



## Economic Optimization of Drying Apple Slices by Response Surface Methodology

Kourosh Esfandiari<sup>1\*</sup>, Erfan Safarzadeh<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Chemical Industries, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 03.08.2021

**Revised:** 05.27.2021

**Accepted:** 06.07.2021

**Keyword:**

Drying

Hot-air dryer

Process optimization

RSM

Apple

**\*Corresponding Author:**

Kourosh Esfandiari

**Email:** [kesfandiari@tvu.ac.ir](mailto:kesfandiari@tvu.ac.ir)

### ABSTRACT

Apple is a valuable agricultural product that can be dried in the form of slices to create much added value in the economic landscape. In the present research, a laboratory hot-air channel dryer was employed for economic optimization of the drying process of red apple slices by means of response surface methodology (RSM). In the RSM technique, by designing experiments in which all independent parameters are changed simultaneously, the simultaneous effect of all parameters on the test output(s) was determined which provided a complete picture of how the parameters affect the test output for the researcher. For designing the experiment by means of RSM in this research, two parameters of temperature and velocity of air passing through the dryer channel were selected as independent variables and two parameters of drying time and energy consumption were chosen as target (response) variables for optimization. In order to design the experiments by RSM approach, the central composite design (CCD) method was used. Finally, by performing pre-designed experiments and using analysis of variance (ANOVA), the optimal drying conditions of red apple slices were determined as the passing air temperature equal to 70 °C and the passing air speed equal to 3 m/s, where the amount of energy consumption and the drying duration of validation test were 1.51 kWh (in comparison to predicted value of 1.36 kWh) and 46 minutes (in comparison to predicted value of 41 minutes), respectively.





## بهینه‌سازی اقتصادی فرایند خشک کردن ورقه‌های سیب به روش سطح پاسخ

کوروش اسفندیاری<sup>\*۱</sup>، عرفان صفرزاده<sup>۲</sup>

۱ و ۲- گروه صنایع شیمیایی، دانشکده شهید چمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

سیب یک محصول کشاورزی باارزش است که می‌توان با خشک کردن آن به صورت ورقه‌های نازک ارزش افزوده فراوانی را از منظر اقتصادی ایجاد کرد. در پژوهش حاضر، از یک خشک‌کن کانالی آزمایشگاهی به منظور بهینه‌سازی اقتصادی فرایند خشک کردن ورقه‌های سیب سرخ با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده گردید. روش سطح پاسخ با طراحی آزمایش‌هایی که در آن‌ها تمامی پارامترهای مستقل به صورت هم‌زمان تغییر می‌یابند، تأثیر هم‌زمان تمامی پارامترها را بر خروجی (خروجی‌های) آزمایش، تعیین می‌کند و تصویری کامل از چگونگی تأثیرگذاری پارامترها بر خروجی آزمایش‌ها را در اختیار پژوهش‌گر قرار می‌دهد. برای طراحی آزمایش به روش RSM در پژوهش حاضر، دو پارامتر دما و سرعت هوای عبوری از درون کانال خشک‌کن به عنوان متغیرهای مستقل و دو پارامتر زمان خشک شدن و میزان مصرف انرژی به عنوان متغیرهای هدف (پاسخ) به منظور بهینه‌سازی انتخاب شدند. به منظور طراحی آزمایش‌ها به روش RSM، روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) به کار گرفته شد. در نهایت با انجام آزمایش‌های طراحی شده و استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA)، شرایط بهینه خشک کردن سیب سرخ به صورت دمای هوای عبوری برابر با ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای عبوری برابر با ۳ متر بر ثانیه تعیین شد که در این حالت میزان مصرف انرژی و مدت‌زمان خشک شدن در آزمون اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۱/۵۱ کیلووات ساعت (در مقابل ۱/۳۶ کیلووات ساعت پیش‌بینی شده) و ۴۶ دقیقه (در مقابل ۴۱ دقیقه پیش‌بینی شده) خواهد بود.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۷

### کلید واژگان:

خشک کردن  
خشک‌کن هوای گرم  
بهینه‌سازی فرایند  
روش سطح پاسخ  
میوه سیب

\*نویسنده مسئول: کوروش اسفندیاری

پست الکترونیکی:

