرات، نوع ماده چسبان و شکل قرص بر خواص کیفی (اختلاف شاخص‌های رنگی ΔL^* ، Δa^* و Δb^*)، فیزیکی (چگالی واحد و چروکیدگی) و مکانیکی (نیروی نفوذ) قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی مورد مطالعه قرار گرفتند. متغیرهای مستقل شامل سه سطح اندازه ذرات پودر گوجه‌فرنگی (ذرات کوچک‌تر از ۰/۳ mm، ذرات بین ۰/۳ تا ۰/۷۵ mm و ذرات بزرگتر از ۰/۷۵ mm)، سه سطح محتوای رطوبتی (۱۸، ۳۶ و ۵۴/d.b.)، سه شکل قرص فشرده (کروی، استوانه‌ای و مکعبی) و سه نوع ماده چسبان (شربت فروکتوز ۵۵ درصد، آب و شکر) بودند. برای بهینه‌سازی از روش سطح پاسخ و طرح دی-اوپتیمال استفاده شد. نتایج نشان داد که نقطه بهینه برای قرص‌های فشرده شده متشکل از پودر گوجه‌فرنگی با محتوای رطوبتی ۳۳/۴ % d.b.، اندازه ذرات ۰/۳ mm، نوع ماده چسبان فروکتوز و شکل قرص استوانه‌ای که در آن در دمای ۶۰°C خشک‌شده بودند به دست آمد. تحت این شرایط، شاخص مطلوبیت ۰/۸۲۶ محاسبه شد و مقدار بهینه متغیرهای مستقل ΔL^* ، Δa^* و Δb^* ، نیروی نفوذ، چگالی واحد و چروکیدگی به ترتیب برابر با ۳۵/۸۹، ۵۱/۶، ۲۳/۲۳، ۲۶۷/۲ N، ۲۲۹۹ kg/m³ و ۲/۱۲ درصد به دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، قرص فشرده گوجه‌فرنگی، محتوای رطوبتی، اندازه ذرات.

مقدمه

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) یکی از بیشترین سبزی‌های مصرفی در سراسر جهان و یکی از باارزش‌ترین منابع تأمین مواد معدنی و ویتامین‌ها در رژیم غذایی انسان است (Martí et al., 2018). سالانه حدود ۱۷۰ میلیون تن گوجه‌فرنگی در دنیا تولید می‌شود که کشور ایران با تولید ۵/۹۷ میلیون تن در بین تمامی کشورهای دنیا رتبه‌ی هفتم را به خود اختصاص داده است (FAO, 2017). گوجه‌فرنگی یکی از محصولات مهم کشاورزی است که برای سلامت انسان‌ها مفید است و حاوی مواد مغذی مهم در سلامت انسان شامل کارتنوئیدها از جمله لیکوپن (فراوان ترین کارتنوئید) اسید آسکوربیک (ویتامین C)، ویتامین E، فولیک اسید و آنتی‌اکسیدان‌ها است که باعث کاهش ابتلا به انواع مختلف سرطان به ویژه سرطان پروستات و بیماری‌های قلبی و عروقی می‌شود (Demiray et al., 2013). با توجه به اهمیت این محصول در رژیم غذایی انسان، تقاضا برای مصرف گوجه‌فرنگی روز به روز در حال افزایش است. گوجه‌فرنگی نیز همانند سایر محصولات کشاورزی فسادپذیر است، بنابراین باید یا سریعاً مصرف شود و یا برای مصارف بعدی تحت شرایط کنترل‌شده فرآوری و نگهداری شود. خشک کردن یکی از این روش‌های مطلوب نگهداری گوجه‌فرنگی است. در کشورهای در حال توسعه، یکی از اهداف

خشک کردن گوجه‌فرنگی، کاهش ضایعات پس از برداشت است (And and Barrett, 2006). فرآورده‌های گوجه‌فرنگی خشک‌شده شامل گوجه‌فرنگی نصف شده، ورقه‌های گوجه‌فرنگی و پودر گوجه‌فرنگی در مقایسه با سایر محصولات گوجه‌فرنگی با توجه به خواص مناسب غذایی، دارای مصرف زیادی هستند. در میان فرآورده‌های گوجه‌فرنگی خشک‌شده، پودر گوجه‌فرنگی بازار خاص را در اختیار دارد. تولید پودر، یک روش جایگزین برای گسترش عمر مفید مواد غذایی است. پودر گوجه‌فرنگی دارای مزایای بسیاری از جمله ارزش تجاری بالا، مدیریت بهتر در بسته‌بندی و حمل و نقل آن، مخلوط شدن سریع با سایر مواد به منظور استفاده از تجهیزات فرآوری در کارخانه‌های صنایع غذایی می‌باشد. علاوه بر این، تولیدکنندگان مواد غذایی از پودر گوجه‌فرنگی به عنوان یک ماده افزودنی در بسیاری از محصولات غذایی، به ویژه، سوپ، غذای فوریه سس گوجه‌فرنگی استفاده می‌کنند (Liu et al., 2010). معمولاً پودر میوه خیلی خشک، رطوبت دوست (گیرنده رطوبت هوا یا نم‌گیر) و حجم زیادی دارد. بنابراین در طول ذخیره سازی، حمل و نقل و اداره آن نیازمند مراقبت ویژه و بسته بندی سنگین است؛ که هزینه را افزایش می‌دهد. برای غلبه بر این مشکلات، تراکم پودر میوه به شکل قرص یک روش منحصر به فرد است (Aziz et al., 2018). این روش

مطالعات انجام شده اثر متغیرهای مؤثر قرص سازی بر خصوصیات کیفی، فیزیکی و مکانیکی قرص های تولید شده از پودر گوجه-فرنگی به عنوان خوراک انسان بررسی نشده است. با توجه به مطالب گفته شده و اهمیت فراوری گوجه فرنگی، به طور کلی اهداف فاینپژوهش عبارتند از: بررسی اثر محتوای رطوبتی بر خواص کیفی، فیزیکی و مکانیکی قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه فرنگی و تعیین نقطه بهینه فرآیند تولید قرص گوجه فرنگی با توجه به متغیرهای اندازه ذرات، محتوای رطوبتی و نوع ماده چسبنده.

مواد و روش ها

آماده سازی پودر خشک کردن ورقه های گوجه فرنگی

گوجه فرنگی تازه (رقم متین) با قطر متوسط بین ۴ تا ۶ cm تهیه گردید. رطوبت اولیه گوجه فرنگی ها با استفاده از روش آن هوای داغ (سه نمونه ۱۰ گرمی در دمای °C ۶۰ به مدت ۴۸ ساعت) تعیین شد که مقدار آن برابر با $15/25 (g H_2O/g \text{ dry matter})$ به دست آمد (Marfil et al., 2008). به منظور تسریع در فرآیند خشک کردن، ابتدا پوست نازک گوجه فرنگی ها به شیوه غوطه وری در آب داغ با دمای حدود °C ۵۰ به مدت ۳۰ s به کمک دست جدا شدند و سپس نمونه ها به وسیله یک تیغ تیز در ضخامت های ۳ mm برش خوردند. ورقه های گوجه فرنگی روی فویل های آلومینیومی قرار گرفته و به وسیله یک خشک کن نیمه صنعتی به شیوه هوای گرم در دمای °C ۶۰ در سرعت هوای ۱ m/s خشک شدند. خشک شدن در شرایط دمایی بین ۵۰ تا °C ۶۰ مواد مغذی گوجه فرنگی به ویژه ویتامین ث و لیکوپین آن را به صورت قابل قبولی حفظ می کند (Purkayastha et al., 2013). فرآیند خشک کردن نمونه ها تا رسیدن محتوای رطوبتی آنها به زیر d.b. ۱۰٪، رطوبت مناسب جهت پودر کردن محصول، ادامه یافت.

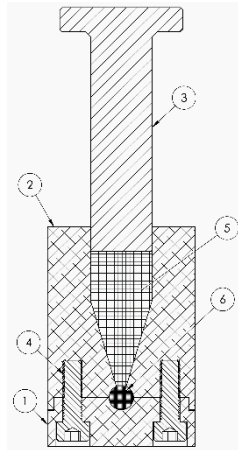
فرآیند پودر کردن

ورقه های خشک گوجه فرنگی با استفاده از یک دستگاه آسیاب خانگی (پاناسونیک، مدل MJ-M176P، ساخت مالزی) به مدت یک دقیقه آسیاب و پودر شدند. پس از اتمام فرآیند آسیاب کردن، به منظور مطالعه اثر توزیع اندازه ذرات (PS) بر کیفیت قرص های تولیدی، پودر گوجه فرنگی تهیه شده توسط الک های آزمایشگاهی در سه دسته (ذرات کوچکتر از ۰/۳ mm، ذرات بین ۰/۳ تا ۰/۷۵ mm و ذرات بزرگتر از ۰/۷۵ mm) طبقه بندی شدند. در نهایت پودرهای گوجه فرنگی تولید شده، داخل پلاستیک های مخصوص جمع آوری و برای انجام آزمایش ها نگهداری شدند.

