



## مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: [www.fsct.modares.ac.ir](http://www.fsct.modares.ac.ir)

### مقاله علمی-پژوهشی

#### بهینه‌یابی فرآیند خشک کردن پیاز سفید در خشک‌کن خورشیدی فتوولتائیک- حرارتی مجهز به پمپ حرارتی

لیلا امیرسیدی<sup>۱</sup>، برات قبادیان<sup>۲\*</sup>، مرتضی آغاباشلو<sup>۳</sup>، حمید مرتضی‌پور<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران، تهران

۴- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قائن

#### اطلاعات مقاله

#### چکیده

#### تاریخ‌های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

#### کلمات کلیدی:

بهینه‌یابی،

خشک کردن خورشیدی،

پیاز سفید،

ضریب نفوذ موثر رطوبت،

نرخ استخراج رطوبت ویژه

DOI: 10.48311/fsct.2025.83899.0.

\* مسئول مکاتبات:

ghobadib@modares.ac.ir

سالیانه بخش زیادی از محصول پیاز در سطح جهان به دلیل تولید زیاد و نبود امکان فراوری مناسب، به هدر می‌رود. در این میان، خشک کردن یکی از روش‌های سنتی فراوری محصولات کشاورزی بوده که از دیرباز به منظور طولانی کردن دوره انبارمانی مواد غذایی مورد توجه بوده است. در همین راستا در این پژوهش از یک خشک‌کن خورشیدی فتوولتائیک- حرارتی برای خشک کردن پیاز سفید استفاده گردید. برای بهینه‌سازی نمونه‌های پیاز از روش سطح پاسخ به منظور بررسی تاثیر دمای هوا در سه سطح (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و نرخ جریان هوای خشک کردن در سه سطح (۰/۰۰۸، ۰/۰۱۶ و ۰/۰۲۴ کیلوگرم بر ثانیه) استفاده شد. به همین منظور، شرایط بهینه خشک کردن براساس انتخاب مقادارهای بیشینه ضریب نفوذ موثر رطوبت، بازده انرژی خشک کردن، نرخ استخراج رطوبت ویژه و ویتامین ث و انتخاب مقادارهای کمینه زمان خشک کردن و تغییرات رنگ استخراج گردید. با توجه به نتایج بدست‌آمده، شرایط بهینه خشک کردن پیاز سفید در دمای هوای ۶۲/۳۵ درجه سلسیوس و نرخ جریان هوای ۰/۰۲۴ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمد. همچنین در نقطه بهینه با درجه مطلوبیت ۰/۵۹، مقدار متغیرهای پاسخ ضریب نفوذ موثر رطوبت، زمان خشک کردن، رنگ، ویتامین ث، نرخ استخراج رطوبت ویژه و بازده انرژی خشک کردن به ترتیب  $10^{-9} \times 1.01$ ، ۱۹۶/۸۲، ۵۳/۹۸، ۰/۳۰ و ۷۹۷/۳۷ بدست آمدند.

## ۱- مقدمه

پیاز (*Allium cepa*) عضوی از خانواده *Amaryllidaceae* و یکی از گونه‌های با کشت وسیع است [۱]. بطوریکه با تولید حدود ۱۱۱ میلیون تن در سال ۲۰۲۲ پس از گوجه فرنگی در رتبه دوم تولید در جهان قرار دارد و ایران نیز سال‌هاست که در بین ده کشور برتر تولیدکننده پیاز قرار گرفته است. بطوریکه در جدیدترین برآورد، پس از هند، چین، مصر، ایالات متحده آمریکا، بنگلادش، ترکیه، و اندونزی در رتبه هشتم قرار دارد [۲]. پرمصرف‌ترین سبزی در تهیه غذای جهان، به ویژه در کشورهای گرمسیری بوده و علاوه بر افزودن طعم و مزه لذیذ به غذاها، به عنوان یک ترکیب دارویی خوب برای پیشگیری از آب مروارید و بیماری‌های قلبی عروقی، تنظیم و تقویت سیستم ایمنی بدن، کنترل سطح قند خون و سرطان می‌باشد [۳، ۴]. این محصول، به طور عمده، به صورت پیاز خشک‌شده، کنسرو پیاز و ترشی پیاز صادر می‌شود [۵]. پیاز خشک به عنوان یک محصول مهم در تجارت جهانی شناخته شده است و به صورت‌های مختلفی همچون ورقه‌ای، ریز خرد شده و پودر شده تولید می‌شود [۶].

پیاز حاوی ترکیبات شیمیایی مفید متعددی مانند فیبرها، ویتامین‌ها، اسیدهای آلی، ترکیبات فنلی و سایر آنتی-اکسیدان‌ها می‌باشد که برخی از این‌ها همچون ترکیبات فنلی و ویتامین ث به شدت تحت تأثیر تغییرات دما قرار می‌گیرند [۷]. بنابراین برای حفظ این ترکیبات، دقت در اعمال تیمارهای مختلف پس از برداشت این محصول و همچنین ذخیره مناسب آن ضروری بنظر می‌رسد. یکی از روش‌های ذخیره و نگهداری طولانی‌مدت این محصول که به خصوص در صنایع غذایی بزرگ بسیار حائز اهمیت است، خشک کردن آن می‌باشد [۸]. پیازها در انواع مختلف و رنگ‌های مختلفی موجودند که باعث تفاوت در تعیین شاخص‌های کیفی مناسب آنها می‌شود ولی بطورکلی رنگ محصول

خشک‌شده جزو پارامترهای بسیار مهم در تعیین کیفیت آن است [۵].

روش‌ها و خشک‌کن‌های مختلفی برای خشک کردن محصولات کشاورزی موجودند که هرکدام مزایا و معایبی دارند [۹]. خشک کردن به روش خورشیدی یکی از روش‌های رایج است که از دیرباز موردتوجه بوده و برای رفع معایب روش سنتی (خشک کردن در زیر آفتاب) همچون آلودگی و کیفیت پایین محصول خشک، خشک‌کن‌های خورشیدی توسعه داده شده‌اند [۱۰]. در این میان، هر کدام از محصولات غذایی و کشاورزی به نوبه خود شرایط بهینه‌ای برای خشک شدن دارند و محققان از روش‌های مختلف خشک کردن یا ترکیبی از آنها [۱۱] برای دستیابی به نقطه بهینه از نظر زمان خشک کردن، مصرف انرژی و کیفیت محصول برای محصولات مختلف کشاورزی استفاده می‌کنند [۱۲، ۱۳].

از آنجا که محصولات کشاورزی دارای هدایت حرارتی پایینی هستند، فرآیند خشک کردن آن‌ها نیازمند مصرف مقدار زیادی انرژی و زمان است که به نوبه خود هزینه‌های فرآیند را نیز افزایش می‌دهد [۱۴]. صنعت غذا به دنبال بهبود عملکرد سامانه‌ها و افزایش کارایی فرآیندها، بدون افزایش هزینه و زمان است. بنابراین یافتن شرایطی با بهترین خروجی برای یک سامانه یا یک فرآیند، هدف اصلی بهینه‌سازی می‌باشد [۱۵]. روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> (RSM) مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است و برای بهینه‌سازی فرآیندهای مختلفی که در آن‌ها پاسخ خاصی تحت تأثیر چند متغیر قرار دارد، استفاده می‌شود. از مهم‌ترین مزایای این روش، امکان ارزیابی تأثیر تعامل بین متغیرهای مستقل بر فرآیند و تولید مدل‌های ریاضی می‌باشد [۱۶].

با توجه به اهمیت مبحث خشک کردن و تأثیر عوامل مختلف در آن و همچنین قابلیت شناخته‌شده روش سطح پاسخ برای استخراج مدل‌های پیش‌بینی و تعیین شرایط بهینه فرآیندها، محققان زیادی از این روش در پژوهش‌های خود همچون

1-Response surface method

پیاز سفید استفاده شد. این سامانه خشک‌کنی شامل جمع‌کننده خورشیدی فتوولتائیک- حرارتی، محفظه خشک‌کن، دمنده، متراکم‌کننده، چگالنده، تبخیرکننده، شیر انبساط، گرم‌کن الکتریکی و سامانه کنترل کننده از نوع تناسبی- انتگرالی- مشتقی (PID) برای تنظیم بهتر دما بود. در هر آزمایش، نرخ جریان هوا و دما بر روی سطوح تعیین‌شده برای متغیرهای اصلی تنظیم می‌شد.

