

ارزیابی بهترین مدل سینتیکی در خشک کردن لایه نازک کامکوات بر مبنای تابع مطلوبیت

میثم پیرمرادی^۱ و مصطفی مصطفایی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۳ تاریخ پذیرش: ۹۶/۸/۲۹

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی

*مسئول مکاتبه b.mostafaei@razi.ac.ir

چکیده

فرآیند خشک کردن یک عملیات حساس و با اهمیت در چرخه نگهداری و حمل و نقل محصولات کشاورزی است. خشک کردن یکی از بهترین راه حل‌ها برای نگهداری و عرضه اکثر محصولات کشاورزی در طول سال می‌باشد. در این تحقیق خشک کردن لایه نازک میوه کامکوات در سه سطح دمایی ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و سه سطح ضخامت ۲، ۴/۵ و ۷ میلی‌متر با سه تکرار انجام گرفت. به منظور پیش بینی روند صحیح خشک شدن، داده‌های حاصل از آزمایش توسط دوازده مدل مختلف برازش شدند. نتایج مدل‌سازی نشان دادند که مدل میدلی در مقایسه با سایر مدل‌های خشک کردن بالاترین ضریب تبیین (۰/۹۹۸۵)، پایین‌ترین مقادیر $RMSE$ ، $MRPD$ و X^2 و بیش‌ترین مقدار را برای تابع مطلوبیت دارد. بررسی خشک شدن لایه‌های نازک میوه کامکوات در دماهای مختلف نشان داد که با افزایش ضخامت لایه‌ها و کاهش دما فرآیند خشک کردن بیشتر به طول خواهد انجامید. بیش‌ترین آهنگ خشک کردن (۱/۳۴ کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک در ساعت) در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۲ میلی‌متر به دست آمد. انرژی فعال‌سازی با ضخامت رابطه مستقیم داشته به طوری که در ضخامت‌های ۲، ۴/۵ و ۷ به ترتیب ۳۴/۲۹، ۷۶/۶۸ و ۸۰/۵۶ کیلوژول بر مول شد. همچنین با افزایش دما و ضخامت، ضریب نفوذ روند افزایشی را نشان می‌دهد و حداکثر مقدار این ضریب $7/594 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه در بیش‌ترین دما و ضخامت حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: تابع مطلوبیت، خشک کردن، کامکوات، مدل سینتیکی

۱- مقدمه

همکاران ۲۰۱۱؛ رامفول و همکاران، ۲۰۱۱). از دیگر پژوهش‌های انجام گرفته بر روی این میوه می‌توان به بررسی بهبود ویژگی‌های کیفی کامکوات نیمه مرطوب با فرآیندهای آبیگری اسمزی و اولتراسونیک (کریمی و همکاران، ۱۳۹۱)، تغییر در الگوی گل‌دهی و تولید میوه کامکوات ناگامی با استفاده از پا کلوبو ترازول (زارع و محمدی، ۱۳۹۴)، مدل‌سازی جرمی میوه کامکوات به همراه برخی ویژگی‌های کیفی (جلیلیان تبار و لرستانی، ۲۰۱۴)، خواص فیزیکی میوه کامکوات (جلیلیان تبار و همکاران، ۲۰۱۳) اشاره کرد. نتایج حاصل از تحقیقات انجام گرفته اهمیت و کاربرد این محصول را نشان می‌دهند و با توجه به فیزیولوژی گیاه، تولید محدود و قیمت بالای آن، استفاده از فرایند خشک کردن یکی از بهترین روش‌ها در عرضه این محصول در طول سال خواهد بود.

میوه کامکوات (*cv. Nagami*) گونه‌ای از جنس *Fortunella* است که نزدیک به خانواده مرکبات محسوب شده و با پوست خورده می‌شود. این میوه دارای شکل بیضی و رنگ نارنجی روشن است. منشأ آن هند و چین بوده اما امروزه در بعضی از نقاط دیگر مانند شمال ایران نیز یافت می‌شود (جلیلیان تبار و همکاران، ۲۰۱۳). این میوه دارای پوسته بیرونی شیرین و ترش مزه با گوشت آبدار است و معمولاً به صورت کامل خورده شده و مزه‌ای شیرین و سپس تند را در دهان ایجاد می‌کند. در تولید فرآورده‌هایی مانند مارمالاد و سس‌ها نیز کاربرد دارد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰ الف).

