

## انتخاب مدل ریاضی برای سینتیک خشک کردن میوه آلبالو در خشک کن مایکروویو-خلا

عبدالرحمن قادری<sup>۱</sup>، سلیمان عباسی<sup>۲</sup>، علی متولی<sup>۳</sup>، سعید مینایی<sup>۴</sup>

۱- دانشآموخته کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- نویسنده مسئول: دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس پست الکترونیکی: sabbasifood@modares.ac.ir

۳- دانشآموخته کارشناسی ارشد ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشیار گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۲۳

تاریخ دریافت: ۸۹/۳/۱۶

### چکیده

**سابقه و هدف:** در سال‌های اخیر، بررسی کارایی و توانایی خشک کن‌های مایکروویو-خلا به عنوان روشی جدید، سریع و نسبتاً کم‌هزینه برای خشک کردن مواد غذایی مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر سعی شد تا ضمن ارزیابی توانایی این روش برای خشک کردن آلبالو در شرایط مختلف، مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن آن معرفی شود.

**مواد و روش‌ها:** آزمایش‌های تجربی خشک کردن به وسیله خشک کن مایکروویو-خلا در ۴ سطح توان اسمی مایکروویو (۳۶۰، ۴۰۰، ۴۴۰ و ۸۴۰ وات) و ۴ سطح فشار مطلق (۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌بار)، انجام شد. سپس ویژگی‌های خشک کردن آلبالو بر حسب تابعی از توان مایکروویو و میزان فشار مطلق سیستم تعیین شد. آن‌گاه میزان برازش داده‌های تجربی با ۷ مدل نیمه‌نظری و تجربی ارزیابی و مقایسه‌ها بر اساس  $R^2$ ،  $X^3$  و RMSE انجام شد و سرانجام مناسب‌ترین مدل گزارش شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که توان مایکروویو و میزان خلا روى سرعت خشک شدن آلبالو اثر مهمی دارند و با افزایش توان و کاهش فشار محفظه، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. هم‌چنین، فرایند خشک شدن در مرحله نزولی اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، مقایسه مدل‌های مختلف نشان داد که مدل میدلی و همکاران به دلیل دارا بودن بالاترین  $R^2$  و کمترین  $X^3$  و RMSE می‌تواند مناسب‌ترین مدل باشد.

**نتیجه‌گیری:** در خشک کردن آلبالو با این روش، دوره سرعت ثابت وجود نداشت. با توجه به نتایج به دست آمده با این روش به نظر می‌رسد که خشک کن مایکروویو-خلا به دلیل کارایی بالا و زمان کوتاه فرایند، روشی مناسب برای خشک کردن آلبالو و سایر محصولات غذایی و کشاورزی باشد.

### وازگان کلیدی: مدل سازی، خشک کن مایکروویو-خلا، آلبالو، خشک کردن لایه نازک

### ۱ مقدمه

بافت پیوندی (fibromyalgia) کمک می‌کند (۳). این میوه یکی از محصولات باگی است که دارای فسادپذیری بالایی است و نمی‌توان آن را مدت زمان زیادی نگهداری کرد (۴). علاوه بر این، مصرف تازه‌خواری آن پایین است (۵) و آلبالوی تولید شده عمده‌تاً به صورت منجمد (۶٪)، کنسرو یا دیگر فراورده‌ها (۳۰٪) و آب‌میوه، شراب و ترشی (۱۰٪) نگهداری می‌شود. یکی از راه‌های حفاظت آلبالو، خشک کردن است که با کاهش محتوای آب، باعث سهولت حمل و نقل، پختن و دیگر کاربردهای آن می‌شود (۳).

آلبالو با نام علمی *Prunus cerasus L.* به جنس *Prunus* و گونه *cerasus* تعلق دارد، اما در حقیقت این میوه از لحاظ برخی ویژگی‌ها با دیگر میوه‌های این گروه نظر آلو، زردآلو، و بادام کمی تفاوت دارد (۱). آلبالو به طور عمده در لهستان، روسیه، صربستان، ایران، اتریش، آمریکا، آذربایجان و آلمان تولید می‌شود. بر اساس آمار FAO در ایران سالیانه حدود ۵۰ هزار تن آلبالو تولید می‌شود که این میزان معادل ۵٪ تولید جهانی است (۲). آلبالو منبع بسیار خوبی از آنتی‌اکسیدان‌ها، آنتوکوئین‌ها، ترکیبات فنولی و ملاتونین است که به تسکین درد مفاصل، نقرس و احتمالاً التهاب

خشک کردن به روش مایکروویو- خلاً پتانسیل بسیار خوبی برای بهبود کیفیت محصول دارد که در خشک کردن میوه‌ها، سبزی‌ها و دانه‌ها توسط پژوهش‌گران مختلف گزارش شده است (۱۲-۱۳).

به خشک شدن فراورده‌های غذایی به صورت تک لایه تحت شرایط ثابت دمایی و رطوبتی خشک کردن به روش لایه نازک می‌گویند (۱۴). محققان زیادی سینتیک خشک کردن محصولات کشاورزی را جهت یافتن بهترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن آن‌ها بررسی کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به خشک کردن انجیر هندی (۱۴)، خرما (۱۵)، برش‌های ورقه‌ای آنجه (۱۶)، انجیر (۱۷)، قطعات سیب زمینی (۹)، پوست کنجد (۱۰) و برنج مالزیایی (۱۸) اشاره کرد.

