



## اثر روش ترکیبی ریزموج- هوای گرم تحت پیش تیمار ریزموج بر سینتیک خشک کردن میوه مورد

صفورا کریمی، سلیمان محمدی، نرگس لایقی نیا، حبیب اله عباسی<sup>۱\*</sup>

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳

### چکیده

**سابقه و هدف:** در طب سنتی، از جوشانده‌ی برگ و میوه‌ی گیاه مورد برای رفع مشکلاتی از قبیل بیماری‌های معده استفاده می‌شود. میوه‌ها و سبزیجات به دلیل داشتن میزان رطوبت بالا، به فساد میکروبی به شدت حساس هستند. به همین دلیل، روش خشک کردن به منظور جلوگیری از فساد میکروبی آن‌ها گسترش یافته است. هوای گرم رایج‌ترین روش خشک کردن می‌باشد، اما به منظور رفع معایب این فرایند از قبیل سرعت خشک کردن پایین و مصرف انرژی بالا تلفیق آن با روش‌هایی از قبیل ریزموج توسعه یافته است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر روش ترکیبی ریزموج- هوای گرم بر سینتیک خشک کردن میوه مورد و یافتن بهترین شرایط آزمایشی خشک کردن از نظر زمان، سرعت و انتقال جرم انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** در پژوهش حاضر فرآیند خشک کردن میوه مورد به روش ترکیبی ریزموج- هوای گرم تحت پیش تیمار ریزموج مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات در توان‌های ترکیبی ۱۸۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ وات با سه دمای هوای گرم ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد تحت پیش تیمار ریزموج در سه توان ۳۰۰، ۴۵۰ و ۶۰۰ وات و در یک دستگاه ریزموج خانگی انجام شد. به منظور بررسی سینتیک خشک کردن میوه مورد، داده‌های آزمایشی بر روی ۱۰ مدل ریاضی برازش شدند. همچنین، کیفیت برازش معادلات با استفاده از پارامترهای ضریب برازش ( $R^2$ ) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد بررسی قرار گرفت. اثر روش ترکیبی بر ضریب انتقال جرم و انرژی فعال‌سازی نمونه‌ها نیز مطالعه شد.

**یافته‌ها:** بررسی سینتیکی فرآیند نشان داد که از بین ۱۰ مدل سینتیکی متداول، مدل دو جمله‌ای نمایی به‌خوبی توانسته روش ترکیبی حاضر را در محدوده‌ی توان مذکور مدل کند. نتایج نشان داد که در یک دمای مشخص با افزایش توان ترکیبی ریزموج، ثابت سرعت خشک کردن (k) مربوط به معادله دوپارامتری نمایی افزایش یافته است. براساس نتایج، در یک دمای مشخص، با افزایش توان ترکیبی ریزموج، زمان خشک کردن کاهش و سرعت خشک شدن افزایش یافته است. بیشترین زمان خشک کردن در توان ترکیبی ۱۸۰ وات و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و برابر ۴۶ دقیقه بود. کمترین زمان خشک کردن (۱۹ دقیقه) با کاهش ۵۸/۷ درصدی مربوط به توان ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۱۹ دقیقه به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش توان ترکیبی ریزموج در یک دمای مشخص، ضریب نفوذ موثر رطوبت میوه مورد افزایش و انرژی فعال‌سازی کاهش یافته است. بیشترین ضریب نفوذ موثر رطوبت و کمترین انرژی فعال‌سازی، برای شرایط ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر  $11/59 \times 10^{-8}$  مترمربع بر ثانیه و  $13/14$  کیلوژول بر مول به دست آمد.

**نتیجه‌گیری:** دما و توان ترکیبی ریزموج دو عامل اثرگذار اصلی بر خشک کردن میوه مورد هستند. افزایش توان ترکیبی ریزموج در یک دمای مشخص و همچنین افزایش دمای هوای گرم در یک توان ترکیبی مشخص، باعث کاهش چشمگیر زمان و افزایش قابل توجه سرعت خشک کردن شد. خشک کردن میوه مورد کاملاً در مرحله نزولی رخ داده است. توان ریز موج بر ثابت سرعت

\* مسئول مکاتبه: habbasi@jsu.ac.ir

خشک کردن نیز تأثیرگذار بود؛ به طوری که با افزایش توان ترکیبی افزایش یافت. بعلاوه با افزایش توان ترکیبی ریزموج انتقال جرم و در نتیجه ضریب نفوذ موثر رطوبت افزایش یافت.

**واژه‌های کلیدی:** ریزموج- هوای گرم، انرژی فعال‌سازی، سینتیک خشک‌کردن، میوه مورد، نفوذپذیری رطوبت.

### مقدمه

مورد با نام علمی *Myrtus communis* L. گونه‌ای از گیاهان مدیترانه‌ای است. این گیاه درختچه‌ای همیشه سبز از تیره موردیان بوده و در چندین منطقه از جهان از جمله ایران رشد می‌کند. برگ، میوه و گل‌های این درختچه دارای ویژگی‌های دارویی بوده و در طب سنتی از جوشانده برگ یا میوه این گیاه برای رفع مشکلاتی از قبیل بیماری‌های معده، سرفه، یبوست و همچنین به عنوان اشتهاآور، ضد میکروب، ضد عفونی‌کننده و ضد خونریزی زخم‌ها استفاده می‌شود (۴). میوه این گیاه فقط در اواسط پاییز رشد می‌کند. بنابراین، نگهداری میوه مورد برای مدت طولانی با استفاده از خشک‌کردن، روشی کارآمد برای استفاده از آن در سایر فصل‌ها می‌باشد.

برای داشتن یک وعده غذایی سالم مصرف میوه‌ها و سبزیجات ضروری است، اما بالا بودن مقدار رطوبت این محصولات، سبب حساسیت بالای آن‌ها نسبت به فساد میکروبی می‌شود (۲۰). از طرفی، امروزه نگهداری طولانی مدت مواد غذایی به‌منظور استفاده طولانی مدت از آنها ضروری می‌باشد. بنابراین برای حفظ و نگهداری این محصولات، استفاده از روش‌های مختلف نگهداری از جمله خشک‌کردن امری ضروری بوده و باید پس از برداشت محصولات انجام شود.

یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش‌های حفظ و نگهداری مواد غذایی، خشک‌کردن است که باعث کاهش میزان آب محصولات، محدود کردن فعالیت میکروبی و افزایش ماندگاری آن‌ها می‌شود (۱۷). لازم به ذکر است که کاهش میزان آب محصولات توسط

خشک‌کردن، هزینه حمل و نقل محصولات را کاهش داده و نگهداری و انبارداری آنها را آسان‌تر می‌کند (۱۲). از این رو، در این پژوهش خشک کردن «میوه‌ی مورد» بررسی شده است.