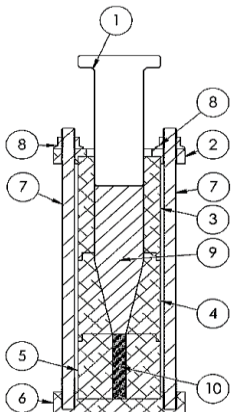
به کاهش حجم و همچنین سطح آن کمک می کند و باعث کاهش میزانتروپت پذیری می شود. متراکم کردن (فشرده سازی) پودر به قرص معمولاً در صنعت داروسازی برای تولید دوزهای خوراکی جامد مورد استفاده قرار می گیرد. اما کاربرد مشابه این نوع تکنیک، در صنایع غذایی هنوز کم است یا در مراحل اولیه توسعه است. خواص قرص به شدت وابسته به فرآیندهای تولید آن شامل فرآیند آماده سازی مواد اولیه (درجه بندی و پوست کندن)، خشک کردن و پودر کردن مواد، فرآیند رطوبت دهی به پودر تولید شده، فرآیند فشرده سازی و تولید قرص مرطوب و فرآیند خشک کردن و خنک کردن است (Ghasemi and Chayjan, 2018). داشتن دانش فنی در هر یک از فرآیندهای تولید قرص فشرده در طراحی مناسب تجهیزات فرآوری بسیار مهم است (Aziz et al., 2018). با توجه به اطلاعات کمی که در تولید قرص های غذایی وجود دارد، مطالعه پارامترهای اثرگذار بر فرآیندهای قرص سازی از اهمیت خاصی برخوردار است. تا کنون تحقیقاتی در مورد شکل گیری قرص از پودرهای پیتایا، انبه و میوه گواوا گزارش شده است (Zhang et al., 2012; Zea et al., 2013; Onget al., 2014). همچنین تحقیقی در مورد تولید قرص های غذایی حاوی پودر میوه های مختلف از جمله خرما، اسپیرولینا و نارنگی انجام شده است (Adiba et al., 2011).

پارامترهای فنی موجود در هر یک از سیستم های فشرده سازی از جمله مقدار فشار، نحوه اعمال فشار، زمان آسایش تنش، نوع مکانیزم برش قرص، اندازه و شکل قالب (مشخصات هندسی قالب)، نحوه تغذیه پودر و سرعت بارگذاری بر کیفیت قرص های تولیدی اثرگذار هستند (Zafari and Kianmehr, 2012). هم چنین فرآیند خشک کردن بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی، حرارتی و کیفی قرص های ساخته شده اثرگذار هستند. متغیرهای خوراک قرص به داخل قالب شامل محتوای رطوبتی مواد، اندازه، شکل و توزیع ذرات و ترکیبات مورد تغذیه می باشد (Ghasemi and Chayjan, 2018).

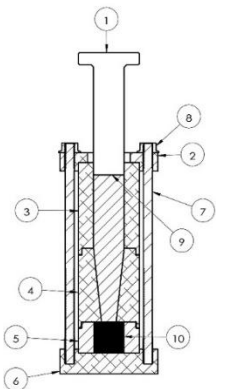
بهینه سازی و مدل سازی نقش مهمی در افزایش بازدهی فرآیندهای تولید دارند. روش سطح پاسخ از جمله متداول ترین روش های بهینه سازی است. این روش مجموعه ای از تکنیک های آماری و ریاضی است که می تواند با کمترین منابع و داده های کمی و طرح آماری مناسب، شرایط بهینه چندین متغیر را به صورت همزمان تعیین کند. عمده ترین کاربرد روش سطح پاسخ در صنعت هنگامی است که چندین متغیر بر ویژگی های محصول و یا فرآیند اثرگذار هستند (Zarrin and Amiri, 2016). با توجه به تحقیقات انجام شده، تا کنون در هیچ یک از این



شکل ۱- نمای شماتیکی برش خورده از قالب تشکیل قرص های کروی شکل (۱- فک پایینی (قالب تشکیل نیم کره پایینی)، ۲- فک بالایی (ورودی مواد خام، بخش پیش تراکم و قالب تشکیل نیم کره بالایی)، ۳- پیستون، ۴- پیچ نگهدارنده، ۵- مواد خام و ۶- قرص کروی تشکیل شده (Ghasemi and Chayjan, 2018))



شکل ۲- نمای شماتیکی برش خورده از قالب تشکیل قرص های استوانه ای شکل (نمای برش خورده): ۱- پیستون، ۲- تکیه گاه بالایی، ۳- سیلندر بالایی (ورودی مواد خام)، ۴- سیلندر میانی (بخش پیش تراکم)، ۵- سیلندر پایینی (قالب تشکیل قرص)، ۶- تکیه گاه پایین، ۷- پیچ نگهدارنده، ۸- مهره، ۹- مواد خام و ۱۰- قرص استوانه ای تشکیل شده (Ghasemi and Chayjan, 2018))



شکل ۳- نمای شماتیکی برش خورده از قالب تشکیل قرص های مکعبی شکل (نمای برش خورده): ۱- پیستون، ۲- تکیه گاه بالایی، ۳- سیلندر بالایی (ورودی مواد خام)، ۴- سیلندر میانی (بخش پیش تراکم)، ۵- سیلندر پایینی (قالب تشکیل پلت)، ۶- تکیه گاه پایین، ۷- پیچ نگهدارنده، ۸- مهره، ۹- مواد خام و ۱۰- قرص مکعبی تشکیل شده

آماده سازی پودر گوجه فرنگی قبل از فرآیند قرص سازی

قبل از انجام فرآیند قرص سازی به منظور افزایش نیروی چسبندگی بین ذرات نیاز است تا به گوجه فرنگی های پودر شده رطوبت و ماده چسبان اضافه گردد. به منظور بررسی اثر محتوای رطوبتی بر کیفیت قرص های تولیدی، با توجه به پیش آزمایش های انجام شده، سه سطح محتوای رطوبتی ۱۸، ۳۶ و ۵۴٪ d.b. استفاده انتخاب شدند. همچنین به منظور بررسی اثر نوع ماده چسبان از سه ماده چسبان (شربت فروکتوز ۵۵ درصد، آب و شکر) استفاده شد. علت های انتخاب فروکتوز به عنوان ماده چسبان عبارتند از: ۱- حلالیت بالای آن در آب و ۲- درصد بالای مونوساکارید آن (۵۵ درصد). وزن آب اضافه شده به پودر گوجه فرنگی از رابطه (۱) محاسبه شد. در هر آزمایش، بسته به نوع ماده چسبیده (شربت فروکتوز، آب و شکر) مورد استفاده، ماده چسبان به مقدار شش درصد وزنی (نسبت به وزن خام پودر گوجه فرنگی) در آب حل شد و مخلوط شد و سپس به منظور جذب کامل رطوبت، پودر گوجه فرنگی رطوبت داده شده به مدت ۷۲ ساعت در یخچال در دمای ۴ °C قرار گرفت.

$$W_w = \frac{W_i (M_f - M_i)}{100 - M_f} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که W_w جرم آب اضافه شده به نمونه W_i ، (kg) جرم اولیه نمونه M_f ، (kg) رطوبت هدف یا نهایی (d.b.) M_i رطوبت اولیه (d.b.) هستند.

دستگاه قرص ساز غیر پیوسته گوجه فرنگی

به منظور بررسی اثر شکل قرص بر کیفیت قرص های تولیدی از سه شکل قرص (کروی، استوانه ای و مکعبی) استفاده شد. بدین منظور سه قالب کروی، استوانه ای و مکعبی جهت تولید قرص از پودر گوجه فرنگی، به ترتیب نشان داده شده در شکل های ۱، ۲ و ۳ طراحی و ساخته شدند. به منظور فشرده سازی مواد خام درون هر یک از قالب های ته بسته، از یکپرس هیدرولیک آزمایشگاهی برای انجام آزمایش های قرص سازی استفاده شد. قالب ها از سه بخش اصلی شامل فک بالایی، فک پایینی و یک پیستون تشکیل شده اند. پس از رسیدن فشار روغن هیدرولیک به ۷۵ bar، حرکت پیستون به مدت ۱۵ ثانیه به منظور آزادسازی تنش های موجود در بافت محصول متوقف می شد (Wongsiriamnuay and Tippayawong, 2015) و سپس فشار از روی مواد برداشته می شد. در پایان، دو فک بالایی و پایینی به آهستگی از هم جدا شده و قرص تشکیل شده از قالب خارج می شد.