شریفی (۱۳۸۶) تحقیقی روی مدل‌سازی خشک کردن ورقه نازک پرتقال انجام داد. خشک کردن ورقه‌هایی به ضخامت ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر و در سه سرعت هوای خشک کردن ۰/۵، ۱ و ۲ متر در ثانیه و چهار دمای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در نهایت مدل میدلی بهترین برآش را با داده‌ها نشان داد (۱۹). *Simal* و همکاران (Exponential) (۲۰۰۵) دقت کاربرد سه مدل ریاضی نمایی (Exponential)، پیج (Page) و انتشاری (Diffusional) را برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن میوه کیوی ارزیابی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل پیج بهترین برآش را با داده‌های آزمایشگاهی داشت (۲۰).

برای انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که بتوان بر اساس آن، سنتیک خشک شدن محصول مورد نظر را به دست آورد، به یک سری ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی مانند انتقال جرم و حرارت، ضریب انتشار مؤثر رطوبت و نظایر آن مورد نیاز است تا بتوان به کمک آن‌ها خشک کن جدیدی با کارایی مناسب طراحی کرد. به همین دلیل در این بررسی به منظور ارزیابی توانایی دستگاه خشک کن مایکروویو- خلاً رفتار خشک شدن دانه‌های آلبالو، انتخاب مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن، تأثیر شرایط خشک کردن بر آهنگ از دست دادن رطوبت در روش خشک کردن مایکروویو- خلاً ارزیابی شد.

اصولاً فرایند خشک کردن به طور وسیعی برای نگهداری میوه‌ها و سبزی‌ها به کار می‌رود که هدف اصلی آن رساندن آب به مقداری است که فساد میکروبی و واکنش‌های شیمیایی به حداقل برسد (۱). میوه خشک شده آلبالو به طور وسیعی در محصولات غذایی مانند کیک و کلوچه، فراورده‌های قنادی، بستنی، دسرهای منجمد، شیرینی، سالاد میوه، پنیر و ماست استفاده می‌شود. خشک کردن از لحاظ پنهان کردن عیوب‌های ناشی از ترک خوردن، صدمه دیدگی پوست توسط باران و موارد مشابه نیز مفید است (۳).

با اینکه هنوز هم خشک کردن میوه‌ها و سبزی‌ها توسط گرمای آفات در سطح وسیعی به کار می‌رود، ولی این روش دارای معایبی نظیر زمان طولانی خشک کردن، آلودگی و خراب شدن محصول به دلیل تغییر شرایط جوی است. بنابراین، به منظور بهبود کیفیت فراورده باید روش‌های صنعتی جایگزین روش‌های سنتی شوند (۱).

در میوه‌هایی مانند انگور، آلو، آلبالو، گیلاس و زردآلو پوشش مومن موجود روی پوست میوه اثر کنترل کننده‌ای در فرایند خشک کردن دارد (۱). بنابراین، استفاده از روش‌هایی مثل خشک کردن تحت خلاً به وسیله مایکروویو می‌تواند در افزایش سرعت خشک کردن این نوع میوه‌ها مؤثر باشد. طی دهه‌های گذشته، تلاش‌هایی زیادی برای استفاده صنعتی از مایکروویو در فراوردهای مختلف نظیر صنایع پخت، انجام‌دادنی، پاستوریزاسیون، حرارتدهی و خشک کردن صورت گرفته است. به طوری که اغلب می‌توان از آون‌های مایکروویو به عنوان جایگزین آون‌های معمولی برای بیشتر محصولات کشاورزی استفاده کرد. خشک کردن با مایکروویو مثل سایر روش‌های خشک کردن به دلیل اختلاف فشار بین داخل و خارج صورت می‌گیرد که نیروی محرکه انتقال رطوبت است (۶).

در سال‌های اخیر، خشک کردن مایکروویو- خلاً به عنوان یک روش بالقوه برای به دست آوردن مواد غذایی خشک شده با کیفیت بالا مورد بررسی قرار گرفته است. این روش ترکیبی، فواید هر دو روش خشک شدن تحت خلاً و خشک شدن با مایکروویو را در بر دارد و می‌تواند هم کارایی افزایی و هم کیفیت فراورده را بهبود بخشد (۷). هم‌چنین، به علت استفاده از خلاً در خشک کن مایکروویو- خلاً، عملیات خشک کردن با سرعت بیشتری انجام می‌شود و مدت زمان خشک شدن و انرژی مصرفی کاهش می‌یابد (۸).

M<sub>t</sub>: محتوای رطوبت در هر لحظه از فرایند خشک کردن

(کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)

M<sub>e</sub>: محتوای رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)

M<sub>o</sub>: محتوای رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)

با توجه به اینکه معمولاً مقدار M<sub>e</sub> در مقایسه با M<sub>o</sub> و M<sub>t</sub> عدد کوچکی است، خطای ناشی از در نظر نگرفتن آن نیز بسیار جزئی است و در نتیجه، می‌توان رابطه را به شکل ساده‌تری درآورد (۱۷).

$$\text{فرمول ۲: } MR = \frac{M_t}{M_o}$$

برای ارزیابی برآذش مدل‌های استاندارد خشک شدن لایه نازک با داده‌های آزمایشی از محیط برآذش منحنی‌های نرم‌افزار 2007 MATLAB استفاده شد. برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین (R<sup>2</sup>)، مربع Root کای Chi-square (χ<sup>2</sup>) و ریشه میانگین مربعات خطای RMSE (Root Mean Square Error) استفاده شد. در ابتدا ۱۵ مدل تجربی را بر داده‌های آزمایشگاهی برآذش داده و با توجه به سه معیار R<sup>2</sup> بالا، χ<sup>2</sup> و RMSE پایین ۷ مدل با دقت انتخاب شدند (جدول ۱).

