مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال ششم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۰، صفحات ۶۴-۵۵

انتخاب مدل ریاضی برای سینتیک خشک کردن میوه آلبالو در خشک‌کن مایکروویو-خلأ

عبدالرحمن قادری[۱]، سلیمان عباسی[۲]، علی متولی[۳]، سعید مینایی[۴]

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 دریافت: ۸۹/۳/۱۶ تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۲۳

چکیده

سابقه و هدف: در سال‌های اخیر، بررسی کارایی و توانایی خشک‌کن‌های مایکروویو- خلأ 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 خشک‌کردن به وسیله خشک‌کن مایکروویو- خلأ در ۴ سطح توان اسمی مایکروویو (۳۶۰، ۶۰۰، ۸۴۰ و ۱۲۰۰ 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^2 و RMSE انجام شد و سرانجام مناسب‌ترین مدل گزارش شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که توان مایکروویو و میزان خلأ روی 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^2 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-خلأ به دلیل کارایی بالا و زمان کوتاه فرایند، روشی مناسب برای خشک کردن آلبالو و سایر محصولات غذایی و کشاورزی باشد.

واژگان کلیدی: مدل سازی، خشک‌کن مایکروویو-خلأ، آلبالو، خشک کردن لایه نازک

• مقدمه

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 نظیر 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، آنتوسیانین‌ها، ترکیبات فنولی و ملاتونین است که به تسکین درد مفاصل، نقرس و احتمالاً التهاب بافت پیوندی (fibromyalgia) کمک می‌کند (۳). این میوه یکی از محصولات باغی است که دارای فسادپذیری بالایی است و نمی‌توان آن را مدت زمان زیادی نگهداری کرد (۴). علاوه بر این، مصرف تازه‌خوری آن پایین است (۵) و آلبالوی تولید شده عمدتاً به صورت منجمد (۶۰٪)، 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).

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-10-08]

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 شدهٔ 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 عیب‌های ناشی از ترک خوردگی، صدمه دیدگی پوست توسط باران و موارد مشابه نیز مفید است (۳).

با اینکه هنوز هم خشک کردن میوه‌ها و سبزی‌ها توسط گرمای آفتاب 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 مومیِ موجود روی پوست میوه اثر کنترل کننده‌ای در فرایند خشک کردن دارد (۱). بنابراین، استفاده از روش‌هایی مثل خشک کردن تحت خلأ به وسیله مایکروویو می‌تواند در افزایش سرعت خشک کردن این نوع میوه‌ها مؤثر باشد. طی دهه‌های گذشته، تلاش‌های زیادی برای استفاده صنعتی از مایکروویو در فراوری‌های مختلف نظیر صنایع پخت، انجمادزدایی، پاستوریزاسیون، حرارت‌دهی و خشک کردن صورت گرفته است. به‌طوری 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 می گیرد که نیروی محرکه انتقال رطوبت است (۶).

در سال‌های اخیر، خشک کردن مایکروویو- خلأ 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 خلأ و خشک شدن با مایکروویو را در بر دارد و می‌تواند هم کارایی انرژی و هم کیفیت فراورده را بهبود بخشد (۷). هم‌چنین، به علت استفاده از خلأ در خشک‌کن مایکروویو-خلأ، عملیات خشک‌کردن با سرعت بیشتری انجام می‌شود و مدت زمان خشک شدن و انرژی مصرفی کاهش می‌یابد (۸).

خشک‌کردن به روش مایکروویو–خلأ پتانسیل بسیار خوبی برای بهبود کیفیت محصول دارد که در خشک کردن میوه‌ها، سبزی‌ها و دانه‌ها توسط پژوهش‌گران مختلف گزارش شده است (۱۲-۹).