## ۲-۲- روش انجام آزمایش

در هر آزمایش، پیاز سفید متوسط با برش‌های دایره‌ای به قطرهایی در حدود ۷ سانتی‌متر از یک فروشنده تهیه و با چاقویی تیز به برش‌هایی با ضخامت ۳ میلی‌متر برش داده شد. سپس ۱۰۰ گرم از برش‌ها بر روی سینی محفظه خشک‌کن قرار داده می‌شد. آزمایش‌ها تا لحظه‌ای که محتوای رطوبت محصول به حدود ۱۰٪ می‌رسید، ادامه می‌یافت. با احتساب ۹ تیمار با سه تکرار، در مجموع ۲۷ آزمایش انجام شد. در طی هر آزمایش، یک ساعت قبل از شروع خشک کردن محصول، خشک‌کن در شرایط موردنظر راه‌اندازی می‌شد تا دمای داخل محفظه به حالت تعادل برسد. متغیرهای مستقل و سطوح آزمایشی آنها در جدول ۱ آورده شده است.

Table 1. Independent variables and related test levels

| Independent variables | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| Airflow temperature   | 50      | 60      | 70      |
| Airflow rate          | 0.008   | 0.016   | 0.024   |

معادله (۲) آورده شده است. البته معادله (۲) در زمان‌های خشک شدن طولانی، می‌تواند به صورت معادله (۳) ساده شود. در این معادله، معمولاً نفوذپذیری‌ها با ترسیم داده‌های تجربی خشک‌کردن به صورت  $\ln MR$  در برابر زمان خشک‌کردن ( $t$ ) تعیین می‌شوند [۲۴]. ضریب نفوذ موثر رطوبت که تحت تأثیر ترکیب، محتوای رطوبت، دما و تخلخل ماده قرار دارد، به دلیل اطلاعات محدود در مورد

تعیین شرایط بهینه خشک کردن توت قرمز تحت خلا [۱۷]، خشک کردن هویج با مایکروویو [۱۸]، خشک کردن برش‌های شلغم با خشک‌کن همرفتی- مادون قرمز [۱۹]، خشک کردن آب چغندر با خشک‌کن پاششی [۲۰]، خشک کردن دانه کدو تبیل با خشک‌کن همرفتی [۲۱] و خشک کردن هلو به روش اسمزی [۲۲] استفاده کرده‌اند اما با این حال، شرایط بهینه خشک کردن پیاز سفید با خشک‌کن خورشیدی فتوولتائیک- حرارتی مجهز به پمپ حرارتی تعیین نشده است.

بنابراین هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی متغیرهای مستقل دما و نرخ جریان هوای خشک‌کردن به منظور دست‌یابی به شرایط بهینه خشک کردن پیاز سفید به کمک خشک‌کن خورشیدی فتوولتائیک- حرارتی مجهز به پمپ حرارتی و همچنین استخراج مدل‌های پیش‌بینی از سه دیدگاه سینتیکی، انرژی و کیفی می‌باشد.

## ۲-مواد و روش‌ها

### ۲-۱- معرفی خشک‌کن خورشیدی فتوولتائیک- حرارتی

#### مجهز به پمپ حرارتی

در این پژوهش از یک خشک‌کن خورشیدی فتوولتائیک- حرارتی مجهز به پمپ حرارتی برای خشک کردن نمونه‌های

### ۲-۳- ضریب نفوذ موثر رطوبت

نرخ حرکت و انتقال رطوبت در محصول در حین خشک‌کردن، با استفاده از شاخصی بنام ضریب نفوذ موثر رطوبت  $D_{eff}$  و براساس قانون دوم فیک که در معادله (۱) آورده شده، توصیف می‌شود [۲۳]. با توجه به اینکه این قانون برای ذرات با هندسه صفحه‌ای، مانند تکه‌های پیاز برش‌خورده که به‌طور یکنواخت روی سینی پخش شده‌اند نیز قابل استفاده است، معادله ضریب نفوذ موثر رطوبت در

مکانیزم حرکت رطوبت در حین خشک کردن و پیچیدگی این فرآیند، مورد استفاده قرار می گیرد [۲۵].

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 MR \quad (۱)$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4H^2}\right) \quad (۲)$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (۳)$$

در نهایت با داشتن داده های تجربی و رسم منحنی  $\ln(MR)$  در مقابل زمان می توان با برازش خطی و تعیین شیب خط مستقیم، پاسخ را بدست آورد [۲۶].

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (۴)$$

$$\text{ب شیب} = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (۵)$$

سنجش رنگ پیازها براساس شاخص های رنگی  $L^*$  (روشنی- تیرگی)،  $a^*$  (قرمزی- سبزی) و  $b^*$  (آبی بودن- زردی) از دستگاه رنگ سنج (Hunter Lab colorimeter, Color Flex, Virginia, USA) استفاده شد [۱۱]. به همین منظور پیازهای خشک ابتدا آسیاب شده و سپس با کمک داده های رنگی ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) استخراج شدند. در نهایت به کمک معادله (۶) تغییرات رنگ محاسبه گردید.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (۶)$$

## ۲-۵- ویتامین ث

محتوای ویتامین ث که به نام اسید اسکوربیک (AA) نیز شناخته می شود، با روش تیتراسیون و با استفاده از ۶،۲-دی-کلروفنل-آیندوفنول<sup>۳</sup> اندازه گرفته شد. با استفاده از

در روابط بالا،  $MR$  بیانگر رطوبت نسبی،  $D_{eff}$  بیانگر نفوذ رطوبت موثر ( $m^2.s^{-1}$ )،  $L$  نصف ضخامت نمونه ( $m$ ) و  $t$  زمان ( $min$ ) است.

## ۲-۴- شاخص های رنگ

رنگ محصول، از پارامترهای مهم کیفی مورد نظر در خشک کردن می باشد که باید تا حد قابل قبولی در حین فرایند، حفظ شود تا محصول، بازارپسندی مطلوب را داشته باشد. برای

در معادله (۶) مقدارهای  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  به ترتیب نشان دهنده سطح روشنایی- تیرگی، قرمزی- سبزی و آبی بودن- زردی نمونه ها هستند. همچنین،  $L_0$ ،  $a_0$  و  $b_0$  مقدار مشخصه های رنگی برش های پیاز تازه را نشان می دهند.

$$SMER = \frac{m_w}{E_{in}} \quad (7)$$

در رابطه بالا،  $m_w$  (kg) مقدار رطوبت استخراج شده از محصول و  $E_{in}$  (kJ) تمام انرژی مصرف شده توسط اجزای مختلف سامانه در طول زمان خشک کردن است.

## ۷-۲- بازده انرژی خشک کردن

بازده انرژی به عنوان نسبت انرژی مصرف شده برای تبخیر رطوبت از نمونه به مجموع مصرف انرژی، شامل انرژی حرارتی، مکانیکی، و الکتریکی تعریف شده و با استفاده از معادله (۸) محاسبه می‌شود [۲۹].

$$\eta_e = \frac{\dot{Q}_{ev}}{\dot{W}_{Total}} \quad (8)$$

انرژی مورد استفاده برای تبخیر رطوبت ( $\dot{Q}_{ev}$ ) نیز با استفاده از معادله (۹) محاسبه می‌شود [۳۰].

$$\dot{Q}_{ev} = h_{fg} \cdot m_w \quad (9)$$

که در آن  $h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر آب می‌باشد که هم می‌توان بصورت تقریبی از عدد ثابت آن استفاده کرد و هم می‌توان آن را به کمک معادلات ارائه شده، به صورت تابعی از دمای مطلق ( $T$ ) هوای خشک کردن محاسبه کرد [۳۱].

