

## مدل سازی و بهینه سازی خشک کردن میوه خرمالو به روش سطح پاسخ

آزاده طبایی<sup>1</sup>، عیسی حزباوی<sup>2\*</sup>، فیض اله شهبازی<sup>3</sup>

1- کارشناسی ارشد گروه مکانیک بیو سیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

2- استادیار گروه مکانیک بیو سیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

3- دانشیار گروه مکانیک بیو سیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

(تاریخ دریافت: 97/11/12 تاریخ پذیرش: 98/11/12)

### چکیده

خشک کردن محصولات غذایی با استفاده از مایکروویو می تواند جانسین مناسبی برای خشک کن های هوای گرم محسوب شود. در این تحقیق روش سطح پاسخ برای مدل سازی و بهینه سازی شرایط خشک کردن برگه های خرمالو توسط مایکروویو مورد استفاده قرار گرفت. اثر ضخامت برگه (3، 5 و 7 میلیمتر) و توان مایکروویو (300، 500 و 700 وات) به عنوان متغیرهای مستقل بر درصد چروکیدگی، زمان تهیه برگه و تغییرات رنگ برگه خرمالو به عنوان متغیرهای وابسته (پاسخ) مورد ارزیابی قرار گرفت. تمام متغیرهای فرایند به صورت مدل های رگرسیونی درجه دوم برای تمام پاسخ ها معنی دار بودند ( $p < 0.01$ ). با افزایش توان مایکروویو، درصد چروکیدگی و تغییرات کلی رنگ برگه خرمالو افزایش ولی زمان فرآوری کاهش یافت. با افزایش ضخامت برگه خرمالو، زمان فرآوری و تغییرات کلی رنگ برگه خرمالو افزایش ولی درصد چروکیدگی کاهش یافت. شرایط بهینه به دست آمده برای حداقل میزان درصد چروکیدگی، تغییرات رنگ و مدت زمان تهیه برگه خرمالو، شامل ضخامت 3 میلیمتر و توان 312 وات بود. در شرایط بهینه به دست آمده میزان درصد چروکیدگی 72/5 درصد، تغییر رنگ کلی 15/2 و زمان تهیه برگه خرمالو 5/97 دقیقه بود.

کلید واژگان: خرمالو، مایکروویو، کیفیت، روش سطح پاسخ

\* مسئول مکاتبات: hazbavi.i@lu.ac.ir

## 1- مقدمه

با استفاده از مایکروویو می‌تواند جانشین مناسبی برای خشک‌کن‌های هوای گرم محسوب شود [6 و 7]. مواد غذایی حاوی مولکول‌های قطبی مانند آب هستند. این مولکول‌ها عموماً دارای یک جهت‌گیری تصادفی می‌باشند اما هنگامی که یک میدان الکتریکی اعمال می‌شود مولکول‌ها خودشان را در جهت میدان قرار می‌دهند. در یک میدان مایکروویو، قطبیت به سرعت تغییر می‌کند. مولکول‌های قطبی دوران می‌کنند تا در راستای قطبیتی که به سرعت در حال تغییر است قرار گیرند. این چرخش مولکول‌ها منجر به ایجاد اصطکاک و تولید گرما می‌شود [5]. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های مشخص آماری برای طراحی آزمایشات، ساخت مدل‌ها، ارزیابی اثرات فاکتورهای مستقل و جست و جو برای تعیین شرایط بهینه رسیدن به پاسخ‌های مطلوب است [8]. اصول و مبانی روش سطح پاسخ برای اولین بار توسط باکس و ویلسون در سال 1951 بیان شده است [9]. در آزمایشات چند مؤلفه‌ای، روش سطح پاسخ می‌تواند به منظور آزمون همزمان پارامترهای مستقل گوناگون با حداقل زمان آزمایش، اندازه‌گیری بیشترین فاکتورهای مرتبط و دامنه اثر آن‌ها و همچنین اثرات متقابل فاکتورهای مستقل مورد استفاده قرار گیرد [10]. روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن محصولاتی مانند فندق [11]، مغز پسته [12] و میوه به [10] استفاده شده است تاکنون هیچ پژوهشی در زمینه بهینه‌سازی خشک‌کردن میوه خرمالو با استفاده از روش سطح پاسخ انجام نشده است. هدف از این تحقیق، بهینه‌سازی شرایط خشک‌کردن با آون مایکروویو میوه خرمالو با استفاده از روش سطح پاسخ بود.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1 آماده‌سازی نمونه‌ها و تهیه برگه خرمالو

میوه‌های خرمالو از بازار میوه و تره بار شهر بروجرد در اواخر تابستان سال 1397 تهیه و به آزمایشگاه بیوسیستم دانشگاه لرستان منتقل شدند. میزان رطوبت میوه خرمالو با قرار دادن نمونه‌ها در آون با دمای 105 درجه سانتی‌گراد و خشک کردن آنها تا زمان ثابت شدن وزن نمونه‌ها انجام شد [13]. رطوبت متوسط میوه‌های خرمالو بر پایه تر به میزان 81% محاسبه شد. برای تهیه برگه از میوه خرمالو، از خشک‌کردن به روش ماکروویو استفاده شد. ابتدا برگه‌هایی از میوه خرمالو توسط دستگاه کالباس‌بر به ضخامت‌های 3، 5 و 7 میلی‌متر تهیه شد.