kesfandiari@tvu.ac.ir



## مقدمه

میوه‌ها و سبزیجات، نقش مهمی را در تغذیه و رژیم غذایی انسان ایفا می‌کنند. با این حال، شرایط نگهداری و روش‌های ذخیره‌سازی نامناسب، عموماً منجر به هدررفت حدود ۱۰ الی ۳۰ درصد از میوه‌ها و سبزیجات تولیدی می‌گردد [۱]. لذا هدف از فرایندهای مرتبط با صنایع غذایی، دستیابی به رضایت مصرف‌کننده‌ها از منظر کیفیت مواد غذایی و با صرف کمترین هزینه است. خشک کردن جامدات یکی از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین فرایندهای صنعتی مورد استفاده در صنایع غذایی به‌شمار می‌آید. هدف از فرایند خشک کردن، کاهش محتوای رطوبت موجود در جامد مرطوب تا رسیدن به یک حد نهایی مطلوب است که از فساد میکروبی و شیمیایی ماده غذایی جلوگیری کند و عمر نگهداری آن را افزایش دهد [۲]. علاوه بر این، خشک کردن محصولات غذایی با کاهش حجم و وزن آن‌ها منجر به کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی می‌گردد [۳]. سبب به‌عنوان یکی از محصولات باارزش کشاورزی و مهم‌ترین ماده باارزش صادراتی در گروه میوه و سبزی‌ها، به‌صورت طبیعی حاوی مقادیر زیادی آب می‌باشد که برای نگهداری این میوه در مدت طولانی مضر است. در ساختار سخت دیواره ۱۰۰ گرم سیب تازه، بیش از ۸۰ گرم آب وجود دارد که منجر به بافت ترد آن می‌گردد اما از سوی دیگر منجر به فساد سریع آن نیز خواهد شد [۴]. لذا به‌منظور حفظ ارزش غذایی این میوه و ایجاد ارزش افزوده می‌توان سیب را به‌صورت ورقه‌های نازک خشک کرد. این کار با کاهش محتوای آب درون سیب منجر به جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌های عامل فساد میکروبی و کاهش سرعت واکنش‌های شیمیایی مخرب می‌گردد [۵]. با این وجود، با توجه به گرمای نهان بالای تبخیر آب، یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که باید در تولید اقتصادی محصولات خشک‌شده موردتوجه قرار گیرد، بهینه‌سازی میزان مصرف انرژی و حداقل‌سازی زمان خشک شدن نمونه است.

آکپینار و همکاران<sup>۱</sup> [۶] از یک خشک‌کن سیکلونی برای خشک کردن ورقه‌های سیب و تحلیل شاخص‌های مصرف انرژی استفاده کردند. در پژوهشی دیگر، قاسم‌خانی و همکاران [۷] خشک شدن ورقه‌های سیب را در یک خشک‌کن دوار آزمودند و پارامترهای انرژی این فرایند را مطالعه کردند. اخیراً، بیگی در مطالعه‌ای در مورد ورقه‌های سیب با استفاده از یک خشک‌کن صنعتی هوای گرم نسبت به بهینه‌سازی راندمان انرژی فرایند خشک کردن این میوه اقدام کرد [۸]. از میان فرایندهای مختلف خشک کردن، استفاده از هوای گرم عبوری به دلیل هزینه‌های کمتر عملیاتی در اکثر خشک‌کن‌های صنعتی موردتوجه قرار گرفته است [۹]. در چنین خشک‌کن‌هایی، دما، سرعت و جهت عبور جریان هوا از سطح نمونه از اهمیت فراوانی برخوردار است و می‌تواند با تغییر بر ضرایب انتقال جرم منجر به تغییر در شرایط خشک شدن نمونه گردد. از این رو به‌منظور رسیدن به یک شرایط اقتصادی مطلوب در تولید ورقه‌های سیب، باید پارامترهای کلیدی تأثیرگذار در فرایند خشک شدن سیب در خشک‌کن‌های هوای گرم مورد بهینه‌سازی قرار گیرد.

طراحی آزمایش‌ها (DOE)<sup>۲</sup> یکی از مهم‌ترین راهکارها برای بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی به‌شمار می‌آید. طراحی آزمایش‌ها عمدتاً به دو روش: (۱) بررسی تأثیر یک پارامتر در هر لحظه (OFAT)<sup>۳</sup> و (۲) بررسی تأثیر هم‌زمان چندین پارامتر استوار است. در روش OFAT، تمامی پارامترهای تأثیرگذار بر خروجی آزمایش، ثابت در نظر گرفته می‌شود و تنها پارامتر موردنظر تغییر می‌یابد و بدین‌وسیله تأثیر آن پارامتر بر خروجی سنجیده می‌شود. با این وجود در روش دوم، با طراحی آزمایش‌های مختلف که در آن‌ها تمامی پارامترهای موردنظر در محدوده‌ای از پیش تعیین‌شده به‌صورت هم‌زمان تغییر می‌یابند، تأثیر هم‌زمان پارامترهای مؤثر بر خروجی (خروجی‌ها) سنجیده می‌شود [۱۰]. یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های طراحی آزمایش با در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان چندین پارامتر، طراحی آزمایش به روش

<sup>1</sup> Akpinaret al

<sup>2</sup> Exergy

<sup>3</sup> Design of experiment

<sup>4</sup> One-factor-at-a-time

سطح پاسخ (RSM)<sup>۱</sup> است که نخستین بار در سال ۱۹۴۰ مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. در این روش که هدف از آن بهینه‌سازی متغیرهای خروجی (که پاسخ نامیده می‌شوند) بر اساس پارامترهای تأثیرگذار ورودی است، با استفاده از روش‌های آماری و ریاضیات کاربردی نسبت به ایجاد مدل‌های تجربی اقدام می‌گردد [۱۰؛ ۱۲]. همامی و همکاران<sup>۲</sup> [۱۳] از خشک‌کن انجمادی و روش RSM به منظور بهینه‌سازی کیفیت فرایند خشک‌کردن ورقه‌های سیب بهره بردند و دما و فشار بهینه برای رسیدن به رطوبت مطلوب سیب را به دست آوردند. هان و همکاران<sup>۳</sup> [۱۴] از یک خشک‌کن امواج ماکرو تحت خلأ برای خشک‌کردن ورقه‌های سیب استفاده کردند و به کمک روش RSM نسبت به بهینه‌سازی قدرت امواج ماکرو، شدت خلأ و محتوای رطوبت اولیه ورقه‌های سیب اقدام کردند. در پژوهشی دیگر که اخیراً صورت پذیرفت، یوان و همکاران [۱۵] با استفاده از روش RSM نسبت به بهینه‌سازی شرایط خشک‌کن هوای گرم به منظور بهینه‌سازی فشار خلأ، دما و مدت‌زمان خشک‌کردن ورقه‌های سیب اقدام کردند.