$$h_{fg} = 2.503 \times 10^6 - 2.386 \times 10^3 \times (T - 273.16)$$

$$h_{fg} = (7.33 \times 10^{12} - 1.60 \times 10^7 \times T^2)^{0.5}$$

فراهم می‌کند [۳۲]. در این پژوهش، برای پیش‌بینی مقدار بهینه متغیرهای مورد بررسی و همچنین درجه تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل، از مدل‌های رگرسیونی چندجمله‌ای با استفاده از روش سطح پاسخ در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت (Design-Expert® Software version 10) استفاده شد. همچنین از روش تابع مطلوبیت که برای بهینه‌سازی چندین صفت به‌طور همزمان استفاده می‌شود، برای بهینه‌سازی متغیرهای مورد بررسی، استفاده گردید. محدوده تغییرات تابع مطلوبیت با توجه به درجه اهمیت هر یک از صفات، در

اسیدآسکوربیک، منحنی استاندارد در غلظت ۰ تا ۵۰ ppm ترسیم شد و معادله آن با فرمول  $y = -0.0043x + 0.3456$  و  $R^2 = 0.99$  بدست آمد و سپس آزمون ویتامین ث برای نمونه‌ها انجام شد. بطوریکه برای تعیین محتوای اسیدآسکوربیک، ۰/۱ گرم پیاز خشک آسیاب شده و ۱۰ گرم پیاز تازه با ۱۰ میلی‌لیتر متافسفریک اسید ۱ درصد همگن شده و سپس فیلتر شد. ماده فیلترشده (۱ میلی‌لیتر) به ۹ میلی‌لیتر ۲،۶-دی کلروفلن اضافه گردیده و رنگ آن به صورتی تغییر کرد. در نهایت، با استفاده از منحنی استاندارد، براساس جذب بدست آمده در طول موج ۵۱۵ نانومتر و با کمک اسپکتروفتومتر، غلظت ویتامین ث محاسبه شد [۲۷].

## ۶-۲- نرخ استخراج رطوبت ویژه (SMER)

نرخ استخراج رطوبت ویژه<sup>۴</sup> (SMER) مفهومی است که برای بیان کارایی فرآیند خشک کردن، از لحاظ مصرف انرژی، استفاده می‌شود. این معیار نشان‌دهنده مقدار رطوبتی است که از یک محصول به ازای مصرف هر واحد انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک کردن خارج می‌شود [۲۸].

$$\text{if } : 273.16 \leq T(k) \leq 338.72$$

$$\text{if } : 338.72 \leq T(k) \leq 533.16 \quad (10)$$

طبق معادلات ذکر شده، گرمای نهان تبخیر آب برای دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C به ترتیب ۲۳۸۴/۰۸۲، ۲۳۶۰/۲۲۲ و ۲۳۳۴/۰۱۳ KJ/Kg بدست آمدند.

## ۸-۲- بهینه‌یابی متغیرهای آزمایش

اصطلاح "روش سطح پاسخ" از نمای گرافیکی ایجاد شده پس از تطبیق مدل ریاضی گرفته شده است. تحلیل داده‌ها با این روش، علاوه بر نشان دادن تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته و ارائه یک مدل تجربی برای ارتباط بین متغیرهای ورودی و پاسخ، امکان بهینه‌سازی فرآیند را نیز

محدوده ۱-۰ تغییر می‌کند و معادله آن، میانگین هندسی تمام متغیرهای مورد بررسی می‌باشد که در رابطه (۱۰) آورده شده است.

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{1/n} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، D بیانگر تابع مطلوبیت، d صفت مورد بررسی و n تعداد صفات می‌باشد.

برای استخراج سطوح بهینه، پاسخ‌های ضریب نفوذ موثر رطوبت، زمان خشک کردن، رنگ، ویتامین ث، نرخ استخراج رطوبت ویژه و بازده خشک کردن در ارتباط با متغیرهای مستقل دما و نرخ جریان هوا بررسی شدند.

### ۳- نتایج و بحث

پی بردن به مطلوبیت مدل‌های پیشنهادی برای توصیف متغیرهای مورد بررسی در یک فرآیند، پیش‌نیاز انجام

بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ می‌باشد. به همین منظور ضرایب معادله رگرسیون و نتایج آماری حاصل از مدل‌های محاسبه‌شده برای متغیرهای پاسخ در جدول ۲ آورده شده‌اند. ضرایب مثبت و منفی به ترتیب بیانگر تاثیر مستقیم و معکوس هر متغیر مستقل بر هر متغیر پاسخ می‌باشد. همچنین بزرگی ضرایب نسبت به یکدیگر، بیانگر مقدار اهمیت متغیر مستقل موردنظر بر هر پاسخ می‌باشد. قابل ذکر است که در این معادلات، A نشان‌دهنده متغیر مستقل نرخ جریان هوا و B نشان‌دهنده متغیر مستقل دمای هوا می‌باشد. بطور مثال در مورد شاخص نرخ استخراج رطوبت ویژه، بزرگی مقدار ضریب فاکتور نرخ جریان هوا (A) نسبت به دمای هوا (B)، بیانگر تاثیر بیشتر آن فاکتور بوده و علامت مثبت ضریب هر دو فاکتور بیانگر رابطه مستقیم این دو فاکتور با شاخص نرخ استخراج رطوبت ویژه می‌باشد.

**Table 2.** Regression equation coefficients and statistical results from calculated models for response variables

| Dependent variables                                | Regression model equation                               | Lack of fit (P-Value) | R <sup>2</sup> |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------|----------------|
| Effective moisture diffusivity (m <sup>2</sup> /s) | $4.85 \times 10^{-8} A + 8.32 \times 10^{-11} B - 2.54$ | 0.25                  | 0.86           |
| Drying time (min)                                  | $-8750A - 2.44B + 559.25$                               | 0.95                  | 0.94           |
| Color changes                                      | $-389.97A + 0.19B + 2.09$                               | 0.53                  | 0.89           |
| Vitamin C content (μg AA / g sample)               | $-14830.48A - 10.79B + 1826.43$                         | 0.99                  | 0.54           |
| Specific moisture extraction rate (kg/kJ)          | $5.97A + 3.53B - 0.06$                                  | 0.48                  | 0.90           |
| Drying efficiency (%)                              | $765.85A + 0.26B + 18.83$                               | 0.98                  | 0.38           |

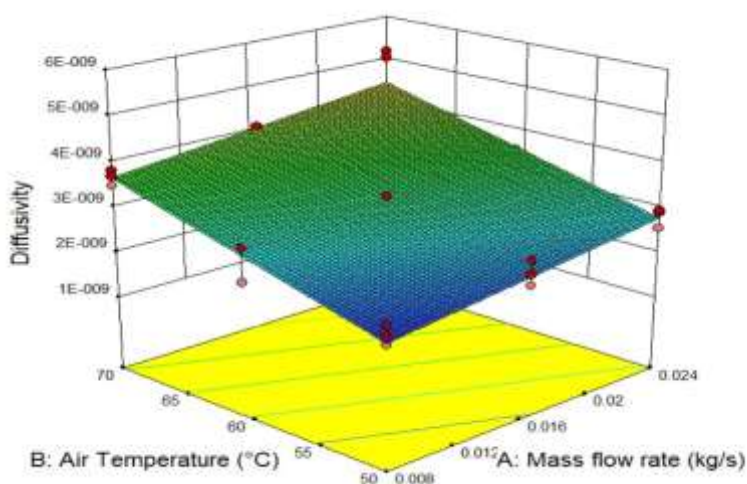
### ۳-۱ ضریب نفوذ موثر رطوبت

اثر همزمان دما و نرخ جریان هوای خشک کردن بر ضریب نفوذ موثر رطوبت در شرایط مختلف آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. طبق نتایج بدست‌آمده، اثر متقابل دما و نرخ جریان هوا بر ضریب نفوذ موثر رطوبت معنی‌دار نشده اما هر کدام از اثرات ساده معنی‌دار شده‌اند. مقادیر R<sup>2</sup> (۰/۸۶)، Adj-R<sup>2</sup> (۰/۸۴)، و C.V. (۹/۹۱) بر مطلوبیت مدل پیش‌بینی شده دلالت دارد. طبق شکل، تاثیر دمای هوا و نرخ جریان هوا بر ضریب نفوذ موثر رطوبت مستقیم بوده است اما با توجه به شیب‌های منحنی در دو سمت مشخص است که تاثیر دمای هوا بیشتر از نرخ جریان

هوا بوده است. با توجه به افزایش نرخ انتقال حرارت و انتقال جرم در دماهای بالا [۳۳]، با بالا رفتن دمای هوا از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت از ۱۰<sup>-۹</sup> × ۲/۳۷ به ۵/۰۴ × ۱۰<sup>-۹</sup> متر مربع بر ثانیه افزایش یافت. مقدارهای بدست‌آمده، در محدوده ارائه‌شده برای انتشار رطوبت مواد غذایی (۱۰<sup>-۱۱</sup> - ۱۰<sup>-۶</sup> متر مربع بر ثانیه) بوده [۳۴] و با مقدارهای گزارش‌شده برای سبزیجات و میوه‌های مختلف در پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد. بطوریکه دویماز [۳۵] خشک کردن سیب‌زمینی شیرین در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت جریان هوای ۲ متر بر ثانیه را مورد مطالعه قرار داده و ضریب نفوذ موثر رطوبت

۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس کار کرده و ضریب نفوذ موثر رطوبت بدست‌آمده را در محدوده  $۶/۸۱ \times ۱۰^{-۹}$  تا  $۷^{-۷}$   $۱/۵۱ \times ۱۰^{-۱۰}$  گزارش کردند.