فرمول ۳

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pred},i} - MR_{\text{exp},i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pred}} - MR_{\text{exp},i})^2}$$

فرمول ۴

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pred},i})^2}{N - m}$$

فرمول ۵

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pred},i} - MR_{\text{exp},i})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

در این رابطه‌ها، M<sub>Repx,i</sub> نسبت رطوبت تجربی آم

M<sub>Rpred,i</sub> : نسبت رطوبت پیشگویی شده آم

N : تعداد مشاهدات

M: تعداد ثابت‌های خشک شدن. بهترین برآذشی که می‌تواند ویژگی‌های خشک شدن آبالو را توصیف کند، با توجه به R<sup>2</sup> بالا، χ<sup>2</sup> و RMSE پایین انتخاب می‌شود.

**تجزیه و تحلیل آماری:** برای انجام محاسبه‌های آماری، هر کدام از آزمون‌ها حداقل در سه تکرار انجام و میانگین و انحراف معیار داده‌ها براساس روش‌های معمول انجام شد.

## • مواد و روش‌ها

**مواد:** آبالوهای مورد آزمایش در تیر ماه ۱۳۸۸ از یکی از باغ‌های اطراف کرج (محمد شهر) تهیه شد. آبالوهای نارس و فاسد به طور دستی جدا شدند و نمونه‌های یکنواخت تا شروع آزمایش‌ها در یخچال (۵°C) نگهداری شدند.

**اندازه‌گیری رطوبت:** برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت آبالوهای نمونه‌های ۲۰ گرمی به کمک آون (دما ۲ ± ۱۰.۵°C به مدت ۷ ساعت) خشک شدند. به طوری که تغییر وزنی بین دو بار توزین مشاهده نشد. این روند در ۵ مرتبه تکرار و محتوای رطوبت اولیه آبالوها در حدود ۷۲/۹۸ ± ۰/۵ درصد بر پایه تر به دست آمد (۱).

**روش خشک کردن با خشک کن مایکروویو-خلأ:** برای این منظور از یک خشک کن مایکروویو-خلأ آزمایشگاهی استفاده شد که در آن برای تأمین فشار مطلق مورد نیاز از پمپ خلأ Kawake airvac مدل jp-120h ساخت تایوان) و برای اعمال امواج مایکروویو از یک مایکروویو خانگی (AEG مدل 725 Micromat آلمان، با توان اسمی ۱۲۰۰ وات، بسیار ۲۴۵۰ مگاهرتز و ابعاد محفظه داخلی ۳۶cm × ۳۲cm × ۲۳cm استفاده شد. همچنین، مقدار فشار مطلق سیستم با خلأ سنج (P.V.R. Mدل VT1 NP ساخت ایتالیا) اندازه‌گیری شد. در نهایت، برای چرخش محفظه (دیکاتور ۵ لیتری) حاوی نمونه در داخل مایکروویو جهت پراکندگی یکنواخت امواج و همچنین خروج بخار حاصل از تبخیر و جلوگیری از افزایش فشار محفظه از تبخیر کننده چرخان (BUCHI) مدل RE120 ساخت سوئیس) و برای توزین نمونه‌ها از ترازوی دیجیتال (Tecator، مدل ۶۱۰، ساخت فرانسه) با دقت ۰/۰۰۰۱ استفاده شد (۱۱). لازم به توضیح است که برای هر آزمایش مقدار مشخصی (۵۰ ± ۲ گرم) از آبالو توسط خشک کن مایکروویو-خلأ خشک شد.

**روش برآذش داده‌ها با مدل‌های تجربی و نیمه تجربی:** در بیشتر پژوهش‌ها، مدل سینتیک خشک کردن بر اساس شاخص نسبت رطوبت (MR) گزارش شده است که علت آن، کاهش پراکندگی و خوش فرم کردن داده‌ها است (۹). در پژوهش حاضر نیز برای محاسبه نسبت رطوبت آبالوهای در طول فرایند خشک کردن از فرمول ۱ استفاده شد.

$$\text{فرمول ۱: } MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$$

MR : نسبت رطوبت (بدون بعد)

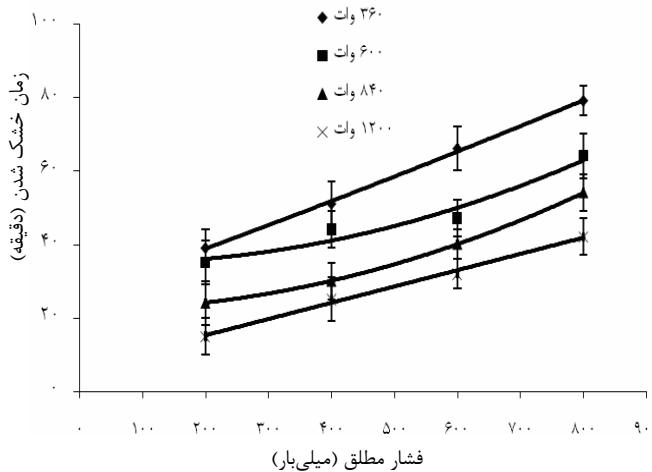
بر حسب دو متغیر مستقل (توان مایکروویو و میزان فشار مطلق) محاسبه کرد؛ به طوری که با داشتن مقادیر مختلف فشار هوا و توان مایکروویو (به غیر از توان و فشارهای آزمایش شده) می‌توان زمان خشک شدن را با به کار بردن فرمول ۶ محاسبه کرد. با استفاده از چنین معادلاتی لزوم انجام آزمایش‌ها در سطوح مختلف توان و فشار هوا بسیار کم می‌شود (شکل ۳).