مطالعاتی در ارتباط با استفاده از روش RSM به منظور خشک‌کردن ورقه‌های سیب در دسترس است، با این وجود، اقتصادی کردن فرایند خشک شدن ورقه‌های سیب مورد توجه قرار نگرفته است. لذا در پژوهش حاضر، با بررسی سرعت و دمای هوای عبوری از درون یک خشک‌کن کانالی سینی‌دار آزمایشگاهی، زمان و میزان مصرف انرژی مورد نیاز برای خشک شدن ورقه‌های سیب سرخ بهینه‌سازی می‌گردد. به بیان دیگر، هدف از پژوهش حاضر تعیین مدت‌زمان بهینه برای رسیدن محتوای رطوبت سیب سرخ به حد مطلوب در شرایطی است که حداقل انرژی مصرفی ممکن توسط خشک‌کن آزمایشگاهی موجود مورد استفاده قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

### خشک‌کن آزمایشگاهی کانالی سینی‌دار

به منظور انجام آزمایش‌های مورد نظر در پژوهش حاضر، از یک دستگاه خشک‌کن کانالی سینی‌دار آزمایشگاهی (شکل ۱) استفاده گردید. طول این دستگاه ۲۱۰ سانتی‌متر و ابعاد مقطع آن ۳۰ سانتی‌متر در ۳۰ سانتی‌متر (مقطع مربعی) است. هوای گرم مورد نیاز فرایند خشک شدن با چرخش پروانه‌های یک دمنده به درون کانال خشک‌کن کشیده شد و با عبور از یک گرم‌کن الکتریکی پره‌ای با توان ۲۵۰۰ وات، گرم گردید. دمای هوای عبوری از درون خشک‌کن به کمک ترموستات دیجیتال (ShivaAmvaj)، مدل TRB-125 D، ساخت ایران) تنظیم شد و سرعت هوای درون کانال با استفاده از یک سرعت‌سنج دستی (Benetech Instruments، مدل GM816، ساخت کانادا) اندازه‌گیری و به کمک دیمر موجود در مسیر برق دمنده، تنظیم شد. شایان ذکر است که محدوده حداقلی و حداکثری دما و سرعت هوای عبوری از درون خشک‌کن موجود به صورت ارائه شده در جدول (۱) است. همچنین، به منظور اندازه‌گیری مصرف انرژی کل دستگاه، از کنتور برق مینیاتوری تک‌فاز (Bruntab، مدل IEC62053-21، ساخت دانمارک) استفاده شد. در نهایت، توزین نمونه‌ها توسط ترازوی آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۱ گرم (A&D، مدل EK-600i، ساخت ژاپن) صورت پذیرفت.

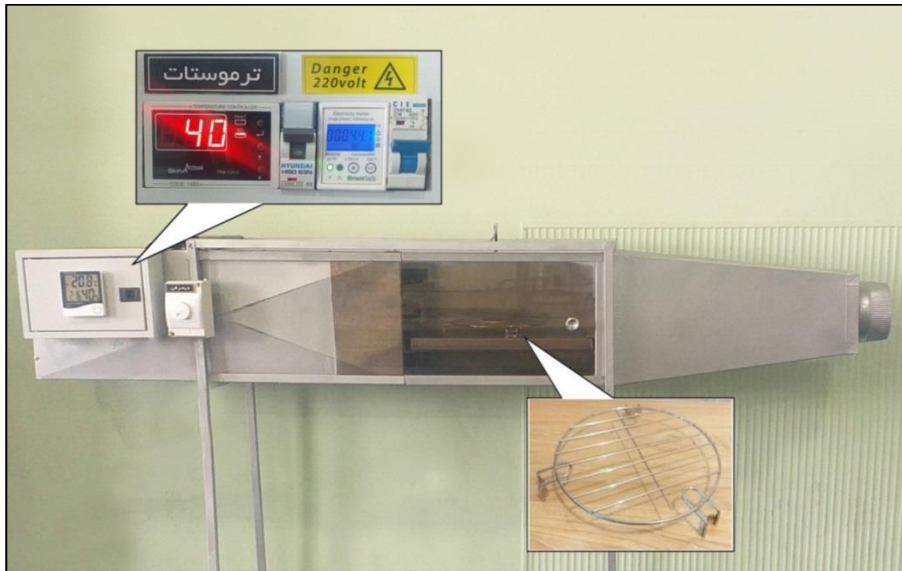
### جدول ۱. محدوده حداقلی و حداکثری عملکرد خشک‌کن آزمایشگاهی پژوهش حاضر

