

## Modeling and Optimization of Vacuum-infrared Dryer Performance in Production Process of Tomato Compressed Tablet: Chemical Properties

MANOUCHEHR RASHIDI<sup>1</sup>, REZA AMIRI CHAYJAN<sup>1\*</sup>, AHMAD ERSHADI<sup>2</sup>, ALI GHASEMI<sup>1</sup>

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

(Received: Nov. 25, 2019- Revised: May. 24, 2020- Accepted: June. 6, 2020)

### ABSTRACT

In this study, optimum drying conditions of compressed tablet tomato under vacuum-infrared conditions were determined to produce tablet with appropriate chemical and qualitative properties. The content of lycopene, total phenol, vitamin C concentration, antioxidant activity as chemical properties and color indices  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  and  $\Delta b^*$  were studied as qualitative properties. Drying process of samples was performed at five levels of air temperature of the compartment 40, 50, 60, 70 and 80 °C and five vacuum pressures 20, 30, 40, 50 and 60 kPa. Statistical analysis of data and optimization of drying process were performed using response surface methodology. The results showed that in vacuum-infrared drying, as the temperature of the dryer chamber increased, the concentration of vitamin C and total phenol content of tomato tablet decreased and lycopene content and antioxidant activity of tomato tablet increased. Also, increasing temperature increased the difference between the color indices  $L^*$  and  $a^*$  and reduced the difference between the color index  $b^*$  compared to fresh tomatoes. The optimum point the drying process of tomato tablet was obtained at 56 °C and vacuum pressure of 30 kPa. The reduction rates of vitamin C concentration, lycopene content, and total phenol content of dried tomato tablets in optimal condition were 54.3, 2.6 and 29.62 percent, respectively. Drying at lower temperature increased the model's desirability index obtained by response surface methodology.

**Keywords:** Tableting, vacuum dryer, vitamin C, lycopene.

## مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد خشک‌کن خلأی - مادون قرمز در فرآیند تولید قرص فشرده گوجه‌فرنگی:

### خواص شیمیایی

منوچهر رشیدی<sup>۱</sup>، رضا امیری چایجان<sup>۱\*</sup>، احمد ارشادی<sup>۲</sup>، علی قاسمی<sup>۱</sup>

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

۲. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۳/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۳/۱۷)

### چکیده

در این پژوهش شرایط بهینه خشک‌کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی تحت شرایط خلأی مادون قرمز به منظور تولید قرص با خواص کیفی و شیمیایی مناسب تعیین شد. محتوای لیکوپن، فنل کل، غلظت ویتامین ث و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به عنوان خواص شیمیایی و شاخص‌های رنگی  $\Delta L^*$ ،  $\Delta a^*$  و  $\Delta b^*$  به عنوان خواص کیفی مطالعه شدند. فرآیند خشک‌کردن نمونه‌ها در پنج سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ °C و پنج سطح فشار خلأ ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ kPa صورت گرفت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شدند. نتایج نشان داد که در خشک‌کردن به شیوه خلأی - مادون قرمز، با افزایش دمای هوای محفظه خشک‌کن، غلظت ویتامین ث و محتوای فنل کل قرص گوجه‌فرنگی، کاهش و محتوای لیکوپن و فعالیت آنتی‌اکسیدانی قرص گوجه‌فرنگی افزایش یافت. همچنین، افزایش دما سبب افزایش اختلاف بیشتر بین شاخص‌های رنگ  $L^*$  و  $a^*$  و کاهش اختلاف بین شاخص رنگ  $b^*$  قرص نسبت به گوجه‌فرنگی تازه شد. نقطه بهینه فرآیند خشک‌کردن قرص گوجه‌فرنگی در دمای ۵۶ °C و فشار خلأ ۳۰ kPa به دست آمد. میزان کاهش غلظت ویتامین ث، محتوای لیکوپن و محتوای فنل کل قرص گوجه‌فرنگی خشک‌شده در حالت بهینه به ترتیب ۵۴/۳، ۲/۶ و ۲۹/۶۲ درصد بود. خشک‌کردن تحت دمای پایین‌تر سبب افزایش شاخص مطلوبیت مدل بدست آمده از روش سطح پاسخ گردید.

واژه‌های کلیدی: قرص‌سازی، خشک‌کن خلأی، ویتامین ث، لیکوپن.

### مقدمه

گوجه‌فرنگی یکی از سبزیجات مهم در آسیا و آفریقا با تولیدی در حدود ۷۰ درصد است. سطح زیر کشت گوجه‌فرنگی در ایران حدود ۱۵۸۹۹۱ هکتار است که حدود ۶۵۷۷۱۰۹ تن برداشت می‌شود. چین با تولید بیش از ۵۰ درصد گوجه‌فرنگی جهان، رتبه اول را در تولید این محصول دارا می‌باشد. ایران نیز با تولید حدود شش درصد از کل گوجه‌فرنگی در جهان، رتبه هفتم را به خود اختصاص داده است (FAO, 2018). گوجه‌فرنگی غنی از مواد غذایی مورد نیاز انسان و منبع خوبی از کارتنوئیدها (به ویژه لیکوپن)، ویتامین‌ها (C، E و B9) بتاکاروتن، فلاونوئیدها، ترکیبات فنلی، پتاسیم، پروتئین و فیبر غذایی است. لیکوپن عامل رنگ قرمز در میوه‌ها و سبزی‌ها از جمله گوجه‌فرنگی است و فراوان‌ترین کارتنوئید در گوجه‌فرنگی است. مصرف منظم گوجه‌فرنگی منجر به کاهش خطر ابتلا به انواع مختلف سرطان (به ویژه سرطان پروستات) و بیماری‌های قلبی و عروقی می‌شود (Martí et al., 2018).

محتوای رطوبتی بالای گوجه‌فرنگی سبب ماندگاری کوتاه مدت و هزینه بالای نگهداری آن شده است، بنابراین جهت کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش زمان ماندگاری، ارائه روش‌های فرآوری مناسب برای این محصول اهمیت تجاری بالایی دارد. خشک‌کردن گوجه‌فرنگی یکی از روش‌های پرکاربرد برای فرآوری و نگهداری آن است. پودر گوجه‌فرنگی، در میان فرآورده‌های گوجه‌فرنگی خشک‌شده، بازار خاصی دارد. تولید پودر یک روش مناسب برای افزایش زمان نگهداری مواد غذایی است. از مزایای پودر گوجه‌فرنگی می‌توان به مدیریت بهتر در بسته‌بندی، حمل و نقل آسان، اختلاط راحت با سایر مواد در کارخانه‌های صنایع غذایی و ارزش تجاری بالا اشاره کرد (Liu et al., 2010). عموماً پودر میوه خیلی خشک، رطوبت دوست و حجیم است که منجر به افزایش هزینه‌های ذخیره‌سازی، بسته‌بندی و حمل و نقل آن می‌شود. برای غلبه بر این مشکلات، تراکم پودر میوه به شکل قرص، یک روش منحصربه‌فرد است. این روش با کاهش حجم و همچنین سطح تماس آن با محیط اطراف سبب کاهش میزان

خشک کن خلأیی به دلیل افزایش اختلاف فشار هوا بین بخش- های داخلی و سطح محصول، نرخ انتقال جرم نیز افزایش می یابد. در فشارهای پایین، محصول به از دست دادن رطوبت مستعدتر است اما برای کاهش رطوبت محصول نیاز به یک منبع حرارتی می باشد تا با ایجاد انرژی، سبب تبخیر رطوبت محصول شود. اشعه مادون قرمز به عمق خاصی از محصولات بیولوژیکی نفوذ می کند و دمای آن را افزایش می دهد. در نتیجه میزان انتشار آب از طریق محصولات بیولوژیکی افزایش می یابد و آب در سطح مواد تبخیر می شود. رطوبت توسط هوای خشک جذب می شود و خشک شدن سریع را فراهم می کند (Onwude *et al.*, 2016). با این روش به دلیل آنکه محصول در معرض درجه حرارت بالا قرار نمی گیرد مواد غذایی محصول خشک شده نیز بهتر حفظ می شوند (Martí *et al.*, 2018).

برای به دست آوردن شرایط بهینه یک فرآیند، از روش های مختلفی استفاده می شود. روشی که به طور گسترده در صنایع غذایی استفاده می شود، روش سطح پاسخ است که به بررسی اثر متغیرهای مستقل روی شاخص های کیفی و بهینه سازی فرآیندها می پردازد. روش سطح پاسخ مجموعه ای از تکنیک ها و روش های آماری جمع آوری اطلاعات است که می تواند با مدل سازی های ریاضی و آماری اثر، عوامل موثر در یک فرآیند را بر متغیرهای پاسخ بهینه سازی نماید (Sumic *et al.*, 2016).

انتخاب بهترین شرایط خشک کردن، کمترین تأثیر منفی را روی خواص کیفی و مواد مؤثره پودر خواهد شد، لذا با توجه به بررسی های انجام شده، تاکنون هیچ پژوهشی در مورد بهینه سازی دستگاه خشک کن خلأیی- مادون قرمز در فرآیند خشک کردن قرص تولید شده از پودر گوجه فرنگی با در نظر گرفتن پارامترهای شیمیایی و کیفی انجام نشده است. در این پژوهش اثر دما و میزان خلأ در خشک کن خلأیی- مادون قرمز بر خواص کیفی قرص گوجه فرنگی با ارائه مدل های تجربی مورد بررسی قرار گرفته و شرایط بهینه خشک کردن قرص تولید شده از پودر گوجه فرنگی تعیین گردید.