فرمول ۶

$$\text{Time} = \frac{53}{100} + \frac{0.5}{100} V - \frac{0.61}{100} P + \frac{0.000266}{100} V^2 + \frac{0.00023099}{100} P^2 - \frac{0.0002278}{100} VP$$

V: فشار مطلق

P: توان مایکروویو

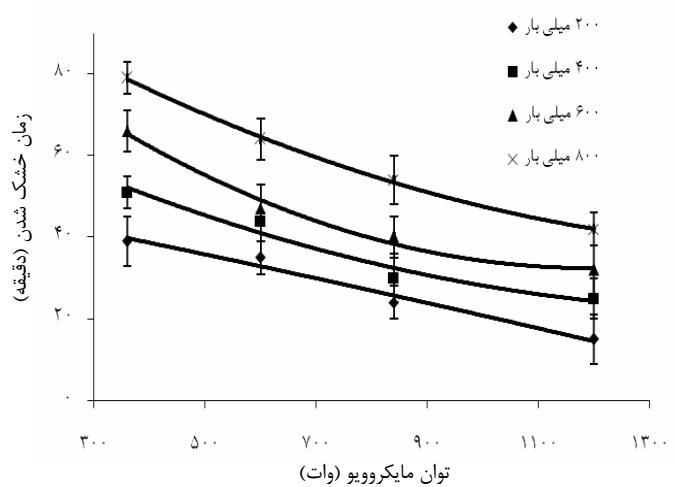


شکل ۲- تأثیر فشارهای مطلق در توان‌های مختلف مایکروویو بر زمان خشک شدن دانه‌های آبالو

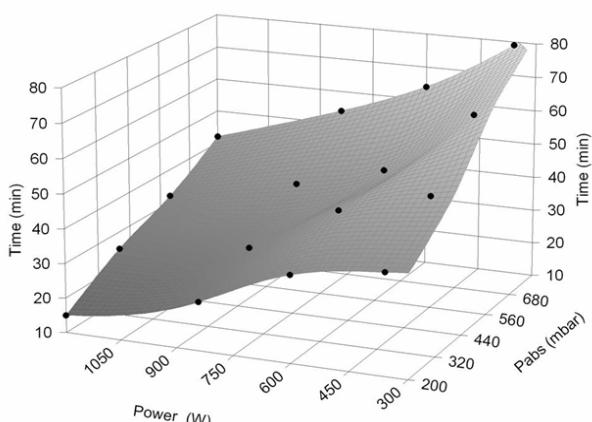
## ۰ یافته‌ها

تأثیر شرایط مختلف توان مایکروویو و میزان خلاً روی زمان خشک شدن: تأثیر توان‌های مختلف مایکروویو در فشارهای مطلق متفاوت روی زمان کلی خشک شدن میوه آبالو در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱ زمان خشک شدن، تابعی از فشار مطلق هوا و توان مایکروویو است؛ به طوری که در یک توان ثابت مایکروویو با افزایش فشار هوا زمان خشک شدن افزایش یافت.

بهترین رابطه ریاضی برآش داده شده بر داده‌های شکل ۱ رابطه درجه دو بود. معادلات مربوط و همچنین  $R^2$  مربوط به معادلات برآش داده شده در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱- تأثیر توان‌های مختلف مایکروویو در فشارهای مطلق متفاوت بر زمان خشک شدن دانه‌های آبالو



شکل ۳- تأثیر همزمان توان مایکروویو و فشار مطلق خشک کن مایکروویو-خلاً بر مدت زمان خشک شدن میوه آبالو

همچنین، نمودارهای زمان خشک شدن در مقابل فشار مطلق در توان‌های مختلف مایکروویو در شکل ۲ نشان داده شده است. رابطه درجه دو بهترین برآش زمان خشک شدن را با داده‌های مربوطه نشان داد. معادلات مربوطه و همچنین  $R^2$  مربوط به معادلات برآش داده شده در جدول ۳ آورده شده است.

با توجه به معادله‌های ارائه شده در جدول‌های ۲ و ۳ در مرحله بعد، تحلیل رگرسیونی چند متغیره زمان خشک شدن، توان مایکروویو و میزان فشار مطلق سیستم انجام شد. یک رابطه ریاضی فرمول ۶) به دست آمد که رابطه رگرسیونی با  $R^2=0.98$  بین این سه متغیر را نشان می‌دهد. با استفاده از فرمول ۶ زمان خشک شدن را می‌توان

در مرحله بعد، داده‌های تجربی حاصل از خشک کردن دانه‌های آلبالو در شرایط مختلف (توانهای مختلف مایکروویو و فشار مطلق سیستم خشک کن مایکروویو- خا) با مدل‌های نظری و تجربی موجود برآذش شدند. با توجه به جدول ۴ اگرچه میزان شاخص‌های انتخاب مدل در برخی شرایط برآذش خوبی با مدل‌های دیگر نظیر هندرسون، پابیس و ورما داشت، ولی در بیشتر موارد، میزان برآذش مدل میدلی و همکاران با داده‌های تجربی بسیار خوب بود.

برآذش داده‌های تجربی با مدل‌های ریاضی: منحنی‌های خشک شدن آلبالو در توانهای مختلف و فشار ثابت در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. در شروع فرایند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول و نرخ از دست دادن رطوبت زیاد بود، ولی به تدریج با گذشت زمان، محتواهای رطوبت محصول کاهش پیدا کرد و در نتیجه، سرعت کاهش رطوبت نیز به طور طبیعی کاهش یافت. محصول، رطوبت عمده خود را در لحظات اولیه فرایند خشک کردن از دست داد و زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقی‌مانده لازم بود.