پارامتر عملیاتی	حداقل	حداکثر
دمای هوای عبوری	دمای محیط	۷۰ درجه سانتی‌گراد
سرعت هوای عبوری	۳ متر بر ثانیه	۷ متر بر ثانیه

<sup>1</sup> Response surface methodology

<sup>2</sup> Hammami

<sup>3</sup> Han



شکل ۱. خشک کن کانالی سینی دار آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش

### آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش

سیب سرخ با درجه رسیدگی و رنگ یکنواخت، از بازار محلی در شهر گرگان خریداری و تا زمان انجام آزمایش‌ها در داخل یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. به‌منظور رسیدن دمای سیب به دمای محیط، نمونه‌ها ۲ ساعت پیش از برش زدن از یخچال خارج گردید. سپس، نمونه‌ها توسط دستگاه برش LUSSO 195 GL (ساخت شرکت R.G.V.، ایتالیا) به ورقه‌هایی با ضخامت ۴ میلی‌متر برش داده شد. به‌منظور حفظ پیوستگی آزمایش‌ها، ورقه‌های سیب با قطر  $7/5 \pm 0/1$  سانتی‌متر برای ادامه آزمایش‌ها انتخاب گردید. همچنین برای بهبود فرایند خشک شدن و جلوگیری از چروکیدگی<sup>۱</sup> لایه بیرونی، پوست ورقه‌های سیب جدا و سپس نمونه‌ها برای تعیین جرم اولیه جامد مرطوب توزین گردید. ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به یکسان بودن نمونه‌های مورد آزمایش از دیدگاه ابعاد و ساختار جسم جامد، جرم نمونه‌های اولیه تقریباً یکسان ( $16 \pm 0/5$  گرم) بود. درنهایت، با توجه به جرم جامد خشک نمونه‌ها (جامد عاری از رطوبت) که برای تمامی آن‌ها تقریباً یکسان بود ( $2/88 \pm 0/05$  گرم) محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها به‌صورت معادله (۱) برابر با  $4/55$  (کیلوگرم رطوبت به کیلوگرم جامد خشک) به‌دست آمد. شایان ذکر است که تعیین رطوبت اولیه نمونه می‌تواند به‌منظور تعیین مدت‌زمان لازم برای رسیدن نمونه به رطوبت نهایی مطلوب با استفاده از مدل‌سازی فرایند خشک کردن مورد استفاده قرار گیرد. در طول انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها هر ۱۰ دقیقه از دستگاه خشک‌کن، خارج و پس از توزین به درون دستگاه بازگردانده شدند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که به‌منظور جلوگیری از برهم خوردن پیوستگی انجام آزمایش، خارج کردن، توزین و بازگرداندن نمونه به دستگاه در کمترین زمان ممکن صورت می‌پذیرفت. بدین ترتیب محتوای رطوبت نمونه‌ها تا رسیدن به رطوبت نهایی  $0/09$  (کیلوگرم رطوبت به کیلوگرم جامد خشک) کاهش یافت. این محتوای رطوبت نهایی براساس سعی و خطا و نیز احساس فردی از میل کردن ورقه‌های خشک‌شده سیب به‌دست آمد.

<sup>1</sup> Shrinkage

$$X = \left( \frac{Kg\text{moisture}}{Kg\text{dry solid}} \right) = \frac{mass_{wet\ solid} - mass_{dry\ solid}}{mass_{dry\ solid}} \quad (1)$$

### طراحی آزمایش‌ها

در این پژوهش به منظور طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ، از نرم‌افزار Design Expert 7.0 و روش طراحی مرکب مرکزی (CCD<sup>۱</sup>) بهره گرفته شد. بدین منظور دو پارامتر سرعت و دمای هوای عبوری به‌عنوان متغیرهای مستقل و دو پارامتر مدت‌زمان خشک شدن و انرژی مصرفی به‌عنوان پاسخ (خروجی) تعیین گردید. پارامترهای ورودی، با انجام آزمون‌های مقدماتی از منظر قابلیت دستگاه خشک‌کن برای ایجاد شرایط موردنیاز در طول آزمایش‌های طراحی‌شده ارزیابی گردید و در نهایت بازه‌های پارامترهای موردنظر مطابق جدول (۲) به‌منظور طراحی آزمایش‌های RSM به‌کار گرفته شد. همچنین با تعیین پارامتر آلفا برابر یک و در نظر گرفتن دو نقطه مرکزی<sup>۲</sup>، در مجموع ۱۰ آزمایش به‌صورت ارائه‌شده در جدول (۳) طراحی شد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که تکرار آزمایش‌های مربوط به نقطه مرکزی (آزمایش‌های شماره ۱ و ۱۰ موجود در جدول ۳) به‌منظور تخمین خطای خالص<sup>۳</sup> طراحی در طول انجام آزمایش است [۱۶].