به خشک شدن فراورده‌های غذایی به صورت تک لایه تحت شرایط ثابت دمایی و رطوبتی خشک کردن به روش لایه نازک می‌گویند (۱۳). 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 انبه (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، ۷۰و ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در نهایت مدل میدلی بهترین برازش را با داده‌ها نشان داد (۱۹). *Simal* و همکاران (۲۰۰۵) دقت کاربرد سه مدل ریاضی نمایی (Exponential)، پیج (Page) و انتشاری (Diffusional) را برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن میوه کیوی ارزیابی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل پیج بهترین برازش 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 خشک‌کن جدیدی با کارایی مناسب طراحی کرد. به همین دلیل در این بررسی به منظور ارزیابی توانایی دستگاه خشک کن مایکروویو- خلأ، 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- خلأ ارزیابی شد.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-10-08]

• مواد و روش‌ها

مواد: آلبالوهای مورد آزمایش در تیر ماه ۱۳۸۸ از یکی از باغ‌های اطراف کرج (محمد شهر) تهیه شد. آلبالوهای 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 آلبالوها، نمونه‌های ۲۰ گرمی به کمک آون (دمای ۲ ± ۱۰۵°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 آلبالوها در حدود ۰/۵± ۷۲/۹۸ 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 Micromat 725 آلمان، با توان اسمی ۱۲۰۰ وات، بسامد ۲۴۵۰ مگاهرتز و ابعاد محفظه داخلی ۳۶cm×۳۲cm×۲۳cm) استفاده شد. هم‌چنین، مقدار فشار مطلق سیستم با خلأ سنج (P.V.R مدل VT1 NP ساخت ایتالیا) اندازه‌گیری شد. در نهایت، برای چرخش محفظه (دسیکاتور 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 (۲±۵۰ گرم) از آلبالو توسط خشک کن مایکروویو- خلأ خشک شد.

روش برازش 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 آلبالوها در طول فرایند خشک کردن از فرمول ۱ استفاده شد.

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

MR : نسبت رطوبت (بدون بعد)

M_t: محتوای رطوبت در هر لحظه از فرایند خشک کردن (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)

M_e: محتوای رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)

M_o : محتوای رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)

با توجه به اینکه معمولاً مقدار M_e در مقایسه با M_o و M_t 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).

فرمول ۲:
$$MR = \frac{M_t}{M_o}$$

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

فرمول ۳
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^{N}(\overline{MR}_{pred} - MR_{exp,i})^2}$$

فرمول ۴
$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - m}$$

فرمول ۵
$$RMSE = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

در این رابطه‌ها، $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت تجربی iام

$MR_{pred,i}$: نسبت رطوبت پیشگویی شده iام

N : تعداد مشاهدات

M: تعداد ثابت‌های خشک شدن. بهترین برازشی که می‌تواند ویژگی‌های خشک شدن آلبالو را توصیف کند، با توجه به R^2 بالا، χ^2 و RMSE پایین انتخاب می‌شود.

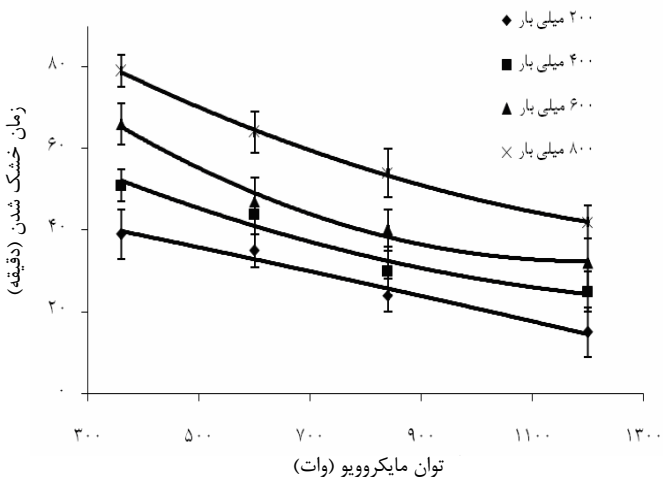
تجزیه و تحلیل آماری: برای انجام محاسبه‌های آماری، هر کدام از آزمون‌ها حداقل در سه تکرار انجام و میانگین و انحراف معیار داده‌ها براساس روش‌های معمول انجام شد.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-10-08]

• یافته‌ها

تأثیر شرایط مختلف توان مایکروویو و میزان خلأ روی زمان خشک شدن: تأثیر توان‌های مختلف مایکروویو در فشارهای مطلق متفاوت روی زمان کلی خشک شدن میوه آلبالو 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 برازش داده شده بر داده‌های شکل۱ رابطه درجه دو بود. معادلات مربوط و هم‌چنین R^2 مربوط به معادلات برازش داده شده در جدول ۲ آورده شده است.