متداول‌ترین روش‌های خشک‌کردن شامل روش خورشیدی، هوای گرم، انجمادی، اسمزی، خلأ، بستر سیال، بستر فورانی و خشک کردن با استفاده از ریزموج و ترکیبی از آن‌ها می‌باشد (۲۷). خشک کردن مواد غذایی معمولاً با خشک کردن به روش جابجایی هوای گرم انجام می‌شود. این روش رایج دارای معایبی از جمله تغییر برخی از ویژگی‌های فیزیکی مانند بافت، رنگ و شکل محصول است. درجه حرارت بالا و مدت زمان طولانی در این روش خشک‌کردن، عامل از بین رفتن کیفیت محصول و در نتیجه افزایش هزینه‌های عملیاتی است (۲۷). به‌علاوه راندمان پایین انرژی مهم‌ترین نقطه ضعف این روش می‌باشد (۲۱). از این رو توسعه برخی از روش‌های جدید خشک‌کردن با مصرف انرژی پایین‌تر ضروری است.

امروزه استفاده از ریزموج زراعی به‌دلیل کاهش زمان و مصرف انرژی و نیز حفظ کیفیت محصول جهت خشک‌کردن محصولات مورد توجه قرار گرفته است (۱). انرژی ریزموج، مواد را دوقطبی کرده و با تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به انرژی جنبشی، باعث حرکت الکترون‌های ماده می‌شود. سپس در اثر برخورد الکترون‌ها با یکدیگر، گرما ایجاد شده و در نهایت، رطوبت از مواد خارج می‌شود (۱۲). خشک کردن به روش ریزموج در مقایسه با هوای گرم دارای توزیع دمایی یکنواخت‌تر و بازده انرژی بالاتری است

خشک شدن را افزایش و زمان خشک شدن را کاهش داده است. همچنین، میزان چروکیدگی ناشی از خشک کردن کیوی به روش ترکیبی کمتر از دو روش دیگر بوده است (۲۲).

به طور کلی، برای طراحی و انتخاب روش مناسب خشک کردن، تعیین زمان مورد نیاز خشک کردن و تأثیر شرایط مختلف بر روی فرآیند ضروری است. بنابراین، ارزیابی سینتیک خشک کردن محصولات از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، تاکنون هیچ مطالعه تجربی بر روی خشک کردن میوه مورد به روش ترکیبی ریز موج-هوای گرم انجام نشده است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی سینتیک خشک کردن میوه مورد به روش ترکیبی ریزموج- هوای گرم انجام شد. همچنین تأثیر دما و توان ریزموج بر (۱) سرعت خشک کردن (۲) ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و (۳) انرژی فعال سازی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

**آماده‌سازی نمونه:** میوه‌های مورد<sup>۱</sup> (*Myrtus communis* L.) از یک بازار محلی در شهر لردگان ایران خریداری شدند. برای تمام آزمایش‌ها، ابتدا میوه‌های مورد با هدف از بین بردن آلودگی شسته شدند و تا زمان شروع آزمایش‌ها در یک یخچال در دمای  $4 \pm 0.1$  درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برای تعیین میزان رطوبت اولیه، ۲۰ گرم از میوه‌های مورد در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت در یک آون آزمایشگاهی (سری ACE400L، شرکت آترا<sup>۲</sup>، ایران) قرار داده شد و پس از اتمام زمان مورد نظر، نمونه‌های خشک شده با استفاده از ترازوی دیجیتال با حساسیت ۰/۰۰۱ گرم

که منجر به افزایش کارایی حذف رطوبت می‌شود (۲۱). دیگر مزایای روش ریزموج در مقایسه با استفاده از هوای گرم سرعت خشک شدن بالاتر (۱۳)، صرفه‌جویی در مصرف انرژی (۳۰) و کاهش فضای لازم برای خشک کردن (۲۱) می‌باشد. با این حال، مشخص شده است که اگر روش خشک کردن ریزموج به طور مطلوبی اعمال نشود، محصول به دست آمده کیفیت پایینی خواهد داشت (۲۱). بنابراین، ترکیب روش خشک کردن هوای گرم و خشک کردن با ریزموج به عنوان یکی از روش‌های مؤثر جهت حل مشکل فوق ارائه شده است.

روش ترکیبی امواج ریزموج - هوای گرم در مقایسه با روش هوای گرم از طریق کاهش زمان خشک شدن باعث حفظ کیفیت محصول نهایی می‌شود (۱۲). فرآیند خشک کردن معمولاً در دو مرحله ثابت و نزولی رخ می‌دهد. با توجه به مرحله خشک کردن، ریزموج را می‌توان به یکی از سه روش زیر اعمال کرد: الف) اعمال ریزموج در ابتدای فرآیند خشک کردن، ب) اعمال ریزموج در شروع مرحله نزولی خشک کردن و ج) اعمال ریزموج در طی مرحله نزولی خشک کردن در ترکیب با هوای گرم (۳). روش ترکیبی ریزموج- هوای گرم تاکنون برای خشک کردن مواد غذایی مختلف از جمله برش‌های لیمو (۱۶)، موز (۲۱)، سیر (۲۹) و کیوی (۲۲) مورد استفاده قرار گرفته است.

کسبی و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی خشک کردن برش‌های لیمو به روش‌های ریزموج، هوای گرم و ترکیبی ریزموج- هوای گرم نشان دادند کیفیت محصول در روش ترکیبی، از لحاظ پارامترهای رنگی بهتر از دو روش دیگر بوده و همچنین سرعت خشک شدن در روش ترکیبی بالاتر بوده است (۱۶). در پژوهشی مشابه ماسکان (۲۰۰۱) گزارش داد خشک کردن به روش ریزموج و ترکیبی سرعت

1. Murd  
2. Atra

ریزموج و وزش هوای گرم با رطوبت نسبی ۴۲ درصد بود. ابعاد محفظه داخلی دستگاه مذکور  $0.397 \times 0.219 \times 0.4$  متر و قطر صفحه شیشه‌ای دوار  $0.38$  متر بود. توان ریزموج در محدوده ۱۰۰ تا ۹۰۰ وات و دمای هوای گرم نیز در محدوده ۴۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قابل تغییر بود (شکل ۱).

(سری S-ES، شرکت مهندسی بل، ایتالیا) وزن شدند. در نهایت میزان رطوبت نسبی نمونه‌های تازه  $68 \pm 0.5$  درصد تعیین شد.

تجهیزات خشک‌کردن و روش آزمایش: به‌منظور انجام آزمایشات ترکیبی ریزموج-هوای گرم از یک دستگاه ریزموج خانگی (سامسونگ مدل سامی ۱۴، ۲۴۵۰ مگاهرتز) استفاده شد که قادر به ایجاد همزمان



شکل ۱- دستگاه خشک‌کن مورد استفاده در پژوهش حاضر

Figure 1. Drying setup used in this study.

توزین شدند. پس از توزین، نمونه‌ها دوباره در دستگاه قرار گرفتند و فرآیند خشک‌شدن ادامه یافت. این روند، تا نزدیک شدن میزان رطوبت نسبی نمونه‌ها به حدود ۸ درصد ادامه یافت.