مقاومت به نفوذ

مقاومت به نفوذ قرص های فشرده، توسط آزمون استاندارد دپانچریت تعیین شدند. این آزمون با استفاده از دستگاه آزمون کشش و فشار مواد غذایی (Zwick/roell مدل bt1_fr0.5th.d14 ساخت کشور آلمان) انجام شد. برای این منظور یک قرص بین یک صفحه تخت و میله نفوذ با قطر ۴/۵ mm قرار می گرفت و با نرخ بارگذاری ثابت ۳۰ mm/min تا هنگام ترک برداشتن و شکستگی نمونه فشرده می شد و مقدار نیرو و جابجایی در هر لحظه ثبت می شدند. بیشترین نیروی ثبت شده در طی این آزمون به عنوان مقاومت به نفوذ نمونه در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری نمونه ها در سه تکرار اندازه گیری شد (Nadim and Ahmadi, 2016).

اندازه گیری رنگ و محاسبه تغییرات آن

به منظور اندازه گیری شاخص های رنگی از روش پردازش تصویر استفاده شد. بدین منظور از اسکنر HP مدل ScanJet G4010 استفاده شد. ابتدا دستگاه اسکنر توسط کارت های سیاه، سفید و رنگی استاندارد به نحوی که بر حسب مقیاس رنگی RGB برای رنگ سیاه عددهای (۰،۰،۰) و برای رنگ سفید (۲۵۵، ۲۵۵، ۲۵۵) را نشان دهد کالیبره شد، سپس گوجه فرنگی تازه، پودر و قرص های کرووی، استوانه ای و مکعبی حاصل از آن با درجه تفکیک dpi ۱۲۰۰ اسکن شدند. تصاویر به دست آمده توسط نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۷a پردازش گردید و مقادیر رنگی a^*L^* و b^* به دست آمده محاسبه شدند. در پایان با استفاده از روابط (۳) تا (۵) انحراف رنگ گوجه فرنگی تازه و پودر و قرص های کرووی، استوانه ای و مکعبی حاصل از آن پس از خشک شدن محاسبه گردید (Ahmadi Ghavidelan and Amiri Chayjan, 2016).

$$\Delta L^* = (L_0^* - L_1^*) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\Delta a^* = (a_0^* - a_1^*) \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\Delta b^* = (b_0^* - b_1^*) \quad (\text{رابطه ۵})$$

که مقدار L^* مقدار تیرگی (۰) تا روشنایی (۱۰۰)، a^* مقدار قرمزی (+۱۲۰) تا سبزی (-۱۲۰) و b^* مقدار زردی (+۱۲۰) تا آبی (-۱۲۰) هستند.

بهینه سازی فرآیند خشک کردن قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه فرنگی

به منظور بررسی آماری اثر متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ مورد مطالعه و همچنین تعیین شرایط بهینه فرآیند قرص سازی از روش سطح پاسخ به شیوهی طرح دی-آپتیمال استفاده شد (Ahmadi Ghavidelan and Amiri Chayjan, 2016). برای این منظور از نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۰ استفاده شد.

فرآیند خشک کردن قرص های کرووی، استوانه ای و مکعبی تولید شده از پودر گوجه فرنگی

آزمایش های خشک کردن بلافاصله پس از پایان فرآیند قرص سازی نمونه ها انجام گرفت. جهت خشک کردن قرص های کرووی، استوانه ای و مکعبی تولید شده از پودر گوجه فرنگی، از دستگاه آون (ممرت، مدل UNE 500، ساخت آلمان) استفاده شد. بدین صورت که ابتدا قرص ها در داخل آون با دمای ۶۰ °C قرار داده شدند و سپس با توجه به رابطه (۱) رطوبت نهایی خشک شده قرص ها بدست آمد و جرم قرص ها در زمان های مشخص توزین می شدند و به محض رسیدن به وزن نهایی خشک، از آون خارج گردیدند.

چروکیدگی

چروکیدگی یا کاهش حجم، یک پدیده غیرمطلوب است که هم زمان با پدیده های انتقال جرم و حرارت طی فرآیند خشک کردن رخ می دهد. چروکیدگی سبب ایجاد تنش های کششی در درون محصول شده و تغییرات نامطلوبی را در شکل محصول نهایی ایجاد کرده و سبب کاهش ابعاد محصول می گردد، همچنین با ایجاد ترک های درون قرص، پایداری آن را کاهش می دهد (Ghasemi and Chayjan, 2018). چروکیدگی معمولاً به عنوان نسبت تغییرات حجم محصول طی فرآیند خشک شدن به حجم اولیه آن تعریف می شود. به منظور اندازه گیری تغییرات حجم قرص های کرووی، استوانه ای و مکعبی، ابعاد نمونه ها قبل و بعد از فرآیند خشک شدن، اندازه گیری و حجم آنها تعیین شد. حجم ثانویه به روش تغییر حجم (تولون) در یک استوانه مدرج انجام شد. در نهایت درصد چروکیدگی قرص های کرووی، استوانه ای و مکعبی از رابطه (۲) به دست آمد.

$$S = \frac{(V_0 - V)}{V_0} \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که S درصد چروکیدگی، V_0 و V به ترتیب حجم قرص های کرووی، استوانه ای و مکعبی (mm^3) قبل و بعد از خشک شدن هستند.

چگالی واحد

چگالی واحد هر یک از قرص های کرووی، استوانه ای و مکعبی خشک شده با اندازه گیری جرم و حجم آنها تعیین شدند. برای این منظور پس از محاسبه حجم قرص های کرووی، استوانه ای و مکعبی اندازه گیری جرم آن ها توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ g، چگالی واحد با تقسیم جرم قرص به حجم آن محاسبه شد (Tumuluru et al., 2011). چگالی واحد گزارش شده در این پژوهش میانگین اندازه گیری شده برای پنج قرص کرووی، استوانه ای و مکعبی است.

نیروی نفوذ، چگالی واحد و تغییرات زنگ)، b_0 عرض از مبدأ، b_i و b_{ij} به ترتیب ضرایب خطی، درجه دو و اثر متقابل رابطه، X_j و X_i متغیرهای مستقل مورد بررسی هستند. جداول ۱ و ۲ به ترتیب، متغیرهای مستقل به همراه سطوح کدبندی شده آنها و تعداد آزمایش‌ها را نشان می‌دهند.

شکل کلی معادله مرتبه دوم سطوح پاسخ در رابطه‌ی (۶) نشان داده شده است.

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{i < j} \sum b_{ij} X_i X_j + \sum_{j=1}^k b_{ij} X_j^2 \quad (\text{رابطه } 6)$$

که Y پاسخ متغیرهای وابسته مورد مطالعه (چروکیدگی)،

جدول ۱- متغیرهای مستقل مورد آزمایش و سطوح آنها

سطوح متغیرها			نماد	متغیرهای مستقل
+۱	۰	-۱		
۵۴	۳۶	۱۸	X_1	محتوای رطوبتی (%d.b.)
$PS > 0.75$	$0.75 < PS < 0.3$	$PS < 0.3$	X_2	اندازه ذرات (mm)
شکر	فروکتوز	آب	X_3	نوع ماده چسبان
مکعبی	استوانه‌ای	کروی	X_4	شکل قرص

جدول ۲- آزمایش‌های طراحی شده برای بررسی اثر متغیرهای پاسخ بر فرآیندهای قرص‌سازی از پودر گوجه‌فرنگی و خشک‌کردن آنها با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۰