**جدول ۱ - مدل‌های مورد استفاده برای برآذش داده‌های تجربی**

$MR = \exp(-kt)$	۱. مدل لوئیس (۲۱، ۲۱)
$MR = a \exp(-kt)$	۲. مدل هندرسون و پابیس (۲۲، ۲۲)
$MR = \exp(-kt^n)$	۳. مدل پیچ (۲۳)
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	۴. مدل لگاریتمی (۲۴)
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	۵. تقریب پخش (۲۵)
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	۶. ورما و همکاران (۲۶)
$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	۷. میدلی و همکاران (۹)

**جدول ۲ - رابطه‌های ریاضی برای پیشگویی مدت زمان لازم برای خشک کردن میوه آلبالو در توان ثابت مایکروویو**

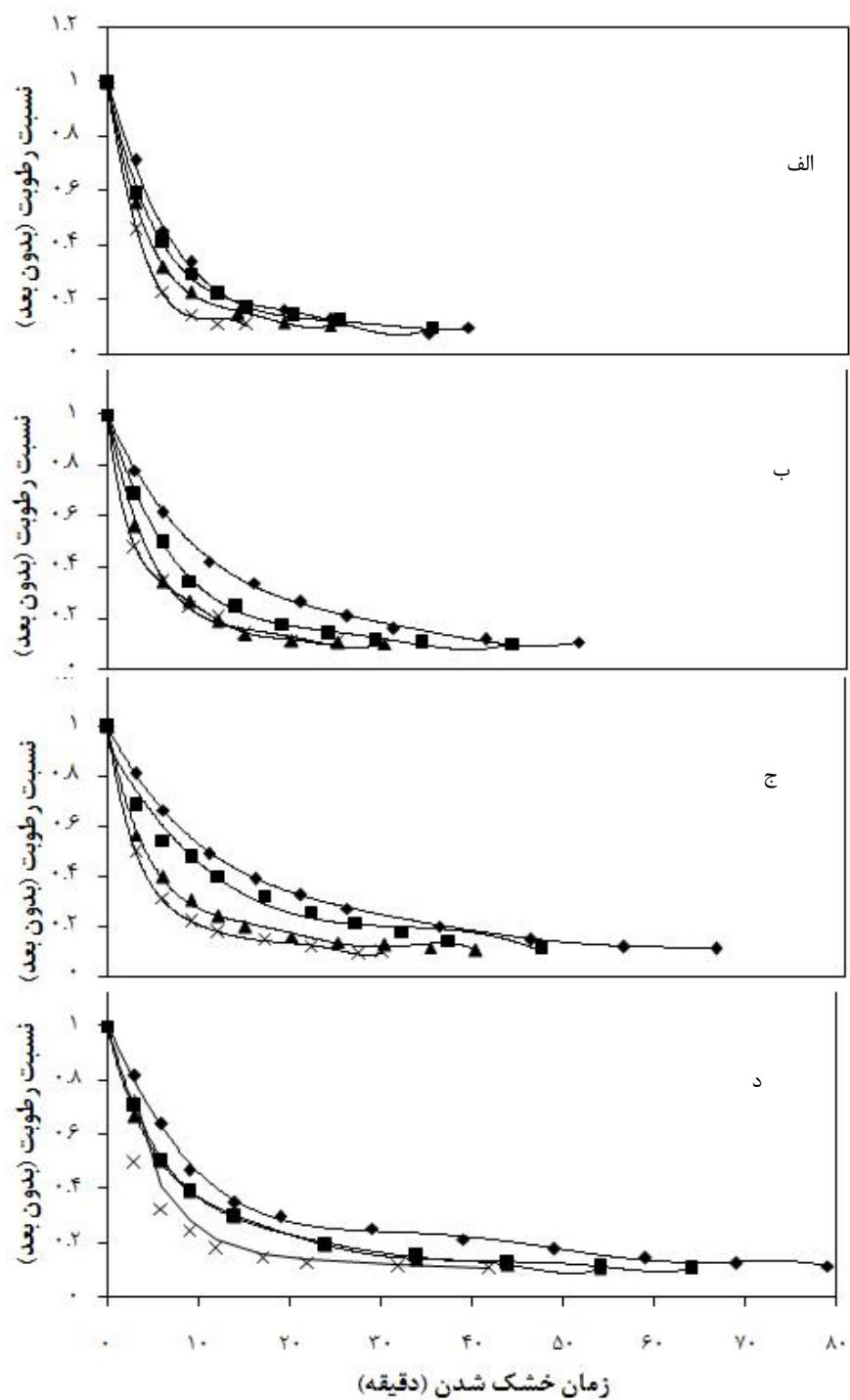
$R^2$	معادلات برآذش شده	فشار مطلق (میلی‌بار)
۰/۹۸	Time = $-2E - 0/6P^2 - 0/0265P + 49/581$	۲۰۰
۰/۹۶	Time = $2E - 0/5P^2 - 0/0671P + 73/377$	۴۰۰
۰/۹۹	Time = $5E - 0/5P^2 - 0/1131P + 99/831$	۶۰۰
۰/۹۹	Time = $3E - 0/5P^2 - 0/0831P + 105/4$	۸۰۰

= توان مایکروویو (وات)

**جدول ۳ - رابطه‌های ریاضی برای پیشگویی مدت زمان لازم برای خشک کردن میوه آلبالو در فشار مطلق ثابت**

$R^2$	معادلات برآذش شده	توان ثابت مایکروویو (وات)
۰/۹۹	Time = $6E - 0/8V^2 + 0/0613V + 25/26$	۳۶۰
۰/۹۶	Time = $5E - 0/5V^2 - 0/005V + 35$	۶۰۰
۰/۹۹	Time = $6E - 0/5V^2 - 16V + 22$	۸۴۰
۰/۹۹	Time = $-4E - 19V^2 + 0/044V + 6/5$	۱۲۰۰

= فشار مطلق هوا (میلی‌بار)