**طرح آماری و آنالیز داده‌ها:** این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی و آنالیز واریانس یک‌طرفه انجام شد و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. آنالیز آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۶ انجام شد.

**مدل‌سازی ریاضی:** برای بررسی سینتیک خشک‌کردن میوه‌های مورد و یافتن بهترین مدل برای توصیف فرآیند خشک‌کردن آن، داده‌ها بر روی ۱۰ مدل جدول (۱) برازش شدند. نسبت رطوبت در هر زمان در طول فرآیند با استفاده از رابطه ۱ بدست آمد (۱۸) که در آن  $M_0$ ،  $M_e$ ،  $M_t$ ،  $MR$  به ترتیب رطوبت نسبی (بدون بعد)، میزان رطوبت در زمان  $t$ ، رطوبت

به‌منظور انجام آزمایشات، ۴ نمونه از میوه‌های مورد دارای اندازه تقریباً یکسان وزن شده و روی صفحه دوار دستگاه ریزموج قرار گرفتند. میانگین وزنه نمونه‌ها در هر آزمایش  $1/5$  گرم بود. ابتدا نمونه‌ها در معرض پیش‌تیمار ریزموج (با نام شوک اولیه) با سه توان ۳۰۰، ۴۵۰ و ۶۰۰ وات قرار گرفتند و زمان پیش‌تیمار (۴ دقیقه) به گونه‌ای در نظر گرفته شد که هیچ سوختگی در نمونه مشاهده نشود. سپس، نمونه‌ها در معرض روش ترکیبی ریزموج-هوای گرم با سه توان ۱۸۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ وات و سه دمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. تغییر وزن نمونه‌ها از طریق ترازوی دیجیتال در حالت پیش‌تیمار ریزموج هر ۳۰ ثانیه یکبار و در حالت ترکیبی هر ۳ دقیقه یکبار، ثبت شد. به این صورت که پس از گذشت زمان ذکر شده، فرآیند از طریق کلید توقف تعبیه شده در دستگاه متوقف و سپس نمونه‌ها به سرعت از دستگاه خارج و توسط ترازوی دیجیتال

از آنجا که در معادله فوق،  $M_e \ll M_0$  و  $M_e \ll M_t$  مقدار  $M_e$  ناچیز و قابل اغماض است (۵)، رابطه ۱ را می‌توان به صورت رابطه ۲ ساده کرد (۷).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad \text{رابطه ۲.}$$

تعادلی و رطوبت اولیه بر مبنای ماده خشک (گرم آب بر گرم ماده خشک) است.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{رابطه ۱.}$$

جدول ۱- مدل‌های ریاضی مورد استفاده جهت پیش‌بینی سینتیک خشک‌کردن.

Table 1. Mathematical models used to predict drying kinetic.

| مرجع<br>Reference | معادله مدل<br>Model equation                   | نام مدل<br>Model name                                    | شماره مدل<br>Model No. |
|-------------------|--|--|------------------------|
| (19)              | $MR = \exp(-k t)$                              | نیوتن (لوئیس) (Newton (Lewis))                           | 1                      |
| (26)              | $MR = \exp(-k t^n)$                            | پیچ (Page)   | 2                      |
| (10)              | $MR = a \exp(-k t)$                            | هندرسون و پابیس (Henderson and Pabis)                    | 3                      |
| (33)              | $MR = a \exp(-k t) + c$                        | لگاریتمی (Logarithmic)                                   | 4                      |
| (23)              | $MR = a \exp(-k t^n) + b t$                    | میدیلی و همکاران (Midilli et al.)                        | 5                      |
| (9)               | $MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$         | دو جمله‌ای (Two-term)                                    | 6                      |
| (28)              | $MR = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k a t)$       | دوجمله‌ای نمایی (Two term exponential)                   | 7                      |
| (32)              | $MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$         | ورما و همکاران (Verma et al.)                            | 8                      |
| (14)              | $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ | اصلاح‌شده هندرسون و پابیس (Modified Henderson and Pabis) | 9                      |
| (2)               | $MR = \exp((-kt)^n)$                           | اصلاح شده پیچ (Modified Page)                            | 10                     |

ضریب نفوذ موثر رطوبت: قانون نفوذ ناپایای فیک یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای توصیف ویژگی‌های محصولات غذایی در مرحله خشک کردن نزولی است. با حل تحلیلی، این معادله در مختصات کروی (مختصات میوه‌های مورد) به صورت رابطه ۴ ارائه شده است (۶):

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{r^2}\right) \quad \text{رابطه ۴.}$$

در معادله فوق  $D_{eff}$  ضریب نفوذ موثر رطوبت (متر مربع بر ثانیه)،  $r$  شعاع نمونه (مقدار آن در این پژوهش برابر  $10^{-3} \times 2/8$  متر می‌باشد) و  $t$  زمان (بر حسب ثانیه) می‌باشد. در معادله بالا کل جملات به جز اولین جمله صفر هستند، از این رو این معادله ساده شده و فرم لگاریتمی آن به صورت رابطه ۵ ارائه شده است:

میزان رطوبت آزاد شده از سطح ماده خشک‌شده در واحد زمان، سرعت خشک‌کردن نمونه (رابطه ۳) را بیان می‌کند و نشان دهنده‌ی میزان تبخیر رطوبت از محصول است (۲۴). بر اساس رابطه ۳  $M_{t+\Delta t}$  و  $\Delta t$  به ترتیب مقدار رطوبت در زمان  $t+\Delta t$  و فاصله زمانی خشک کردن (دقیقه) است.

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad \text{رابطه ۳.}$$

از نرم افزار سیگما پلات<sup>۱</sup> (نسخه ۱۲.۳) به منظور برازش داده‌ها بر روی مدل‌های مورد نظر استفاده شد. ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز برای یافتن صحت مدل‌ها اندازه‌گیری گردید. مقدار کمتر مجذور میانگین مربعات خطا و مقدار بالاتر ضریب همبستگی، بهترین مدل را نشان می‌دهند.

### 1. Sigma plot

نتیجه زمان خشک کردن کاهش می‌یابد (۱۶). به عبارت دیگر توان بالاتر ریزموج باعث انتقال بیشتر جرم و افزایش بیشتر دما در میوه‌های مورد شده، از این رو اختلاف فشار بخار بزرگی بین مرکز و سطح نمونه ایجاد می‌شود (۱۱). نتایج مشابهی برای چندین ماده‌ی غذایی نیز با استفاده از روش خشک کردن ترکیبی ریزموج-هوای گرم مانند سیب (۸) و انگور (۳۱) مشاهده شد. با توجه به شکل ۲، قسمت اول منحنی‌ها مربوط به شوک اولیه توسط ریزموج برای سه آزمایش یکسان بود. شوک اولیه باعث گرم شدن آب داخلی نمونه و کاهش زمان خشک شدن می‌شود. علاوه بر این، شیب این بخش به دلیل رطوبت زیاد و گرمایش حجمی که پیش از این به آن اشاره شد، نسبت به سایر قسمت‌ها بیشتر بود. در بخش دوم، شیب نزولی ابتدا زیاد بود و سپس به تدریج کاهش یافت. دلیل آن، حذف تدریجی رطوبت سطح نمونه و سپس حذف رطوبت از داخل نمونه‌ها بود.