جدول ۲. محدوده پارامترهای ورودی جهت طراحی آزمایش به روش RSM

متغیر	نام پارامتر	واحد	سطوح		
			+۱	۰	-۱
A	دمای هوای عبوری	درجه سانتی‌گراد	۵۰	۴۰	۳۰
B	سرعت هوای عبوری	متر بر ثانیه	۶	۵	۴

جدول ۳. آزمایش‌های طراحی‌شده توسط نرم‌افزار Design Expert 7.0 به روش RSM

شماره آزمایش	A دمای هوای عبوری (درجه سانتی‌گراد)	B سرعت هوای عبوری (متر بر ثانیه)
۱	۴۰	۵
۲	۴۰	۶
۳	۵۰	۶
۴	۵۰	۵
۵	۴۰	۴
۶	۵۰	۴
۷	۳۰	۵
۸	۳۰	۶
۹	۳۰	۴
۱۰	۴۰	۵

<sup>1</sup> Central composite design (CCD)

<sup>2</sup> Center point

<sup>3</sup> Pure error

## نتایج و بحث پیرامون آن‌ها

## تعیین شرایط بهینه با استفاده از روش سطح پاسخ

جدول ۴ ارائه‌کننده پاسخ (نتایج) مربوط به هر یک از آزمایش‌ها (جدول ۳) است. این نتایج با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA<sup>۱</sup>) موجود در نرم‌افزار Design Expert تحلیل و شرایط بهینه انجام آزمایش تعیین شد. تحلیل واریانس، مجموعه‌ای از مدل‌های آماری است که به بررسی میانگین در گروه‌ها و توابع وابسته به آن‌ها می‌پردازد. نتایج تحلیل واریانس برای متغیرهای وابسته به صورت ارائه‌شده در جدول ۵ است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی متغیرهای زمان و میزان مصرف انرژی به ترتیب مدل خطی و مدل درجه دوم است. همچنین ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برای مدل خطی در راستای پیش‌بینی زمان فرایند (معادله ۲) برابر با  $0.9803$  و برای مدل درجه دوم برای پیش‌بینی میزان مصرف انرژی (معادله ۳) برابر با  $0.9554$  است که نشان از توانایی بالای این دو مدل جهت پیش‌بینی متغیرهای وابسته دارد.

جدول ۴. پاسخ آزمایش‌های طراحی‌شده توسط نرم‌افزار جهت انجام تحلیل واریانس

پاسخ (۲): $R_2$ میزان مصرف انرژی (کیلووات ساعت)	پاسخ (۱): $R_1$ زمان خشک شدن (دقیقه)	B سرعت هوای عبوری (متر بر ثانیه)	A دمای هوای عبوری (درجه سانتی‌گراد)	شماره آزمایش
۵/۹	۲۲۰	۵	۴۰	۱
۶/۸	۱۹۵	۶	۴۰	۲
۶/۶	۱۲۸	۶	۵۰	۳
۶/۲	۱۶۵	۵	۵۰	۴
۵	۲۷۰	۴	۴۰	۵
۶/۱	۱۷۳	۴	۵۰	۶
۴/۲	۳۲۰	۵	۳۰	۷
۴/۸	۳۰۰	۶	۳۰	۸
۳/۴	۳۵۰	۴	۳۰	۹
۶/۱	۲۵۰	۵	۴۰	۱۰

$$R_1 = 714.77 - (8.4 \times A) - (28.33 \times B) \quad (2)$$

$$R_2 = -13.2 + (0.695 \times A) + (0.616 \times B) - [(7.33 \times 10^{-3}) \times A^2] \quad (3)$$

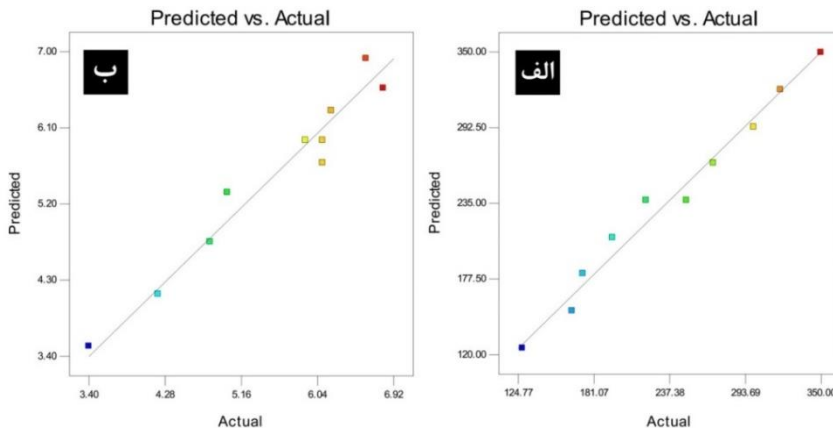
<sup>1</sup> Analysis of variance

جدول ۵. نتایج حاصل از آنالیز ANOVA برای پارامترهای خروجی مدل

متغیر وابسته	F Value	p-value	R-Squared	توضیحات
زمان	۱۷۴/۴۱	< ۰/۰۰۰۱	۰/۹۸۰۳	معنی‌دار
A: دمای هوای عبوری	۳۳۳/۱۹	< ۰/۰۰۰۱		
B: سرعت هوای عبوری	۳۵/۶۳	۰/۰۰۰۶		
Lack of Fit	۰/۱۸۳۷			غیرمعنی‌دار
مصرف انرژی	۴۲/۸۸	۰/۰۰۰۲	۰/۹۵۵۴	معنی‌دار
A: دمای هوای عبوری	۸۵/۳۵	< ۰/۰۰۰۱		
B: سرعت هوای عبوری	۲۷/۶۵	۰/۰۰۱۹		
A <sup>2</sup> : دمای هوای عبوری به توان ۲	۱۵/۶۴	۰/۰۰۷۵		
Lack of Fit	۴/۷۵	۰/۳۳۴۴		غیرمعنی‌دار