خرمالو با نام علمی *Diospyros kaki* و از خانواده *Ebenaceae* درختی است که دارای برگ‌های ساده با گل‌هایی عموماً تک جنسی است. این تیره دارای 6 جنس و 300 تا 400 گونه است که بیشتر آنها مناطق بین گرمسیری و خاور دور انتشار دارند. درخت خرمالو که در ایران درخت مشهوری است، در اصل بومی چین و ژاپن است. این درخت از گذشته‌های نسبتاً دور وارد ایران شده و امروزه در بیشتر نقاط کاشته و تکثیر می‌شود تولید این میوه در کشور 1000 تن در سال است و ایران رتبه 8 تولید خرمالو را دارد. بخش گوشت میوه محتوی مقدار زیادی مواد قندی، تانن و ویتامین است [1]. خشک‌کردن محصولات کشاورزی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری و محافظت آنها به حساب می‌آید. با کاهش میزان آب موجود در محصولات به یک سطح خیلی پایین، فعالیت میکروبی در آنها از بین می‌رود. به علاوه، کاهش رطوبت محصولات باعث کاهش مقدار وزن و حجم آن شده و بازده حمل و نقل و انبارداری محصولات را افزایش می‌دهد. در بعضی مواقع خشک‌کردن بعضی تولیدات کشاورزی برای راحت‌تر شدن مصرف آن توسط مصرف‌کننده است [2]. میوه‌ها، سبزیجات و غلات مانند انگور، فلفل، زردآلو و ذرت که معمولاً با قرار گرفتن در معرض آفتاب خشک می‌شوند دارای آلودگی‌های مختلف موجود در خاک و محیط اطراف می‌باشند [3]. مشکلات استفاده از انرژی خورشید در خشک‌کردن محصولات مختلف کشاورزی سبب شد تا خشک‌کن‌های صنعتی جایگزین روش‌های سنتی خشک‌کردن گردند. در مقابل استفاده از خشک‌کن‌های صنعتی باعث مصرف انرژی زیادی در صنعت خشک‌کردن می‌گردند و خشک‌کردن محصولات کشاورزی را یک عملیات با مصرف انرژی زیاد ولی با اهمیت زیاد صنعتی مطرح می‌سازد [4]. فرآیند خشک‌کردن با مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. طیف الکترومغناطیسی بین بسامدهای 300 MHz تا 300 GHz نشانگر امواج مایکروویو است. برخلاف سیستم‌های گرمایشی رایج، امواج مایکروویو در ماده نفوذ کرده و گرمایش در سراسر محصول گسترش می‌یابد [5]. امواج ماکروویو خیلی سریع و موثر در ماده گیاهی نفوذ می‌کنند و در نتیجه منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شوند بنابراین خشک‌کردن محصولات غذایی

Image-mode-Lab فضای رنگی Lab انتخاب گردید. سپس پنج نقطه از سطح نمونه انتخاب و اطلاعات  $L$ ،  $a$  و  $b$  از طریق پنجره Information نرم افزار قرائت شد. سپس میانگین داده‌های ثبت شده محصول محاسبه و به عنوان داده-های رنگی نمونه ثبت گردید. در آنالیز رنگی محصول معمولاً از شاخصه کلی تغییرات رنگ یعنی  $E\Delta$  استفاده می‌شود (رابطه 2) که بیانگر تغییرات کلی رنگ محصول نسبت به ماده اولیه می‌باشد:

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

که در آن  $a_0$ ،  $b_0$  و  $L_0$  مشخصات رنگی ماده اولیه و  $a$ ،  $b$  و  $L$  مشخصات رنگی محصول نهایی می‌باشد.

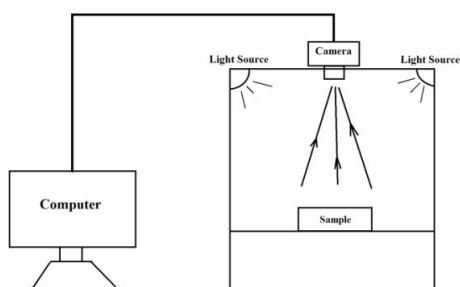


Fig 1 Image processing system

## 2-4- طرح آزمایشات

روش سطح پاسخ برای پیش بینی تأثیر متغیرهای مستقل فرایند خشک کردن خرمالو شامل توان مایکروویو (300، 500 و 700 وات) و ضخامت برگه (3، 5 و 7 میلی‌متر) بر متغیرهای وابسته (پاسخ) درصد چروکیدگی، تغییر رنگ و زمان تهیه برگه خرمالو به کار برده شد. آزمایشات بر طبق طرح مرکب مرکزی با سه سطح برای هر متغیر مستقل و 5 تکرار انجام شد [17]. روش سطح پاسخ با استفاده از نرم افزار Design Expert 7 اجرا گردید.

## 3- نتایج و بحث

نتایج حاصل از طرح آزمایش مورد استفاده برای بهینه‌سازی خشک کردن مایکروویو در جدول 1 آمده است. در روش سطح پاسخ، نقاط مرکزی برای توان مایکروویو و ضخامت برگه

سپس نمونه‌ها بطور یکنواخت به منظور جذب یکنواخت انرژی مایکروویو روی سینی دستگاه آون مایکروویو (سامسونگ مدل CS4550، ساخت کره) پخش شدند. عمل خشک کردن نمونه‌ها در توان‌های 300، 500 و 700 وات بررسی شد. برای تعیین میزان کاهش وزن نمونه‌ها تا دو رقم اعشار از یک ترازوی دیجیتال استفاده شد. مدت زمان لازم برای هر بار وزن کردن نمونه 15 ثانیه (طبق تحقیقات مشابه) در نظر گرفته شد و خشک کردن نمونه‌ها تا زمانی که رطوبت نهایی آنها به 10% برسد، ادامه یافت [1].

## 2-2- اندازه‌گیری چروکیدگی

ابتدا به روش جابه‌جایی مایع تولون، حجم نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند خشک کردن تعیین شد [14] سپس برای محاسبه درصد چروکیدگی از رابط (1) استفاده شد [15].

$$Sh = \left(1 - \frac{V_t}{V_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن،  $Sh$  چروکیدگی (%،  $V_t$  حجم نمونه خشک شده و  $V_0$  حجم اولیه نمونه می‌باشد.