## مواد و روش ها

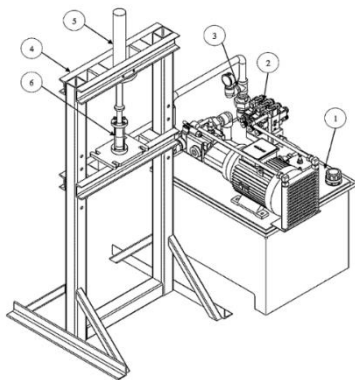
### تهیه پودر گوجه فرنگی

به منظور تهیه پودر، گوجه فرنگی تازه از میدان میوه و تره بار استان همدان تهیه شد. رطوبت اولیه محصول با استفاده از روش آون هوای داغ تعیین گردید که مقدار آن برابر با ۱۶۰۶/۵ d.b. به دست آمد (Marfil *et al.*, 2008). پوست نازک گوجه فرنگی ها به شیوه غوطه وری در آب گرم (۵۰°C به مدت ۳۰ s) با دست جدا شدند و سپس نمونه ها در ضخامت های ۳ mm برش خوردند.

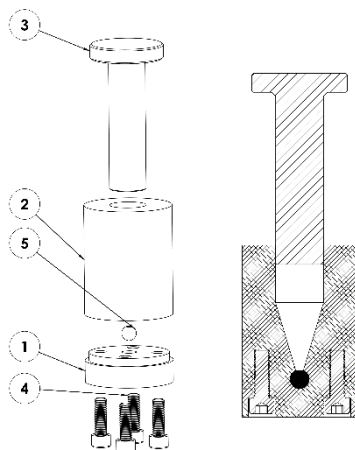
رطوبت پذیری آن می شود. به این ترتیب احتمال انجام واکنش های شیمیایی و تخریب مواد مغذی محصول (اکسیداسیون) نیز کاهش می یابد. تبدیل پودر به قرص در صنعت داروسازی به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرد، اما کاربرد آن در صنعت غذا کم است و یا در مراحل اولیه توسعه است (Martí *et al.*, 2018). تاکنون تحقیقاتی در مورد تولید قرص از پودر میوه های پیتایا، انبه، گواوا و همچنین تولید قرص های غذایی حاوی پودر میوه های مختلف از جمله خرما، اسپیرولینا و نارنگی گزارش شده است ( ; Adiba *et al.*, 2011 Yusof *et al.*, 20123; Zea *et al.*, 201; Ong *et al.*, 2014).

با توجه به مطالعات کمی که در مورد تولید قرص های غذایی انجام شده، مطالعه پارامترهای اثرگذار بر فرآیندهای قرص سازی از اهمیت خاصی برخوردار است. خواص قرص به شدت وابسته به فرآیندهای تولید آن شامل فرآیند پیش آماده سازی (پوست کنی میوه، پودر کردن و رطوبت دهی یا بخاردهی به پودر)، فرآیندهای قرص سازی، خشک کردن و خنک کردن است (Ghasemi and Chayjan, 2018). در مطالعات انجام شده، به منظور انجام فرآیند قرص سازی از دستگاه های قرص ساز متنوعی شامل: تک محوره، چند محوره و یا شبیه ساز پرس استفاده شده است. فشرده سازی توسط قالب و یک پرس تک محوره به صورت گسترده در مطالعات قرص سازی به دلیل سادگی در اجرا و داده برداری استفاده می شود. اصول اساسی همه دستگاه های پرس قرص به طور معمول یکسان هستند، این فرآیندها معمولاً شامل پرکردن ماتریس قالب با پودر، سپس فشردن آن با یک سنبه، آزاد کردن فشار و در نهایت خارج کردن قرص از ماتریس می باشد (Aziz *et al.*, 2018). محتوای رطوبتی، چسبندگی، چگالی، جریان پذیری، اندازه و شکل ذرات پودر میوه پارامترهای مهمی هستند که به شدت بر رفتار فشرده سازی آن تأثیر می گذارند. برای ذخیره سازی ایمن قرص، مطلوب است که محتوای رطوبتی آن به کمتر از ۱۲ درصد بر مبنای تر کاهش داد. این فرآیند، تولید قرص و دوام آن را بهبود می بخشد و همچنین موجب عدم فروپاشی و شکستن قرص در هنگام جابجایی و حمل و نقل می شود (Mahapatra *et al.*, 2010). به منظور جلوگیری از فساد قرص های فشرده مرطوب و حفظ کیفیت آنها، خشک کردن یکی از مراحل مهم پس از فرآیند تولید آنها می باشد. تحقیقات نشان می دهد که عملیات خشک کردن قرص های فشرده مرطوب نیز اثر قابل توجهی بر خواص آنها دارد (Ghasemi and Chayjan, 2018). در خشک کن های صنعتی برای مقابله با اثرات نامطلوب خشک کردن و بالابردن کیفیت و ارزش غذایی محصول خشک شده از یک شیوه خشک کردن تحت خلأ استفاده می شود. در

۱۵ ثانیه به منظور آزادسازی تنش‌های موجود در بافت محصول متوقف می‌شد و سپس فشار از روی مواد برداشته می‌شد (Wongsiriamnuay and Tippayawong, 2015). در پایان دو فک بالایی و پایینی به آهستگی از هم جدا شده و قرص تشکیل شده از قالب خارج می‌شد.



شکل ۱- شماتیکی از دستگاه پرس هیدرولیک ساخته شده به منظور انجام آزمایش‌های قرص‌سازی (۱- پاور پک هیدرولیک، ۲- شیر کنترل جریان، ۳- شیر کنترل فشار، ۴- شاسی، ۵- جک هیدرولیک و ۶- قالب (Ghasemi et al., 2018))



شکل ۲- نمای برش خورده از قالب تشکیل قرص‌های کروی (۱- فک بالایی، ۲- فک بالایی، ۳- پیستون، ۴- پیچ‌های نگهدارنده و ۵- قرص کروی)

### فرآیند خشک کردن قرص‌های فشرده

قرص‌های فشرده مرطوب بلافاصله پس از پایان فرآیند قرص‌سازی با استفاده از یک خشک‌کن خلائی-مادون‌قرمز (شکل ۳) خشک شدند. آزمایش‌های خشک کردن در پنج سطح دمایی ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ و ۷۰ °C و پنج سطح فشار خلائی ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ و ۷۰ kPa انجام شدند. طی فرآیند خشک کردن، دمای داخل محفظه توسط یک ترموستات (آتبین، ساخت ایران) با درجه تفکیک ۰.۱ °C که به یک ترموکوپل نوع K متصل بود، کنترل می‌شد. ظرفیت خشک‌کن ۴۰۰ گرم قرص در هر وعده می‌باشد. طی فرآیند خشک شدن در فواصل زمانی مشخص، نمونه‌ها از خشک‌کن خارج

ورقه‌های گوجه‌فرنگی به وسیله یک خشک‌کن نیمه‌صنعتی به شیوه هوای گرم در دمای ۵۰ °C در سرعت هوای ۱ m/s خشک شدند تا محتوای رطوبتی آنها به زیر ۱۰ درصد بر پایه خشک (رطوبت مناسب جهت پودر کردن) برسد. دمای مورد مطالعه با توجه به این که تحت خشک شدن در محدوده دمایی ۵۰ تا ۶۰ °C، محتوای ویتامین ث و لیکوپین گوجه‌فرنگی به صورت قابل قبولی حفظ می‌شود، انتخاب شد (Ghasemi and Chayjan, 2019). سپس ورقه‌های خشک گوجه‌فرنگی با استفاده از یک دستگاه آسیاب خانگی (پاناسونیک، مدل MJ-M176P، ساخت مالزی) به مدت یک دقیقه آسیاب و پودر شدند. به منظور همگن کردن اندازه ذرات، پودر گوجه‌فرنگی توسط یک الک آزمایشگاهی با مش شماره ۵۰ (اندازه حفره‌ها ۰/۵ mm) الک شدند.

### تهیه خمیر گوجه‌فرنگی قبل از فرآیند قرص‌سازی

با توجه به پیش‌آزمایش‌های انجام شده، محتوای رطوبتی مناسب به منظور ایجاد چسبندگی کافی بین ذرات پودر گوجه‌فرنگی ۲۳ درصد بر پایه خشک انتخاب شد. در این تحقیق، از شربت فروکتوز با غلظت ۵۵ درصد به عنوان ماده چسبان استفاده شد. شربت فروکتوز به نسبت ۶ درصد وزنی (نسبت به وزن خام پودر گوجه‌فرنگی) در آب حل شد و محلول به دست آمده به پودر گوجه‌فرنگی اضافه شد. جرم آب مورد نیاز جهت رساندن محتوای رطوبتی پودر گوجه‌فرنگی به سطح ۲۳ درصد بر پایه خشک از رابطه (۱) تعیین شد. خمیر به دست آمده به مدت ۷۲ ساعت در یخچال در دمای ۴ °C نگهداری شد تا فرآیند جذب رطوبت انجام شود.

$$W_w = \frac{W_i (M_f - M_i)}{100 - M_f}$$

که  $W_w$  جرم آب اضافه شده به پودر  $W_i$  (g)، جرم اولیه پودر  $M_f$  (g)، رطوبت نهایی (d.b.) و  $M_i$  رطوبت اولیه (d.b.) هستند.