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

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

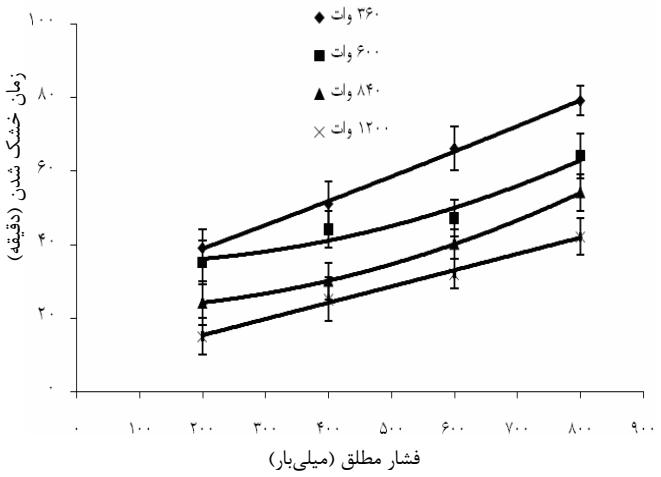
با توجه به معادله‌های ارائه شده در جدول‌های ۲ و ۳ در مرحله بعد، تحلیل رگرسیونی چند متغیره زمان خشک شدن، توان مایکروویو و میزان فشار مطلق سیستم انجام شد. یک رابطه ریاضی فرمول ۶) به دست آمد که رابطهٔ رگرسیونی با R^2=۰/۹۸ بین این سه متغیر را نشان می‌دهد. با استفاده از فرمول ۶ زمان خشک شدن را می‌توان بر 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:

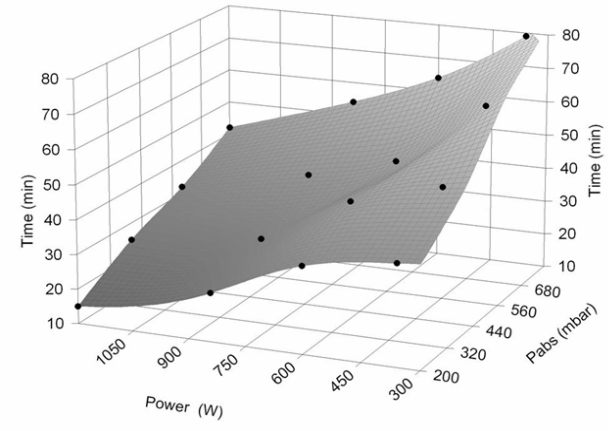
$$Time=۵۳/۰۰۵+۰/۰۴۲۱۴۸V-۰/۰۶۱۰۴۸P+۰/۰۰۰۰۲۶۶V^2 +۰/۰۰۰۰۲۳۰۹۹\ P^2 -۰/۰۰۰۰۲۲۷۸\ PV$$

V: فشار مطلق

P: توان مایکروویو



شکل۲- تأثیر فشارهای مطلق در توان‌های مختلف مایکروویو بر زمان خشک شدن دانه‌های آلبالو



شکل۳- تأثیر همزمان توان مایکروویو و فشار مطلق خشک کن مایکروویو-خلأ بر مدت زمان خشک شدن میوه آلبالو

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-10-08]

برازش داده‌های تجربی با مدل‌های ریاضی: منحنی‌های خشک شدن آلبالو در توان‌های متفاوت 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، محتوای 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.