بدست‌آمده از پژوهش خود را در محدوده  $۹/۳۲ \times ۱۰^{-۱۱}$  تا  $۱/۷۶ \times ۱۰^{-۱۰}$  متر مربع بر ثانیه گزارش کرد. مفتون‌زاد و همکاران [۲۴] نیز بر روی خشک کردن پیاز با خشک‌کن تونلی هوای گرم هیبریدی مجهز به مایکروویو در دماهای

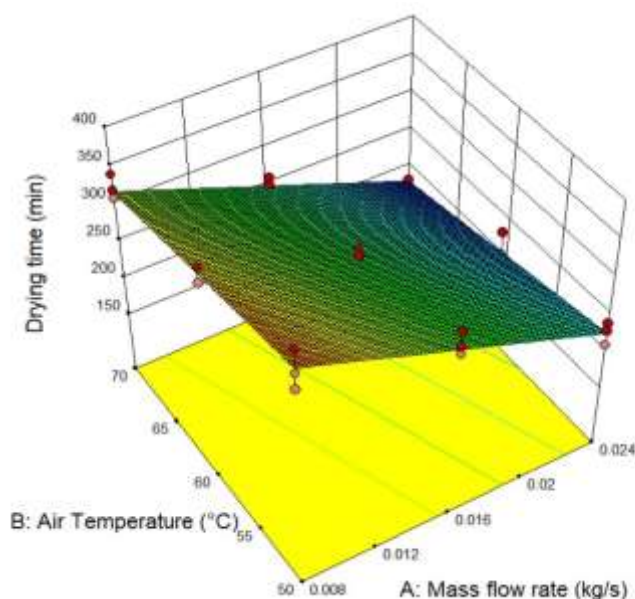


**Fig 1.** The interaction effects of airflow temperature and airflow rate on effective moisture diffusivity  $R^2$  (۰/۹۴)،  $Pred-R^2$  (۰/۹۳) و C.V. (۵/۶۸) بر مطلوبیت

مدل پیش‌بینی شده دلالت دارد. طبق شکل، تاثیر دمای هوا و نرخ جریان هوا بر زمان خشک کردن پیازهای سفید معکوس بوده است. بطوریکه با بالا رفتن دمای هوا از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، زمان خشک کردن پیاز از حدود ۳۹۰ به ۱۷۰ دقیقه کاهش یافته است.

### ۲-۳ زمان خشک کردن

اثر متقابل دما و نرخ جریان هوای خشک کردن بر زمان خشک کردن نمونه‌های پیاز سفید در شرایط مختلف آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. اثر متقابل دما و نرخ جریان هوا بر زمان خشک کردن معنی‌دار نبود اما هر دو اثر ساده معنی‌دار بودند ( $P < 0.01$ ). مقادیر  $R^2$  (۰/۹۴)، Adj-



**Fig 2.** The interaction effects of airflow temperature and airflow rate on drying time

## ۳-۳ شاخص‌های رنگ

اثر هم‌زمان دما و نرخ جریان هوای خشک کردن بر مقدار تغییرات رنگ کلی پیاز سفید در حین خشک کردن، در شکل (۳) نشان داده شده است. تغییرات شاخص‌های رنگ کل از سه عامل رنگی  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  و از طریق معادله ۶ بدست می‌آید. تغییرات در مقدارهای  $L^*$  می‌تواند به دلیل تشکیل رنگدانه‌های قهوه‌ای و اکسیداسیون مواد مغذی حساس به حرارت باشد [۱۱]. دمای بالا و خشک شدن بیش از حد باعث بالا رفتن مقدارهای  $a^*$  می‌شود که نشان‌دهنده قرمزی زیاد و حاکی از واکنش‌های قهوه‌ای شدن است. همچنین بالا بودن مقدارهای  $b^*$  حاکی از زردی زیاد نمونه است که ممکن است در اثر فرآیند اکسیداسیون ترکیبات حساس به فرآیند خشک شدن صورت گیرد [۳۶، ۳۷]. همانطور که از شکل پیداست، بیشترین مقدار تغییر رنگ کلی در بیشترین دما و کمترین نرخ جریان هوا رخ داده است. همچنین کمترین مقدار تغییر رنگ کلی در کمترین دما و بیشترین نرخ جریان هوا رخ داده است. البته بایستی توجه داشت که هرچند نرخ جریان هوای بالا باعث کاهش تغییرات رنگ کلی شده اما در صورت عدم یکنواختی جریان هوای عبوری از روی محصول، این عامل

باعث بالا رفتن بیش از حد دما و تاثیر منفی بر تغییرات رنگ خواهد شد. با افزایش دما از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، مقدار تغییر رنگ کلی پیازهای سفید از ۳/۲۳ به ۱۴/۵۹ افزایش یافته است. مقدارهای بدست‌آمده برای تغییرات رنگ پیاز سفید حین خشک کردن در این پژوهش، به نوبه خود از مقدارهای گزارش‌شده در پژوهش‌های پیشین بهتر است. بطوریکه مفتون زاد و همکاران [۲۴] مقدارهای تغییرات رنگ در محدوده ۶/۰۴ تا ۳۲ را در خشک کردن پیاز سفید در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس خشک‌کن تونلی هوای گرم مجهز به مایکروویو گزارش کردند و دلیل آن را قرار گرفتن نمونه در معرض هوای گرم به مدت زیاد ذکر کردند. این درحالیست که برخی زمان‌های خشک کردن در پژوهش آنها کمتر از پژوهش حاضر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شرایط مختلف خشک کردن تاثیر به‌سزایی در نتیجه فرآیند خواهند داشت. کاوه و همکاران [۳۸] نیز تغییرات رنگ در محدوده ۱۲/۴۳ تا ۲۳/۶۵ را برای خشک کردن پیاز در خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی چندمرحله‌ای در دماهای ۴۰، ۵۵ و ۷۰ و سرعت جریان هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ گزارش کردند.