### فرآیند قرص‌سازی از خمیر گوجه‌فرنگی

فرآیند تولید قرص‌های کروی شکل گوجه‌فرنگی، توسط یک دستگاه پرس هیدرولیک آزمایشگاهی (شکل ۱) و یک قالب ته‌بسته (شکل ۲) انجام شد. این قالب از سه بخش اصلی شامل فک بالایی، فک پایینی و یک پیستون تشکیل شده است. طی فرآیند قرص‌سازی با این قالب، مواد خام از طریق مجرای ورودی قرار گرفته در فک بالایی وارد قالب می‌شدند و با اعمال فشار به پیستون، مواد خام با عبور از قسمت مخروطی شکل وارد دو نیم‌کره بین فک بالایی و پایینی (با قطر ۱۲ mm) می‌شدند و در یک حجم بسته، متراکم و قرص فشرده تشکیل می‌گردید. پس از رسیدن فشار روغن هیدرولیک به ۷۵ بار، حرکت پیستون به مدت

فازها از هم جدا شوند. فاز هگزان (فاز بالایی که احتمالاً زرد رنگ است) نمونه با دقت برداشته شد و با دستگاه اسپکتروفوتومتر (مدل کری ۱۰۰، ساخت کشور آمریکا) در طول موج ۵۰۳ nm جذب نمونه قرائت شد (Fish et al., 2002).

#### اندازه‌گیری محتوای فنل کل

برای اندازه‌گیری محتوای فنل کل از روش فولین سیکالتو استفاده شد. به طور خلاصه، ابتدا با ۰/۵ g از بافت میوه با ۳ ml متانول ۸۵ درصد عصاره‌گیری شد. سپس ۳۰۰ μl از عصاره به ۱۵۰۰ μl معرف فولین سیکالتو ۱۰٪ افزوده شد و به مدت ۵ min در دمای آزمایشگاه قرار گرفت. سپس ۱۲۰۰ μl سدیم کربنات ۷ درصد همراه با ۶۰۰ μl آب مقطر به آن اضافه شد و به مدت ۹۰ min روی شیکر ۱۱۰ rpm در دمای اتاق به صورت تاریکی تکان داده شد. در نهایت میزان جذب نمونه گوجه‌فرنگی با استفاده از دستگاه اسپکتوفوتومتر (مدل کری ۱۰۰، ساخت کشور آمریکا) در طول موج ۷۶۵ nm اندازه‌گیری شد و پس از مقایسه با استاندارد اسیدگالیک، بر اساس میلی‌گرم اسید گالیک در یک گرم بافت نمونه گوجه‌فرنگی بیان گردید (Singleton and Rossi, 1965).

#### اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گوجه‌فرنگی از طریق توانایی خنثی‌کنندگی رایکال آزاد (RSC<sup>۱</sup>) DPPH (۲ و ۲ دی فنیل ۱- پیگریل هیدرازیل) به صورت درصد بازدارندگی محاسبه شد. در این روش ابتدا ۵۰۰ μl از عصاره تهیه شده برای فنل کل همراه با ۵۰۰ μl آب مقطر به مدت پنج دقیقه و با سرعت ۱۰۰۰ rpm سانتریفیوژ شد. سپس ۷۵ μl از محلول حاصل به لوله‌های آزمایش منتقل شده و در نهایت ۲۹۲۵ μl محلول متانولی DPPH (با غلظت mg ۲/۴ در ۱۰۰ ml متانول ۰/۸۵٪) به آن اضافه شد و پس از چند ثانیه ورتکس، جذب نوری نمونه محلول‌های بدست آمده و شاهد توسط اسپکتوفوتومتر (مدل کری ۱۰۰، ساخت کشور آمریکا) در طول موج ۵۱۵ nm قرائت شد. درصد RSC از رابطه (۲) محاسبه شد (Brand-Williams et al., 1995)

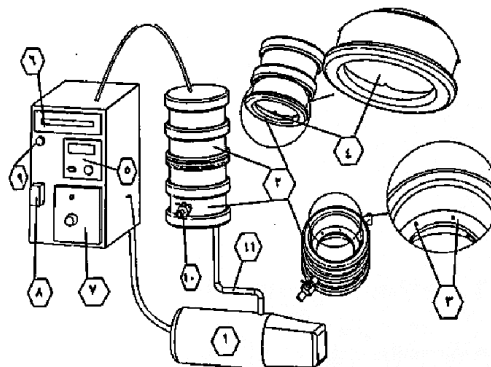
$$RSC (\%) = \left( \frac{A_{blank} - A_{sample}}{A_{blank}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که  $A_{sample}$  و  $A_{banke}$  به ترتیب میزان جذب شاهد و نمونه هستند.

#### اندازه‌گیری رنگ و محاسبه تغییرات آن

به منظور اندازه‌گیری شاخص‌های رنگی از روش پردازش تصویر استفاده شد. بدین منظور از اسکنر اچ‌پی مدل Scan Jet G4010

و محتوای رطوبتی آنها تعیین می‌شدند. آزمایش‌ها تا رسیدن به محتوای رطوبتی ۱۰٪ d.b. ادامه یافت.



شکل ۳- شماتیک خشک‌کن خلائی- مادون قرمز (۱) - پمپ خلا، ۲- محفظه خلا، ۳- حسگرهای دما و خلا، ۴- لامپ مادون قرمز، ۵- ترموستات، ۶- کنترل گر و عملگر فشار خلا، ۷- دیمر، ۸- فیوز، ۹- چراغ سیگنال، ۱۰- شیر شکستن خلا و ۱۱- شلنگ خلا (Safari et al., 2016)

تعیین خصوصیات شیمیایی و کیفی قرص‌های فشرده کروی خواص شیمیایی گوجه‌فرنگی تازه (قبل از فرآیند خشک شدن)، پودر گوجه‌فرنگی (بعد از فرآیند خشک شدن) و قرص خشک‌شده بعد از فرآیند خشک‌کردن خلائی- مادون قرمز تعیین شدند.

#### اندازه‌گیری غلظت ویتامین ث

غلظت ویتامین ث به روش تیتراسیون دو مرحله‌ای اندازه‌گیری شد (Ghasemi and Chayjan, 2019). در این روش ابتدا مقدار ۲۵ ml اسید متافسفریک ۶ درصد به ۱۰ g نمونه گوجه‌فرنگی اضافه گردید (محلول استخراج)، سپس ۵ ml از این محلول با اسید متافسفریک ۳ درصد در ارلن ۵۰ cc به حجم رسانده شد و توسط کاغذ صافی فیلتر شد. پس از آن ۱۰ ml از نمونه صاف شده توسط ۲-۶ دیکلروفنل‌ایندوفنل (محلول آشکارساز) تیترو گردید. در نقطه پایان آزمایش، محلول به رنگ صورتی کم‌رنگ درآمد که این رنگ به مدت ۱۵ s دوام داشت.

#### اندازه‌گیری محتوای لیکوپن

به منظور اندازه‌گیری مقدار محتوای لیکوپن، نمونه‌ها ابتدا محلول استخراج با ترکیب ۵ ml اتانول ۹۵ درصد، ۵ ml استون خالص و ۱۰ ml هگزان ساخته شد. سپس بین ۰/۴ تا ۰/۶ g نمونه گوجه‌فرنگی به ظرف حاوی محلول استخراج اضافه شد. محلول بدست آمده توسط یک شیکر با سرعت ۱۸۰ rpm به مدت ۱۵ min با یکدیگر ترکیب شدند تا مخلوط همگنی بدست آید. پس از آن ۳ ml آب مقطر مجدداً به نمونه‌ها اضافه شد و ۵ min با همان شرایط قبل روی شیکر قرار داده شد. سپس نمونه‌ها را از روی شیکر برداشته و به مدت ۵ min در دمای آزمایشگاه قرار داده شدند تا

اکسپرت<sup>۱</sup> نسخه ۱۰ تعریف شدند. متغیرهای مستقل (ورودی) به نرم افزار دیزاین اکسپرت در خشک کن خلائی- مادون قرمز شامل مدت دمای هوای محفظه خشک کن و فشار خلاء بودند. متغیرهای وابسته که مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از: محتوای لیکوپن، غلظت ویتامین ث، محتوای فنل کل، فعالیت آنتی اکسیدانی و شاخص های رنگی  $\Delta L^*$ ،  $\Delta a^*$  و  $\Delta b^*$  برای مدل سازی رفتار سیستم های عاملی دو خطی و بررسی اثرهای متقابل از مدل (۶) استفاده شد (Da Porto and Natolino, 2018).

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

که در این رابطه،  $y$  متغیر پاسخ،  $x_j$  مقدار مستقل،  $x_i$  مقدار واقعی هر پارامتر،  $k$  تعداد متغیرها،  $\beta_j$  ضرایب متغیرها،  $\beta_{ij}$  ضرایب اثرهای متقابل متغیرها است. در برآورد کردن ضرایب متغیرها ( $\beta$ )ها برای یک مدل درجه دوم نمی توان به راحتی طرح چند عاملی دو سطحی با نقاط مرکزی و حقیقی استفاده کرد، زیرا تعداد  $\beta$ ها بیشتر از تعداد تیمارها می شود. از این رو با اضافه کردن نقاط محوری، محاسبه  $\beta$ ها و همچنین استفاده بهتر از مدل درجه دوم امکان پذیر است. متغیرهای مستقل و سطوح کدبندی شده آن ها و تعداد آزمایش ها برای خشک کن خلائی- مادون قرمز به- ترتیب در جدول ۱ و ۲ آورده شده اند.