تعداد تکرار	سطوح متغیرهای مستقل (مقدار کدبندی)			محتوای رطوبتی (%d.b.)	شماره آزمایش
	شکل قرص	نوع ماده چسبان	اندازه ذرات (mm)		
۲	مکعبی (۱)	آب (-۱)	$0.75 < PS < 0.3$ (۰)	۳۶ (۰)	۱
۲	استوانه‌ای (۰)	شکر (۱)	$PS < 0.3$ (-۱)	۳۶ (۰)	۲
۲	استوانه‌ای (۰)	آب (-۱)	$0.75 < PS < 0.3$ (۰)	۵۴ (۱)	۳
۲	استوانه‌ای (۰)	فروکتوز (۰)	$0.75 < PS$ (۱)	۳۶ (۰)	۴
۱	کروی (-۱)	فروکتوز (۰)	$PS < 0.3$ (-۱)	۳۶ (۰)	۵
۱	استوانه‌ای (۰)	فروکتوز (۰)	$PS < 0.3$ (-۱)	۳۶ (۰)	۶
۱	مکعبی (۱)	فروکتوز (۰)	$PS < 0.3$ (-۱)	۵۴ (۱)	۷
۱	استوانه‌ای (۰)	شکر (۱)	$PS < 0.3$ (-۱)	۱۸ (-۱)	۸
۱	مکعبی (۱)	آب (-۱)	$PS < 0.3$ (-۱)	۱۸ (-۱)	۹
۱	استوانه‌ای (۰)	آب (-۱)	$PS < 0.3$ (-۱)	۱۸ (-۱)	۱۰
۱	مکعبی (۱)	فروکتوز (۰)	$PS < 0.3$ (-۱)	۱۸ (-۱)	۱۱
۱	مکعبی (۱)	شکر (۱)	$PS < 0.3$ (-۱)	۵۴ (۱)	۱۲
۱	کروی (-۱)	آب (-۱)	$0.75 < PS < 0.3$ (۰)	۱۸ (-۱)	۱۳
۱	کروی (-۱)	شکر (۱)	$0.75 < PS < 0.3$ (۰)	۳۶ (۰)	۱۴
۱	کروی (-۱)	آب (-۱)	$0.75 < PS < 0.3$ (۰)	۱۸ (-۱)	۱۵
۱	کروی (-۱)	فروکتوز (۰)	$0.75 < PS < 0.3$ (۰)	۵۴ (۱)	۱۶
۱	کروی (-۱)	شکر (۱)	$0.75 < PS$ (۱)	۳۶ (۰)	۱۷
۱	استوانه‌ای (۰)	فروکتوز (۰)	$0.75 < PS < 0.3$ (۰)	۱۸ (-۱)	۱۸
۱	مکعبی (۱)	شکر (۱)	$0.75 < PS$ (۱)	۱۸ (-۱)	۱۹
۱	استوانه‌ای (۰)	شکر (۱)	$0.75 < PS$ (۱)	۵۴ (۱)	۲۰
۱	کروی (-۱)	فروکتوز (۰)	$0.75 < PS$ (۱)	۱۸ (-۱)	۲۱
۱	مکعبی (۱)	فروکتوز (۰)	$0.75 < PS$ (۱)	۱۸ (-۱)	۲۲
۱	استوانه‌ای (۰)	آب (-۱)	$0.75 < PS$ (۱)	۱۸ (-۱)	۲۳
۱	کروی (-۱)	آب (-۱)	$PS < 0.3$ (-۱)	۵۴ (۱)	۲۴
۱	مکعبی (۱)	شکر (۱)	$0.75 < PS$ (۱)	۵۴ (۱)	۲۵
۱	استوانه‌ای (۰)	فروکتوز (۰)	$PS < 0.3$ (-۱)	۵۴ (۱)	۲۶
۱	مکعبی (۱)	آب (-۱)	$0.75 < PS$ (۱)	۵۴ (۱)	۲۷
۱	کروی (-۱)	آب (-۱)	$0.75 < PS$ (۱)	۵۴ (۱)	۲۸

ارائه شده در جدول ۳ مشاهده می شود که مقدار ضریب تبیین (R^2) برای تمامی مدل های ارائه شده بالاتر از ۰/۹۳ و ضریب تغییرات برای تمامی مدل ها کمتر از ۸/۵ بود، بنابراین مقادیر پایین ضریب تغییرات (≈ 8) برای اغلب مدل های پیشنهادی در جدول ۳ نشان دهنده تکرارپذیری خوب این مدل ها می باشد (Ghasemi *et al.*, 2018). همچنین با توجه به معنی دار نشدن فاکتور عدم برازش برای همه متغیرهای مورد بررسی، می توان گفت که مدل های ارائه شده به روش سطح پاسخ به خوبی توانسته اند مقدار تغییرات متغیرهای وابسته را پیش بینی کنند.

برای تعیین شرایط بهینه با توجه به اهداف مورد مطالعه، ضریب اهمیت متغیرهای مقاومت به نفوذ و رنگ برابر ۵ (بیشترین اهمیت)، چروکیدگی برابر ۳ و چگالی واحد برابر ۱ (کمترین اهمیت) انتخاب شدند.

نتایج و بحث

ضرایب معادله رگرسیون حاصل از طرح دی-اِپتیمال روش سطح پاسخ اطلاعات آماری به دست آمده برای متغیرهای پاسخ مورد بررسی در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به مقادیر آماری

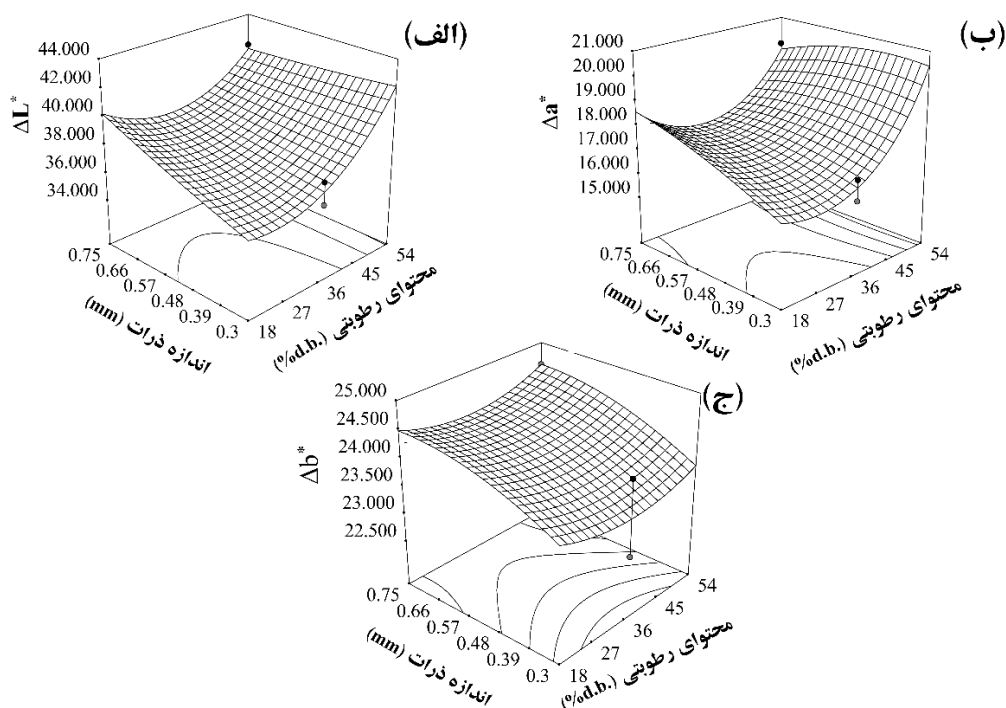
جدول ۳- ضرایب مدل برازش شده به معادله رگرسیونی درجه دوم برای متغیرهای پاسخ قرص های فشرده شده از پودر گوجه فرنگی (X_1 محتوی رطوبتی مواد خام، X_2 اندازه ذرات پودر، X_3 نوع ماده چسبان و X_4 شکل قالب)

ضرایب مدل						منابع تغییرات
S (%)	UD (g.cm ⁻³)	Pf (N)	Δb^*	Δa^*	ΔL^*	
عرض از مبدأ						
+۱/۲۳	+۶۰/۳۳	+۴۰/۲۲	+۰/۰۲۲	+۰/۰۳۵	+۱/۲	(b ₀)
عبارت خطی						
+۰/۰۴۷ ^b	-۷۷/۰۴ ^c	+۲۱/۸۰ ^c	-۶/۷۷×۱۰ ^{-a}	-۵/۳۲× ^{-۱۰} a	-۵/۲۱× ^{-۱۰} b	(b ₁) X ₁
+۰/۰۷۴ ^c	-۶۷۵/۷ ^b	-۶۸/۴۲ ^a	-۱/۴۷× ^{-۱۰} ns	-۳/۲۲× ^{-۱۰} ns	-۳/۴۵× ^{-۱۰} c	(b ₂) X ₂
+۰/۰۳۱ ^{ns}	+۱/۸۴ ^{ns}	-۲/۱۲ ^{ns}	-۱/۷۲× ^{-۱۰} ns	+۵/۰۵× ^{-۱۰} ns	۱/۲۲× ^{-۱۰} ns	(b ₃) X ₃
-۰/۰۳۸ ^{ns}	-۰/۶۵ ^{ns}	+۰/۷۰ ^{ns}	-۱/۷۵× ^{-۱۰} ns	-۲/۳۹× ^{-۱۰} ns	-۱/۷۹× ^{-۱۰} ns	(b ₄) X ₄
اثر متقابل						
-۰/۱۶ ^b	+۱/۲۷ ^c	-۴/۲۱ ^b	-۵/۳۴× ^{-۱۰} b	+۱/۵۷× ^{-۱۰} c	-۱/۸۶× ^{-۱۰} b	(b ₁₂) X ₁ X ₂
+۰/۰۲۹ ^{ns}	-۲/۶۱ ^{ns}	+۶/۳۱ ^{ns}	+۱/۹۱× ^{-۱۰} ns	-۱/۷۴× ^{-۱۰} ns	+۲/۰۲× ^{-۱۰} ns	(b ₁₃) X ₁ X ₃
+۰/۰۶۷ ^{ns}	-۱/۲۸ ^{ns}	+۲/۰۰ ^{ns}	-۴/۵۵× ^{-۱۰} ns	-۲/۱۴× ^{-۱۰} ns	+۲/۸۶× ^{-۱۰} ns	(b ₁₄) X ₁ X ₄
-۰/۰۹۵ ^{ns}	+۱/۶۶ ^{ns}	-۲/۳۹ ^{ns}	-۲/۵۲× ^{-۱۰} ns	+۶/۵۵× ^{-۱۰} ns	-۴/۱۳× ^{-۱۰} ns	(b ₂₃) X ₂ X ₃
+۰/۰۶۸ ^{ns}	+۱/۱۰ ^{ns}	-۲/۳۳ ^{ns}	-۳/۶۳× ^{-۱۰} ns	-۳/۲۴× ^{-۱۰} ns	+۳/۰۵× ^{-۱۰} ns	(b ₂₄) X ₂ X ₄
+۰/۰۳۶ ^c	+۰/۵۶ ^b	-۰/۹۰ ^c	+۹/۳۲× ^{-۱۰} ns	+۸/۸۶× ^{-۱۰} ns	+۱/۸۳× ^{-۱۰} ns	(b ₃₄) X ₃ X ₄
عبارت درجه دوم						
+۰/۱۷ ^c	+۹/۹ ^{ns}	+۶/۴۸ ^{ns}	-۲/۹۹× ^{-۱۰} ns	-۳/۶× ^{-۱۰} b	+۳/۲۹× ^{-۱۰} b	(b ₁₁) X ₁ ²
+۰/۰۳۱ ^{ns}	+۵/۷۷ ^{ns}	+۴/۷۳ ^{ns}	+۲/۶۲× ^{-۱۰} ns	+۶/۷۱× ^{-۱۰} ns	+۱/۳۸× ^{-۱۰} ns	(b ₂₂) X ₂ ²
۰/۹۹ ^{ns}	۰/۲۲ ^{ns}	۰/۷۶ ^{ns}	۰/۵۳ ^{ns}	۰/۲۴ ^{ns}	۲/۱۱ ^{ns}	Lack of Fit (P-value)
۰/۳ ^{ns}	۰/۱۵ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^b	۰/۴۸ ^{ns}	۰/۰۳ ^c	۰/۰۲ ^c	Model (P-value)
۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۹۷	R ²
۰/۶۳	۰/۳۷	۰/۷۷	۰/۰۲	۰/۶۰	۰/۶۲	Adj. R ²
۰/۵۱	-۳/۷۷	۰/۷۳	-۲/۲۷	-۱/۶۶	-۱/۳۵	Predicted. R ²
۷/۲۴	۶/۶۴	۸/۱۵	۲/۷۲	۵/۳۷	۰/۱۴	C.V. (%)
۰/۱۲	۳/۷۴	۳/۱۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	Std. Dev.