کل زمان مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت نهایی مشخص ۰/۰۸ تحت شوک اولیه ۳۰۰ وات در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، با افزایش توان ریزموج در یک دمای مشخص، زمان خشک شدن به طور چشمگیری کاهش یافت. همچنین، با افزایش دما در یک توان ترکیبی مشخص، زمان مورد نیاز نیز کاهش یافت. بیشترین زمان خشک کردن در توان ترکیبی ۱۸۰ وات و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و برابر ۴۶ دقیقه به دست آمد. با استفاده از توان ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد زمان خشک شدن با کاهش ۵۸/۷ درصدی به ۱۹ دقیقه رسید. آنالیز آماری نتایج نشان داد که در توان ۱۸۰ وات تفاوت معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) در دماهای مورد بررسی وجود داشت؛ به طوری که با افزایش دما از ۶۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد زمان خشک شدن کاهش یافت. در توان ۳۰۰ وات، تفاوت

$$\text{رابطه ۵.} \quad \ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{r^2}$$

با رسم خط  $\ln(MR)$  بر حسب  $t$  و با استفاده از شیب خط ترسیم شده می‌توان مقادیر  $D_{\text{eff}}$  را بدست آورد.

**انرژی فعال سازی:** وابستگی ضریب نفوذ موثر رطوبت به دما توسط معادله آرنیوس بیان می‌شود که بر اساس آن انرژی فعال سازی ( $E_a$ ) در طی مرحله نزولی خشک کردن به صورت رابطه ۶ تعیین می‌گردد (۱۱) که در آن،  $D_0$  ثابت پیش‌نمایی معادله آرنیوس (مترمربع بر ثانیه)،  $E_a$  انرژی فعال سازی (کیلوژول بر مول)،  $R$  ثابت جهانی گازها (کیلوژول بر مول کلوین) و  $T$  دمای هوا (کلوین) است.

$$\text{رابطه ۶.} \quad D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

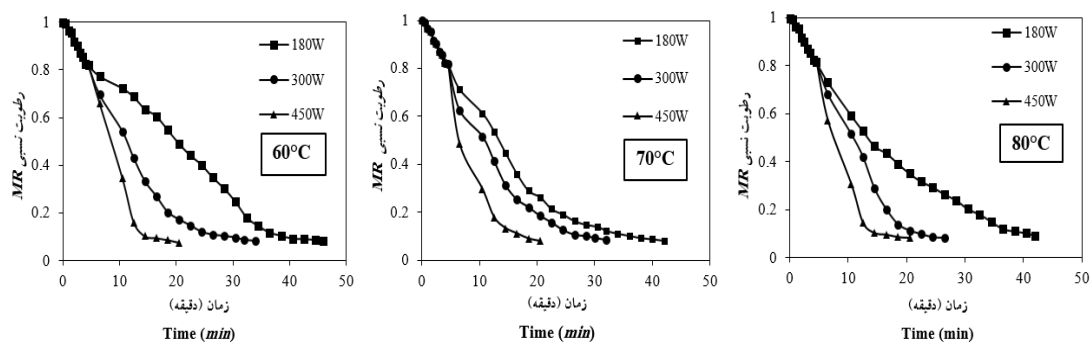
### نتایج و بحث

**منحنی خشک کردن:** تغییرات رطوبت میوه‌های مورد در مقابل زمان برای تمام آزمایشات با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شدند. منحنی تغییر رطوبت با زمان تا رسیدن به رطوبت نسبی مشخص ۸ درصد، برای حالت شوک اولیه ۳۰۰ وات در دماهای مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. در فرآیند خشک کردن، پدیده‌های انتقال حرارت و انتقال جرم به طور همزمان رخ می‌دهد. سطح ذرات نمونه‌ها قبل از خشک شدن با لایه نازکی از آب غیریونندی پوشیده شده است و پس از برقراری تماس بین سطح مواد و ترکیب ریزموج و هوای گرم، دمای مورد نیاز برای تبخیر آب تأمین شده و باعث خشک شدن نمونه می‌شود.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در یک دمای مشخص، با افزایش توان ریزموج، میزان رطوبت نمونه میوه مورد و زمان خشک شدن کاهش یافت (۳). از آنجا که ریزموج قادر به القای گرمای حجمی به درون نمونه‌ها هستند، این امر منجر به تسریع خروج رطوبت نمونه‌ها شده و نرخ خشک کردن و در

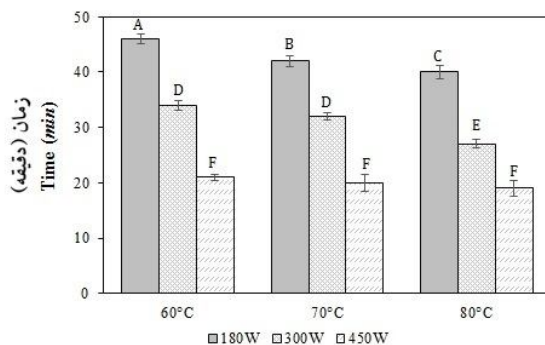
مربوط به ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی (داده‌ها نشان داده نشده است) نیز مشاهده شد. بنابراین، با وجودی که کمترین زمان خشک شدن در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و توان ۴۵۰ وات به دست آمده است ولی تفاوت معنی‌داری با سایر دماها وجود نداشت. لذا، در عمل پیشنهاد می‌شود به دلیل کاهش مصرف انرژی، فرایند خشک کردن را در توان ۴۵۰ وات و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام داد.

معنی‌داری بین دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد وجود نداشت ولی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، تفاوت معنی‌دار بود. با در نظر گرفتن اینکه در توان ۴۵۰ وات، هیچ‌گونه اثر معنی‌داری بین دماهای مختلف دیده نشد، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در مورد خشک کردن میوه مورد با روش ریزموج، توان ۳۰۰ وات و به‌ویژه ۴۵۰ وات موثرتر از دما عمل کرده است. چنین روندی با آنالیز آماری داده‌های



شکل ۲- منحنی‌های آزمایشی خشک‌شدن میوه مورد به روش ترکیبی ریزموج-هوای گرم تحت شوک اولیه ۳۰۰ وات

Figure 2. Experimental drying curve of Myrtus fruit by combined microwave-hot air drying method under primary shock of 300W.



شکل ۳- زمان خشک‌کردن میوه مورد تحت شوک اولیه ۳۰۰ وات.