## 2-3- اندازه‌گیری رنگ نمونه‌ها

پارامتر رنگ یکی از ویژگی‌های مهم در تولید محصولات کشاورزی می‌باشد. برای بدست آوردن رنگ محصول همچنین مقایسه محصول بدست آمده از تیمارهای مختلف با یکدیگر، از فضای رنگی Lab استفاده گردید. برای بدست آوردن پارامترهای  $L$  (روشنایی)،  $a$  (میزان قرمزی - سبزی) و  $b$  (میزان زردی - آبی) روش‌های مختلفی مانند استفاده از هانتربل یا نرم افزار فتوشاپ استفاده می‌شود که در این تحقیق از نرم افزار فتوشاپ استفاده شد و برای کالیبراسیون آن از روش هانتربل استفاده شده است [16]. برای اینکه شرایط محیطی برای تمامی نمونه‌ها یکسان باشد یک اتاقک به ابعاد  $50 \times 50 \times 30$  cm ساخته شد (شکل 1) و دیواره داخلی آن با رنگ سفید به منظور بازتاب کامل نور پوشانده شد. از 4 لامپ 60 وات با نور سفید جهت ایجاد روشنایی در داخل جعبه استفاده گردید. از یک دوربین دیجیتالی مدل Fujifilm FinePix Ax50 با دقت 16MP جهت عکس برداری از نمونه‌ها استفاده شد. فاصله لنز دوربین تا سطح نمونه برابر با 25 سانتی متر انتخاب گردید. عکس‌های گرفته شده از نمونه‌ها به داخل کامپیوتر منتقل شده و به کمک نرم افزار فتوشاپ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. بدین منظور ابتدا از طریق دستور

**3-1- تجزیه مدل برازش یافته**

بر اساس نتایج به دست آمده (جدول 2)، مدل درجه دوم کاسته برای درصد چروکیدگی از نظر آماری معنی دار بود ( $P < 0.001$ )، و آزمون عدم برازش آن غیر معنی‌دار بود ( $P > 0.05$ ) که نشان دهنده مناسب بودن مدل پس از کاهش دادن تعداد جملات غیر معنی دار آن است.

خرمالو به ترتیب برابر با 500 وات و 5 میلی‌متر بود و بقیه نقاط محوری می‌باشند. برازش داده‌های به دست آمده برای درصد چروکیدگی، زمان تغییر رنگ و تهیه برگه خرمالو بر اساس مدل چند جمله‌ای درجه دوم صورت گرفت. پس از برازش مدل، رابطه‌های به دست آمده در معرض الگوریتم حذف پس‌خور قرار گرفتند. با استفاده از الگوریتم مذکور، جملات مدل که از نظر آماری در سطح 95 درصد معنی دار نبودند، حذف شدند (مدل درجه دوم کاسته شده).

**Table 1** Results of the experimental design used in drying of persimmon fruit

| b     | a     | L     | EΔ    | Processing time (min) | Shrinkage | Slice thickness | Microwave power | No. |
|-------|-------|-------|-------|-----------------------|-----------|-----------------|-----------------|-----|
| 35.76 | 14.10 | 49.01 | 18.81 | 3.67                  | 76.14     | 3               | 500             | 1   |
| 30.01 | 15.04 | 47.69 | 20.31 | 3.95                  | 74.03     | 5               | 500             | 2   |
| 27.57 | 15.71 | 47.91 | 21.42 | 3.53                  | 75.21     | 5               | 700             | 3   |
| 26.28 | 14.02 | 44.44 | 18.08 | 7.16                  | 71.62     | 7               | 300             | 4   |
| 38.11 | 13.15 | 52.23 | 15.04 | 6.17                  | 72.13     | 3               | 300             | 5   |
| 25.88 | 16.01 | 43.01 | 20.92 | 4.52                  | 72.11     | 7               | 500             | 6   |
| 28.28 | 15.81 | 48.54 | 19.82 | 3.71                  | 74.05     | 5               | 500             | 7   |
| 30.26 | 16.02 | 49.02 | 20.28 | 3.95                  | 74.96     | 5               | 500             | 8   |
| 29.58 | 13.73 | 49.83 | 16.21 | 6.37                  | 71.81     | 5               | 300             | 9   |
| 29.00 | 15.22 | 47.02 | 19.91 | 3.88                  | 74.51     | 5               | 500             | 10  |
| 25.63 | 16.52 | 37.01 | 21.81 | 4.34                  | 72.49     | 7               | 700             | 11  |
| 28.71 | 15.11 | 47.13 | 20.75 | 3.86                  | 74.14     | 5               | 500             | 12  |
| 32.66 | 14.08 | 48.57 | 20.11 | 3.33                  | 77.21     | 3               | 700             | 13  |

معنی‌دار بود (جدول 3) و از طرفی آزمون عدم برازش آن معنی‌دار نبود که با توجه به این نتایج می‌توان اینچنین برداشت نمود که مدل کاسته شده مدلی مناسب بوده است. عبارت‌های معنی‌دار مدل شامل توان مایکروویو (A)، ضخامت برگه (B)، عبارت درجه دوم توان مایکروویو ( $A^2$ ) و عبارت درجه دوم ضخامت برگه ( $B^2$ ) بود. مقدار  $R^2$  و  $R^2$  adjusted برابر با 0/99 بودند که نشان از قدرت بالای مدل می‌باشد.