شکل ۴- تأثیر توانهای مختلف مایکروویو، (۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ وات) بر نسبت رطوبت دانههای تک لایه آبالو در حین فرایند خشک شدن بر حسب میزان برازش دادهها با مدل میدلی (خطوط پیوسته) در فشارهای مطلق (الف) ۲۰۰، (ب) ۴۰۰، (ج) ۶۰۰ و (د) ۸۰۰ میلی بار

جدول ۴ - مقایسه میزان برآش داده های تجربی خشک کردن دانه های آبالو در شرایط مختلف توان مایکروویو و فشار مطلق با مدل های نظری

نام مدل	لویس	پیچ	هندرسون و پابیس						لگاریتمی						تقریب پخش						ورما و همکاران			میدلی و همکاران				
			R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE		
۲۰۰			-0.996	-0.00048	-0.0220	-0.957	-0.00117	-0.01627	-0.997	-0.0017	-0.01857	-0.986	-0.0018	-0.01392	-0.971	-0.00224	-0.00566	-0.987	-0.00096	-0.0370	-0.969	-0.0239	-0.0547	-0.00048	-0.958	-0.00068	-0.0154	-0.998
۴۰۰			-0.999	-0.00045	-0.0074	-0.958	-0.00068	-0.01154	-0.998	-0.00078	-0.01146	-0.976	-0.00181	-0.01480	-0.96	-0.002756	-0.00275	-0.993	-0.000417	-0.0244	-0.954	-0.02113	-0.06238	-0.00045	-0.958	-0.00068	-0.0154	-0.998
۳۶۰			-0.999	-0.00040	-0.0130	-0.989	-0.00031	-0.00655	-0.999	-0.00035	-0.00651	-0.975	-0.00222	-0.049	-0.975	-0.00219	-0.00494	-0.995	-0.00039	-0.0209	-0.968	-0.0282	-0.0531	-0.00040	-0.989	-0.00031	-0.0130	-0.999
۶۰۰			-0.999	-0.00045	-0.0027	-0.979	-0.00052	-0.02649	-0.994	-0.00056	-0.0249	-0.962	-0.00252	-0.0593	-0.912	-0.00819	-0.00905	-0.973	-0.00252	-0.0502	-0.982	-0.0198	-0.0949	-0.0029	-0.979	-0.00052	-0.0127	-0.994
۲۰۰			-0.999	-0.00045	-0.00738	-0.998	-0.00022	-0.01515	-0.998	-0.00027	-0.0115	-0.976	-0.00162	-0.0481	-0.960	-0.00276	-0.00827	-0.994	-0.00042	-0.0244	-0.954	-0.0311	-0.0624	-0.00045	-0.998	-0.00022	-0.01515	-0.998
۴۰۰			-0.999	-0.00045	-0.1141	-0.999	-0.00045	-0.00828	-0.999	-0.00051	-0.0088	-0.985	-0.01120	-0.0388	-0.969	-0.01252	-0.00561	-0.991	-0.00072	-0.0299	-0.964	-0.0284	-0.0562	-0.00045	-0.999	-0.00051	-0.1141	-0.999
۶۰۰			-0.999	-0.00040	-0.1174	-0.989	-0.00058	-0.0087	-0.999	-0.00053	-0.00817	-0.971	-0.01231	-0.0377	-0.970	-0.01563	-0.00839	-0.988	-0.00096	-0.0346	-0.921	-0.0635	-0.0840	-0.00040	-0.989	-0.00058	-0.1174	-0.999
۸۰۰			-0.998	-0.00045	-0.0140	-0.979	-0.00041	-0.00728	-0.999	-0.00041	-0.0078	-0.929	-0.0508	-0.0752	-0.952	-0.00242	-0.00617	-0.999	-0.00021	-0.0058	-0.926	-0.0547	-0.0740	-0.00045	-0.979	-0.00041	-0.0140	-0.998
۲۰۰			-0.998	-0.00049	-0.1182	-0.989	-0.00012	-0.01219	-0.998	-0.00011	-0.0119	-0.964	-0.0258	-0.0356	-0.922	-0.00573	-0.00798	-0.994	-0.00039	-0.0209	-0.909	-0.0663	-0.0815	-0.00049	-0.989	-0.00012	-0.01219	-0.998
۴۰۰			-0.999	-0.00045	-0.00602	-0.998	-0.00081	-0.01513	-0.998	-0.0007	-0.0113	-0.969	-0.0269	-0.0619	-0.928	-0.0446	-0.00796	-0.995	-0.00034	-0.0221	-0.926	-0.0549	-0.0813	-0.00045	-0.998	-0.00081	-0.01513	-0.998
۶۰۰			-0.996	-0.00043	-0.0046	-0.989	-0.00018	-0.0063	-0.999	-0.00015	-0.0063	-0.984	-0.0100	-0.0446	-0.967	-0.0204	-0.00839	-0.993	-0.00044	-0.0298	-0.965	-0.0416	-0.0600	-0.00043	-0.989	-0.00018	-0.0063	-0.999
۸۰۰			-0.999	-0.00042	-0.1113	-0.991	-0.00011	-0.01534	-0.998	-0.00011	-0.0134	-0.982	-0.0123	-0.0420	-0.962	-0.0271	-0.00622	-0.994	-0.00045	-0.0279	-0.958	-0.0294	-0.0606	-0.00042	-0.991	-0.00011	-0.01534	-0.998
۲۰۰			-0.986	-0.00028	-0.4235	-0.969	-0.00017	-0.00529	-0.999	-0.00010	-0.0059	-0.989	-0.0062	-0.0393	-0.981	-0.0111	-0.0056	-0.995	-0.00027	-0.0260	-0.981	-0.0114	-0.0478	-0.00028	-0.969	-0.00017	-0.00529	-0.999
۴۰۰			-0.997	-0.00044	-0.1929	-0.993	-0.00012	-0.01824	-0.997	-0.00017	-0.0184	-0.961	-0.0244	-0.0638	-0.943	-0.0305	-0.00769	-0.994	-0.00010	-0.0131	-0.975	-0.0402	-0.0758	-0.00044	-0.993	-0.00012	-0.01824	-0.997
۶۰۰			-0.999	-0.00047	-0.00890	-0.999	-0.00021	-0.00627	-0.999	-0.00027	-0.0087	-0.975	-0.0164	-0.0484	-0.927	-0.0295	-0.00841	-0.991	-0.00056	-0.0282	-0.922	-0.0526	-0.0811	-0.00047	-0.999	-0.00021	-0.00627	-0.999
۸۰۰			-0.998	-0.00040	-0.00998	-0.993	-0.00016	-0.01105	-0.997	-0.00014	-0.0105	-0.969	-0.0205	-0.0451	-0.917	-0.0507	-0.0174	-0.990	-0.00064	-0.0303	-0.911	-0.0591	-0.0859	-0.00040	-0.993	-0.00016	-0.01105	-0.997