a بیانگر انحراف معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۱، b انحراف معنی دار در ۰/۱، c انحراف معنی دار در ۰/۵ و ns عدم انحراف معنی دار می باشند. (Δb^* , Δa^* , ΔL^* شاخص های رنگی، Pf نیروی نفوذ، S چروکیدگی و UD چگالی توده)

تیرگی بیشتر (افزایش شاخص L^*) و کاهش مقدار قرمزی (کاهش شاخص a^*) قرص فشرده گوجه‌فرنگی شد. یعنی نمونه‌ها نسبت به حالت اول تیره‌تر شدند، که به دلیل تشکیل رنگ‌دانه‌ی قهوه‌ای از طریق واکنش مایلارد بود (Sledz and Witrowa-Rajchert, 2012). همچنین با توجه به نتایج شکل ۴-ج محتوای رطوبتی بر شاخص رنگ b^* نیز اثرگذار بود، به طوری که با افزایش محتوای رطوبتی، شاخص رنگ b^* (مقدار زردی) کاهش یافت. همان‌طور که در شکل ۱ (الف، ب و ج) مشاهده شد، در اندازه ذرات کوچکتر از ۰/۳ mm، افزایش محتوای رطوبتی سبب کاهش انحراف شاخص‌های رنگی بین قرص فشرده گوجه‌فرنگی با گوجه‌فرنگی تازه شد درحالی که در اندازه ذرات بزرگتر از ۰/۷۵mm، با افزایش محتوای رطوبتی، این انحراف بیشتر شد. این تغییر رنگ در نمونه‌های خشک‌شده می‌تواند به علت واکنش‌های قهوه‌ای شدن مایلارد در طول فرآیند خشک‌شدن و تشکیل رنگ‌دانه‌های قهوه‌ای باشد (Arslan and Özcan, 2011). به‌طور کلی شاخص‌های رنگ در محتوای رطوبتی پایین به مقادیر نمونه‌های گوجه‌فرنگی‌های تازه نزدیک‌تر بودند.

شاخص‌های رنگ نهایی ΔL^* ، Δa^* و Δb^* نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر خطی محتوای رطوبتی، اثر متقابل محتوای رطوبتی و اندازه ذرات بر تمامی شاخص‌های رنگی ΔL^* ، Δa^* و Δb^* قرص‌فشرده‌گوجه‌فرنگی معنی‌دار بودند و همچنین اثر عبارت درجه دوم محتوای رطوبتی بر شاخص‌های رنگی ΔL^* و Δa^* قرص‌فشرده‌گوجه‌فرنگی معنی‌دار ($P < 0.001$) بودند. شکل ۴ (الف تا ج) اثر متقابل محتوای رطوبتی مواد خام و اندازه ذرات پودر گوجه‌فرنگی بر شاخص‌های رنگی قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی را به ترتیب برای تفاوت شاخص‌های رنگ L^* ، a^* و b^* نسبت به شاخص‌های رنگ گوجه‌فرنگی تازه نشان می‌دهد. مطابق شکل، مشاهده شد از آنجایی که با افزایش محتوای رطوبتی، محصول تا رسیدن به سطح محتوای رطوبتی ایمن، بیشتر در معرض هوای داغ قرار می‌گیرد (به علت افزایش زمان فرآیند خشک‌شدن) بنابراین افزایش محتوای رطوبتی سبب افزایش انحراف بیشتر بین شاخص‌های رنگ L^* و a^* قرص فشرده گوجه‌فرنگی نسبت به گوجه‌فرنگی تازه شد، به نحوی که افزایش محتوای رطوبتی سبب



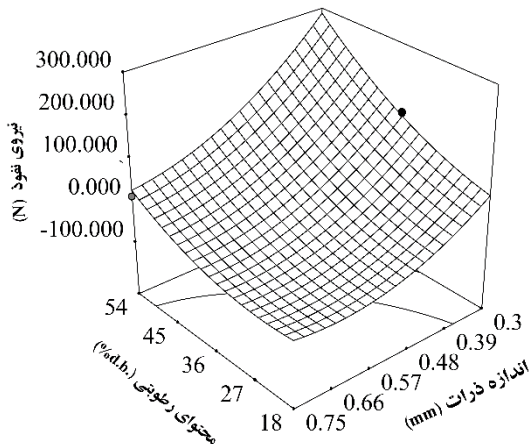
شکل ۴- اثر متقابل محتوای رطوبتی مواد خام و اندازه ذرات بر شاخص‌های رنگی قرص‌های فشرده‌شده گوجه‌فرنگی الف- ΔL^* ، ب- Δa^* و ج- Δb^*

شکل ۵ نمودار تغییرات نیرو- تغییر شکل مربوط به قرص فشرده شده‌متشکل از پودر گوجه‌فرنگی با محتوای رطوبتی ۱۸/d.b. تحت بارگذاری شبه استاتیک با اندازه ذرات کمتر از ۰/۳، بین ۰/۳ تا ۰/۷۵ و بزرگتر از ۰/۷۵ mm را نشان می‌دهد.

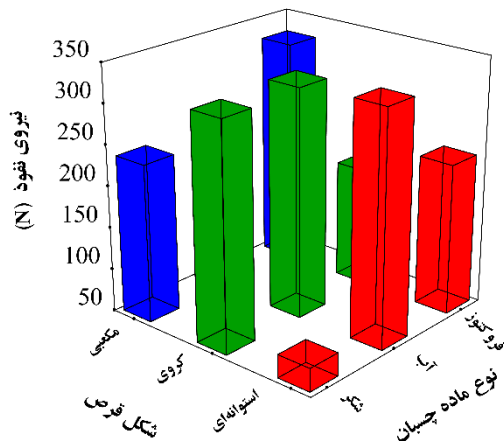
نیروی نفوذ

نتایج آزمون پانچری (بارگذاری شبه استاتیک) قرص فشرده گوجه‌فرنگی نشان داد که در منحنی نیرو- تغییر شکل این محصول می‌توان بخش خطی و نقطه شکست را تشخیص داد.

چسبان شکر و هندسه استوانه‌ای بود. همانطور که از نتایج شکل ۷ مشاهده می‌گردد، نوع ماده چسبان با توجه به تأثیری که در ایجاد پیوند بین ذرات تشکیل دهنده قرص دارد بر مقاومت یا نیروی نفوذ قرص‌ها اثر گذار است. نتایج مشابهی توسط (Ghasemi and Chayjan, 2018) برای قرص‌های تشکیل شده از ماده افزودنی فروکتوز گزارش شد.