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

جدول ۱ – مدل های مورد استفاده برای برازش داده‌های تجربی

۱. مدل لوئیس(۲۱، ۱۷)	$MR=exp\ (-kt)$
۲. مدل هندرسون و پابیس(۲۲ ، ۱۴)	$MR=a\ exp(-kt)$
۳. مدل پیج (۲۳)	$MR=exp(-ktn)$
۴. مدل لگاریتمی(۲۴)	$MR=a\ exp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)$
۵. تقریب پخش (۲۵)	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$
۶. ورما و همکاران (۲۶)	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$
۷. میدیلی و همکاران (۹)	$MR = a\exp(-kt^n) + bt$

جدول ۲- رابطه های ریاضی برای پیشگویی مدت زمان لازم برای خشک‌کردن میوه آلبالو در توان ثابت مایکروویو

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

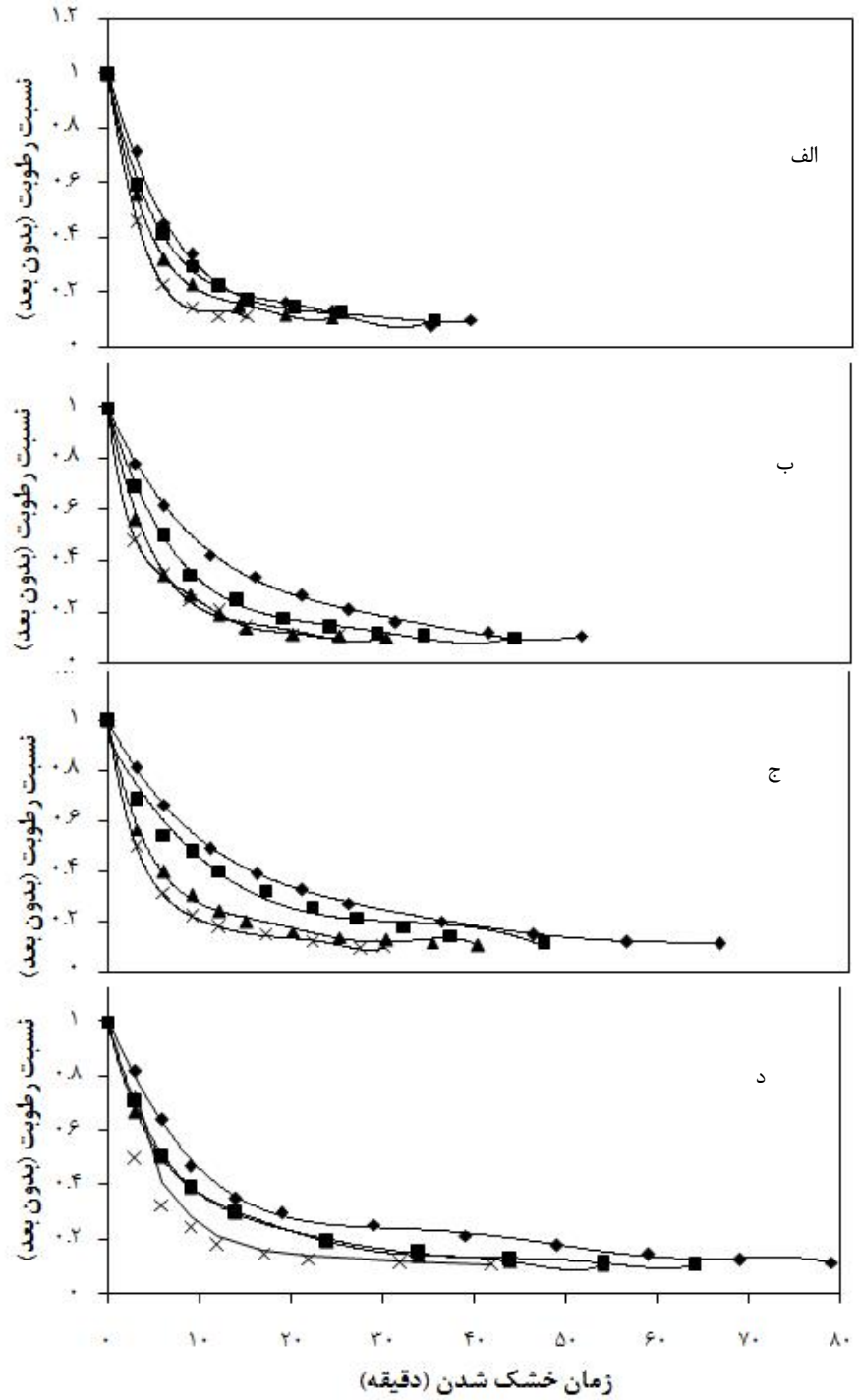
P= توان مایکروویو (وات)