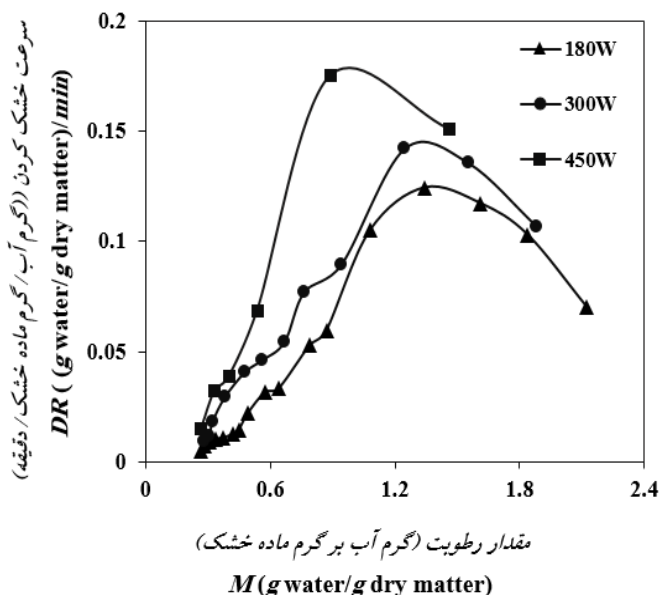
Figure 3. Drying time of Myrtus fruit under primary shock of 300W.

افزایش سرعت خشک‌شدن می‌شود. سپس رطوبت نمونه و در نتیجه جذب انرژی نیز کاهش یافته و باعث کاهش سرعت خشک‌کردن می‌شود. برای کلیه آزمایشات، در یک دمای مشخص با افزایش توان امواج ریزموج، سرعت خشک‌شدن افزایش یافت؛ زیرا جذب انرژی در توان‌های بالاتر امواج ریزموج

سرعت خشک‌کردن: سرعت خشک کردن در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان نمونه در شکل ۴ قابل مشاهده است. مطابق این شکل، در ابتدای فرآیند خشک‌شدن، سرعت خشک‌شدن افزایش یافت که به دلیل رطوبت زیاد نمونه‌ها و جذب انرژی بیشتر بوده است. این امر منجر به افزایش دمای نمونه و در نتیجه

است و در هیچ مرحله‌ای با نرخ ثابت خشک کردن روی نداده است. این رفتار نشان می‌دهد مکانیسم غالب برای حذف آب از میوه مورد مکانیسم نفوذ بوده است. نتایج مشابهی برای میوه‌های زغال اخته (۲۵)، زردآلو (۱۱) و موز (۲۱) به دست آمده است.

بیشتر بوده و در نتیجه نفوذپذیری رطوبت بیشتر شده و رطوبت نمونه سریعتر کاهش یافته است. بیشینه سرعت خشک شدن در توان ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بدست آمد. شکل (۴) نشانگر آن است که فرآیند خشک کردن در مرحله نزولی رخ داده



شکل ۴- سرعت خشک کردن میوه مورد در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تحت شوک اولیه ۳۰۰ وات.

Figure 4. Drying rate of Myrtus fruit at 80°C under primary shock of 300W.

ترکیبی ریزموج-هوای گرم به گونه‌ای انتخاب گردید که برای تمام آزمایش‌ها به‌طور همزمان دارای بیشترین مقدار ضریب همبستگی و کمترین میزان مجذور میانگین مربعات خطا بود. در بین تمام مدل‌ها، مدل دوجمله‌ای نمایی (رابطه ۷) به عنوان بهترین مدل برای توصیف سینتیک خشک کردن مورد تعیین گردید: رابطه ۷.

$$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$$

این مدل با کمترین مقدار  $RMSE=0.0174$  و بیشترین مقدار  $R^2=0.9982$  داده‌های خشک کردن ترکیبی میوه مورد را توصیف کرده است. همانطور که در جدول ۲ مشخص شده است، در یک دمای مشخص با افزایش توان ترکیبی ریزموج ثابت سرعت خشک کردن (k) در معادله دوپارامتری نمایی توصیف‌کننده رفتار

سینتیک خشک کردن: در این مطالعه ۱۰ مدل سینتیکی لایه نازک انتخاب و داده‌های بدست آمده بر روی این مدل‌ها برازش شد تا مناسب ترین مدل برای توصیف رفتار خشک کردن میوه مورد بر اساس شرایط آزمایش انتخاب گردد. نتایج حاصل از برازش داده‌های بدست آمده تحت شوک اولیه ۳۰۰ وات و دمای هوای ورودی ۸۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج مشابهی برای سایر آزمایشات به‌دست آمد.

مدل‌ها دارای ضریب همبستگی بالا ( $R^2 > 0.96$ ) و مجذور میانگین مربعات خطای پایین ( $RMSE < 0.1$ ) بودند که کیفیت برازش تمامی داده‌ها را نشان می‌دهد. بهترین مدل برای توصیف فرآیند خشک کردن میوه مورد تحت فرآیند خشک کردن

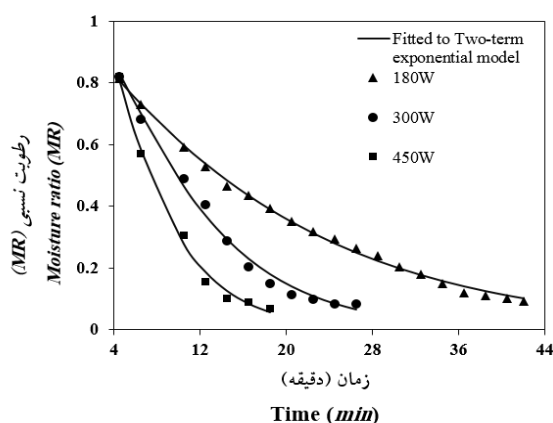


خشک کردن میوه مورد افزایش یافته است. این یافته به افزایش سرعت خشک کردن مرتبط است. افزایش جذب انرژی در توان‌های بالاتر و در نتیجه

جدول ۲- پارامترهای مربوط به مدل‌های لایه نازک برای خشک کردن میوه مورد در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تحت شوک اولیه ۳۰۰ وات.