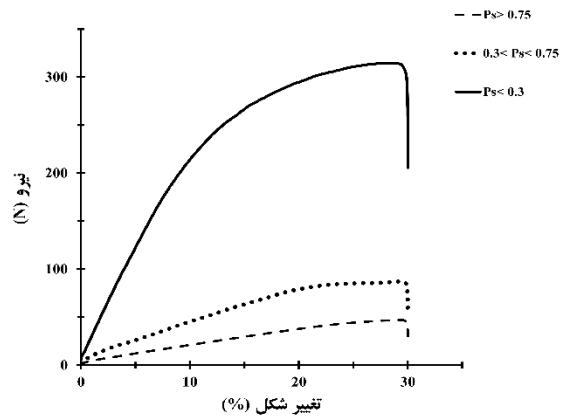
شکل ۶- اثر متقابل محتوای رطوبتی و اندازه ذرات بر نیروی نفوذ قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی



شکل ۷- اثر متقابل نوع ماده چسبان و شکل قرص فشرده بر نیروی نفوذ قرص فشرده گوجه‌فرنگی

چگالی واحد

مقدار تغییرات چگالی واحد در محدوده‌ی $240.1/5 \text{ kg/m}^3$ (محتوای رطوبتی ۱۸٪ d.b، اندازه ذرات کوچکتر از ۰/۳ mm، ماده چسبان آب و شکل قرص مکعبی) و $919/8 \text{ kg/m}^3$ (محتوای رطوبتی ۵۴٪ d.b، اندازه ذرات بزرگتر از ۰/۷۵ mm، ماده چسبان شکر و شکل قرص مکعبی) بود. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر خطی و متقابل محتوای رطوبتی و اندازه ذرات بر چگالی واحد قرص فشرده گوجه‌فرنگی خشک‌شده معنی‌دار

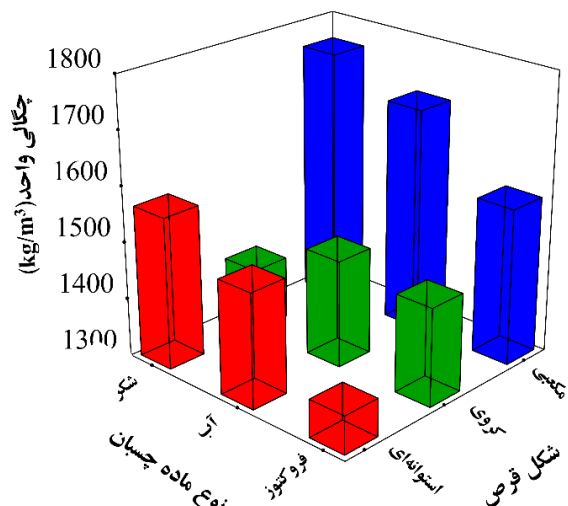


شکل ۵- نمودار نیرو- تغییر شکل قرص فشرده شده متشکل از پودر گوجه-فرنگی تحت بارگذاری شبه استاتیک با اندازه ذرات کمتر از ۰/۳، بین ۰/۳ تا ۷۵/۰۲ mm و بزرگتر از ۷۵/۰۲ mm در محتوای رطوبتی ثابت ۱۸٪ d.b.

بیشترین مقدار نیروی نفوذ برابر با $314/42 \text{ N}$ برای قرص-های فشرده شده متشکل از پودر گوجه‌فرنگی با اندازه ذرات بزرگتر از $75/02 \text{ mm}$ به دست آمد و هم‌چنین کمترین مقدار نیروی نفوذ برابر با $47/02 \text{ N}$ برای قرص‌های فشرده شده پودر گوجه‌فرنگی با محتوای رطوبتی ۱۸٪ d.b. که دارای اندازه ذرات کوچکتر از 3 mm بودند، به دست آمد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثرات خطی و متقابل محتوای رطوبتی و اندازه ذرات و همچنین اثر متقابل نوع ماده چسبان و شکل قرص بر نیروی نفوذ قرص‌های فشرده شده و خشک‌شده گوجه‌فرنگی معنی‌دار بودند. شکل ۶ اثر متقابل محتوای رطوبتی و اندازه ذرات بر گسیختگی قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این شکل، با کاهش اندازه ذرات، مقدار نیروی نفوذ افزایش یافت که دلیل آن افزایش نیروهای واندروالسی به علت افزایش ناحیه سطح تماس با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات است. هم‌چنین با افزایش محتوای رطوبتی، مقدار نیروی نفوذ افزایش یافت. دلیل این امر را می‌توان افزایش تنش‌های حرارتی و رطوبتی وارد شده به نمونه به دلیل افزایش محتوای رطوبتی دانست، زیرا این تنش‌ها سبب ایجاد ترک‌های ریز در بافت محصول شده و منجر به کاهش استحکام و انسجام بافت سلولی و انرژی مورد نیاز برای محصول می‌گردند (Ghasemi and Chayjan, 2018).

شکل ۷ اثر متقابل نوع ماده چسبان و شکل قرص فشرده بر نیروی نفوذ قرص فشرده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، قرص فشرده مکعبی با ماده چسبان فروکتوز بیشترین نیروی نفوذ را در بین سایر اشکال قرص با ماده چسبان دارد. بیشترین نیروی نفوذ برابر با $314/42 \text{ N}$ بود که برای قرص‌های تشکیل شده با ماده چسبان فروکتوز و هندسه مکعبی شکل بود و کمترین نیروی نفوذ مربوط به قرص‌های تشکیل شده با ماده

مشاهده می‌شود که در تمامی تیمارهای مورد آزمایش، قرص‌های مکعبی شکل نسبت به قرص‌های کروی و استوانه‌ای شکل چگالی واحد بالاتری داشتند. دلیل احتمالی برای این امر این است که جریان مواد خام ورودی به قالب مکعبی نسبت به دو قالب دیگر بهتر بوده و در نتیجه این قرص‌های مکعبی نسبت به قرص‌های استوانه‌ای و کروی تراکم بیشتری را در واحد حجم داشته‌اند.



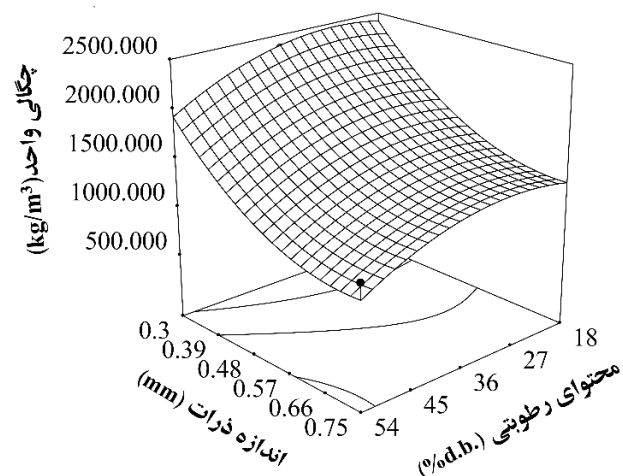
شکل ۹- اثر متقابل نوع ماده چسبان و شکل قرص فشرده بر چگالی واحد قرص فشرده گوجه‌فرنگی

چروکیدگی

مقدار تغییرات چروکیدگی در محدوده‌ی ۲۵ درصد (محتوای رطوبتی ۱۸٪ d.b.)، اندازه ذرات کوچکتر از ۰/۳ mm، ماده چسبان آب و شکل قرص استوانه‌ای) و ۰/۸ درصد (محتوای رطوبتی ۵۴٪d.b.)، اندازه ذرات بزرگتر از ۰/۷۵ mm، ماده چسبان آب و شکل قرص مکعبی) بود. با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده شد که اثرات خطی و متقابل محتوای رطوبتی و اندازه ذرات، اثر متقابل نوع ماد چسبان و شکل قرص و هم چنین اثر درجه دوم محتوای رطوبتی بر چروکیدگی قرص‌های فشرده شده و خشک‌شده گوجه‌فرنگی معنی‌دار بودند.