## • بحث

دیگر محققان شباهت دارد (۲۸، ۲۷). همچنین، مدل *Midilli* و همکاران به این دلیل به عنوان بهترین مدل شناخته شد که میزان  $R^2$  اغلب در حدود ۰/۹۸۶ تا ۰/۹۹۹ و میزان  $\chi^2$  و RMSE به ترتیب در حدود ۰/۰۰۰۰۰۲۹۱ تا ۰/۰۰۰۰۰۴۲۳۵ و ۰/۰۰۲۷ تا ۰/۰۰۲۸ بود. به عبارت دیگر، شاخص ضریب تعیین مدل *Midilli* و همکاران بیشترین مقدار و دو شاخص دیگر کمترین مقدار را نسبت به مدل‌های دیگر داشتند.

بر اساس رفتار خشک شدن میوه آلبالو به صورت لایه نازک در خشک کن مایکروویو- خلاً در توان‌های مختلف و فشارهای مطلق متفاوت مشخص شد که فرایند خشک شدن میوه آلبالو در مرحله نزولی اتفاق می‌افتد و توان خروجی مایکروویو و میزان فشار در خشک کن مایکروویو- خلاً عامل مهمی در زمان خشک شدن میوه آلبالو و ثابت‌های مدل *Midilli* است. با توجه به شاخص‌های مورد نظر، مدل میدلی بهترین برآنش با داده‌های آزمایشگاهی را نشان داد. در ضمن، خشک شدن میوه آلبالو در خشک کن مایکروویو- خلاً تحت تأثیر توان مایکروویو، میزان فشار و رطوبت اولیه محصول است؛ به طوری که با افزایش توان و کاهش میزان فشار در خشک کن مایکروویو- خلاً سرعت خشک کردن افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج کلی این بررسی به نظر می‌رسد که خشک کردن با مایکروویو- خلاً به دلیل کارایی بالا، زمان کوتاه و دمای نسبتاً پایین فرایند، روش مناسبی برای خشک کردن بیشتر مواد غذایی به ویژه آلبالو باشد.

### • References

1. Doymaz I. Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *J Food Eng* 2005; 78: 591–6.
2. FAO (2007). Statistical Database. Available at: [www.faostat.fao.org/site/339/default.aspx](http://www.faostat.fao.org/site/339/default.aspx) May 2011
3. Barrett D, Somogyi L, Ramaswamy H. (2005). Fruits Processing. 2nd ed. CRC press. New York.
4. Ahmadi MG, Davari N, Azizi M, Sedaghat N, Tehranifar E. Influence of modified atmosphere packaging on quality properties and increase the shelf-life of two species of sour cherry. *J Agric Sci Natur Resour* 2008; 22(2): 155–166 [in Persian].
5. Pourkomaleh A, Gani E, Azizi M. Effect of stem, coverage and use of some natural compounds in increasing the shelf-life of sour cherry. *J Agric Sci Natur Resour* 2008; 15(1) 18–29 [in Persian].
6. Maroulis ZB, Kiranoudis CT, Tsami E. Microwave vacuum drying kinetics of some fruits. *J Drying* 1997; 15: 2424–40.
7. Li Y, Xu Shi-Ying, Da-Wen S. Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave–vacuum and vacuum drying as well as microencapsulation. *J Food Eng* 2007; 83: 76–83.
8. Drouzas AE, Schubert H. Microwave application in vacuum drying of fruits. *J Food Eng* 1996; 28: 203–209.
9. Akpinar E, Midilli A, Bicer Y. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *Energ Convers Manag* 2003; 44: 1689–1705.

از آنجا که سرعت خشک شدن، رابطه مستقیمی با توان خروجی مایکروویو و رابطه معکوس با فشار هوا دارد، مشاهده می‌شود که با افزایش توان مایکروویو و کاهش فشار هوا، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. همچنین، زمان خشک شدن آلبالو با این روش نسبت به هوای گرم  $65^{\circ}\text{C}$  که دست آوردن زمان خشک شدن در یک توان مشخص، غیر از توان‌های آزمایش شده نیز می‌توان با استفاده از معادلات به دست آمده، زمان خشک شدن را به آسانی محاسبه کرد.

از روی معادلات به دست آمده در این بررسی می‌توان زمان خشک شدن میوه آلبالو را در یک توان ثابت و فشارهای مطلق مختلف به دست آورد. به طوری که برای به دست آوردن زمان خشک شدن در یک توان مشخص، غیر از توان‌های آزمایش شده نیز می‌توان با استفاده از معادلات به دست آمده، زمان خشک شدن را به ذکر است که با افزایش توان مایکروویو در فشارهای ثابت، سرعت خشک شدن افزایش می‌یابد. در ضمن، در توان‌های ثابت مایکروویو، با افزایش فشار مطلق، زمان خشک شدن، طولانی یا به عبارتی سرعت خشک شدن، کاهش نشان می‌دهد که این مشاهدات همگی هم راستا با اصول فیزیکی و مطابق با یافته‌های اغلب پژوهشگران هستند (۲۷، ۲۸).