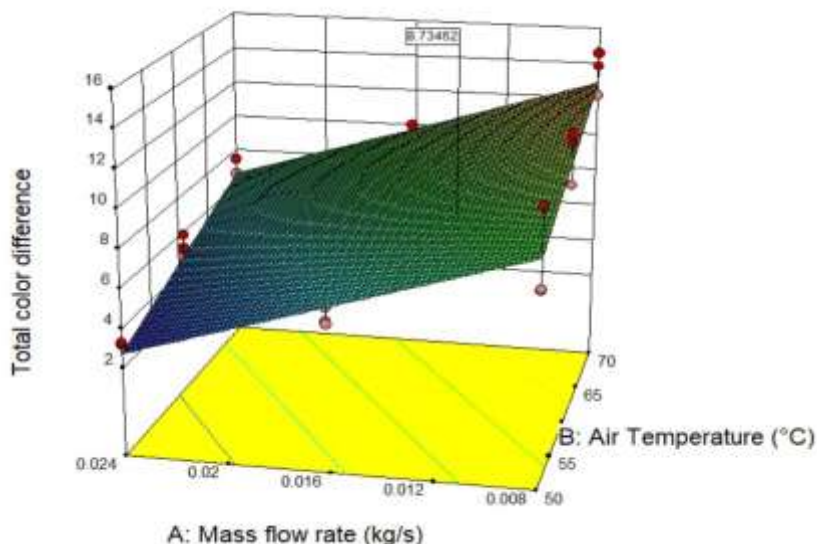


Fig 3. The interaction effects of airflow temperature and airflow rate on total color differences

## ۳-۴ ویتامین ث

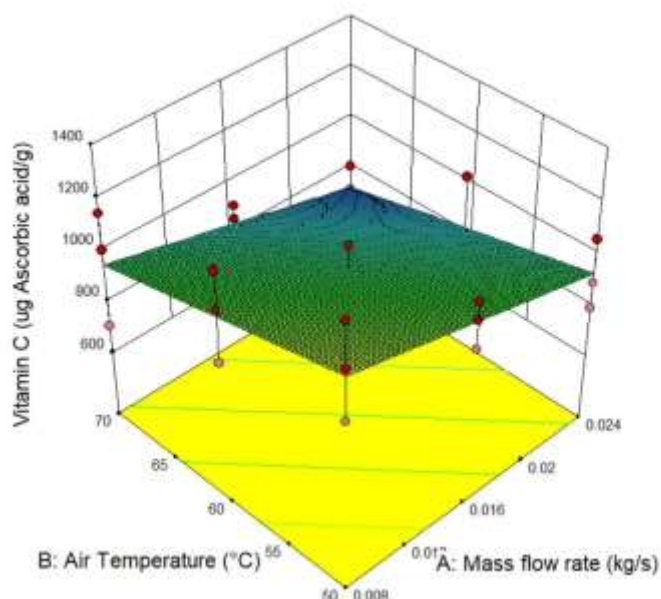
اثرات همزمان دما و نرخ جریان هوای خشک کردن بر محتوای ویتامین ث در شکل (۴) نشان داده شده است. مقدار

ویتامین ث در تیمارهای مختلف در محدوده ۲۷۱/۴۹-۱۱۹۳/۰۲ میکروگرم آسکوربیک اسید در هر گرم نمونه متغیر بود. این درحالیست که مقدار آسکوربیک اسید در پیاز خام



خشک کردن بر محتوای ویتامین ث معنی‌دار نبود اما اثرات ساده معنی‌دار بودند.

۹۵۷۰/۷۴۳ میکروگرم آسکوربیک اسید در هر گرم نمونه تخمین زده شد. تاثیر متقابل دمای هوا و نرخ جریان هوای



**Fig 4.** The interaction effects of airflow temperature and airflow rate on vitamin C content

تحت تاثیر منفی قرار می‌گیرد [۳۹]. مقادیر  $R^2$  (۰/۵۴)،  $Adj-R^2$  (۰/۵۰)،  $Pred-R^2$  (۰/۴۰) و C.V. (۱۳/۵۹) بر مطلوبیت مدل پیش‌بینی شده دلالت دارد.

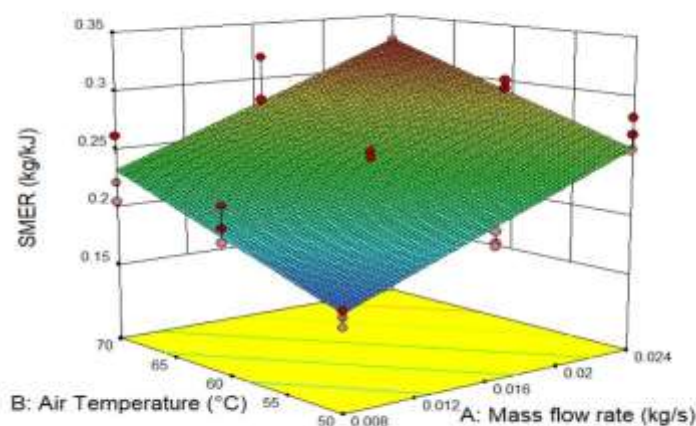
### ۳-۵ نرخ استخراج رطوبت ویژه

اثرات همزمان دمای هوا و نرخ جریان هوای خشک کردن بر نرخ استخراج رطوبت ویژه در شکل (۵) آورده شده است. همانطور که از شکل پیداست، با افزایش دما و نرخ جریان هوای خشک کردن، نرخ استخراج رطوبت ویژه افزایش یافته و این یعنی میزان مصرف انرژی ویژه در سطوح با دما و نرخ جریان هوای بالاتر، کاهش یافته است. بنظر می‌رسد تاثیر افزایش سطوح نرخ جریان هوا بیشتر از سطوح دمایی بوده است که این امر به دلیل تعدیل هرچه بیشتر رطوبت داخل محفظه در اثر جریان هوای بالاتر باشد. البته باید در نظر داشت که این نتایج مربوط به سطوح دمایی و نرخ جریان هوایی تعریف شده در این پژوهش است و ممکن بود با سطوح مختلف متغیرها به نتایج دیگری رسید. طبق نتایج بدست‌آمده، تاثیر همزمان دمای هوا و نرخ جریان هوای خشک کردن بر نرخ استخراج رطوبت ویژه معنی‌دار نشد اما هر دو اثر ساده معنی‌دار بودند. درک مفهوم نرخ استخراج

همان‌طور که از شکل (۴) مشخص است، سطوح دمایی بالاتر دارای محتوای ویتامین ث کمتری هستند، اما انتظار می‌رفت که تغییر محتوای ویتامین ث در سطوح مختلف دمایی بیشتر از این بوده و شیب تغییرات تندتر باشد. از سوی دیگر، مشاهده می‌شود که سطوح با نرخ جریان هوای بالاتر نیز دارای ویتامین ث کمتری هستند که این امر با توجه به افزایش دمای هوای ناشی از افزایش نرخ جریان هوا قابل توجیه است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق و با توجه به اینکه افزایش نرخ جریان هوا، زمان خشک‌کردن را کاهش داده و جریان انتقال حرارت را یکنواخت می‌کند، نتیجه‌گیری می‌شود که زمان خشک‌کردن پیاز تاثیر قابل‌توجهی بر حفظ محتوای ویتامین ث در این محصول دارد که نزدیکی مقدار محتوای ویتامین ث در تیمارهای با سطوح مختلف دمایی نیز گواه این مطلب است. بنابراین، کاهش زمان خشک‌کردن و تعدیل اثر منفی گرما بر محتوای آسکوربیک اسید در پیاز موجب حفظ بیشتر محتوای ویتامین ث در نمونه‌های خشک‌شده پیاز می‌گردد. در زمان خشک شدن طولانی مدت، محتوای ویتامین ث علاوه بر قرار گرفتن نمونه به مدت طولانی در دمای بالا، از جنبه اکسیداسیون نیز

امکان تخریب مواد مغذی محصول کاهش یافته و کیفیت بهتری خواهد داشت. مقادیر  $R^2$  (۰/۹۰)،  $Adj-R^2$  (۰/۸۹)،  $Pred-R^2$  (۰/۸۷) و C.V. (۶/۸۱) بر مطلوبیت مدل پیش‌بینی‌شده دلالت دارد.