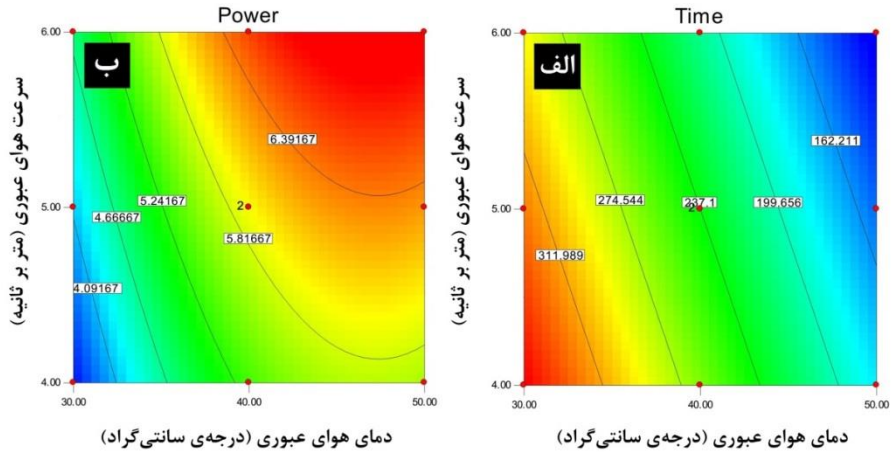
در معادله‌های بالا (مطابق با جدول ۴)، پارامترهای  $R_1$ ،  $R_2$ ، A و B به ترتیب زمان خشک شدن بر حسب دقیقه، میزان مصرف انرژی بر حسب کیلووات ساعت، دمای هوای عبوری بر حسب درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای عبوری بر حسب متر بر ثانیه هستند.

شکل ۲ نمایش‌دهنده داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار براساس مدل‌های پیشنهادی است. همان‌طور که در این شکل مشهود است، داده‌های پیش‌بینی شده زمان و میزان مصرف فرایند خشک شدن تقریباً بر روی خطوط راست قرار دارند که این موضوع تأییدی بر ضریب همبستگی مطلوب دو مدل پیشنهادی خواهد بود. شکل‌های ۳ و ۴ نمایش‌دهنده نمودارهای دویبعدی و سه‌بعدی (کانتور) تأثیر هم‌زمان متغیرهای مستقل (یعنی دما و سرعت هوای عبوری) بر هریک از متغیرهای وابسته (یعنی زمان و میزان مصرف فرایند خشک شدن) است. همان‌طور که مشهود است افزایش هم‌زمان دما و سرعت هوای عبوری از درون کانال، از یک سو منجر به کاهش زمان فرایند و از سوی دیگر منجر به افزایش میزان مصرف انرژی طی فرایند خشک شدن تا رسیدن به میزان رطوبت مطلوب می‌گردد.

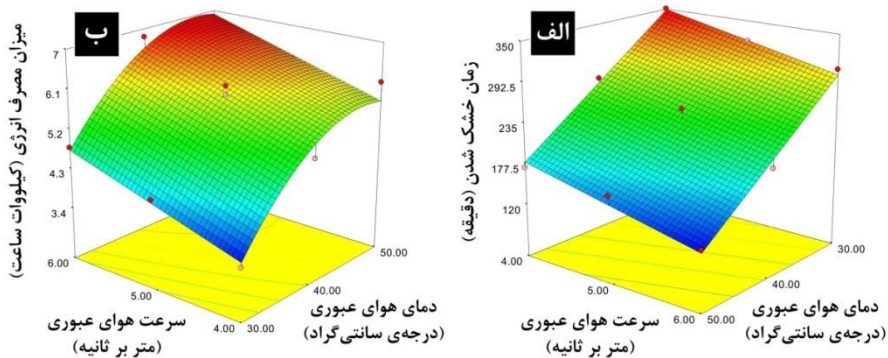


شکل ۲. مقایسه داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل برای هریک از متغیرهای وابسته: الف) زمان خشک شدن، ب) انرژی مصرفی.





شکل ۳. نمودار دوبعدی تأثیر هم‌زمان پارامترهای مستقل بر پاسخ‌های مدل:  
الف) زمان خشک شدن، ب) انرژی مصرفی.