Table 2. Parameters related to the models of thin layer drying for Myrtus fruit at 80°C under primary shock of 300W.

| شماره مدل<br>Model NO. | ۱۸۰ وات، ۸۰ درجه سانتی‌گراد<br>180W, 80°C   | ۳۰۰ وات، ۸۰ درجه سانتی‌گراد<br>300W, 80°C   | ۴۵۰ وات، ۸۰ درجه سانتی‌گراد<br>450W, 80°C  |
|------------------------|---|---|--|
| 1                      | k=0.0517<br>R <sup>2</sup> =0.9896 RMSE=0.0885  | k= 0.0815<br>R <sup>2</sup> =0.9748 RMSE=0.0796   | k= 0.1122<br>R <sup>2</sup> =0.9805 RMSE=0.0728  |
| 2                      | n= 1.0724 k= 0.0414<br>R <sup>2</sup> =0.989 RMSE=0.0991  | n= 1.5485 k= 0.0191<br>R <sup>2</sup> =0.9797 RMSE=0.0783   | n= 1.7804 k= 0.0182<br>R <sup>2</sup> =0.971 RMSE=0.0671   |
| 3                      | a= 1.0454 k= 0.0541<br>R <sup>2</sup> =0.9901 RMSE=0.0888   | a= 1.3838 k= 0.1081<br>R <sup>2</sup> =0.972 RMSE=0.0681  | a= 1.8673 k= 0.1826<br>R <sup>2</sup> =0.9738 RMSE=0.0743  |
| 4                      | a= 1.068 c= -0.0598<br>k=0.0541<br>R <sup>2</sup> =0.9942 RMSE=0.0809                                   | k=0.0835 a=1.3699 c=-0.1062<br>R <sup>2</sup> =0.9808 RMSE=0.0699                                       | k=0.204 a=1.9968 c= 0.0305<br>R <sup>2</sup> =0.9872 RMSE=0.0591   |
| 5                      | a=0.006 b=-0.0087<br>n=-0.067 k= -5.5078<br>R <sup>2</sup> =0.9859 RMSE=0.0710                          | a=0.0015 b=-0.014<br>n=-0.0788 k= -7.22<br>R <sup>2</sup> =0.9904 RMSE=0.0528                           | a=0.0001 b=-0.0063<br>n=-0.133 k=-10.7925<br>R <sup>2</sup> =0.9849 RMSE=0.0485                          |
| 6                      | a=0.5227 b=0.5228<br>k <sub>1</sub> =0.0541 k <sub>2</sub> =0.541<br>R <sup>2</sup> =0.9903 RMSE=0.0716 | a=0.6919 b=0.6919<br>k <sub>1</sub> =0.1081 k <sub>2</sub> =0.1081<br>R <sup>2</sup> =0.971 RMSE=0.0683 | a=1.9389 b=2.194<br>k <sub>1</sub> =0.1895 k <sub>2</sub> =-0.4859<br>R <sup>2</sup> =0.9797 RMSE=0.0606 |
| 7                      | a=1.5165 k= 0.0622<br>R <sup>2</sup> =0.9982 RMSE=0.0174  | a=2.0649 k=0.1295<br>R <sup>2</sup> =0.9981 RMSE=0.0214   | a=2.412 k=0.2031<br>R <sup>2</sup> =0.9968 RMSE=0.0251   |
| 8                      | g= 1394.62 a=1.0541<br>k=0.0541<br>R <sup>2</sup> =0.9909 RMSE=0.0486                                   | a=1.383 g=2757.75 k=0.1081<br>R <sup>2</sup> =0.9762 RMSE=0.0662  | k=0.1826 a=1.8673 g=5147.8<br>R <sup>2</sup> =0.9791 RMSE=0.0599   |
| 9                      | a=0.3485 b=0.3485<br>c=0.3485 k=0.0541<br>g=0.0541 h=0.0541<br>R <sup>2</sup> =0.9939 RMSE=0.0761       | a=0.4613 b=0.4613<br>c= 0.4613 k=0.1081<br>g=0.1081 h=0.1081<br>R <sup>2</sup> =0.9797 RMSE=0.0569      | a=0.7979 b=2.197<br>c=1.141 k= 0.1895<br>g= 0.4859 h=0.1895<br>R <sup>2</sup> =0.9924 RMSE=0.0829        |
| 10                     | k=0.0517 n=1<br>R <sup>2</sup> =0.9803 RMSE=0.0749  | k=0.0815 n=1<br>R <sup>2</sup> =0.9716 RMSE=0.0843  | k=0.1122 n=1<br>R <sup>2</sup> =0.9778 RMSE=0.0838   |

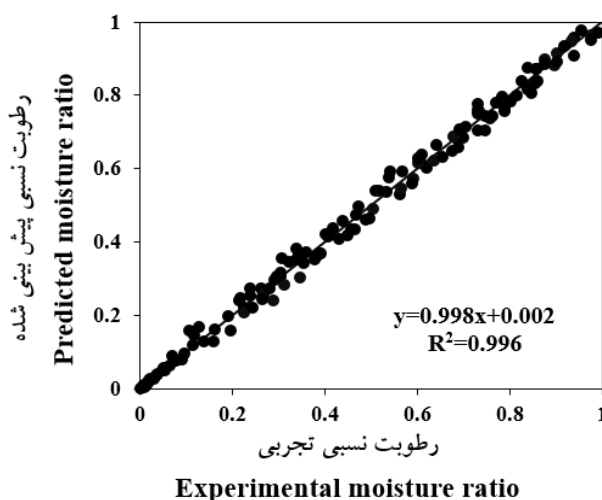


شکل ۵- مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده داده‌های رطوبت نسبی توسط مدل دوجمله‌ای نمای در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تحت شوک اولیه ۳۰۰ وات.

Figure 5. Experimental and predicted values of moisture ratio using two-term exponential model at 80°C under primary shock of 300W.

شکل ۶ مقایسه داده‌های رطوبت نسبی برآزش شده با استفاده از مدل دو جمله‌ای نمایی با مقادیر تجربی به دست آمده را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این مقایسه نشان داد که پیش‌بینی‌های مدل دو جمله‌ای نمایی و داده‌های خشک‌کردن تجربی به‌طور کلی در اطراف یک خط مستقیم قرار گرفته است. این امر بیانگر آن است که مدل دو جمله‌ای نمایی در توصیف رفتار خشک‌کردن میوه مورد تحت روش ترکیبی ریزموج-هوای گرم در محدوده توان ۱۸۰ تا ۴۵۰ وات و محدوده دمای ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌خوبی عمل کرده است.

بر اساس نتایج، مدل دو جمله‌ای نمایی به‌عنوان بهترین مدل برای برآزش داده‌های تجربی میوه مورد تحت خشک‌کردن ترکیبی معرفی شد. مقایسه منحنی‌های خشک‌کردن تجربی و پیش‌بینی‌شده در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل، داده‌های MR از اولین زمان روش ترکیبی (یعنی ۴ دقیقه) برآزش شده‌اند. این معادله به‌طور موفقیت‌آمیزی برای توصیف سینتیک خشک‌کردن محصولات غذایی دیگر از قبیل ذرت (۲۸) و سیب (۱۵) نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

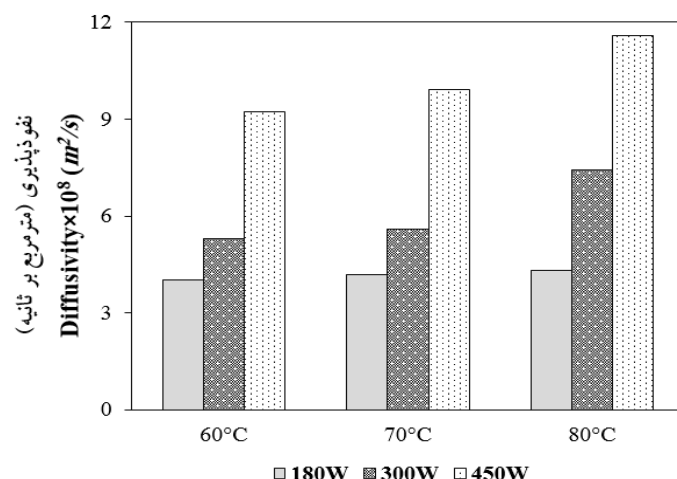


شکل ۶- مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل دو جمله‌ای نمایی با داده‌های تجربی.