استفاده شد. ابتدا دستگاه اسکنر توسط کارت های سیاه و سفید 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 حاصل از آن با درجه تفکیک ۱۲۰۰ dpi اسکن شدند. عکس های به دست آمده توسط نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۷a پردازش گردید و مقادیر رنگی  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  به دست آمده محاسبه شدند. در پایان با استفاده از روابط (۳) تا (۵) تغییرات رنگ گوجه فرنگی تازه و پودر و قرص حاصل از آن پس از خشک شدن محاسبه گردید (Ahmadi and Amiri Chyjan, 2017).

$$\Delta L^* = (L_0^* - L_1^*) \quad (3)$$

$$\Delta a^* = (a_0^* - a_1^*) \quad (4)$$

$$\Delta b^* = (b_0^* - b_1^*) \quad (5)$$

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

در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل داده ها و بهینه سازی فرآیند خشک کردن قرص فشرده کروی تولید شده از پودر گوجه فرنگی با خشک کن خلائی- مادون قرمز از روش سطح پاسخ استفاده شد. آزمایش ها در قالب طرح مرکب مرکزی در نرم افزار دیزاین

جدول ۱- سطوح کدبندی شده متغیرهای مستقل مورد مطالعه و سطوح آنها

سطوح کدبندی شده متغیرها					نماد	متغیرهای مستقل
۲	۱	۰	-۱	-۲		
۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	$X_1$	دمای هوای داخل محفظه (°C)
۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	$X_2$	فشار خلاء (kPa)

جدول ۲- آزمایش های انجام شده برای بررسی اثر متغیرهای پاسخ بر فرآیندهای قرص سازی از پودر گوجه فرنگی و خشک کردن آنها به روش سطح پاسخ

تعداد تکرار	سطوح متغیرهای مستقل (مقدار کدبندی)		شماره آزمایش
	فشار خلاء (kPa)	دمای هوای داخل محفظه (°C)	
۵	۴۰ (۰)	۶۰ (۰)	۱
۱	۳۰ (-۱)	۵۰ (-۱)	۲
۱	۴۰ (۰)	۴۰ (-۲)	۳
۱	۵۰ (۱)	۵۰ (-۱)	۴
۱	۶۰ (۲)	۶۰ (۰)	۵
۱	۴۰ (۰)	۸۰ (۲)	۶
۱	۳۰ (-۱)	۷۰ (۱)	۷
۱	۲۰ (-۲)	۶۰ (۰)	۸
۱	۵۰ (۱)	۷۰ (-۱)	۹

در این پژوهش به دلیل اهمیت بالای کیفیت در فرآوری گوجه‌فرنگی، برای پارامترهای شیمیایی لیکوپن و ویتامین ث بیشترین ضریب وزنی (۵)، برای ارزیابی رنگ ضریب وزنی متوسط (۳) و برای محتوای فنل کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی کمترین ضریب وزنی (۱) لحاظ گردید.

### نتایج و بحث

ضرایب معادله رگرسیونی حاصل از روش سطح پاسخ و اطلاعات آماری به دست آمده برای متغیرهای پاسخ در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- ضرایب مدل برازش شده به معادله رگرسیونی درجه دوم برای متغیرهای پاسخ (X<sub>1</sub> دمای هوای داخل محفظه، X<sub>2</sub> فشار خلأ)

ضرایب مدل							منابع تغییرات
$\Delta b^*$	$\Delta a^*$	$\Delta L^* AA$ (%)	TFC (mgGAE/100gDM)	CVC (mg/gDM)	LC (mg/100gDM)		
عرض از مبدأ							
+۱/۹۰	+۹/۳۳	+۱۲/۳۶	+۵۸/۴۴	+۶/۱۳	+۰/۷۵	+۱۲۱۸/۳۹ (b <sub>0</sub> )	
عبارت خطی							
-۳/۰۶ <sup>a</sup>	-۳/۷۲ <sup>a</sup>	-۱/۰۳ <sup>a</sup>	+۱۹/۸۸ <sup>a</sup>	-۱/۹۶ <sup>a</sup>	-۰/۳۶ <sup>a</sup>	+۳۶۴/۹۱ <sup>a</sup> (b <sub>1</sub> ) X <sub>1</sub>	
+۰/۲۱ <sup>ns</sup>	-۰/۱۴ <sup>ns</sup>	+۱/۶۱ <sup>a</sup>	+۲/۹۵ <sup>c</sup>	-۰/۲۲ <sup>ns</sup>	-۰/۰۱۹ <sup>ns</sup>	+۳۲/۹۲ <sup>ns</sup> (b <sub>2</sub> ) X <sub>2</sub>	
اثر متقابل							
+۰/۲۸ <sup>ns</sup>	+۰/۲۵ <sup>ns</sup>	+۱/۲۶ <sup>b</sup>	-۱/۰۳ <sup>ns</sup>	-۰/۱۰ <sup>ns</sup>	+۰/۰۶۷ <sup>ns</sup>	+۴۹/۳۹ <sup>ns</sup> (b <sub>12</sub> ) X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	
عبارت درجه دوم							
+۰/۱۲ <sup>ns</sup>	-۰/۸۳ <sup>b</sup>	-۰/۷۴ <sup>b</sup>	+۰/۴۸ <sup>ns</sup>	+۰/۰۸۸ <sup>ns</sup>	-۰/۰۳۳ <sup>ns</sup>	-۲۰/۷۹ <sup>ns</sup> (b <sub>11</sub> ) X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	
-۰/۰۴ <sup>ns</sup>	-۰/۰۷ <sup>ns</sup>	-۰/۰۶ <sup>ns</sup>	+۰/۳۱ <sup>ns</sup>	-۰/۰۸۱ <sup>ns</sup>	+۰/۰۱۷ <sup>ns</sup>	-۱۲/۸۰ <sup>ns</sup> (b <sub>22</sub> ) X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	
۰/۴۷ <sup>ns</sup>	۰/۶۹ <sup>ns</sup>	۰/۴۷ <sup>ns</sup>	۰/۴ <sup>ns</sup>	۰/۸۲ <sup>ns</sup>	۰/۲۸ <sup>ns</sup>	۰/۷۲ <sup>ns</sup> Lack of Fit (P-value)	
۰/۰۰۰۳ <sup>a</sup>	۰/۰۰۰۱ <sup>a</sup>	۰/۰۰۰۴ <sup>a</sup>	۰/۰۰۰۱ <sup>a</sup>	۰/۰۰۰۱ <sup>a</sup>	۰/۰۰۰۴ <sup>a</sup>	۰/۰۰۰۹ <sup>a</sup> Model (P-value)	
۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۲ R <sup>2</sup>	
۵/۵۴	۸/۴۳	۶/۲۲	۵۸/۰۴	۸/۲۱	۶/۷۰	۶/۷۵ C.V. (%)	

a بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱، b اختلاف معنی‌دار در ۱٪، c اختلاف معنی‌دار در ۵٪ و ns عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشند. (LC محتوای لیکوپن، غلظت ویتامین ث، TFC محتوای فنل کل، AA فعالیت آنتی‌اکسیدانی و  $\Delta L^*$ ،  $\Delta a^*$  و  $\Delta b^*$  تغییرات شاخص‌های رنگی)

با محتوای رطوبتی ۲۳ درصد بر پایه خشک و خشک‌کردن در دمای ۴۰ °C و فشار خلأ ۴۰ kPa به دست آمد. تحت این شرایط، غلظت ویتامین ث از ۲/۰۵ mg/gDM در ابتدای فرآیند خشک‌کردن به ۱/۳۵ g/gDM در انتهای فرآیند خشک‌کردن به مقدار ۳۲/۸۳ درصد کاهش یافت و بیشترین نرخ تخریب ویتامین ث در شرایط قرص‌سازی از پودر گوجه‌فرنگی با محتوای رطوبتی ۲۳ درصد بر پایه خشک و خشک‌کردن آن در دمای ۸۰ °C و فشار خلأ ۴۰ kPa به دست آمد که در این شرایط غلظت ویتامین ث در ابتدای فرآیند خشک‌کردن ۲/۰۵ mg/gDM بود که در انتهای فرآیند خشک‌کردن به صفر رسید یعنی به مقدار ۱۰۰ درصد کاهش یافت. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تنها تأثیر خطی متغیر دمای هوای محفظه خشک‌کن بر غلظت ویتامین ث قرص گوجه‌فرنگی معنی‌دار بود، درحالی‌که سایر اثرات

با توجه به مقادیر آماری ارائه شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود که مقدار ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) برای تمامی مدل‌های ارائه شده بالاتر از ۰/۹۲ و ضریب تغییرات برای تمامی مدل‌ها کمتر از ۸/۴۳ بود به جز ضریب فعالیت آنتی‌اکسیدانی که مقدار ضریب تغییرات برای آن برابر با ۵۸/۰۴ به دست آمد. بنابراین مقادیر پایین ضریب تغییرات (≈۱۰) برای اغلب مدل‌های پیشنهادی در جدول ۳ نشان‌دهنده تکرارپذیری خوب این مدل‌ها می‌باشد (Ghasemi *et al.*, 2018). همچنین با توجه به معنی‌دار نشدن فاکتور عدم برازش برای همه متغیرهای مورد مطالعه، می‌توان گفت که مدل‌های ارائه شده به خوبی توانسته‌اند مقدار تغییرات متغیرهای وابسته را پیش‌بینی کنند.