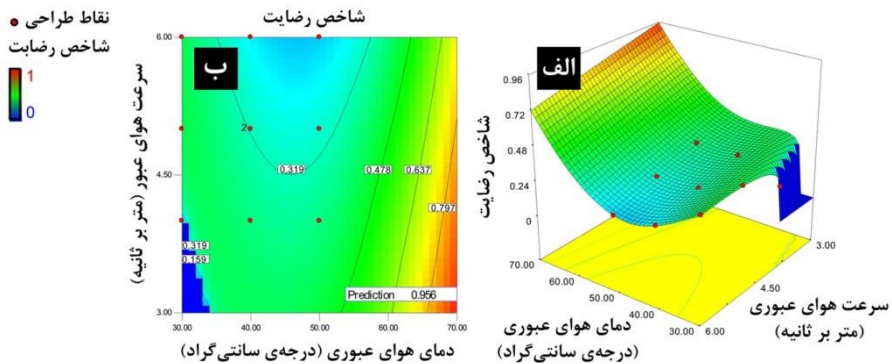
شکل ۴. نمودار سه‌بعدی تأثیر هم‌زمان پارامترهای مستقل بر پاسخ‌های مدل:  
الف) زمان خشک شدن، ب) انرژی مصرفی.

بر اساس مدل‌سازی صورت‌پذیرفته، چگونگی اثرگذاری متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته به خوبی مشخص گردید، با این وجود، به منظور تعیین نقطه (نقاط) بهینه عملیاتی که در آن حداقل میزان انرژی مصرفی در کوتاه‌ترین زمان ممکن حاصل شود، نیاز به بهینه‌سازی هم‌زمان مدل‌های ارائه شده است. به بیان دیگر، دما و سرعت بهینه هوای عبوری از سطح ورقه‌های سیب، مقداری از این کمیت‌ها است که منجر به حداقل شدن زمان رسیدن به رطوبت مطلوب نمونه با صرف حداقل میزان انرژی ممکن گردد.

به منظور بهینه‌سازی مدل‌های موجود و یافتن نقطه بهینه، بخش بهینه‌سازی<sup>۱</sup> نرم‌افزار Design Expert مورد استفاده قرار گرفت. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در طول بهینه‌سازی به منظور افزایش صرفه اقتصادی فرایند خشک شدن سیب، حداقل‌سازی میزان مصرف انرژی از اولویت بالاتری نسبت به حداقل‌سازی زمان فرایند خشک شدن

<sup>1</sup> Optimization

برخوردار بود. به‌منظور یافتن نقطه بهینه، شاخص رضایت<sup>۱</sup> ارائه‌شده توسط مدل که نشان‌دهنده توانایی و رابطه قوی بین پاسخ‌ها و متغیرهای مستقل می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص عددی بین صفر و یک می‌باشد که مقدار یک آن حاکی از بهینه‌ترین حالت است. شکل (۵-الف) و (۵-ب) به ترتیب نمایش‌دهنده تغییرات شاخص رضایت برای شرایط مختلف عملیاتی به‌صورت نمایش دوبعدی و سه‌بعدی می‌باشد. شایان ذکر است که رنگ آبی روی این نمودارها نشان‌دهنده کمترین میزان شاخص رضایت و رنگ قرمز حاکی از بیشترین میزان این شاخص است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در شرایط عملیاتی دما و سرعت هوای عبوری از درون کانال، به ترتیب برابر با ۷۰ درجه سانتی‌گراد و ۳ متر بر ثانیه، شاخص رضایت سیستم دارای بیشتری مقدار خود و برابر با ۰/۹۶ خواهد بود. براساس پیش‌بینی مدل‌های پیشنهادی توسط نرم‌افزار، با بهره‌گیری از شرایط بهینه عملیاتی که دارای بالاترین شاخص رضایت است (یعنی دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت عبور ۳ متر بر ثانیه)، مدت زمان لازم برای کاهش محتوای رطوبت نمونه به رطوبت مطلوب برابر با ۴۱ دقیقه و میزان مصرف انرژی برابر با ۱/۳۶ کیلووات ساعت به‌دست آمد. در گام پایانی، به‌منظور اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده، یک مرحله فرایند خشک شدن در دمای هوای عبوری ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۳ متر بر ثانیه به انجام رسید. هدف از این آزمون، تعیین زمان رسیدن رطوبت نمونه به میزان مطلوب (یعنی ۰/۰۹ کیلوگرم رطوبت به کیلوگرم جامد خشک) و اندازه‌گیری میزان مصرف انرژی در این فرایند خشک شدن بود. نتایج حاصل نشان داد که نمونه موردبررسی با استفاده از شرایط هوای عبوری مورد نظر (یعنی دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۳ متر بر ثانیه)، در زمان ۴۶ دقیقه و با صرف انرژی برابر با ۱/۵۱ کیلووات ساعت به محتوای رطوبت مطلوب رسید. با توجه به خطای حدوداً ۱۰ درصدی در مقایسه داده‌های واقعی با مدل پیشنهادی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که مدل پیشنهادی در فرایند خشک شدن موردبررسی در این پژوهش از دقت قابل‌قبولی برخوردار است.