عبارت‌های معنی‌دار مدل شامل توان مایکروویو (A)، ضخامت برگه (B)، اثر متقابل توان مایکروویو و ضخامت برگه (AB) و درجه دوم توان مایکروویو ( $A^2$ ) بود (جدول 2). مقدار  $R^2$  و  $R^2$  adjusted به ترتیب برابر با 0/96 و 0/94 بودند که بالا بودن مقادیر آنها تأییدکننده قدرت بالای مدل می‌باشد. مدل درجه دوم ارائه شده برای زمان تهیه برگه خرمالو

**Table 2** Analysis of variance and coefficients of predictive model of shrinkage percentage

| P-value | Mean square | df | Sum of squares | Coefficients | Source      |
|---------|-------------|----|----------------|--------------|-------------|
| <0.001  | 7.27        | 5  | 36.35          | 74.3         | Model       |
| <0.001  | 14.6        | 1  | 14.6           | 1.56         | A           |
| <0.001  | 8.12        | 1  | 8.12           | -1.54        | B           |
| 0.001   | 4.41        | 1  | 4.41           | -1.05        | AB          |
| 0.007   | 2.41        | 1  | 2.41           | -0.86        | $A^2$       |
|         | 0.11        | 7  | 0.79           |              | Residual    |
| 0.4     | 0.05        | 3  | 0.15           |              | Lack of fit |
|         | 0.16        | 4  | 0.63           |              | Error       |
|         |             |    |                | 0.96         | $R^2$       |
|         |             |    |                | 0.94         | Adj- $R^2$  |

**Table 3** Analysis of variance and coefficients of predictive model of persimmon processing time

| P-value | Mean square | df | Sum of squares | Coefficients | Source             |
|---------|-------------|----|----------------|--------------|--------------------|
| <0.001  | 4.6         | 4  | 18.42          | 3.86         | Model              |
| <0.001  | 12.1        | 1  | 12.1           | -1.42        | A                  |
| <0.001  | 1.35        | 1  | 1.35           | 0.47         | B                  |
| <0.001  | 3.44        | 1  | 3.44           | 1.12         | A <sup>2</sup>     |
| 0.001   | 0.19        | 1  | 0.19           | 0.26         | B <sup>2</sup>     |
|         | 0.006       | 8  | 0.05           |              | Residual           |
| 0.9     | 0.003       | 4  | 0.01           |              | Lack of fit        |
|         | 0.01        | 4  | 0.04           |              | Error              |
|         |             |    |                | 0.99         | R <sup>2</sup>     |
|         |             |    |                | 0.99         | Adj-R <sup>2</sup> |

بودن مدل کاسته شده برای هر یک از فاکتورهای رنگ است. مقادیر بالای ضرایب همبستگی (R<sup>2</sup> adjusted و R<sup>2</sup>) نشان از قدرت بالای مدل آنها بود.

نتایج تجزیه واریانس مربوط به تغییرات رنگ برگه خرمالو در جداول 4 تا 7 آمده است. مدل درجه دوم برای هر کدام از فاکتورهای رنگ  $\Delta E$ ،  $L$ ،  $a$  و  $b$  معنی‌دار بود. همچنین آزمون عدم برازش آنها نیز غیر معنی‌دار بود که نشان دهنده مناسب

**Table 4** Analysis of variance and coefficients of the predictive model of total color change ( $\Delta E$ )

| P-value | Mean square | df | Sum of squares | Coefficients | Source             |
|---------|-------------|----|----------------|--------------|--------------------|
| <0.001  | 15.42       | 3  | 46.26          | 20.11        | Model              |
| <0.001  | 32.71       | 1  | 32.71          | 2.33         | A                  |
| <0.001  | 7.8         | 1  | 7.8            | 1.14         | B                  |
| 0.002   | 5.75        | 1  | 5.75           | -1.33        | A <sup>2</sup>     |
|         | 0.16        | 9  | 1.42           |              | Residual           |
| 0.4     | 0.17        | 5  | 0.87           |              | Lack of fit        |
|         | 0.14        | 4  | 0.55           |              | Error              |
|         |             |    |                | 0.97         | R <sup>2</sup>     |
|         |             |    |                | 0.96         | Adj-R <sup>2</sup> |

**Table 5** Analysis of variance and coefficients of predictive model of L color factor

| P-value | Mean square | df | Sum of squares | Coefficients | Source             |
|---------|-------------|----|----------------|--------------|--------------------|
| <0.001  | 51.6        | 3  | 154.9          | 48.15        | Model              |
| 0.004   | 28.3        | 1  | 28.3           | -2.17        | A                  |
| <0.001  | 107.3       | 1  | 107.3          | -4.23        | B                  |
| 0.01    | 19.3        | 1  | 19.3           | -2.45        | B <sup>2</sup>     |
|         | 1.91        | 9  | 17.17          |              | Residual           |
| 0.1     | 2.8         | 5  | 14.1           |              | Lack of fit        |
|         | 0.76        | 4  | 3.1            |              | Error              |
|         |             |    |                | 0.91         | R <sup>2</sup>     |
|         |             |    |                | 0.87         | Adj-R <sup>2</sup> |

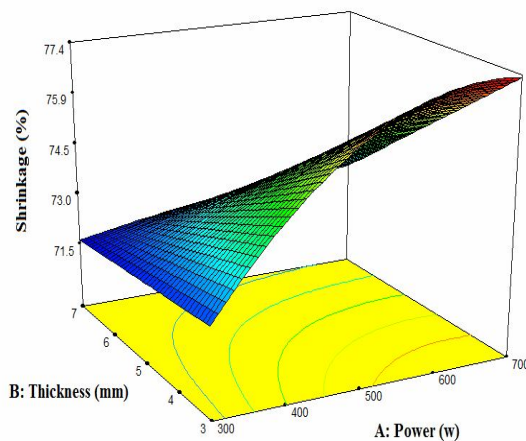
**Table 6** Analysis of variance and coefficients of predictive model of a color factor

| P-value | Mean square | df | Sum of squares | Coefficients | Source             |
|---------|-------------|----|----------------|--------------|--------------------|
| 0.003   | 3.8         | 3  | 11.4           | 15.32        | Model              |
| 0.007   | 4.9         | 1  | 4.9            | 0.9          | A                  |
| 0.001   | 4.5         | 1  | 4.5            | 0.87         | B                  |
| 0.01    | 2.02        | 1  | 2.02           | -0.79        | A <sup>2</sup>     |
|         | 0.19        | 9  | 1.75           |              | Residual           |
| 0.5     | 0.2         | 5  | 0.98           |              | Lack of fit        |
|         | 0.19        | 4  | 0.77           |              | Error              |
|         |             |    |                | 0.87         | R <sup>2</sup>     |
|         |             |    |                | 0.82         | Adj-R <sup>2</sup> |