رطوبت ویژه با توجه به اینکه میزان رطوبت استخراجی به ازای انرژی مصرفی را نشان می‌دهد، می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیند کمک کند تا علاوه بر مصرف انرژی کمتر، هزینه‌های انرژی نیز کاهش یابد. نرخ استخراج رطوبت ویژه بالاتر نشان‌دهنده فرآیند سریع‌تر نیز می‌باشد که در این صورت

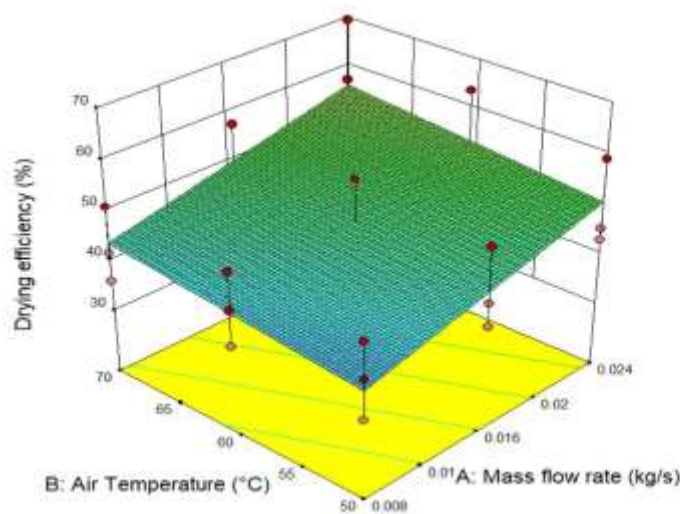


**Fig 5.** The interaction effects of airflow temperature and airflow rate on specific moisture extraction rate

هوا بوده است. با بالا رفتن دمای هوا از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، بازده انرژی خشک کردن از ۳۲/۶۹ به ۶۹/۴۰ درصد افزایش یافته است. تاثیر هم‌زمان دمای هوا و نرخ جریان هوای خشک کردن بر روی بازده انرژی معنی‌دار نبود اما اثرات ساده معنی‌دار شدند. مقادیر  $R^2$  (۰/۳۸)،  $Adj-R^2$  (۰/۳۳)،  $Pred-R^2$  (۰/۲۱) و C.V. (۱۵/۵۷) بر مطلوبیت مدل پیش‌بینی‌شده دلالت دارد. مقدارهای بدست آمده برای بازده انرژی خشک کردن نسبت به اغلب پژوهش‌های پیشین بیشتر است. موگی و چاندراموهان [۴۰] میانگین بازده انرژی خشک کردن بامیه در خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم در حالت جریان طبیعی و اجباری را ۲۰/۱۳ و ۲۴/۹۵ درصد گزارش کردند. البته قابل ذکر است که بالا بودن بازده خشک کردن در خشک‌کن‌های ترکیبی، حقیقتی ثابت شده است [۴۱].

### ۳-۶ بازده انرژی خشک کردن

در شکل (۶) تاثیر هم‌زمان متغیرهای مستقل دما و نرخ جریان هوای خشک کردن بر روی بازده انرژی خشک کردن نشان داده شده است. با وجود اینکه بازده انرژی خشک کردن و نرخ استخراج رطوبت ویژه مفاهیم مرتبطی هستند، اما هرکدام بر جنبه‌های مختلفی از فرآیند خشک کردن تمرکز دارند. بطوریکه نرخ استخراج رطوبت ویژه، قابلیت استخراج رطوبت یک روش خشک‌کردن را در ارتباط با ورودی انرژی ارزیابی می‌کند. در حالی که بازده انرژی خشک کردن بر روی عملکرد کلی سامانه و اثربخشی فرآیند خشک کردن با بررسی تاثیر عواملی مانند زمان، دما و وضعیت ماده‌ای که خشک می‌شود، تمرکز دارد. طبق نتایج، با افزایش دما و نرخ جریان هوای خشک کردن، بازده انرژی افزایش یافته است و با توجه به شیب بیشتر منحنی، تاثیر نرخ جریان هوا بیشتر از دمای

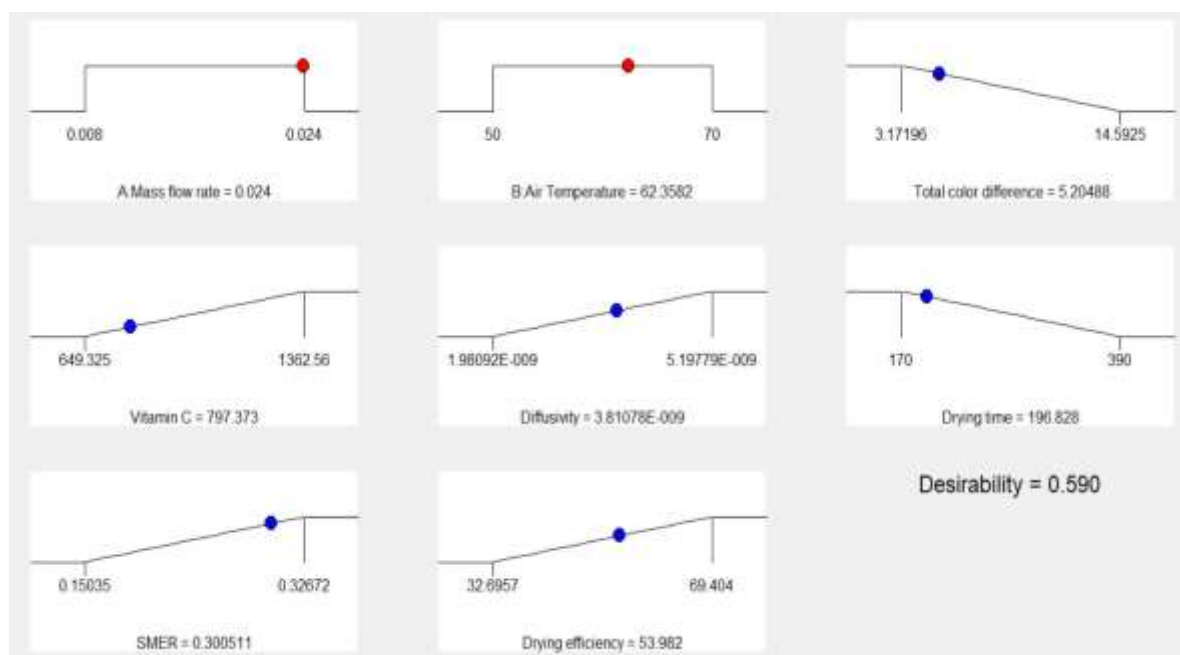


**Fig 6.** The interaction effects of airflow temperature and airflow rate on drying efficiency

خشک کردن بدست آمدند. مقدار پاسخ‌های بهینه‌شده برای ضریب نفوذ موثر رطوبت، زمان خشک کردن، تغییرات رنگ، ویتامین ث، نرخ استخراج رطوبت ویژه و بازده انرژی خشک کردن با درجه مطلوبیت ۰/۵۹ به ترتیب  $3/81 \times 10^{-9}$ ، ۱۹۶/۸۲، ۵/۲۰، ۷۹۷/۳۷، ۰/۳۰ و ۵۳/۹۸ بدست آمدند. در راه‌حل انتخابی، مشاهده شد که با وجود اینکه در دما و نرخ جریان هوای پیشنهادی، مقدار ویتامین ث کمتر شد اما در این دما مقدار زمان خشک کردن محصول و تغییرات رنگ محصول نیز کمتر و مقدار نرخ استخراج رطوبت ویژه، بازده انرژی خشک کردن و ضریب نفوذ موثر رطوبت بیشتر بود و این از نظر بازارپسندی، مصرف بهینه انرژی و کاهش هزینه‌ها مناسب بود.

### ۳-۷ بهینه‌یابی

با استفاده از روش تابع مطلوبیت، ۸ راه حل برای تعیین شرایط بهینه خشک کردن نمونه‌های پیاز سفید با مقدار شاخص مطلوبیت بین ۰/۵۸ و ۰/۵۹ به دست آمدند که نتایج این تحلیل در جدول (۳) آورده شده است. بر اساس راه‌حل‌های شاخص مطلوبیت، بهینه‌ترین شرایط خشک کردن پیاز سفید در دمای هوای ۶۲/۳۵ درجه سلسیوس و نرخ جریان هوای ۰/۰۲۴ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمد. قابل ذکر است که این شرایط بهینه متغیرهای مستقل، با توجه به بیشینه مقدار متغیرهای پاسخ ضریب نفوذ موثر رطوبت، محتوای ویتامین ث، نرخ استخراج رطوبت ویژه و بازده انرژی خشک کردن و کمینه مقدارهای تغییرات رنگ و زمان



**Fig 7.** Desirability points for optimal drying process of onion slices in heat pump assisted photovoltaic-thermal solar dryer

(۳) آورده شده است. این نتایج اعتبار مدل‌های توسعه‌یافته براساس داده‌های تجربی را نشان می‌دهند. بطوری‌که هر چه خطای نسبی بین مقادیرهای تجربی و پیش‌بینی‌شده کمتر باشد، دقت مدل بالاتر خواهد بود.