شکل ۵. نمودارهای دوبعدی و سه‌بعدی تأثیر هم‌زمان پارامترهای مستقل بر شاخص رضایت سیستم

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از یک خشک‌کن کانالی سینی‌دار آزمایشگاهی، نسبت به خشک کردن ورقه‌های سیب سرخ اقدام شد. طراحی آزمایش‌ها با در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان پارامترهای دما و سرعت هوای عبوری از درون خشک‌کن به‌عنوان دو متغیر مستقل صورت پذیرفت و شرایط بهینه عملیات خشک کردن به‌صورت دمای هوای عبوری برابر با ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای عبوری برابر با ۳ متر بر ثانیه تعیین شد. نتایج به‌دست‌آمده در آزمون اعتبارسنجی با استفاده از شرایط عملیاتی بهینه پیش‌گفته منجر به خشک شدن نمونه تا میزان رطوبت مطلوب طی زمان ۴۶ دقیقه و

<sup>1</sup> Desirability

با صرف انرژی برابر با ۱/۵۱ کیلووات ساعت گردید. این مقادیر که در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی (یعنی زمان ۴۱ دقیقه و انرژی مصرفی ۱/۳۶ کیلووات ساعت) از خطای در حدود ۱۰ درصدی برخوردار بود، حاکی از آن است که روش سطح پاسخ به‌خوبی قادر به تعیین شرایط بهینه اقتصادی انجام آزمایش است به صورتی که نمونه در کمترین زمان ممکن و با صرف کم‌ترین میزان انرژی ممکن خشک شود.

## References

- [1] Yaldýz, O., & Ertekýn, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19(3-4), 583-597. <https://doi.org/10.1081/DRT-100103936>
- [2] Mesbahi, G. R., Zomorodian, A., Dadashzadeh, M., & Farahnaki, A. (2007). A Comparative Study Of Raisin Production By Solar Dryer And Other Drying Methods. *Iranian Food Science and Technology Reasearch*, 2(2), 61-74. <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=162407>
- [3] Chin, S., Siew, E., & Soon, W. (2015). Drying Characteristics and Quality Evaluation of Kiwi Slices Under Hot Air Natural Convective Drying Method. *International Food Research Journal*, 22(6), 2188-2195. <https://eprints.ncl.ac.uk/229101>
- [4] Timoumi, S., Mihoubi, D., & Zagrouba, F. (2007). Shrinkage, vitamin C degradation and aroma losses during infra-red drying of apple slices. *LWT- Food Science and Technology*, 40(9), 1648-1654. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.11.008>
- [5] Krokida, M. K., & Marinos-Kouris, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57(1), 1-7. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00214-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00214-5)
- [6] Akpinar, E. K., Midilli, A., & Bicer, Y. (2005). Thermodynamic analysis of the apple drying process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 219(1), 1-14. <https://doi.org/10.1243/095440805x6991>
- [7] Ghasemkhani, H., Keyhani, A., Aghbashlo, M., Rafiee, S., & Mujumdar, A. (2015). Improving exergetic performance parameters of a rotating-tray air dryer via a simple heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 94, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.114>
- [8] Beigi, M. (2018). Energy and exergy analyses for drying process of apple cubes in a hot air dryer. *Journal of Food Science and Technology*, 15(76), 1-11. <https://fsct.modares.ac.ir/article-7-11447-fa.html>
- [9] Khoshthagaza, M.-H., Sadeghi, M., & Amirichayjan, R. (2007). Study of rough rice drying process in fixed and fluidized bed conditions. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(2), 127-137. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=98978>
- [10] Esfandiari, K., Mahdavi, A. R., Ghoreyshi, A. A., & Jahanshahi, M. (2018). Optimizing parameters affecting synthesize of CuBTC using response surface methodology and development of AC@CuBTC composite for enhanced hydrogen uptake. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(13), 6654-6665. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.089>
- [11] Maccurin, T., & Reilly, J. (1940). Sclerotiorine, a chlorinated metabolic product of *Penicillium sclerotiorum*, van Beyma. *Nature*, 146(3697), 335-335. <https://doi.org/10.1038/146335b0>
- [12] Jalili, F., Jafari, S. M., Emam-Djomeh, Z., Malekjani, N., & Farzaneh, V. (2018). Optimization of ultrasound-assisted extraction of oil from canola seeds with the use

- of response surface methodology. *Food analytical methods*, 11(2), 598-612. <https://doi.org/10.1007/s12161-017-1030-z>
- [13] Hammami, C., Floris, R., & Marin, M. (2001). Process-quality optimization of the vacuum freeze-drying of apple slices by the response method. *International Journal of Food Science & Technology*, 34(2), 145-160. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.1999.00247.x>
- [14] Han, Q.-H., Yin, L.-J., Li, S.-J., Yang, B.-N., & Ma, J.-W. (2010). Optimization of Process Parameters for Microwave Vacuum Drying of Apple Slices Using Response Surface Method. *Drying Technology*, 28(4), 523-532. <https://doi.org/10.1080/07373931003618790>
- [15] Yuan, Y., Zhao, Z., Wang, L., Xu, Y., Chen, H., Kong, L., & Wang, D. (2022). Process optimization of CO2 high-pressure and low-temperature explosion puffing drying for apple chips using response surface methodology. *Drying Technology*, 40(1), 100-115. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1771361>
- [16] Rabbi, A., Nasouri, K., Bahrambeygi, H., Shoushtari, A .M., & Babaei, M. R. (2012). RSM and ANN approaches for modeling and optimizing of electrospun polyurethane nanofibers morphology. *Fibers and Polymers*, 13(8), 1007-1014. <https://doi.org/10.1007/s12221-012-1007-x>