### غلظت ویتامین ث

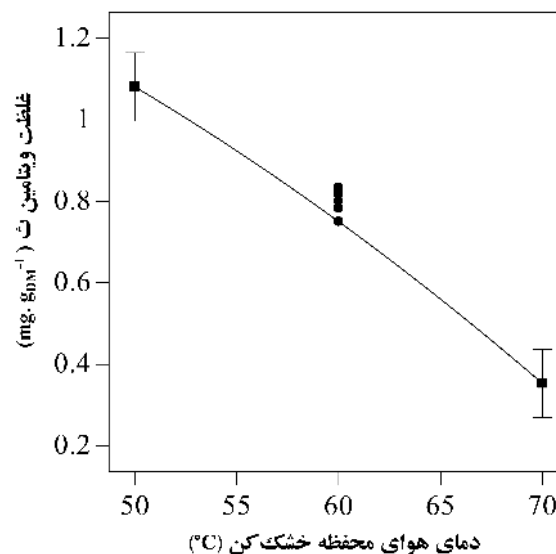
کمترین تخریب ویتامین ث در شرایط قرص‌سازی از پودر گوجه

### محتوای لیکوپن

مقدار لیکوپن قرص گوجه‌فرنگی خشک‌شده بین ۵۴/۴۷- تا ۶۱/۸ درصد تغییر کرد. نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تنها تأثیر خطی متغیر دمای هوای محفظه خشک‌کن بر مقدار لیکوپن قرص معنی‌دار بود. ضرایب مثبت دما و فشار خلاء در مدل برازش شده به داده‌های آزمایش با استفاده از روش سطح پاسخ دلالت بر اثر مثبت این دو متغیر (به ویژه دما) بر میزان لیکوپن دارد؛ به عبارت دیگر با افزایش دمای محفظه‌ی خشک‌کن، محتوای لیکوپن قرص افزایش یافت. به نحوی که بیشترین میزان لیکوپن در بیشترین سطح از دمای خشک‌کردن ( $80^{\circ}\text{C}$ ) برابر با  $1795/7 \text{ mg}/100\text{gDM}$  به دست آمد که نسبت به نمونه گوجه-فرنگی اولیه معادل  $10/6$  درصد افزایش داشت. همچنین کمترین میزان لیکوپن در کمترین سطح از دمای خشک‌کردن ( $40^{\circ}\text{C}$ ) برابر با  $550/5 \text{ mg}/100\text{gDM}$  به دست آمد که  $66$  درصد کاهش یافت.

در شکل ۵ اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن بر میزان لیکوپن (پس از انجام فرآیند خشک‌کردن) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج این شکل قابل مشاهده است، با افزایش دمای هوا، میزان لیکوپن افزایش یافت. این افزایش را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که پردازش حرارتی میوه‌ها و سبزیجات غنی از لیکوپن باعث دسترسی به لیکوپن بالاتری از محصولات تازه می‌شود، به طوری که تیمارهای با درجه حرارت بالا باعث ثبات یا کاهش کمی در محتوای لیکوپن میوه می‌شود. شکستن ماتریکس گوجه‌فرنگی توسط همگن‌سازی مکانیکی یا تیمار حرارتی گوجه‌فرنگی باعث افزایش قابلیت زیستی لیکوپن می‌شود (Purkayastha *et al.*, 2013). اکو و همکاران (۲۰۱۳) در خشک‌کردن مایکروویو- خلاء گزارش کرد که محتوای لیکوپن گوجه-فرنگی تازه در حدود  $2/96 \text{ mg}/100\text{gDM}^{-1}$  بود. در حالی که محتوای لیکوپن ورقه‌های گوجه‌فرنگی بعد از خشک‌کردن در توان مایکروویو  $700 \text{ W}$  و فشار خلاء  $40 \text{ kPa}$  به  $25/44 \text{ mg}/100\text{gDM}^{-1}$  افزایش یافت. لیکوپن گوجه‌فرنگی تازه می‌تواند از فرم ترانس آن به *cis*-lycopene تبدیل شود که به عنوان یک نتیجه از تیمار حرارتی و یا تجزیه به شکل بی‌رنگ است. پردازش حرارتی به طور قابل توجهی محتوای لیکوپن قابل دسترس در گوجه فرنگی را افزایش می‌دهد. علت این افزایش در میزان لیکوپن bioaccessible در درجه اول آن است که آزادی فیتوکمیکال‌ها از ماتریکس افزایش یافته و آن را در استخراج بیشتر در دسترس قرار می‌دهد (Ekow *et al.*, 2013). همچنین نتایج نشان داد که در فشارهای ثابت، با افزایش دما، محتوای لیکوپن افزایش یافت.

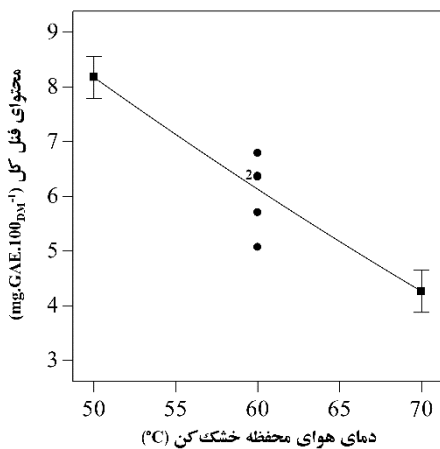
متقابل و درجه دوم دمای هوا و فشار خلاء بر غلظت ویتامین ث قرص گوجه‌فرنگی در یک سطح احتمال مشخص معنی‌دار نبودند. در شکل ۴ اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن بر غلظت نهایی ویتامین ث (پس از انجام فرآیند خشک‌کردن) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج این شکل قابل مشاهده است با افزایش دمای هوا، غلظت ویتامین ث کاهش یافت. دلیل کاهش غلظت نهایی ویتامین ث با افزایش دما را می‌توان افزایش انرژی حرارتی مورد نیاز برای انجام واکنش شیمیایی تجزیه ویتامین ث با افزایش دمای هوا دانست. همچنین از آنجایی که ویتامین ث، یک ویتامین محلول در آب است با افزایش محتوای رطوبتی، سرعت انجام واکنش تخریب آن بیشتر می‌گردد، ضمن آنکه افزایش محتوای رطوبتی، زمان انجام فرآیند خشک‌شدن را افزایش داده که سبب می‌شود محصول مدت بیشتری در معرض حرارت و اکسیژن قرار گیرد که همین مسئله نرخ تخریب ویتامین ث آن را افزایش می‌دهد (Purkayastha *et al.*, Ekow *et al.*, 2013). از دست‌دادن ویتامین C در درجه اول با تخریب شیمیایی که شامل اکسیداسیون اسید آسکوربیک به دی‌هیدرا آسکوربیک اسید (DHAA) و پس از هیدرولیز به اسید ۲،۳- دکتوگولونیک<sup>۱</sup> و پلیمریزاسیون بیشتر به شکل سایر محصولات مواد مغذی غیرفعال رخ می‌دهد زیرا گرما به عنوان سرعت‌دهنده روند اکسیداسیون اسید آسکوربیک شناخته شده است و پردازش حرارتی منجر به از دست‌دادن محتوای ویتامین C در میوه‌ها و سبزیجات می‌شود (Santos and Silva, 2008). همچنین نتایج نشان داد که در فشارهای ثابت، با افزایش دما، غلظت ویتامین ث کاهش یافت.



شکل ۴- اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن بر غلظت ویتامین ث قرص-های فشرده شده گوجه‌فرنگی



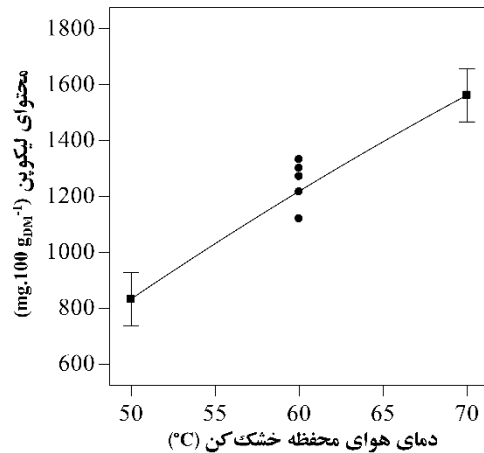
می کند تا از تخریب و از دست دادن اسید فنولیک جلوگیری شود ولی با افزایش دما آنزیمها فعال شده و منجر به از دست دادن اسید فنولیک می شود (Dewanto *et al.*, 2002; Toor and Savage, 2006). علاوه بر این، دما، اکسیژن و آنزیمها نیز عوامل اصلی موثر در ثبات اسیدهای فنولی هستند (Dewanto *et al.*, 2002; Ifie and Marshall, 2018). هم چنین نتایج نشان داد که در فشارهای ثابت، با افزایش دما، محتوای فنل کل قرص های گوجه فرنگی کاهش یافت. طی تحقیقی روی خشک کردن سه رقم گوجه فرنگی گزارش شد که محتوای فنل کل بین ۸ تا ۳۲ درصد پس از خشک کردن کاهش یافت (Kerkhofs *et al.*, 2005).