همان طور که ذکر شد، با افزایش توان مایکروویو و کاهش فشار هوا، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد؛ زیرا با کاهش فشار هوا دمای تبخیر آب پایین می‌آید و رطوبت داخل محصول در دمای پایین‌تری از آن خارج می‌شود. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج به دست آمده توسط

10. AL-Mahsneh MA, Rababah TM, AL-Shbool MA, Yang W. Thin-layer drying kinetics of sesame hulls under forced convection open sun drying. *J Food Process Eng* 2007; 30: 324–337.
11. Abbasi S, Azari S. Novel microwave-freeze drying of onion slices. *Int J Food Sci Tech* 2009; 44: 974–9.
12. Wadsworth JI, Velupillai L, Verma LR. Microwave-vacuum drying of parboiled rice. *Transactions of the ASAE* 1990; 33: 199–210.
13. Chakraverty A, Singh RP. Post-harvest Technology of Cereals, Pulses and Oilseeds. New Delhi. Oxford and IBH Publishing Co; 1988. PVT. LTD.
14. Lahsasni S, Kouhila M, Mahroz M, Aitmahmamad L, Agoram B. Characteristic drying curve and mathematical modeling of thin-layer solar drying of Prickly pear cladode (*opuntia ficus indica*). *J Food Process Eng* 2004; 27: 103–17.
15. Bakari HH, Hobani AI. Thin-layer drying of dates. *J Food Process Eng* 2000; 23: 177–89.
16. Goyal RK, Kingsly ARP, Manikantanl MR, Ilyas SM.. Thin-layer drying kinetics of raw mango slices. *Bios Eng* 2006; 95: 43–9.
17. Babalis SJ, Papaniclaou E, Kyriakis N, Belessiotis VG. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *J Food Eng* 2005; 75: 205–14.
18. NG PP, Tasrian SM, Law CL. Thin layer method analysis of spouted bed dried Malaysian paddy characteristic drying curves. *J Food Process Eng* 2006; 29: 414–28.
19. Sharifi M. Investigation of drying models of orange slices (Thomson cultivars) and comparsion of its drying time and energy consumption at different conditions. [dissertation]. Tehran; Tehran University; 2007 [in Persian].
- 20- Simal S, Femenia A, Garau MC, Rossello C. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of Kiwi fruit. *J Food Eng* 2005; 66: 323–28.
21. Lewis WK. The rate of drying of soild materials. *Ind Eng Chem* 1921; 13: 427–32.
22. Henderson, SM, Pabis S. Grain drying theory. 1. Temperature affection drying coefficient. *J Agr Eng Research* 1961; 6: 169–70.
23. Page GE. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. [dissertation]. Lafayette; Purdue University; 1949.
24. Togrul IT, Pehlivan D. Modelling of thin-layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *J Food Eng* 2004; 65: 413–25.
25. Menges HO, Ertekin C. Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. *J Food Eng* 2005; 77: 119–25.
26. Verma LR, Bucklin RA, Endan JB, Wratten FT. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE* 1985; 28: 296–301.
27. McMinn WAM. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. *J Food Eng* 2006; 72: 113–23.
28. Zheng-Wei C, Shi-Ying X, Da-Wen S. Microwave–vacuum drying kinetics of carrot slices. *J Food Eng* 2004; 65: 157–64.

## Selection of a mathematical model for drying kinetics of sour cherry (*Prunus cerasus L.*) in a microwave-vacuum dryer

*Ghaderi A<sup>1</sup>, Abbasi S<sup>\*2</sup>, Motevali A<sup>3</sup>, Minaei S<sup>4</sup>*

*1- MSc in Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*2- \*Corresponding author: Associate Prof. Dept. of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: sabbasifood@modares.ac.ir*

*3- MSc in Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*4- Associate Prof. Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

**Received 6 Jun, 2010**

**Accepted 14 Dec, 2010**

**Background and Objective:** In the recent years, the application of microwave–vacuum drying as a novel, effective, and low-cost method for dehydration of various foods has been investigated. Therefore, the objective of the present study was to evaluate the potential of this method in drying sour cherry, as well as to select an appropriate mathematical model for describing its drying kinetics.

**Materials and Methods:** The experimental drying trials were performed at 4 nominal microwave power levels (360, 600, 840, and 1200 Watts) and 4 absolute pressures (200, 400, 600, and 800 mbar) using a microwave–vacuum dryer designed in our laboratory. The drying parameters were determined as functions of absolute pressure and microwave power. Moreover, the fitting rates of experimental data with seven semi-theoretical and empirical models based on  $R^2$ ,  $\chi^2$  and RMSE values were determined and the most appropriate mathematical model was selected.

**Results:** The findings showed that the microwave power and the vacuum level play the major role in the drying rate of sour cherry, such that increasing microwave power and decreasing the drying chamber pressure reduce the drying time significantly. Moreover, the drying process occurred in the falling rate period. Comparison of different models showed that the Middili and co-workers model can be the most suitable model due to its having the highest  $R^2$  and lowest  $\chi^2$ , RMSE values.

**Conclusion:** The findings of this study indicate that the drying process of sour cherry does not show any constant drying rate during dehydration using a microwave–vacuum dryer. Thus, microwave–vacuum drying has a high potential for dehydration of sour cherry and other food and agricultural products due to high efficiency and reasonably short processing times.

**Keywords:** Modeling, Microwave – vacuum drying, Sour cherry, Thin-layer drying