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

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

V= فشار مطلق هوا (میلی‌بار)

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-10-08]



شکل۴- تأثیر توان‌های مختلف مایکروویو، (۳۶۰، ■ ۶۰۰ ، ▲ ۸۴۰ و × ۱۲۰۰ وات) بر نسبت رطوبت دانه‌های تک لایه آلبالو 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

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-10-08]

جدول ۴- مقایسه میزان برازش داده‌های تجربی خشک کردن دانه‌های آلبالو در شرایط مختلف توان مایکروویو و فشار مطلق با مدل‌های نظری

نام مدل		لویس			پیج			هندرسون و پابیس			لگاریتمی			تقریب پخش			ورما و همکاران			میدلی و همکاران		
توان مایکروویو (وات)	فشارمطلق (میلی بار)	RMSE	R^2	χ^2	RMSE	R^2	χ^2	RMSE	R^2	χ^2	RMSE	R^2	χ^2	RMSE	R^2	χ^2	RMSE	R^2	χ^2	RMSE	R^2	χ^2	RMSE	R^2
۳۶۰	۲۰۰	۰/۰۵۴۷	۰/۰۲۳۹	۰/۹۶۹	۰/۰۳۷۰	۰/۰۰۹۶	۰/۹۸۷	۰/۰۵۶۶	۰/۰۲۲۴	۰/۹۷۱	۰/۰۳۹۲	۰/۰۱۰۸	۰/۹۸۶	۰/۰۱۸۶۷	۰/۰۰۱۷	۰/۹۹۷	۰/۰۱۶۲۷	۰/۰۱۱۷	۰/۹۶۷	۰/۰۲۲۰	۰/۰۰۰۴۸	۰/۹۹۶
	۴۰۰	۰/۰۶۲۳۸	۰/۰۳۱۱۳	۰/۹۵۴	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۴۱۷	۰/۹۹۳	۰/۰۶۲۷۵	۰/۰۲۷۵۶	۰/۹۶	۰/۰۴۸۰	۰/۰۱۶۱۸	۰/۹۷۶	۰/۰۱۱۴۶	۰/۰۰۰۷۸	۰/۹۹۸	۰/۰۱۱۵۴	۰/۰۰۰۶۸	۰/۹۵۸	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۰۰۵	۰/۹۹۹
	۶۰۰	۰/۰۵۳۱	۰/۰۲۸۲	۰/۹۶۸	۰/۰۲۰۹	۰/۰۰۰۳۹	۰/۹۹۵	۰/۰۴۹۴	۰/۰۲۱۹	۰/۹۷۵	۰/۰۴۹	۰/۰۲۲۲	۰/۹۷۵	۰/۰۰۶۵۱	۰/۰۰۰۳۵	۰/۹۹۹	۰/۰۰۶۵۵	۰/۰۰۰۳۱	۰/۹۸۹	۰/۰۱۳۰	۰/۰۰۰۱۰	۰/۹۹۹
	۸۰۰	۰/۰۹۲۹	۰/۰۹۴۹	۰/۸۹۸	۰/۰۵۰۲	۰/۰۳۵۲	۰/۹۷۳	۰/۰۹۰۵	۰/۰۸۱۹	۰/۹۱۲	۰/۰۵۹۳	۰/۰۳۵۲	۰/۹۶۲	۰/۰۲۴۹	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹۴	۰/۰۲۶۴۹	۰/۰۰۵۲	۰/۹۷۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۰	۰/۹۹۹
۶۰۰	۲۰۰	۰/۰۶۲۴	۰/۰۳۱۱	۰/۹۵۴	۰/۰۲۴۴	۰/۰۰۴۲	۰/۹۹۴	۰/۰۶۲۷	۰/۰۲۷۶	۰/۹۶۰	۰/۰۴۸۱	۰/۰۱۶۲	۰/۹۷۶	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۰۷۷	۰/۹۹۸	۰/۰۱۵۱۵	۰/۰۰۰۷۲	۰/۹۹۸	۰/۰۰۷۳۸	۰/۰۰۰۰۵	۰/۹۹۹
	۴۰۰	۰/۰۵۶۲	۰/۰۲۸۴	۰/۹۶۴	۰/۰۲۹۹	۰/۰۰۷۲	۰/۹۹۱	۰/۰۵۶۱	۰/۰۲۵۲	۰/۹۶۹	۰/۰۳۸۸	۰/۰۱۲۰	۰/۹۸۵	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۰۵۱	۰/۹۹۹	۰/۰۰۸۲۸	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۹	۰/۰۱۱۴۱	۰/۰۰۰۱۵	۰/۹۹۹
	۶۰۰	۰/۰۸۴۰	۰/۰۶۳۵	۰/۹۲۱	۰/۰۳۴۶	۰/۰۰۰۹۶	۰/۹۸۸	۰/۰۸۳۹	۰/۰۵۶۳	۰/۹۳۰	۰/۰۵۳۷	۰/۰۲۳۱	۰/۹۷۱	۰/۰۰۸۱۷	۰/۰۰۰۵۳	۰/۹۹۹	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۰۵۸	۰/۹۸۹	۰/۰۱۱۷۴	۰/۰۰۰۱۳	۰/۹۹۹