در ادامه به منظور اعتبارسنجی داده‌های نرم‌افزار، آزمایش‌هایی در این سطوح بهینه انجام شد. بدین منظور دما و نرخ جریان هوا بر روی اعداد پیشنهادی تنظیم شد تا کارایی مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی پاسخ‌های بهینه مورد بررسی قرار گیرد. نتایج تجربی به‌دست‌آمده از این آزمایش نیز در جدول

**Table 3.** Experimental and predicted values of variables under optimization

| Dependent variables                                      | Predicted values      | Experimental values   | Relative errors (%) |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| Effective moisture diffusivity ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) | $3.81 \times 10^{-9}$ | $3.95 \times 10^{-9}$ | 3.53                |
| Drying time (min)                                        | 196.82                | 192.08                | 2.41                |
| Color changes                                            | 5.20                  | 5.01                  | 3.65                |
| Vitamin C content ( $\mu\text{g AA} / \text{g sample}$ ) | 797.37                | 746.5                 | 6.36                |
| Specific moisture extraction rate ( $\text{kg/kJ}$ )     | 0.30                  | 0.31                  | 3.34                |
| Drying efficiency (%)                                    | 53.98                 | 57.19                 | 5.6                 |

و در فشارهای ۲۰ تا ۵۸۰ میلی‌بار خشک کردند و به دما و فشار بهینه ۵۷/۱ درجه سلسیوس و ۱۰۰ میلی‌بار رسیدند. لیو و همکاران [۴۲] به منظور تعیین شرایط خشک کردن ترکیبی میکروویو و هوای داغ کلم بنفش، چگالی مایکروویو، دمای هوای داغ و محتوای رطوبت پایه محصول را به‌عنوان سه عامل مستقل و محتوای آنتوسیانین، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی،

پژوهش‌های مختلفی در زمینه بهینه‌سازی برای تعیین شرایط بهینه محصولات کشاورزی صورت گرفته است. شومیخ و همکاران [۱۶] پژوهشی بر روی بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن قارچ شیتاکه<sup>۵</sup> در خشک‌کن خلا با روش سطح پاسخ، به منظور تولید نمونه‌های خشک با عمر مفید مناسب انجام دادند. آنها نمونه‌ها را در دماهای ۴۶ تا ۷۴ درجه سلسیوس

درجه سلسیوس و نرخ جریان هوای  $0.24$  کیلوگرم بر ثانیه پیشنهاد شد. همچنین مقادیر بهینه متغیرهای پاسخ ضریب نفوذ موثر رطوبت، زمان خشک کردن، تغییرات رنگ، محتوای ویتامین ث، نرخ استخراج رطوبت ویژه و بازده انرژی خشک کردن به ترتیب  $9 \times 10^{-3}$ ،  $3/81$ ،  $196/82$ ،  $5/20$ ،  $797/37$ ،  $0/30$  و  $53/98$  بدست آمدند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل‌های توسعه‌یافته و شرایط بهینه پیشنهادشده توسط نرم‌افزار، براساس داده‌های تجربی نیز تایید گردید.

### تشکر و قدردانی

از گروه‌های مهندسی مکانیک بیوسیستم و علوم و صنایع غذایی و همچنین پژوهشکده انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تربیت مدرس که ما را در اجرای این پژوهش یاری نمودند، صمیمانه تشکر می‌گردد.

جویدنی بودن، تغییرات رنگ، نسبت بازجذب آب و نرخ خشک کردن را به عنوان عوامل پاسخ در نظر گرفته و به نقطه بهینه با چگالی مایکروویو  $2/5$  وات بر گرم، دمای هوای داغ  $55$  درجه سلسیوس و محتوای رطوبت پایه محصول  $4$  گرم بر گرم محصول خشک رسیدند. با وجود پژوهش‌های صورت‌گرفته، با توجه به شرایط مختلف خشک کردن محصولات مختلف و با سامانه‌های مختلف، همچنان نیاز به انجام پژوهش‌هایی در این زمینه می‌باشد.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر متغیرهای مستقل دما و نرخ جریان هوای خشک کردن بر روی متغیرهای پاسخ با استفاده از روش سطح پاسخ و برای تعیین شرایط بهینه خشک کردن پیاز سفید در خشک‌کن خورشیدی فتوولتائیک-حرارتی مجهز به پمپ حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج بدست‌آمده، شرایط بهینه خشک کردن پیاز سفید در دمای هوای  $62/35$

### ۵- منابع

- [1] Arslan, D., & Özcan, M.M. (2010). Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *LWT - Food Sci Technol*, 43:1121-7. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.02.019>.
- [2] FAOSTAT. (2022). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [3] Süfer, Ö., Sezer, S., & Demir, H. (2017). Thin layer mathematical modeling of convective, vacuum and microwave drying of intact and brined onion slices. *J Food Process Preserv*, 41. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13239>.
- [4] Compaoré, A., Putranto, A., Dissa, A.O., Ouoba, S., Rémond, R., & Rogaume, Y. (2019). Convective drying of onion: modeling of drying kinetics parameters. *Journal of Food Science Technology*, 56:3347-54. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03817-3>.
- [5] Mitra, J., Shrivastava, S.L., & Rao, P.S. (2012). Onion dehydration: A review. *Journal of Food Science Technology*, 49:267-77. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0369-1>.
- [6] Praveen Kumar, D.G., Hebbar, H.U., & Ramesh, M.N. (2006). Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices. *LWT - Food Sci Technol*, 39:700-5. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.03.021>.
- [7] Sasongko, SB., Hadiyanto, H., Djaeni, M., Perdanianti, A.M., & Utari, F.D. (2020). Effects of drying temperature and relative humidity on the quality of dried onion slice. *Heliyon*, 6:e04338. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04338>.
- [8] Djaeni, M., Arifin, U.F., & Sasongko, S.B. (2017). Physical-chemical quality of onion analyzed under drying temperature. *AIP Conf Proc*, 1823. <https://doi.org/10.1063/1.4978114>.
- [9] Ajuebor, F., Aworanti, O.A., Agbede, O.O., Agarry, S.E., Afolabi, T.J., & Ogunleye, O.O. (2022). Drying Process Optimization and Modelling the Drying Kinetics and Quality Attributes of Dried Chili Pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Trends Sci*, 19:1-21. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.5752>.
- [10] El Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Farhat, A., & Guizani, A. (2017). Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM. *J Clean Prod*, 148:37-48. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.149>.
- [11] Morteza pour, H., Rashedi, S.J., Akhavan, H.R., & Maghsoudi, H. (2017). Experimental analysis of a solar dryer equipped with a novel heat recovery system for onion drying. *J Agric Sci Technol*, 19:1227-40.
- [12] Salehi, F., & Kashaninejad, M. (2018). Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying. *Inf Process*