شکل اثر متقابل محتوای رطوبتی و اندازه ذرات بر چروکیدگی قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این شکل، مشاهده می‌گردد که هر دو عامل محتوای رطوبتی و اندازه ذرات بر چروکیدگی اثر مستقیم داشتند، به طوری که با افزایش هم‌زمان محتوای رطوبتی و اندازه ذرات، مقدار چروکیدگی افزایش یافت. علت چروکیدگی بیشتر در محتوای رطوبتی بالا به دلیل طولانی‌تر شدن فرآیند خشک کردن و اعمال تنش‌های حرارتی و رطوبتی بیشتر است. این رفتار می‌تواند به دلیل این باشد که چروکیدگی ابتدا از سطح محصول آغاز شده و با ادامه یافتن فرآیند خشک شدن بتدریج به لایه‌های درونی

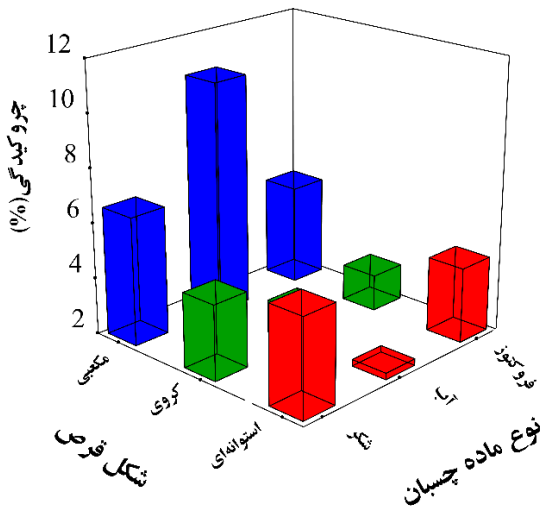
بود. شکل ۸ اثر متقابل اندازه ذرات و محتوای رطوبتی را بر چگالی واحد قرص فشرده و خشک‌شده گوجه‌فرنگی نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج قابل مشاهده است با کاهش اندازه ذرات، چگالی واحد افزایش یافت. دلیل این امر آن است که ذرات کوچک‌تر و ریزتر، سطح تماس بیشتری را به منظور تشکیل پیوندها و پل‌های ارتباطی بین ذرات ایجاد می‌کنند (Lerma et al., 2017); بنابراین اندازه ذرات اثر منفی بر چگالی واحد دارد. همچنین مطابق شکل ۸ با افزایش محتوای رطوبتی، چگالی واحد کاهش یافت. دلیل این امر آن است که قرص‌هایی که از مواد با محتوای رطوبت بالاتر تشکیل شده بودند طی فرآیند خشک کردن به منظور رسیدن به یک سطح محتوای رطوبتی مناسب برای جلوگیری از فساد محصول، مقدار آب بیشتری را باید از دست دهند، در نتیجه مقدار کاهش وزن آنها طی فرآیند خشک شدن بیشتر بود. هر چند رطوبت طی فرآیند تراکم همانند یک چسب عمل کرده و با افزایش سطح تماس ذرات سبب به وجود آمدن نیروهای واندروالسی بین ذرات شده و سبب تشکیل قرص‌هایی متراکم‌تر می‌گردد (Maniet et al., 2006). با افزایش محتوای رطوبتی بیشتر از محدوده بهینه، نیروهای بین‌مولکولی کاهش یافته و پیوندهای بین‌مولکولی در محدوده رطوبتی خیلی بالا ایجاد نمی‌گردند. این امر به دلیل وجود ترکیبات فازی (فاز چربی و فاز جامد) در بافت محصول است (Ghasemi and Chayjan, 2018).



شکل ۸- اثر متقابل دمای هوای ورودی به خشک‌کن و فشار خلاء بر چروکیدگی قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی

شکل ۹ اثر متقابل نوع ماده چسبان و شکل قرص فشرده بر چگالی واحد قرص فشرده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل قرص فشرده مکعبی با ماده چسبان شکر بیشترین چگالی واحد و قرص‌های استوانه‌ای شکل تشکیل شده از ماده چسبان فروکتوز کمترین چگالی واحد را در بین سایر اشکال قرص با ماده چسبان دارد. همچنین باتوجه به نتایج حاصل از این شکل

مکعبی، سرعت انتشار بیشتر رطوبت در این قرص‌ها (استوانه و کره) نسبت به قرص‌های مکعبی بود، که این امر سبب می‌شود که زمان خشک‌شدن قرص‌های استوانه‌ای و کروی نسبت به قرص‌های مکعبی کمتر باشد. به طور کلی هر عاملی که بتواند زمان خشک‌شدن را کاهش دهد سبب کاهش چروکیدگی محصول می‌شود (Amiri Chayjan et al., 2015).

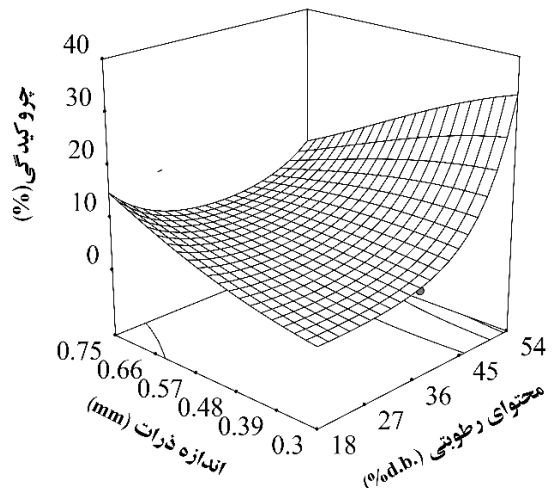


شکل ۱۱- اثر متقابل نوع ماده چسبان و شکل قرص فشرده بر چروکیدگی قرص فشرده گوجه‌فرنگی

شرایط بهینه خشک کردن قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی

به منظور بهینه‌سازی هم‌زمان متغیرهای پاسخ از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت استفاده شد. کمترین و بیشترین مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها و ضریب اهمیت آنها برای متغیرهای پاسخ (با توجه به میزان اهمیت آنها در جواب بهینه) مورد بررسی در جدول ۴ آورده شده‌اند. با استفاده از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت، یازده راه‌حل برای تعیین شرایط بهینه با مقدار شاخص مطلوبیت بین ۰/۷۳۵ تا ۰/۸۲۶ به دست آمدند که در جدول ۵ ارائه شده‌اند. نتایج به دست آمده از جدول ۵ نشان می‌دهد که مطلوب‌ترین حالت برای قرص‌های فشرده متشکل از پودر گوجه‌فرنگی با محتوای رطوبتی ۳۳/۴ d.b.، اندازه ذرات mm ۰/۳، نوع ماده چسبان فروکتوز و شکل قرص استوانه‌ای که در آن در دمای °C ۶۰ خشک‌شده بودند به دست آمد. تحت این شرایط، شاخص مطلوبیت ۰/۸۲۶ به دست آمد و مقدار بهینه متغیرهای مستقل ΔL^* ، Δa^* و Δb^* (اختلاف شاخص‌های رنگی با گوجه‌فرنگی تازه)، نیروی نفوذ، چگالی واحد و چروکیدگی به ترتیب برابر با ۳۵/۸۹، ۵۱/۶، ۲۳/۲۳ N، ۲۶۷/۲ kg/m^3 و ۲/۱۲ درصد پیشنهاد شدند.

محصول می‌رسد (Amiri Chayjan et al., 2015). طی فرآیند خشک‌کردن محصول با محتوای رطوبتی بالا، فاز مایع (آب) بیشتری از محصول تبخیر شده و منجر به ایجاد فضاهای خالی بیشتری درون محصول می‌گردد که این پدیده موجب ایجاد تغییر حجم بیشتری در محصول می‌گردد (Ghasemi and Chayjan, 2018). هم‌چنین دلیل احتمالی افزایش چروکیدگی با افزایش اندازه ذرات این است که قرص تشکیل شده از ذرات بزرگ‌تر ساختار متخلخل‌تر با پیوندهای ضعیف‌تری دارد، بنابراین هنگامی که طی فرآیند خشک‌کردن تحت تنش‌های حرارتی و رطوبتی قرار می‌گیرد تغییرات حجم بیشتری در آن ایجاد می‌گردد (Madiouli et al., 2007).



شکل ۱۰- اثر متقابل محتوای رطوبتی و اندازه ذرات بر چروکیدگی قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی

شکل ۱۱ اثر متقابل نوع ماده چسبان و شکل قرص فشرده بر چروکیدگی قرص فشرده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، قرص فشرده مکعبی با ماده چسبان آب بیشترین چروکیدگی و هم‌چنین قرص فشرده استوانه‌ای با ماده چسبان آب کمترین چروکیدگی را در بین سایر اشکال قرص با ماده چسبان دارند. این مسئله به علت ماهیت موجودی این اشکال هندسی (نسبت سطح به حجم) است که در صنعت داروسازی هم مشهود می‌باشد. با توجه به تقارن هندسی بهتر قالب استوانه‌ای و کروی نسبت به قالب مکعبی می‌توان گفت توزیع تنش در طی عملیات فشرده‌سازی مواد در قالب‌های استوانه‌ای و کروی نسبت به قالب مکعبی یکنواخت‌تر بوده و در نتیجه قرص‌های استوانه‌ای و کروی شکل نسبت به قرص‌های مکعبی شکل چروکیدگی کمتری را داشتند. یک دلیل احتمالی دیگر برای کم‌تر بودن چروکیدگی قرص‌های استوانه‌ای و کروی نسبت به قرص‌های

جدول ۴- کمترین و بیشترین مقدار متغیرهای پاسخ و ضریب اهمیت آنها جهت بهینه‌سازی فرآیندهای قرص‌سازی از پودر گوجه‌فرنگی و خشک‌کردن به روش