شکل ۶- اثر خطی دمای هوای محفظه خشک کن بر محتوای فنل کل قرص های فشرده گوجه فرنگی

#### فعالیت آنتی اکسیدانی

فعالیت آنتی اکسیدانی قرص گوجه فرنگی خشک شده بین ۱۶/۵ تا ۹۷/۰۸ درصد متغیر بود. با توجه به نتایج حاصل از مدل برازش شده به داده های آزمایش (جدول ۳) مشاهده شد که تنها تأثیر خطی متغیر دمای هوای محفظه خشک کن بر فعالیت آنتی-اکسیدانی قرص معنی دار بود، در حالی که سایر اثرات متقابل و درجه دوم دمای هوا و فشار خلاء بر فعالیت آنتی اکسیدانی قرص در یک سطح احتمال مشخص معنی دار نبودند. ضرایب مثبت دما و فشار خلاء در مدل برازش شده به داده های آزمایش، دلالت بر اثر مثبت دما و فشار خلاء بر فعالیت آنتی اکسیدانی دارد؛ به عبارت دیگر با افزایش دمای محفظه خشک کن، فعالیت آنتی اکسیدانی قرص گوجه فرنگی افزایش یافت. به نحوی که بیشترین تخریب فعالیت آنتی اکسیدانی در شرایط خشک کردن در دمای ۴۰ °C و فشار خلاء ۴۰ kPa به دست آمد. تحت این شرایط، فعالیت آنتی اکسیدانی از ۷۴/۵۲ درصد در ابتدای فرآیند خشک کردن، به مقدار ۱۶/۵ درصد در انتهای فرآیند خشک کردن رسید و در مجموع ۵۸ درصد کاهش یافت. کمترین نرخ تخریب فعالیت



شکل ۵- اثر خطی دمای هوای محفظه خشک کن بر محتوای لیکوپین قرص های فشرده گوجه فرنگی

#### محتوای فنل کل

محتوای فنل کل قرص گوجه فرنگی خشک شده بین ۳/۷۳ تا ۶۱/۸ درصد متغیر بود. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تنها تأثیر خطی متغیر دمای هوای محفظه خشک کن بر محتوای فنل کل قرص گوجه فرنگی معنی دار بود. ضرایب منفی دما و فشار خلاء در مدل برازش شده به داده های آزمایش با استفاده از روش سطح پاسخ دلالت بر اثر منفی این دو متغیر (به ویژه دما) بر محتوای فنل کل دارد؛ به عبارت دیگر با افزایش دمای محفظه خشک کن، محتوای فنل کل قرص کاهش یافت. به نحوی که کمترین تخریب محتوای فنل کل در شرایط خشک کردن در دمای ۴۰ °C و فشار خلاء ۴۰ kPa به دست آمد. تحت این شرایط، محتوای فنل کل از ۹/۷۴ mgGAE/gDM در ابتدای فرآیند خشک کردن به ۱۰/۱۱ mgGAE/gDM در انتهای فرآیند خشک کردن رسید که به مقدار ۳/۷۳ درصد افزایش یافت. بیشترین نرخ تخریب محتوای فنل کل در شرایط خشک کردن در دمای ۸۰ °C و فشار خلاء ۴۰ kPa به دست آمد که در این شرایط محتوای فنل کل در ابتدای فرآیند خشک کردن ۲/۶۷ mgGAE/gDM بود که در انتهای فرآیند خشک کردن به ۶۱/۸ درصد کاهش یافت.

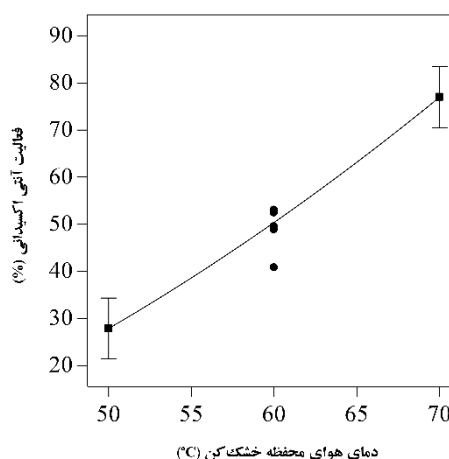
در شکل ۶ اثر خطی دمای هوای محفظه خشک کن بر محتوای فنل کل (پس از انجام فرآیند خشک کردن) ارائه شده است. همان طور که از نتایج این شکل قابل مشاهده است با افزایش دمای هوا، محتوای فنل کل کاهش یافت. دلیل این کاهش این است که فرآوری حرارتی ممکن است اسید فنولیک بیشتری را از تجزیه اجزای سلولی آزاد کند. اگرچه اختلال در دیواره سلولی باعث آزاد شدن آنزیم های اکسیدکننده و هیدرولیتی نیز می شود که می توانند آنتی اکسیدانها را در میوه ها و سبزیجات نابود کنند اما فرآوری حرارتی در دماهای پایین، این آنزیمها را غیرفعال

شاخص رنگی  $L^*$  کاهش یافت. مقدار تغییرات  $\Delta a^*$  در محدوده‌ی ۱۳/۹۷ (فشار ۴۰ kPa و دمای ۴۰ °C) و ۱/۵۷- (فشار ۴۰ kPa و دمای ۸۰ °C) بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بعد از خشک کردن قرص گوجه‌فرنگی شاخص رنگی  $a^*$  کاهش یافت. مقدار تغییرات  $\Delta b^*$  در محدوده‌ی ۸/۲۶ (فشار ۴۰ kPa و دمای ۴۰ °C) و ۳/۰۳- (فشار ۴۰ kPa و دمای ۸۰ °C) بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بعد از خشک کردن قرص، شاخص رنگی  $b^*$  کاهش یافت. مقدار ضرایب، نشان‌دهنده‌ی این بود که پارامتر دما بیشترین تأثیر را بر تغییرات شاخص رنگی  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  داشت. علامت منفی بیانگر این بود که با افزایش دما، تغییرات شاخص‌های رنگی  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  افزایش یافت. نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثرات اصلی و متقابل دمای هوا و فشار خلاء و عبارت درجه دوم دما بر شاخص رنگی  $\Delta L^*$  قرص معنی‌دار بود، همچنین فقط تأثیر خطی متغیر دمای هوای محفظه خشک‌کن بر شاخص‌های رنگی  $\Delta a^*$  و  $\Delta b^*$  قرص معنی‌دار بود. عبارت درجه دوم دما نیز بر شاخص رنگ  $a^*$  قرص‌های فشرده شده و خشک‌شده پودر گوجه‌فرنگی از نظر آماری معنی‌دار بود.

شکل ۸ الف تا ج به ترتیب اثر متقابل دمای هوای ورودی به خشک‌کن و فشار خلاء بر شاخص‌های رنگی قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی برای شاخص رنگ  $\Delta L^*$  و همچنین اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن بر شاخص‌های رنگی  $\Delta a^*$  و  $\Delta b^*$  (پس از انجام فرآیند خشک کردن) را به ترتیب برای تفاوت شاخص‌های رنگ  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  نسبت به شاخص‌های رنگ گوجه‌فرنگی تازه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش دما سبب افزایش اختلاف بیشتر بین شاخص‌های رنگ  $L^*$  و  $a^*$  قرص گوجه‌فرنگی نسبت به گوجه‌فرنگی تازه شد. به نحوی که افزایش دما سبب تیرگی بیشتر (کاهش شاخص  $L^*$ ) و کاهش مقدار قرمزی (کاهش شاخص  $a^*$ ) قرص شد. یعنی نمونه‌ها نسبت به حالت اول تیره‌تر شدند که به دلیل تشکیل رنگ‌دانه‌ی قهوه‌ای از طریق واکنش مایلارد بود. تغییر رنگ سبز به صورت گسترده‌ای به مقدار کاهش کلروفیل گیاه بستگی دارد به طوری که با باقی‌ماندن بیشتر کلروفیل در بافت گیاه، رنگ سبز، کمتر به سمت قرمزی میل خواهد کرد (Sledz et al., 2012). با توجه به نتایج شکل ۸ ج مشاهده می‌شود که در محتوای رطوبتی ۲۳ درصد بر پایه خشک، افزایش دما سبب کاهش اختلاف شاخص رنگ  $b^*$  بین قرص با گوجه‌فرنگی تازه شد. این تغییر رنگ در نمونه‌های خشک شده می‌تواند به علت واکنش‌های قهوه‌ای شدن مایلارد در طول فرآیند خشک شدن و تشکیل رنگ‌دانه‌های قهوه‌ای باشد (Arslan and Özcan, 2011). به طور کلی شاخص‌های رنگ در دماهای پایین به مقادیر نمونه‌های گوجه‌فرنگی‌های تازه نزدیک‌تر

آنتی‌اکسیدانی در شرایط خشک کردن در دمای ۸۰ °C و فشار خلاء ۴۰ kPa به دست آمد که در این شرایط فعالیت آنتی‌اکسیدانی از ۷۴/۵۲ درصد در ابتدای فرآیند خشک کردن، به ۹۷ درصد در انتهای فرآیند خشک کردن رسید، یعنی به مقدار ۲۲ درصد افزایش یافت.