**Table 7** Analysis of variance and coefficients of predictive model of b color factor

| P-value | Mean square | df | Sum of squares | Coefficients | Source             |
|---------|-------------|----|----------------|--------------|--------------------|
| <0.001  | 40.83       | 4  | 163.3          | 29.06        | Model              |
| <0.001  | 10.96       | 1  | 10.96          | -1.35        | A                  |
| <0.001  | 137.7       | 1  | 137.7          | -4.79        | B                  |
| 0.004   | 5.          | 1  | 5.             | 1.2          | AB                 |
| 0.002   | 8.9         | 1  | 8.9            | 1.66         | B <sup>2</sup>     |
|         | 0.5         |    | 3.99           |              | Residual           |
| 0.8     | 0.28        |    | 1.11           |              | Lack of fit        |
|         | 0.72        |    | 2.89           |              | Error              |
|         |             |    |                | 0.97         | R <sup>2</sup>     |
|         |             |    |                | 0.96         | Adj-R <sup>2</sup> |

تقریباً برابر ولی معکوسی بر درصد چروکیدگی برگه خرمالو داشته است. افزایش درصد چروکیدگی با افزایش توان مایکروویو در نتایج دیگران نیز آمده است [18]. کاهش درصد چروکیدگی با افزایش ضخامت برگه در تحقیقات دیگران نیز گزارش شده است [19 و 20].

**Fig 2** Response surface of effect of microwave power and thickness of slice on shrinkage of persimmon

### 3-2-2- تأثیر متغیرهای مستقل بر پاسخ‌ها

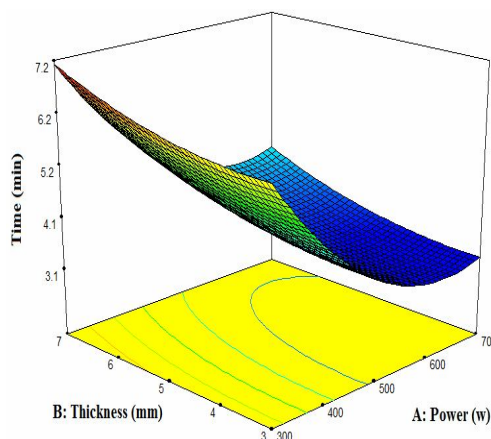
#### 3-2-1-1- تأثیر متغیرهای مستقل بر درصد چروکیدگی

با توجه به مقادیر جدول 2، مشاهده می‌شود که اثر خطی متغیر ضخامت برگه و اثر خطی و درجه دوم توان مایکروویو بر درصد چروکیدگی معنی‌دار بود ( $P < 0.01$ ). این روند در شکل 2 سطح پاسخ آن (شکل 2) به خوبی مشهود است و تأییدی بر معنی‌دار بودن ضرایب خطی و درجه دوم مدل می‌باشد. با توجه به منفی بودن علامت ضریب فاکتور ضخامت برگه و مثبت بودن ضریب فاکتور توان مایکروویو و همچنین شکل رویه پاسخ مشاهده می‌شود که ارتباط درصد چروکیدگی و توان مایکروویو، مستقیم و ارتباط ضخامت برگه با درصد چروکیدگی، معکوس است، بدین معنی که با افزایش ضخامت برگه و توان مایکروویو، درصد چروکیدگی به ترتیب کاهش و افزایش پیدا می‌کند. این نتیجه می‌تواند به دلیل خروج سریع آب (رطوبت) از بافت محصول با افزایش توان مایکروویو و کاهش ضخامت برگه باشد. از ضرایب مدل در جدول 2 چنین بر می‌آید که ضخامت برگه در مقایسه با توان مایکروویو تأثیر

### 3-2-2- تأثیر متغیرهای مستقل بر زمان تهیه برگ

#### خرمالو

با توجه به نتایج جدول 3، مشاهده می‌شود که اثرات خطی و درجه دوم فاکتورهای توان مایکروویو و ضخامت برگه بر زمان تهیه برگه خرمالو معنی‌دار بود ( $P < 0.01$ ). در شکل 2 نمودار سطح تأثیر توان مایکروویو و ضخامت برگه بر زمان تهیه برگه خرمالو نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که زمان تهیه برگه به میزان زیادی از فاکتور توان مایکروویو تأثیر می‌پذیرد (ضریب بیشتر در جدول 3). با افزایش توان مایکروویو و ضخامت برگه، زمان تهیه برگه خرمالو به ترتیب کاهش و افزایش یافته است. این نحوه اثرگذاری مثبت و منفی فاکتورها با توجه به ضرایب مدل (جدول 3) و نمودار رویه (شکل 3) مورد تأیید است.



**Fig 3** Response surface of effect of microwave power and thickness of slice on processing time

همچنین با در نظر گرفتن معنی‌دار بودن عبارت درجه دوم توان مایکروویو و ضخامت برگه، وجود انحناء در شکل رویه مشاهده می‌شود. کاهش زمان فرآوری با افزایش توان مایکروویو می‌تواند به دلیل خروج سریع‌تر رطوبت از بافت محصول در توان‌های بالای مایکروویو باشد. افزایش توان خروجی مایکروویو، رطوبت نسبی محصول را بیشتر کاهش می‌دهد، زیرا اینگونه به نظر می‌رسد که با افزایش توان خروجی از مایکروویو دمای درون محفظه و شدت پرتوهای مایکروویو افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت دانه می‌شود، به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت شدیدتر است. کاهش زمان فرآوری با

کاهش ضخامت برگه می‌تواند به دلیل خروج سریع رطوبت از بافت محصول در امتداد ضخامت برگه باشد. کاهش زمان فرآوری با افزایش توان مایکروویو در گزارش محققان دیگر نیز آمده است [13 و 21]. این نتیجه می‌تواند به دلیل خروج سریع رطوبت از بافت محصول در امتداد ضخامت برگه باشد. کاهش زمان فرآوری با کاهش ضخامت برگه در گزارش محققان دیگر نیز آمده است [15].