سطح پاسخ				
متغیرهای پاسخ	هدف	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	ضریب اهمیت
شاخص رنگی ΔL^*	کمینه	۳۵/۵۱	۴۲/۲	۳
شاخص رنگی Δa^*	کمینه	۱۵/۶	۲۰/۰۵	۳
شاخص رنگی Δb^*	کمینه	۲۲/۷۴	۲۴/۹۹	۳
نیروی نفوذ (N)	بیشینه	۴۷/۰۲	۲۳۱/۴۵	۳
چگالی واحد (kg/m^3)	بیشینه	۹۱۹/۸	۲۴۰/۱۵	۳
چروکیدگی (%)	کمینه	۰/۰۸	۲۵	۲

نتیجه‌گیری

ریزتر با توجه به سطح تماس بیشتر بین ذرات و نیروهای واندروالسی قوی‌تر بین آن‌ها، پیوندهای قوی‌تری نسبت به اندازه ذرات بزرگتر دارند. قرص‌های تشکیل شده با محتوای رطوبتی بالا (بیشترین محتوای حدود ۵۴ درصد)، چروکیدگی بیشتر و چگالی واحد کمتری داشتند. همچنین مشاهده شد که قرص‌های تشکیل شده از ذرات با محتوای رطوبتی پایین (حدود ۱۸ درصد) نیروی نفوذ و خواص مکانیکی کمتری داشتند. بنابراین قرص‌های تشکیل شده از ذراتی با محتوای رطوبتی ۳۳ درصد بهترین شرایط را از نظر خواص کیفی، فیزیکی و مکانیکی داشته‌اند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های خشک‌کردن اولیه و پودر سازی، قرص‌سازی و خشک‌کردن نهایی قرص فشرده، موارد زیر قابل استنتاج است: نتایج نشان داد که قرص‌سازی با استفاده از پودرهایی با محتوای رطوبتی پایین‌تر و اندازه ذرات کوچکتر سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید. حالت بهینه برای قرص‌های تشکیل شده از کوچکترین اندازه ذرات به دست آمد. علت این امر آن است که قرص‌های تشکیل شده از ذرات با اندازه

جدول ۵- مقادیر پیش‌بینی شده متغیرهای وابسته و مستقل به روش سطح پاسخ در شرایط بهینه فرآیندهای خشک‌کردن و قرص‌سازی از پودر گوجه‌فرنگی

شماره	محتوای رطوبتی (d.b.%)	اندازه ذرات (mm)	نوع ماده چسبان	شکل قرص	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	نیروی نفوذ (N)	چگالی واحد (g/cm^3)	چروکیدگی (%)	شاخص مطلوبیت
۱	۳۳/۴۸	۰/۳	فروکتوز	استوانه‌ای	۳۵/۸۹	۱۵/۶	۲۳/۲۴	۲۶۷/۲	۲۲۹۹/۰۶	۲/۱۲	۰/۸۲۶
۲	۳۳/۶۳	۰/۳	فروکتوز	استوانه‌ای	۳۵/۸۹	۱۵/۶	۲۳/۲۴	۲۶۸	۲۲۹۸/۳۸	۲/۱۵	۰/۸۲۶
۳	۳۳/۳	۰/۳	فروکتوز	استوانه‌ای	۳۵/۸۹	۱۵/۶	۲۳/۲۳	۲۶۶/۲	۲۲۹۹/۹	۲/۰۹	۰/۸۲۶
۴	۳۳/۱	۰/۳	فروکتوز	استوانه‌ای	۳۵/۸۹	۱۵/۵۹	۲۳/۲۳	۲۶۵/۵	۲۲۳۰	۲/۰۷	۰/۸۲۶
۵	۳۳/۹	۰/۳	فروکتوز	استوانه‌ای	۳۵/۹۰	۱۵/۵۹	۲۳/۲۳	۲۶۹/۹	۲۲۹۶/۶	۲/۱۲	۰/۸۲۶
۶	۳۴/۴	۰/۳	فروکتوز	استوانه‌ای	۳۵/۹۱	۱۵/۶	۲۳/۲۳	۲۷۲/۵	۲۲۹۴/۲	۲/۲۱	۰/۸۲۶
۷	۳۴/۷	۰/۳	فروکتوز	استوانه‌ای	۳۵/۹۲	۱۵/۶	۲۳/۲۴	۲۷۳/۷	۲۲۹۲/۶	۲/۳	۰/۸۲۶
۸	۲۹/۷	۰/۳	فروکتوز	کروی	۲۴/۸۲	۱۵/۶	۲۳/۲۴	۱۷۲/۶	۲۲۹۲/۵	۲/۳۵	۰/۷۳۵
۹	۲۹/۶	۰/۳	فروکتوز	کروی	۲۴/۸۲	۱۵/۵۹	۲۳/۲۵	۱۷۱/۹	۲۲۹۲/۲	۳/۱۷	۰/۷۳۵
۱۰	۳۰	۰/۳	فروکتوز	کروی	۲۴/۸۱	۱۵/۹۹	۲۳/۲۵	۱۷۳	۲۲۹۲/۹	۳/۱۶	۰/۷۳۵
۱۱	۳۰/۲	۰/۳	فروکتوز	کروی	۲۴/۸۲	۱۵/۹۹	۲۳/۲۵	۱۷۳/۹	۲۲۹۳/۱	۳/۲	۰/۷۳۵

REFERENCES

- Adiba, B. D., Salem, B., Nabil, S., & Abdelhakim, M. (2011). Preliminary characterization of food tablets from date (*Phoenix dactylifera* L.) and spirulina (*Spirulina* sp.) powders. *Powder Technology*, 208(3), 725-730.
- Ahmadi Ghavidelan, M., & Amiri Chayjan, R. (2016). Optimization of hazelnut kernel drying in an infrared dryer with microwave pretreatment using response surface methodology. *Food Science and Technology*, 14(64), 178-165. (In Farsi)
- Amiri Chayjan, R., Kaveh, M., & Khayati, S. (2015). Modeling Drying Characteristics of Hawthorn Fruit under Microwave Convective Conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(3), 239-253.
- And, G. L., & Barrett, D. M. (2006). Influence of Pre-drying Treatments on Quality and Safety of Sun-dried Tomatoes. Part I: Use of Steam Blanching, Boiling Brine Blanching, and Dips in Salt or Sodium Metabisulfite. *Journal of Food Science*, 71(1), S24-S31.
- Arslan, D., & Özcan, M. (2011). Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4), 504-513.
- Aziz, M., Yusof, Y., Blanchard, C., Saifullah, M., Farahnaky, A., & Scheiling, G. (2018). Material

- Properties and Tableting of Fruit Powders. *Food Engineering Reviews*, 1-15.
- Demiray, E., Tulek, Y., & Yilmaz, Y. (2013). Degradation kinetics of lycopene, β -carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying. *LWT-Food Science and Technology*, 50(1), 172-176.
- FAO, 2017. FAOSTAT: Data-crops. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Ghasemi, A., & Chayjan, R. A. (2018). Optimization of Pelleting and Infrared-Convection Drying Processes of Food and Agricultural Waste Using Response Surface Methodology (RSM). *Waste and Biomass Valorization*, 1-19
- Ghasemi, A., Chayjan, R. A., & Najafabadi, H. J. (2018). Optimization of granular waste production based on mechanical properties. *Waste Management*.
- Lerma-Arce, V., Oliver-Villanueva, J.-V., & Segura-Orenga, G. (2017). Influence of raw material composition of Mediterranean pinewood on pellet quality. *Biomass and Bioenergy*, 99, 90-96.
- Liu, F., Cao, X., Wang, H., & Liao, X. (2010). Changes of tomato powder qualities during storage. *Powder Technology*, 204(1), 159-166.
- 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. doi:10.1080/07373930701227185
- 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.
- Marfil, P., Santos, E., & Telis, V. (2008). Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions. *LWT-Food Science and Technology*, 41(9), 1642-1647
- Martí, R., Leiva-Brondo, M., Lahoz, I., Campillo, C., Cebolla-Cornejo, J., & Roselló, S. (2018). Polyphenol and l-ascorbic acid content in tomato as influenced by high lycopene genotypes and organic farming at different environments. *Food Chemistry*, 239, 148-156
- Nadim, Z., & Ahmadi, E. (2016). Rheological properties of strawberry fruit coating with methylcellulose. *Journal of Agricultural Machinery*. (In Farsi)
- Ong, M., Yusof, Y., Aziz, M., Chin, N., & Amin, N. M. (2014). Characterisation of fast dispersible fruit tablets made from green and ripe mango fruit powders. *Journal of Food Engineering*, 125, 17-23.
- Purkayastha, M. D., Nath, A., Deka, B. C., & Mahanta, C. L. (2013). Thin layer drying of tomato slices. *Journal of Food Science and Technology*, 50(4), 642-653.