Figure 6. Comparison of fitted data with experimental one by two-term exponential model.

رطوبت افزایش یافت. در نتیجه، با توجه به وابستگی نفوذ رطوبت به دما، دمای نمونه نیز افزایش خواهد یافت. رفتار مشابهی برای خشک‌کردن برگ نعناع تحت روش ترکیبی توسط هوروز و همکاران (۲۰۱۷) گزارش شده است (۱۱). لازم به ذکر است که تاکنون هیچ گزارشی برای نفوذپذیری رطوبت مورد در مقالات ذکر نشده است. مقادیر به‌دست آمده در مطالعه حاضر در محدوده کلی ضریب نفوذ  $10^{-6}$  -  $10^{-11}$  (مترمربع بر ثانیه) برای محصولات غذایی بوده است (۳۴).

بررسی ضریب نفوذ موثر رطوبت: مقادیر به‌دست آمده برای شوک اولیه ۳۰۰ وات در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. کمترین مقدار به‌دست آمده ضریب نفوذ برابر  $4/028 \times 10^{-8}$  (مترمربع بر ثانیه) برای توان ۱۸۰ وات و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و بیشترین مقدار برابر  $11/59 \times 10^{-8}$  (مترمربع بر ثانیه) برای توان ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. برای کلیه آزمایشات، در یک دمای مشخص با افزایش توان ضرایب نفوذ میوه مورد نیز افزایش یافتند. همچنین در یک توان مشخص، با افزایش دما، ضریب نفوذ



شکل ۷- مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت (Deff) در دماهای مختلف تحت شوک اولیه ۳۰۰ وات.

Figure 7. Effective moisture diffusivity values (Deff) at different temperature under primary shock of 300W.

سیتتیک خشک کردن ترکیبی ریزموج-هوای گرم میوه مورد با مدل دو جمله‌ای نمایی در محدوده‌ی توان ۱۸۰ تا ۴۵۰ وات و دمای ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد، به‌خوبی برازش می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، در یک دمای مشخص با افزایش توان ریزموج، زمان خشک شدن کاهش و سرعت خشک شدن افزایش یافت. بیشترین سرعت خشک شدن در توان ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بدست آمد. کمترین زمان خشک کردن مربوط به توان ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بود، که در آن زمان خشک شدن با کاهش ۵۸/۷ درصدی به ۱۹ دقیقه رسید. نتایج حاکی از افزایش ضریب نفوذ و کاهش انرژی فعال-سازي با افزایش توان امواج ریزموج در یک دمای مشخص بود. بیشترین ضریب نفوذ موثر رطوبت و کمترین انرژی فعال‌سازی، برای توان ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر<sup>۸</sup> ۱۱/۵۹×۱۰ مترمربع بر ثانیه و ۱۳/۱۴ کیلوژول بر مول به‌دست آمد. بنابراین، در حالت توان ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، شرایط بهینه از لحاظ زمان، سرعت و نفوذپذیری به‌دست خواهد آمد. از طرفی با توجه به اینکه در توان‌های بالا تفاوت

بررسی انرژی فعال‌سازی: در مطالعه حاضر، مقادیر انرژی فعال‌سازی میوه مورد در شرایط مختلف خشک کردن در محدوده ۱۶/۸۴-۱۳/۱۴ (کیلوژول بر مول) تعیین شدند. کمترین مقدار انرژی فعال‌سازی به دست آمده، برای توان ریزموج ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، برابر ۱۳/۱۴ (کیلوژول بر مول) و بیشترین مقدار برای توان ۱۸۰ وات و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۱۶/۸۴ (کیلوژول بر مول) به‌دست آمد. برای تمام آزمایشات، در یک دمای مشخص، با افزایش توان ریزموج مقدار انرژی فعال‌سازی کاهش یافت، زیرا با افزایش توان ریزموج نفوذپذیری رطوبت بیشتر شده و انرژی مورد نیاز برای شروع نفوذ از بخش‌های داخلی نمونه کمتر خواهد شد. مقادیر انرژی فعال‌سازی به‌دست آمده در مطالعه حاضر (۱۱۰-۱۲/۷ کیلوژول بر مول) در محدوده کلی انرژی فعال‌سازی محصولات غذایی قرار داشتند (۳۴).

### نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی سیتتیک خشک کردن میوه مورد داده‌های آزمایشی با ۱۰ مدل ریاضی برازش شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که

خشک کردن در توان ۴۵۰ وات و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام گیرد.

معنی‌داری بین نتایج دماها وجود نداشت؛ لذا در عمل پیشنهاد می‌شود جهت کاهش مصرف انرژی فرایند