	۸۰۰	۰/۰۷۴۰	۰/۰۵۴۷	۰/۹۲۶	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۰۲۱	۰/۹۹۹	۰/۰۶۱۷	۰/۰۳۴۲	۰/۹۵۲	۰/۰۷۵۲	۰/۰۵۰۸	۰/۹۲۹	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۰۴۱	۰/۹۹۹	۰/۰۰۷۲۸	۰/۰۰۰۴۱	۰/۹۷۹	۰/۰۱۴۰	۰/۰۰۰۱۵	۰/۹۹۸
۸۴۰	۲۰۰	۰/۰۸۱۵	۰/۰۶۶۳	۰/۹۰۹	۰/۰۲۰۹	۰/۰۰۳۹	۰/۹۹۴	۰/۰۷۹۸	۰/۰۵۷۳	۰/۹۲۲	۰/۰۵۳۶	۰/۰۲۵۸	۰/۹۶۴	۰/۰۱۱۹	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۸	۰/۰۱۲۱۹	۰/۰۰۱۱۲	۰/۹۸۹	۰/۰۱۱۸۲	۰/۰۰۰۱۹	۰/۹۹۸
	۴۰۰	۰/۰۸۱۳	۰/۰۵۲۹	۰/۹۲۶	۰/۰۲۲۱	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹۵	۰/۰۷۹۶	۰/۰۴۴۴	۰/۹۳۸	۰/۰۶۱۹	۰/۰۲۶۹	۰/۹۶۹	۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹۸	۰/۰۱۵۱۳	۰/۰۰۰۷۱	۰/۹۹۸	۰/۰۰۶۰۲	۰/۰۰۰۰۵	۰/۹۹۹
	۶۰۰	۰/۰۶۰۰	۰/۰۲۱۶	۰/۹۶۵	۰/۰۲۹۸	۰/۰۰۰۴۴	۰/۹۹۳	۰/۰۶۳۹	۰/۰۲۰۴	۰/۹۶۷	۰/۰۴۴۶	۰/۰۱۰۰	۰/۹۸۴	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۰۱۵	۰/۹۹۹	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۰۱۸	۰/۹۸۹	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۰۰۳	۰/۹۹۶
	۸۰۰	۰/۰۶۰۶	۰/۰۲۹۴	۰/۹۵۸	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۵۴	۰/۹۹۴	۰/۰۶۲۲	۰/۰۲۷۱	۰/۹۶۲	۰/۰۴۲۰	۰/۰۱۲۳	۰/۹۸۲	۰/۰۱۳۴	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۸	۰/۰۱۵۳۴	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۱	۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۰۱۲	۰/۹۹۹
۱۲۰۰	۲۰۰	۰/۰۴۷۸	۰/۰۱۱۴	۰/۹۸۱	۰/۰۲۶۰	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹۵	۰/۰۵۲۶	۰/۰۱۱۱	۰/۹۸۱	۰/۰۳۹۳	۰/۰۰۶۲	۰/۹۸۹	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۰۱۰	۰/۹۹۹	۰/۰۰۵۳۹	۰/۰۰۰۱۷	۰/۹۶۹	۰/۰۴۲۳۵	۰/۰۰۰۲۸	۰/۹۸۶
	۴۰۰	۰/۰۷۵۸	۰/۰۴۰۲	۰/۹۳۵	۰/۰۱۳۱	۰/۰۰۱۰	۰/۹۹۴	۰/۰۷۶۹	۰/۰۳۵۵	۰/۹۴۳	۰/۰۶۳۸	۰/۰۲۴۴	۰/۹۶۱	۰/۰۱۸۴	۰/۰۰۱۷	۰/۹۹۷	۰/۰۱۸۲۴	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹۳	۰/۰۱۹۲۹	۰/۰۰۰۴۴	۰/۹۹۷
	۶۰۰	۰/۰۸۱۱	۰/۰۵۲۶	۰/۹۲۲	۰/۰۲۸۲	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹۱	۰/۰۸۴۱	۰/۰۴۹۵	۰/۹۲۷	۰/۰۴۸۴	۰/۰۱۶۴	۰/۹۷۵	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۰۲۷	۰/۹۹۹	۰/۰۰۶۲۷	۰/۰۰۰۲۱	۰/۹۹۹	۰/۰۰۸۹۰	۰/۰۰۰۰۷	۰/۹۹۹
	۸۰۰	۰/۰۸۵۹	۰/۰۵۹۱	۰/۹۱۱	۰/۰۳۰۳	۰/۰۰۶۴	۰/۹۹۰	۰/۹۱۷۴	۰/۰۵۵۳	۰/۹۱۷	۰/۰۵۴۱	۰/۰۲۰۵	۰/۹۶۹	۰/۰۱۵۵	۰/۰۰۱۴	۰/۹۹۷	۰/۰۱۱۵۵	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹۳	۰/۰۰۹۹۸	۰/۰۰۰۱۰	۰/۹۹۸