### 3-2-3- تأثیر متغیرهای مستقل بر تغییر رنگ برگه

#### خرمالو

در جدول‌های 4 تا 7، نتایج تجزیه واریانس تغییرات رنگ برگه خرمالو آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود اثر خطی فاکتورهای توان مایکروویو و ضخامت برگه بر تمام فاکتورهای رنگ برگه ( $E\Delta$ ,  $a$  و  $b$ ) معنی‌دار بود ( $P < 0.01$ ). همچنین عبارت درجه دوم توان مایکروویو برای فاکتور تغییر کلی رنگ ( $E\Delta$ ) و فاکتور قرمزی رنگ ( $a$ ) و همچنین عبارت درجه دوم ضخامت برگه برای فاکتور روشنایی رنگ ( $L$ ) و فاکتور زردی رنگ ( $b$ ) معنی‌دار بود. در شکل‌های 4 و 5، روند تأثیرگذاری توان مایکروویو و ضخامت برگه بر تغییرات رنگ برگه خرمالو بعد از خشک‌کردن قابل مشاهده است. با توجه به شکل‌های 4 و 5، چنین به نظر می‌رسد که رابطه میزان تغییر کلی رنگ ( $E\Delta$ ) و فاکتور قرمزی رنگ ( $a$ ) با توان مایکروویو و ضخامت برگه رابطه‌ای مستقیم است با توجه به شکل‌های 4 و 5، رابطه میزان روشنایی رنگ ( $L$ ) و فاکتور زردی رنگ ( $b$ ) با توان مایکروویو و ضخامت برگه رابطه‌ای معکوس است. این روندها بوسیله مثبت یا منفی بودن ضرایب مدل در جداول 4 تا 7 تایید می‌شوند. انحنای موجود در شکل سطح پاسخها (شکل‌های 4 و 5) نیز بوسیله معنی‌دار بودن عبارت‌های درجه دوم تایید می‌شوند (جدول 4 تا 7). با توجه به ضرایب جدول‌های 4 تا 7 و همچنین رویه‌های پاسخ شکل‌های 4 و 5، بیشترین تأثیر بر فاکتورهای روشنایی رنگ ( $L$ ) و زردی رنگ ( $b$ ) مربوط به فاکتور ضخامت برگه بوده است در صورتی که برای فاکتور تغییر کلی رنگ ( $E\Delta$ ) برگه خرمالو، بیشترین تأثیر مربوط به توان مایکروویو بوده است.

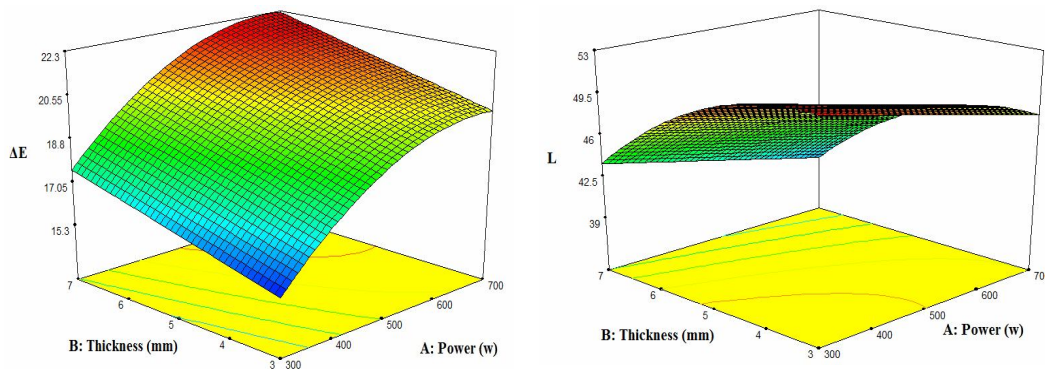


Fig 4 Response of  $\Delta E$  and  $L$  affected by microwave power and slice thickness

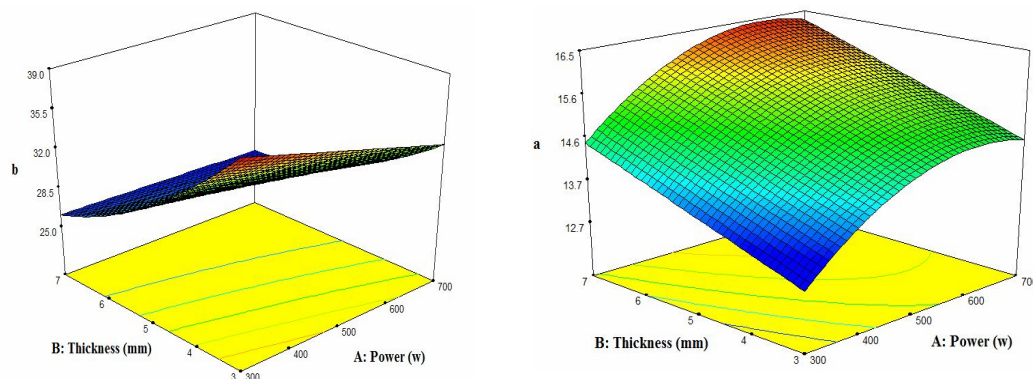


Fig 5 Response of  $a$  and  $b$  affected by microwave power and slice thickness

بهینه‌سازی برای هر یک از متغیرها و پاسخ‌های فرایند در جدول 8 با توجه به کاهش انرژی مصرفی (زمان فرآوری کمتر) و همچنین بازارپسندی محصول (رنگ روشن‌تر و چروکیدگی و تغییر شکل کمتر) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از این فرایند بهینه‌سازی در جدول 9 ارائه شده است.