در شکل ۷ اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی (پس از انجام فرآیند خشک کردن) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج این شکل قابل مشاهده است با افزایش دمای هوا، فعالیت آنتی‌اکسیدانی افزایش یافت. دلیل افزایش آنتی‌اکسیدان این است که فرآیند حرارتی ممکن است اسید فنولیک بیشتری را از تجزیه اجزای سلولی آزاد کند. اگرچه اختلال در دیواره سلولی باعث آزاد شدن آنزیم‌های اکسیدکننده و هیدرولیتی نیز می‌شود که می‌توانند آنتی‌اکسیدان‌ها را در میوه‌ها و سبزیجات نابود کنند اما فرآیند حرارتی در دماهای پایین، این آنزیم‌ها را غیرفعال می‌کند تا از تخریب و از دست دادن اسید فنولیک جلوگیری شود، ولی با افزایش دما، آنزیم‌ها فعال شده و منجر به از دست دادن اسید فنولیک می‌شود و در نتیجه ظرفیت آنتی‌اکسیدانی افزایش پیدا می‌کند. افزایش فعالیت کل آنتی‌اکسیدانی گوجه‌فرنگی‌های گرم شده می‌تواند با افزایش مقدار لیکوپن، یک فیتوشیمیایی بزرگ در گوجه‌فرنگی و دیگر فیتوشیمیایی‌های مرطوب آزاد شده از ماتریس با پردازش حرارتی در دماهای بالا بیان شود. یکی دیگر از دلایل می‌تواند اثرات افزایشی و هم‌افزایی دیگر فیتوشیمیایی مانند فنول‌ها و فلاونوئیدها باشد (Toor and Savage, 2006).



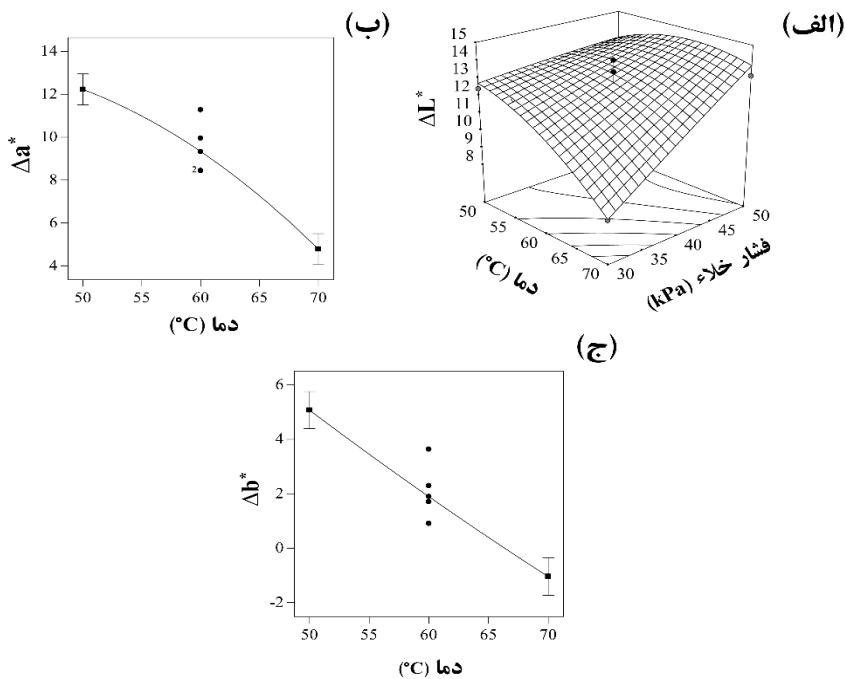
شکل ۷- اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی قرص‌های فشرده گوجه‌فرنگی

#### شاخص‌های رنگ نهایی $\Delta L^*$ ، $\Delta a^*$ و $\Delta b^*$

مقدار تغییرات  $\Delta L^*$  در محدوده‌ی ۲۸/۳۲ (فشار ۲۰ kPa و دمای ۷۰ °C) و ۱۴/۹۲ (فشار ۴۰ kPa و دمای ۴۰ °C) بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بعد از خشک کردن قرص گوجه‌فرنگی،

رنگ‌دانه‌ها دانست. همچنین با افزایش دمای خشک کردن، واکنش‌های ایزومریزاسیون و تخریب لیکوپن گوجه‌فرنگی افزایش می‌یابد و سبب کاهش شاخص‌های رنگ  $L^*$  و  $a^*$  می‌گردد.

بودند. مطابق نتایج تحقیقات قبلی، هرچه مقدار لیکوپن گوجه-فرنگی بیشتر باشد مقدار قرمزی محصول نیز بالاتر است (Purkayastha *et al.*, 2013). علت احتمالی این امر را می‌توان اثر رطوبت بر سرعت انجام برخی از واکنش‌های شیمیایی اثرگذار بر



شکل ۸- اثر متقابل و خطی دمای هوای ورودی به خشک‌کن و فشار خلاء بر شاخص‌های رنگی قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی (الف-  $\Delta L^*$  ب-  $\Delta a^*$  و ج-  $\Delta b^*$ )

مقدار متغیرهای پاسخ (ویژگی‌های کیفی و شیمیایی) و ضریب اهمیت آنها جهت بهینه‌سازی فرآیندهای قرص‌سازی از پودر گوجه‌فرنگی و خشک کردن با خشک‌کن خلأی- مادون قرمز در جدول ۴ نشان داده شده است.

شرایط بهینه عملیات خشک کردن قرص گوجه‌فرنگی به منظور بهینه‌سازی هم‌زمان متغیرهای پاسخ از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت استفاده شد. محدوده کمترین و بیشترین

جدول ۴- محدوده متغیرهای پاسخ و ضریب اهمیت آنها جهت بهینه‌سازی فرآیندهای خشک کردن به روش سطح پاسخ

متغیرهای پاسخ	هدف	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	ضریب اهمیت
غلظت ویتامین ث (g/mgDM)	بیشینه	۰	۱/۳۵	۴
محتوای لیکوپن (mg/100gDM)	بیشینه	۵۵۰	۱۷۹۵/۷	۴
محتوای فنل کل (mgGAE/gDM)	بیشینه	۲/۶۷	۱۰/۱۱	۲
فعالیت آنتی‌اکسیدانی (/.)	بیشینه	۱۶/۳۳	۹۷/۰۸	۲
شاخص رنگی $\Delta L^*$	کمینه	۷/۹۲	۱۶/۳۱	۳
شاخص رنگی $\Delta a^*$	کمینه	-۱/۵۷	۱۳/۹۷	۳
شاخص رنگی $\Delta b^*$	کمینه	-۳/۰۳	۸/۲۶	۳

d.b. ۲۳٪ که در خشک‌کن خلأی- مادون قرمز در دمای ۵۶ °C و فشار خلاء ۳۰ kPa خشک‌شده بودند به دست آمد. تحت این شرایط شاخص مطلوبیت ۰/۵۱۹ تا ۰/۵۱۹ به دست آمد و مقدار بهینه متغیرهای وابسته شامل غلظت ویتامین ث، محتوای لیکوپن، محتوای فنل کل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، شاخص‌های رنگ  $\Delta L^*$ ،  $\Delta a^*$  و  $\Delta b^*$  (اختلاف شاخص‌های رنگی با گوجه‌فرنگی تازه)، به

با استفاده از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت، ۹ راه‌حل (جدول ۵) برای تعیین شرایط بهینه با مقدار شاخص مطلوبیت بین ۰/۵۱۹ تا ۰/۵۱۳ بدست آمدند. نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۵ نشان می‌دهند که مقادیر بهینه به دست آمده تا حدود بسیار زیادی به یکدیگر نزدیک بودند که مطلوب‌ترین حالت برای قرص-های فشرده شده متشکل از پودر گوجه‌فرنگی با محتوای رطوبتی

ترتیب برابر با  $0.918 \text{ mg/gDM}$ ،  $10.717 \text{ mg/100gDM}$ ،  $6/860 \text{ mgGAE/gDM}$ ،  $41/82$  درصد،  $11/83$ ،  $10/5$ ،  $2/69$  به دست آمدند. در نهایت میزان تغییرات غلظت ویتامین ث، محتوای لیکوپن و محتوای فنل کل قرص گوجه‌فرنگی خشک‌شده در حالت بهینه نسبت به ابتدای فرآیند خشک‌کردن به ترتیب  $54/3$ ،  $2/6$  و  $29/62$  درصد کاهش داشت. گوجه‌فرنگی یک منبع غنی از ویتامین ث است. با این‌وجود فرآیند خشک‌کردن و محتوای رطوبتی اثر مضر بر مقدار غلظت ویتامین ث دارند. به طور کلی

مشاهده شده است که اگر طی فرآیندهای غذایی بتوان ویتامین ث را حفظ کرد می‌توان گفت که سایر مواد مغذی نیز حفظ خواهند شد. از آنجاکه اسید آسکوربیک (ویتامین ث) نسبت به سایر اجزا غذایی ناپایدارتر است بنابراین به‌عنوان شاخصی برای کیفیت مواد غذایی استفاده می‌شود (Marfil *et al.*, 2008). نتایج نشان داد که خشک‌کردن تحت شرایط ملایم‌تر (دمای پایین‌تر) سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید.