- Agric, 5:516–23. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.05.006>.
- [13] Taheri-Garavand, A., Karimi, F., Karimi, M., Lotfi, V., & Khoobakht, G. (2018). Hybrid response surface methodology–artificial neural network optimization of drying process of banana slices in a forced convective dryer. *Food Sci Technol Int*, 24:277–91. <https://doi.org/10.1177/1082013217747712>.
- [14] Parhizi, Z., Karami, H., Golpour, I., Kaveh, M., & Szymanek, M. (2022). sustainability Modeling and Optimization of Energy and Exergy Parameters of a Hybrid-Solar Dryer for Basil Leaf Drying Using RSM.
- [15] Ba, D., & Boyaci, I.H. (2007). Modeling and optimization i: Usability of response surface methodology. *J Food Eng*, 78:836–45. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.11.024>.
- [16] Šumić, Z., Tepić, A., Vidović, S., Vladić, J., & Pavlić, B. (2016). Drying of shiitake mushrooms in a vacuum dryer and optimization of the process by response surface methodology (RSM). *J Food Meas Charact*, 10:425–33. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9321-4>.
- [17] Šumić, Z., Vakula, A., Tepić, A., Čakarević, J., Vitas, J., & Pavlić, B. (2016). Modeling and optimization of red currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM). *Food Chem*, 203:465–75. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.109>.
- [18] Taghinezhad, E., Kaveh, M., Szumny, A., & Figiel, A. (2023). Quantifying of the Best Model for Prediction of Greenhouse Gas Emission, Quality, and Thermal Property Values during Drying Using RSM (Case Study: Carrot). *Appl Sci*, 13. <https://doi.org/10.3390/app13158904>.
- [19] Taghinezhad, E., Kaveh, M., & Szumny, A. (2021). Optimization and prediction of the drying and quality of turnip slices by convective-infrared dryer under various pretreatments by rsm and anfis methods. *Foods*, 10. <https://doi.org/10.3390/foods10020284>.
- [20] Bazaria, B., & Kumar, P. (2018). Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). *J Saudi Soc Agric Sci*, 17:408–15. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.09.007>.
- [21] Zalazar-Garcia, D., Román, M.C., Fernandez, A., Asensio, D., Zhang, X., & Fabani, MP. (2022). Exergy, energy, and sustainability assessments applied to RSM optimization of integrated convective air-drying with pretreatments to improve the nutritional quality of pumpkin seeds. *Sustain Energy Technol Assessments*, 49:101763. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101763>.
- [22] Kaur Dhillon, G., Kour, A., & Gupta, N. (2022). Optimization of Low-cost Drying Technology for Preservation of Peach (*Prunus Persica*) Using RSM. *Int J Fruit Sci*, 22:525–38. <https://doi.org/10.1080/15538362.2022.2070576>.
- [23] Amiri Chayjan, R., Bahrabad, S.M.T., & Rahimi Sardari, F. (2014). Modeling infrared-convective drying of pistachio nuts under fixed and fluidized bed conditions. *J Food Process Preserv*, 38:1224–33. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12083>.
- [24] Maftoonazad, N., Deghani, M.R., & Ramaswamy, H.S. (2022). Hybrid microwave-hot air tunnel drying of onion slices: Drying kinetics, energy efficiency, product rehydration, color, and flavor characteristics. *Dry Technol*, 40:966–86. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1841790>.
- [25] Doymaz, I. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *J Food Eng*, 78:1291–7. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.047>.
- [26] Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A., & Viseda, P. (2000). Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market. *Dry Technol*, 18:995–1006. <https://doi.org/10.1080/07373930008917749>.
- [27] Bor, J.Y., Chen, H.Y., & Yen, G.C. (2006). Evaluation of antioxidant activity and inhibitory effect on nitric oxide production of some common vegetables. *J Agric Food Chem*, 54:1680–6. <https://doi.org/10.1021/jf0527448>.
- [28] Wang, W., Li, M., Hassanien, R.H.E., Wang, Y., & Yang, L. (2018). Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango. *Appl Therm Eng*, 134:310–21. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.115>.
- [29] Beigi, M. (2016). Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. *Food Sci Technol*, 36:145–50. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.0068>.
- [30] Ma, S.S., Tseng, C.Y., Jian, Y.R., Yang, T.H., & Chen, S.L. (2018). Utilization of waste heat for energy conservation in domestic dryers. *Energy*, 162:185–99. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.011>.
- [31] Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., & Madadlou, A. (2012). Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation. *Biosyst Eng*, 111:229–41. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.12.001>.
- [32] Yolmeh, M., Jafari, S.M. (2017). Applications of Response Surface Methodology in the Food Industry Processes. *Food Bioprocess Technol*, 10:413–33. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1855-2>.
- [33] Shi, J., Pan, Z., McHugh, T.H., Wood, D., Hirschberg, E., & Olson, D. (2008). Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *Lwt*, 41:1962–72. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.01.003>.

- [34] Olanipekun, B.F., Tunde-Akintunde, T.Y., Oyelade, O.J., Adebisi, M.G., Adenaya, T.A. (2015). Mathematical Modeling of Thin-Layer Pineapple Drying. *J Food Process Preserv*, 39:1431–41. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12362>.
- [35] Doymaz, I. (2011). Thin-layer drying characteristics of sweet potato slices and mathematical modelling. *Heat Mass Transf Und Stoffuebertragung*, 47:277–85. <https://doi.org/10.1007/s00231-010-0722-3>.
- [36] Wang, H., Liu, Z.L., Vidyarthi, S.K., Wang, Q.H., Gao, L., & Li, B.R. (2020). Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, microstructure, and energy consumption of potato (*Solanum tuberosum* L.) cubes. *Dry Technol*, 39:418–31. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1818254>.
- [37] Feng, Y., Xu, B., ElGasim, A., Yagoub, A., Ma, H., Sun, Y., & Xu, X. (2021). Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic. *Food Chem*, 343:128404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128404>.
- [38] Kaveh, M., Chayjan, R.A., Golpour, I., Poncet, S., Seirafi, F., & Khezri, B. (2021). Evaluation of exergy performance and onion drying properties in a multi-stage semi-industrial continuous dryer: Artificial neural networks (ANNs) and ANFIS models. *Food Bioprod Process*, 127:58–76. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.02.010>.
- [39] Nyangena, I.O., Owino, W.O., Imathiu, S., & Ambuko, J. (2019). Effect of pretreatments prior to drying on antioxidant properties of dried mango slices. *Sci African*, 6:e00148. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00148>.
- [40] Mugi, V.R., & Chandramohan, V.P. (2021). Energy and exergy analysis of forced and natural convection indirect solar dryers: Estimation of exergy inflow, outflow, losses, exergy efficiencies and sustainability indicators from drying experiments. *Journal of Cleaner Production*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124421>.
- [41] Lakshmi, D.V.N., Muthukumar, P., & Nayak, P.K. (2020). Experimental investigations on active solar dryers integrated with thermal storage for drying of black pepper. *Renewable Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.144>.
- [42] Liu, J., Li, X., Yang, Y., Wei, H., Xue, L., & Zhao, M. (2021). Optimization of combined microwave and hot air drying technology for purple cabbage by Response Surface Methodology (RSM). *Food Science Nutrition*, 9:4568–77. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2444>.





## Journal of Food Science and Technology (Iran)

Homepage: [www.fsct.modares.ir](http://www.fsct.modares.ir)

### Scientific Research

### Optimizing the drying process of white onion in a heat pump assisted photovoltaic-thermal solar dryer

Leyla Amirseyedi<sup>a</sup>, Barat Ghobadian<sup>a\*</sup>, Mortaza Aghbashlo<sup>b</sup>, Hamid Morteza pour<sup>c</sup>

a. Department of Mechanical and Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

b. Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, University of Tehran, Karaj, Iran

c. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

| ARTICLE INFO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Article History:</b></p> <p>Received:2024/10/7</p> <p>Accepted:2024/12/24</p> <p><b>Keywords:</b></p> <p>Optimization,</p> <p>Solar drying,</p> <p>White onion,</p> <p>Moisture effective diffusivity,</p> <p>Specific moisture extraction rate</p> <p><b>DOI: 10.48311/fsct.2025.83899.0.</b></p> <p>*Corresponding Author E-<br/>ghobadib@modares.ac.ir</p> | <p>A significant proportion of the global onion harvest is annually lost as a consequence of excessive production and insufficient processing techniques. Concurrently, the practice of drying represents a time-honored method of processing agricultural commodities, which has been historically regarded as a means to extend the shelf life of food products. In this context, the present study employed a photovoltaic-thermal solar dryer for the drying of white onions. In order to optimization of onion specimens, the response surface methodology was employed to analyze the influence of air temperature at three levels (50, 60, and 70 degrees Celsius) alongside the drying air flow rate at three varying levels (0.008, 0.016, and 0.024 kg/s). To achieve this objective, the optimum drying conditions were determined through the identification of the maximum values of the effective moisture diffusion coefficient, drying energy efficiency, specific moisture extraction rate, and vitamin C concentration, alongside the determination of the minimum durations of drying time and alterations in color. Based on the results obtained, the optimal drying conditions for white onion slices were established at an air temperature of 62.35 °C and an air flow rate of 0.024 kg/s. Moreover, at the point of optimality with a desirability of 0.59, the resultant values for the response variables, namely the effective moisture diffusion coefficient, drying duration, colorimetric differences, vitamin C content, specific moisture extraction rate, and drying energy efficiency were determined to be <math>3.81 \times 10^{-9}</math>, 196.82, 5.20, 797.37, 0.30, and 53.98, respectively.</p> |