### 3-4- آزمون صحت مدل

جهت بررسی کفایت مدل‌های به دست آمده برای پیش‌بینی هر یک از پاسخ‌ها در شرایط بهینه خشک‌کردن با میکروویو، آزمون صحت (آزمایش با شرایط بهینه) انجام گردید. نزدیک بودن مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها (جدول 10) مناسب بودن این مدل‌ها در پیش‌بینی هر یک از پاسخ‌ها را نشان می‌دهد.

فاکتور قرمزی رنگ (a)، بصورت یکسان از فاکتورهای توان میکروویو و ضخامت برگه تأثیر پذیرفته است. کاهش روشنایی رنگ محصول (L) طی خشک‌کردن با افزایش توان میکروویو توسط پژوهش‌گران دیگر نیز برای میوه انگور [22]، کیوی [23] و انبه [24] و کاهش فاکتور زردی رنگ (b) برای گوجه فرنگی [25] گزارش شده است. همچنین افزایش فاکتور قرمزی رنگ (a) با افزایش توان میکروویو توسط محققان دیگر برای کیوی [23] و گوجه فرنگی [25] و افزایش تغییرات کلی رنگ ( $E\Delta$ ) برای میوه انبه [24] و قارچ [26] گزارش شده است.

### 3-3 بهینه‌سازی

شرایط عملیاتی بهینه برای خشک‌کردن به روش میکروویو برگه‌های خرمالو، با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی عددی نرم افزار روش سطح پاسخ بررسی شد. شاخص‌ها و اهداف



**Table 8** Indicators and optimization objectives for persimmon drying

| Importance | Upper | Lower | Goal     | Variable              |
|------------|-------|-------|----------|-----------------------|
| 3          | 700   | 300   | In range | Microwave power       |
| 3          | 7     | 3     | In range | Slice thickness (mm)  |
| 3          | 77.21 | 71.62 | Minimize | Shrinkage (%)         |
| 3          | 7.17  | 3.33  | Minimize | Processing time (min) |
| 3          | 21.81 | 15.04 | Minimize | $\Delta E$            |
| 3          | 52.23 | 37.01 | Maximize | L                     |
| 3          | 16.52 | 13.15 | Minimize | a                     |
| 3          | 38.11 | 25.63 | Maximize | b                     |

**Table 9** Results of optimization of persimmon drying

| Value | Response              | Value | Independent variable |
|-------|-----------------------|-------|----------------------|
| 72.5  | Shrinkage (%)         |       |                      |
| 5.97  | Processing time (min) | 312   | Microwave power (W)  |
| 15.2  | $\Delta E$            |       |                      |
| 51.16 | L                     |       |                      |
| 13.15 | a                     | 3     | Slice thickness (mm) |
| 37.82 | b                     |       |                      |

**Table 10** Predicted and actual values of responses in optimal conditions of persimmon drying

| Real value (experiment) | Predicted value (model) | Response              |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 68.82±1.28              | 72.5                    | Shrinkage (%)         |
| 5.65±0.44               | 5.97                    | Processing time (min) |
| 14.66±1.84              | 15.2                    | $\Delta E$            |
| 46.16±2.12              | 51.16                   | L                     |
| 11.16±1.09              | 13.13                   | a                     |
| 35.06±2.51              | 37.82                   | b                     |

#### 4- نتیجه گیری کلی

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق مشخص شد که تمام مدل‌های رگرسیونی به دست آمده برای تمام پاسخ‌ها از نظر آماری در سطح 99 درصد معنی دار بودند. با افزایش توان مایکروویو، درصد چروکیدگی و تغییر کلی رنگ برگه افزایش و زمان تهیه برگه و روشنایی رنگ برگه کاهش یافت. با افزایش ضخامت برگه خرمالو، درصد چروکیدگی و روشنایی رنگ برگه کاهش و زمان تهیه برگه و تغییر کلی رنگ برگه افزایش یافت. فرآیند خشک کردن برگه‌های خرمالو تحت شرایط بهینه، توان 312 وات و ضخامت برگه 3 میلیمتر منجر به تولید برگه-هایی با درصد چروکیدگی 72/5 درصد، تغییر رنگ کلی 15/2 و زمان تهیه برگه خرمالو 5/97 دقیقه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش سطح پاسخ روشی کارآمد برای بهینه‌سازی

کیفیت برگه خرمالو در خشک کردن با آون مایکروویو در محدوده توان 300 تا 700 وات و ضخامت برگه 3 تا 7 میلیمتر بود.

#### 5- منابع

- [1] Hazbavi, I., Minaei, S. 2010. Preparation and investigation of quality characteristics of persimmon slice. *Journal of Food Science and Technology*. 7 (4), 65-72. (In Farsi).
- [2] Zarinnejad, M., Amiri Chaychian, R. 2016. Determination of the optimum conditions for drying pistachios in a microwave fluid bed. *Journal of Food Science and Technology*. 57 (13), 13-24. (In Farsi).
- [3] Ozkan, I., Alibas, B., Akbudak, N. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. *J. Food Eng.*, 78(2): 577-583.
- [4] Motevali, A., Younaji, S., Amiri Chayjan, R., Aghilinategh, N., Banakar, A. 2013.