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-10-08]

• بحث

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 ۶۵°C که *Doymaz* (۲۰۰۷) مطالعه کرده بود، حدود ۹۵٪ کم شده بود که کاهش قابل توجهی است.

از روی معادلات به دست آمده در این بررسی می‌توان زمان خشک شدن میوه آلبالو را در یک توان ثابت و فشار-های 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 آسانی محاسبه کرد.

لازم 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 (۲۸، ۲۷، ۱۱).

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 دیگر محققان شباهت دارد (۲۸، ۲۷، ۱۱). 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 χ^2 و RMSE به ترتیب در حدود ۰/۰۰۰۰۰۲۹۱ تا ۰/۰۰۲۸ و ۰/۰۰۲۷ تا ۰/۰۴۲۳۵ 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- خلأ 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– خلأ عامل مهمی در زمان خشک شدن میوه آلبالو و ثابت‌های مدل *Midilli* است. با توجه به شاخص های مورد نظر، مدل میدلی بهترین برازش با داده‌های آزمایشگاهی را نشان داد. در ضمن، خشک شدن میوه آلبالو در خشک کن مایکروویو- خلأ 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- خلأ سرعت خشک کردن افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج کلی این بررسی به نظر می‌رسد که خشک کردن با مایکروویو-خلأ 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 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 Agr Sci 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.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-10-08]

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, Agorram 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.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-10-08]

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

*Ghaderi A[1], Abbasi S[*2], Motevali A[3] , Minaei S [4]*

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, χ^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 χ^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 proceesing times.

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

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-10-08]