جدول ۵- مقدار بیش‌بینی‌شده متغیرهای وابسته و مستقل به روش سطح پاسخ در شرایط بهینه فرآیندهای خشک‌کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی در خشک‌کن خانگی- مالدون قرمز

شماره	دما (°C)	فشار خلاء (kPa)	غلظت ویتامین ث (g/mgDM)	محتوای لیکوپن (mg/100gDM)	محتوای فنل کل (mgGAE/gDM)	فعالیت آنتی-اکسیدانی (%)	AL*	Δa*	Δb*	شاخص مطلوبیت
۱	۵۶	۳۰	۰/۹۱۸	۱۰۷۱/۷۲	۶/۸۶	۴۱/۸	۱۱۳/۸	۱۰/۵۵	۲/۶۹	۰/۵۱۹
۲	۵۶	۳۰	۰/۹۱۸	۱۰۷۱/۵۵	۶/۸۶	۴۱/۸	۱۱۸/۳	۱۰/۵۶	۲/۷۰	۰/۵۱۹
۳	۵۶	۳۰	۰/۹۱۳	۱۰۷۵/۷۴	۶/۸۳	۴۲/۱	۱۱۸/۱	۱۰/۵۱	۲/۶۵	۰/۵۱۹
۴	۵۶	۳۰	۰/۹۲۲	۱۰۶۸/۰۹	۸۸۱/۶۰	۴۱/۵	۱۱۸/۵	۱۰/۵۹	۲/۷۳	۰/۵۱۹
۵	۵۷	۳۰	۰/۹۰۴	۱۰۸۳/۰۵	۶/۷۹	۴۲/۶	۱۱۷/۷	۱۰/۴۳	۲/۵۸	۰/۵۱۹
۶	۵۶	۳۰	۰/۹۳۲	۱۰۶۰/۱۶	۶/۹۲	۴۱/۱	۱۱۸/۹	۱۰/۶۷	۲/۸۱	۰/۵۱۹
۷	۵۷	۳۰	۰/۸۷۶	۱۱۰۴/۵۰	۶/۶۶	۴۴/۲	۱۱۶/۴	۱۰/۳۰	۲/۳۵	۰/۵۱۸
۸	۵۵	۳۰	۰/۹۸۹	۱۰۱۳/۱۹	۷/۱۹	۳۷/۶	۱۲۱/۳	۱۱/۱۴	۲/۳۰	۰/۵۱۶
۹	۵۹	۳۰	۰/۷۹۹	۱۱۶۳/۴۶	۶/۳۲	۴۸/۸	۱۱۲/۶	۹/۵۱	۲/۷۳	۰/۵۱۳

با گوجه‌فرنگی تازه)، به ترتیب برابر با ۰/۹۱۸ mg/gDM، ۱۰/۷۱/۷ mg/100gDM، ۶/۸۶۰ mgGAE/gDM، ۴۱/۸۲ درصد، ۱۱/۸۳، ۱۰/۵، ۲/۶۹ به دست آمدند. همچنین میزان تغییرات غلظت ویتامین ث، محتوای لیکوپن و محتوای فنل کل قرص گوجه‌فرنگی خشک‌شده در حالت بهینه نسبت به ابتدای فرآیند خشک کردن به ترتیب ۵۴/۳، ۲/۶ و ۲۹/۶۲ درصد کاهش داشت. نتایج نشان داد خشک کردن تحت شرایط ملایم‌تر (دمای پایین‌تر) سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه بوعلی سینا به جهت تأمین مالی هزینه‌های این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

### 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, G. M., and Amiri Chayjan, R. (2017). Optimization of hazelnut kernel drying in an infrared dryer with microwave pretreatment using response surface methodology. (In Farsi)
- Arslan, D., and Özcan, M. (2011). Drying of tomato slices: changes in drying kinetics, mineral contents, antioxidant activity and color parameters Secado de rodajas de tomate: cambios en cinéticos del secado, contenido en minerales, actividad antioxidante y parámetros de color. *CyTA-Journal of Food*, 9(3), 229-236.
- Aziz, M., Yusof, Y., Blanchard, C., Saifullah, M., Farahnaky, A., and Scheiling, G. (2018). Material Properties and Tableting of Fruit Powders. *Food Engineering Reviews*, 1-15.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.-E., and Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*, 28(1), 25-30.
- Da Porto, C., and Natolino, A. (2018). Optimization of the extraction of phenolic compounds from red grape marc (*Vitis vinifera* L.) using response surface methodology. *Journal of Wine Research*, 29(1), 26-36.
- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. K., and Liu, R. H. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(10), 3010-3014.
- Ekow, A. E., Haile, M. A., John, O. W. U. S. U., & Narku, E. F. (2013). Microwave-vacuum drying effect on drying kinetics, lycopene and ascorbic acid content of tomato slices. *Journal of Stored Product and Postharvest*, 4, 11-22.
- FAO, 2017. FAOSTAT: Data-crops. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy
- Fish, W. W., Perkins-Veazie, P., and Collins, J. K. (2002). A quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents. *Journal of Food composition and Analysis*, 15(3), 309-317.
- Ghasemi, A., and Chayjan, R. A. (2019) Numerical simulation of vitamin C degradation during dehydration process of fresh tomatoes. *Journal of Food Process Engineering*, paper number: e13189.
- Ghasemi, A., and 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., and Najafabadi, H. J. (2018). Optimization of granular waste production based on mechanical properties. *Waste Management*, 75, 82-93.
- Ifie, I., and Marshall, L. J. (2018). Food processing and its impact on phenolic constituents in food. *Cogent Food and Agriculture*, 4(1), 1-11.
- Kerkhofs, N., Lister, C., and Savage, G. (2005). Change in colour and antioxidant content of tomato cultivars following forced-air drying. *Plant Foods for Human Nutrition*, 60(3), 117-121.
- Liu, F., Cao, X., Wang, H., and Liao, X. (2010). Changes of tomato powder qualities during storage. *Powder Technology*, 204(1), 159-166.
- Mahapatra, A., Harris, D., Durham, D., Lucas, S., Terrill, T., Kouakou, B., and Kannan, G. (2010). Effects of moisture change on the physical and thermal properties of sericea lespedeza pellets. *International Agricultural Engineering Journal*,

### نتیجه‌گیری

اثر دمای هوای محفظه خشک‌کن بر همه متغیرهای پاسخ قرص گوجه‌فرنگی در خشک‌کن خلائی- مادون قرمز معنی‌دار بود. کمترین و بیشترین مقدار غلظت ویتامین ث، محتوای لیکوپن، محتوای فنل کل، غلظت ویتامین ث و شاخص‌های رنگ  $\Delta L^*$ ،  $\Delta a^*$  و  $\Delta b^*$  قرص فشرده گوجه‌فرنگی در خشک‌کن بستر سیال به ترتیب بین ۰ تا ۱/۳۵ mg/gDM، ۵۵۰/۵ تا ۱۷۹۵/۷ mg/100gDM، ۲/۶۷ تا ۱۰/۱۱ mgGAE/gDM، ۱۶/۵ تا ۹۷ درصد، ۱۴/۹۲ تا ۲۸/۳۲، ۱/۵۷- تا ۱۳/۹۷، ۳/۰۳- تا ۸/۲۶ به دست آمد. نقطه بهینه برای پارامترهای مستقل در فرآیند خشک کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی در دمای ۵۶ °C و فشار خلاء ۳۰ kPa به دست آمد. مقدار بهینه متغیرهای وابسته شامل غلظت ویتامین ث، محتوای لیکوپن، محتوای فنل کل، فعالیت آنتی اکسیدانی، شاخص‌های رنگ  $\Delta L^*$ ،  $\Delta a^*$  و  $\Delta b^*$  (اختلاف شاخص‌های رنگی

- 19(3), 23-29.
- Marfil, P., Santos, E., and 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., and 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.
- Ong, M., Yusof, Y., Aziz, M., Chin, N., and 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.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., and Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 15(3), 599-618.
- Purkayastha, M. D., Nath, A., Deka, B. C., and Mahanta, C. L. (2013). Thin layer drying of tomato slices. *Journal of food science and technology*, 50(4), 642-653.
- Santos, P., and Silva, M. (2008). Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables—A review. *Drying Technology*, 26(12), 1421-1437.
- Singleton, V. L., and Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.
- Sledz, M., and Witrowa-Rajchert, D. (2012). Influence of microwave-convective drying of chlorophyll content and colour of herbs. *Acta Agrophysica*, 19(4).
- Safari, M., AmiriChayjan, R., Alaei, B. (2016). Modeling of some thermal and physical properties of almond kernels under vacuum-infrared dryer with microwave pretreatment. , 39(1), 21-37
- Šumić, Z., Vakula, A., Tepić, A., Čakarević, J., Vitas, J., and Pavlič, B. (2016). Modeling and optimization of red currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM). *Food chemistry*, 203, 465-475.
- Toor, R. K., and Savage, G. P. (2006). Effect of semi-drying on the antioxidant components of tomatoes. *Food chemistry*, 94(1), 90-97.
- Wongsiriamnuay, T., and Tippayawong, N. (2015). Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets. *Biosystems Engineering*, 139, 111-120.
- Yusof, Y., Mohd Salleh, F., Chin, N., & Talib, R. (2012). The drying and tableting of pitaya powder. *Journal of Food Process Engineering*, 35(5), 763-771
- Zea, L. P., Yusof, Y. A., Aziz, M. G., Ling, C. N., and Amin, N. A. M. (2013). Compressibility and dissolution characteristics of mixed fruit tablets made from guava and pitaya fruit powders. *Powder Technology*, 247, 112-119.