- Mazafati dates during accelerated ripening . Iranian Food Science and Technology Research Journal. 5(1). 37-46.
- [17] Chauhan, A., Srivastava. A. 2009. Optimizing drying conditions for vacuumassisted microwave drying of green peas (*Pisum sativum* L.). *Drying Technology*, 27(6): 761-769.
- [18] Raghavan, G.S.V., Venkatachalapathy, K. 1999. shrinkage of strawberries during microwave drying. *Drying Tech.*, 17(10): 2309-2321.
- [19] Pawan, J., Genitha, I., Prakash, O. 2015. Effects of blanching on the dehydration characteristics of unripe banana slices dried at different temperature. *Agric. Eng. Int.*, 17(2): 168- 175.
- [20] Hafezi, N., Sheikhdavoodi, M.J., Sajadiye, M., Arkiyan, A.H. 2015. Shrinkage characteristic of potato slices based on computer vision. *Agric Eng In.*, 17(3): 287-295.
- [21] Motevali, A., Minaei, S., Ahmadi, E., Azizi, M. H., Khoshtaghaza, M. H. 2011. Determination of mathematical model, effective diffusion coefficient, activation and consumption energy for microwave drying of pomegranate arils. *Food Science and Technology*. 4(7). 43-52. (In Farsi).
- [22] Dehbooreh, R., Esmaili, M. 2010. Evaluation of Microwave and Convective Finish Drying Parameters and Drying Effects on Color of Dried Grapes. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*.5(2). 108-122. (In Farsi).
- [23] Khakbaz, M., Seifi, A. 2018. Application of intermittent microwave – convective hot air technique on quality and nutritional characteristics of dried kiwi slices. *Journal of Food Research*. 27(1), 111-126. (In Farsi).
- [24] Nazmi, I., Gokcen, I., Onur, T. 2017. Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. *Food Science and Technology*. 37(4): 604-612.
- [25] Abano, E.E., Ma, H., Qu, W. 2012. Influence of combined microwave-vacuum drying on drying kinetics and quality of dried tomato slices. *Journal of Food Quality*. 35(3): 159-168.
- [26] Omari, A., Behrooz-Khazaei, N., Sharifian, F. 2018. The evaluation of quality parameters and drying efficiency of button mushroom in hybrid microwave-hot air dryer. *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology*. 7(2). 213-224. (In Farsi).
- Drying kinetics of dill leaves in convective dryer. *Int. Agrophys.*, 27(1):39-47.
- [5] Schiffman, R.F. 1992. Microwave processing in the U.S. food industry. *Food Tech.*, 56: 50–52.
- [6] Diaz, G.R., Martinez-Monzo, J., Fito, P., Chiralt, A. 2003. Modeling of dehydrating and rehydrating of orange slices in combined microwave/air drying. *Innov. Food Sci. Emerg.*, 4: 203-209.
- [7] Feng, H. 2002. Analysis of microwave assisted fluidized-bed drying of particulate product with a simplified heat and mass transfer model. *Int. Commun. Heat Mass*, 29: 1021-1028.
- [8] Park, K.J., Bin, A., Brod, P. 2003. Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 56(1): 97-103.
- [9] Ozdemir, M., Ozen, B.F., Dock, L.L., Floros, J.D. 2008. Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. *LWT-Food Science and Technology*, 41(10): 2044-2050.
- [10] Noshad, M., Mohebbi, M., Shahidi, F., Mortazavi, S.A. 2012. Multi-objective optimization of osmotic-ultrasonic pretreatments and hot-air drying of quince using response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6): 2098-2110.
- [11] Uysal, N., Sumnu, G., Sahin, S. 2009. Optimization of microwave–infrared roasting of hazelnut. *Journal of Food Engineering*, 90: 255-61.
- [12] Kahyaoglu, T. 2008. Optimization of the pistachio nut roasting process using response surface methodology and gene expression programming. *Food Science and Technology*, 41: 26-33.
- [13] Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Food Eng.*, 48: 177-182.
- [14] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A., Nazghelichi, T. 2011. Modelling the Carrot Thin-Layer Drying in a Semi-Industrial Continuous Band Dryer . *Czech J. Food Sci.*, 29 (5): 528-538.
- [15] Naghipur Zadeh, M., Agh Khani, M.H. 2016. Study of the effect of cutting type on kinetics of drying and dry carrot quality. *Journal of Agricultural Machines*, 6 (1), 224-235. (In Farsi).
- [16] Afshari Jouybari, H., Farahnaky, A. 2010. Evaluation of Photoshop software potential for food colorimetry: color changes of

## Modeling and Optimization of Persimmon Drying Using Response Surface Methodology

Tabaei, A. <sup>1</sup>, Hazbavi, I. <sup>2\*</sup>, Shahbazi, F. <sup>3</sup>

1. Graduate Master student of biosystem engineering, faculty of agriculture, Lorestan University
2. Assistant professor of biosystem engineering, faculty of agriculture, Lorestan University
3. Associate professor of biosystem engineering, faculty of agriculture, Lorestan University

(Received: 2019/02/01 Accepted:2020/02/01)

Drying of food products using microwave can be a good replacement to hot air dryers. In this study, Response Surface Methodology (RSM) was used for optimization of the conditions for microwave drying of persimmon slices. The effects of microwave power (300, 500 and 700 W) and slice thickness (3, 5 and 7mm) as independent variables on shrinkage percentage, processing time and total color change of persimmon as dependent variables (responses) were evaluated. All process variables were statistically significant as quadratic regression models for all responses. As microwave power increased, the shrinkage percentage and total color change of persimmon slice increased but processing time decreased. As the thickness of persimmon slice increased, the processing time and total color change of persimmon slice increased but shrinkage percentage decreased. The optimum conditions obtained for minimum shrinkage percentage, processing time and total color change were 3 mm as slice thickness and the microwave power of 312 W. In optimized condition, the shrinkage percentage, processing time and total color change of dried persimmon slices were 72.5 %, 5.97 min and 15.2, respectively.

**Keywords:** Persimmon, Microwave, Quality, Response Surface Methodology

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: [hazbavi@lu.ac.ir](mailto:hazbavi@lu.ac.ir)