### منابع

- Ahmed, N., Singh, J., Chauhan, H., Anjum, P. G. A., and Kour, H. 2013. Different drying methods: Their applications and recent advances. *Int. J. Food. Nutr. Saf.* 434-42.
- Akpinar, E. K., and Toraman, S. 2016. Determination of drying kinetics and convective heat transfer coefficients of ginger slices. *Heat and Mass Transfer.* 52: 10. 2271-2281.
- Andrés, A., Bilbao, C., and Fito, P. 2004. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration. *J. of Food Engineering.* 63:1. 71-78.
- Aydın, C., and Özcan, M. M. 2007. Determination of nutritional and physical properties of myrtle (*Myrtus communis* L.) fruits growing wild in Turkey. *J. of Food Engineering.* 79: 2. 453-458.
- Aykin-Dinçer, E., Kılıç-Büyükkurt, Ö., and Erbaş, M. 2019. Influence of drying techniques and temperatures on drying kinetics and quality characteristics of beef slices. *Heat and Mass Transfer* 1-6.
- Doymaz, İ., and Altınar, P. 2012. Effect of pretreatment solution on drying and color characteristics of seedless grapes. *Food Science and Biotechnology.* 21 :1. 43-49.
- Doymaz, I., Kipcak, A. S., and Piskin, S. 2015. Microwave drying of green bean slices: drying kinetics and physical quality. *Czech J. of Food Sciences.* 33: 4. 367-376.
- Feng, H., and Tang, J. 1998. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *J. of Food Science.* 63: 4. 679-683.
- Henderson, S. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE.* 17: 6.1167-1168.
- Henderson, S. 1961. Grain Drying Theory (I) Temperature Effect on Drying Coefficient. *J. of Agricultural Engineering Research.* 6: 3.169-174.
- Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H., and Maskan, M. 2017. Drying kinetics of apricot halves in a microwave-hot air hybrid oven. *Heat and Mass Transfer.* 53: 6. 2117-2127.
- İlter, I., Akyıl, S., Devseren, E., Okut, D., Koç, M., and Ertekin, F. K. 2018. Microwave and hot air drying of garlic puree: drying kinetics and quality characteristics. *Heat and Mass Transfer.* 54: 7. 2101-2112.
- Jia, Y., Khalifa, I., Hu, L., Zhu, W., Li, J., Li, K., and Li, C. 2019. Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques. *Food and bioproducts processing.* 11867-76.
- Karathanos, V. T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *J. of Food Engineering.* 39: 4. 337-344.
- Kaya, A., Aydın, O., and Demirtaş, C. 2007. Drying kinetics of red delicious apple. *Biosystems Engineering.* 96: 4. 517-524.
- Kesbi, O.M., Sadeghi, M., and Mireei, S.A. 2016. Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices. *Engineering in agriculture, environment and food.* 9: 3. 216-223.
- Lee, J.H., and Kim, H.J. 2009. Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices. *LWT-Food Science and Technology.* 42: 1.180-186.
- Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez, A., Moraga, N. O., and Astudillo, S. 2015. Dehydration of *S tevia rebaudiana* Bertoni Leaves: Kinetics, Modeling and Energy Features. *J. of Food Processing and Preservation.* 39: 5.508-520.
- Lewis, W.K. 1921. The rate of drying of solid materials. *Industrial & Engineering Chemistry.* 13: 5.427-432 .

20. Maisnam, D., Rasane, P., Dey, A., Kaur, S., and Sarma, C. 2017. Recent advances in conventional drying of foods. *J. of Food Technology and Preservation*. 1:1.
21. Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of food engineering*. 44: 2. 71-78.
22. Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J. of Food Engineering*. 48: 2. 177-182.
23. Midilli, A., Kucuk, H., and Yapar, Z. 2002. A new model for single-layer drying. *Drying Technology*. 20: 7.1503-1513.
24. Mujaffar, S., and Sankat, C. 2015. Modeling the Drying Behavior of Unsalted and Salted Catfish (*Arius* sp.) Slabs. *J. of Food Processing and Preservation*. 39: 6.1385-1398.
25. Ozgen, F. 2015. Experimental investigation of drying characteristics of cornelian cherry fruits (*Cornus mas* L.). *Heat and Mass Transfer*. 51: 3.343-352.
26. Page, G.E. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers.
27. Sagar, V., and Kumar, P.S. 2010. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *J. of food science and technology*. 47: 1.15-26.
28. Sharaf-Eldeen, Y.I., Blaisdell, J., and Hamdy, M. 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*. 5: 4. 1261-1265.
29. Sharma, G., and Prasad, S. 2001. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *J. of Food Engineering*. 50: 2. 99-105.
30. Torringa, E., Esveld, E., Scheewe, I., van den Berg, R., and Bartels, P. 2001. Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. *J. of food engineering*. 49: 2-3. 185-191.
31. Tulasidas, T., Raghavan, G., and Mujumdar, A. 1995. Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450 Mhz-11: quality and energy aspects. *Drying Technology*. 13: 8-9. 1973-1992.
32. Verma, L.R., Bucklin, R., Endan, J., and Wratten, F. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*. 28: 1. 296-301.
33. Yagcioglu, A. 1999. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. Paper presented at the Proceedings of the 7th International congress on agricultural mechanization and energy.
34. Zogzas, N., Maroulis, Z., and Marinos-Kouris, D. 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*. 14: 10. 2225-2253.

## Effect of combined microwave-hot air under microwave pretreatment on drying kinetics of Myrtus fruit

S. Karimi, S. Mohammadi, N. Layeghiniya<sup>3</sup> H. Abbasi\*

Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Received: 2020/03/29; Accepted: 2020/06/02

### Abstract

**Background and objectives:** In traditional medicine, a decoction of leaves and fruit of Myrtus are used to address the problems such as stomach disease. Fruits and vegetables are highly susceptible to microbial spoilage due to their high moisture content. For this reason, drying methods have been developed to prevent microbial spoilage. The most common method is hot air drying, but combination of this method with others like microwave drying is developed to solve hot air method disadvantages such as low drying rate and high energy consumption. Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of combined microwave-hot air drying method on mass transfer and drying kinetics of Myrtus fruit and to find the best experimental drying conditions in terms of time, rate, and mass transfer.

**Materials and methods:** In present study, drying process of the Myrtus fruit by combined microwave-hot air under microwave pretreatment was investigated. Drying experiments were performed at combined powers of 180, 300 and 450W and three temperatures of 60, 70 and 80°C under microwave pretreatment at powers of 300, 450 and 600W in a domestic microwave device. Experimental data were fitted to 10 mathematical models to study drying kinetics of Myrtus fruit. Also, fitting quality of equations was evaluated using coefficient determination ( $R^2$ ) and root mean square error (RMSE). The effect of the combined method on mass transfer coefficient and activation energy of samples were also investigated.

**Results:** kinetic analysis of process showed that among 10 common kinetic models, exponential Two-term model fits well the present combined method in mentioned power range. The results showed that at a certain temperature with increasing microwave power, drying rate constant ( $k$ ) of exponential two-parameter equation describing drying behavior of the Myrtus fruit increased. According to the results, at a certain temperature, with increasing microwave power, drying time decreased and drying rate increased. The highest drying time (46 min) was obtained at combined power of 180W and temperature of 60°C. The lowest drying time (19min) was obtained at 450W and 80°C, which was 58.7% lower than the maximum drying time. The results revealed that with increasing microwave power at a certain temperature, diffusion coefficient of Myrtus fruit increased and activation energy decreased. The highest effective moisture diffusivity and lowest activation energy were obtained at 450W and 80°C and was  $11.59 \times 10^{-8}$  ( $m^2/s$ ) and 13.14 ( $kJ/mol$ ), respectively.

**Conclusion:** Temperature and combined power are two main factors affecting Myrtus fruit drying. Increasing the combined microwave power at a certain temperature as well as increasing the hot air temperature at a specific combined power have dramatically reduced time and significantly increased drying rate. The drying of the Myrtus fruit occurred at falling rate. Also, Microwave power affect drying rate constants directly. In addition, increasing combined microwave power increases mass transfer and thus effective diffusion coefficient of moisture.

**Keywords:** Activation energy, Drying kinetics, Microwave-hot air, Myrtus fruit, Moisture diffusivity.

\*Corresponding Author: [habbasi@jsu.ac.ir](mailto:habbasi@jsu.ac.ir)