مطالعات بسیاری بر روی خواص دارویی ترکیبات بیواکتیو بدست آمده از پوست میوه کامکوات انجام شده است که بیشترین ترکیبات، فلاونوئیدها می‌باشند (لین و همکاران، ۲۰۰۸؛ بارکا و

رازی انجام شد. به وسیله کاتر آزمایشگاهی و به کمک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی متر، اقدام به برش ورقه‌های نازک از سطح میوه شد. از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ g و از آن آزمایشگاهی جریان همرفتی (مدل Memmert 600 D 06062) برای خشک کردن ورقه نازک میوه‌ها استفاده شد.

برای تعیین درصد رطوبت، سه نمونه از میوه کامکوات با اندازه‌های بزرگ، کوچک، متوسط به‌طور تصادفی انتخاب گردید. طبق استاندارد ASAE S352.2 به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۳°C در داخل دستگاه آن قرار داده شده و مقدار میانگین آن‌ها به‌عنوان درصد رطوبت بر مبنای تر گزارش شد.

۲-۱- آزمون خشک کردن

به‌وسیله کاتر آزمایشگاهی، میوه به لایه‌های نازک ۲، ۴/۵، ۷ میلی‌متر، برش داده شد. با تماس کردن انتهای کولیس با سطح برش و از طریق عمق‌سنج آن اندازه دقیق ضخامت برش مشخص گردید. در این آزمایش خشک کردن لایه نازک میوه در سه سطح دمایی ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس با سه تکرار انجام گرفت. نمونه‌های برش خورده کامکوات در ظروف کاغذی داخل آن قرار گرفته و توزین آن‌ها در فواصل زمانی مشخصی بعد از خارج کردن از آن انجام شد.

۲-۲- آهنگ خشک کردن

ابتدا به محاسبه آهنگ خشک کردن برش با استفاده از معادله (۱) پرداخته شد (رفیعی، ۱۳۸۵):

$$D.R = \left| \frac{M(t+\Delta t) - Mt}{\Delta t} \right| \quad (1)$$

که در آن $M(t + \Delta t)$ رطوبت در لحظه $(t + \Delta t)$ ، Mt مقدار رطوبت در هر لحظه و Δt فاصله زمانی بین دو رطوبت متوالی برحسب دقیقه می‌باشد.

۲-۳- نسبت رطوبت

دومین گام، محاسبه نسبت رطوبت است. نسبت مقدار رطوبت در لایه‌های بافت داخلی میوه در مقایسه با رطوبت اولیه و نهایی بیانگر این مفهوم بوده و از رابطه (۲) زیر محاسبه می‌شود (سان و وودز، ۱۹۹۴):

$$MR = \frac{M(t) - M(e)}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

که در آن MR ، $M(t)$ ، M_0 و $M(e)$ به ترتیب نسبت رطوبت، رطوبت در مبنای خشک در لحظه t ، رطوبت تعادلی در مبنای خشک و رطوبت اولیه در مبنای خشک (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک)

خشک کردن از طریق انتقال هم‌زمان جرم و حرارت، به‌طور گسترده برای افزایش ماندگاری، تسهیل حمل و نقل، حفظ کیفیت و کاهش افت پس از برداشت محصولات کشاورزی مرسوم است. در مهندسی صنایع غذایی، خشک کردن یک نوع عملیات حرارتی تحت شرایط کنترل شده برای کاهش آب موجود در مواد غذایی با استفاده از تبخیر رطوبت می‌باشد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۲). با کاهش رطوبت از مقدار مشخصی با توجه به نوع محصول این فرآیند سبب محافظت از مواد غذایی شده و همچنین با کاهش فعالیت میکروبی از فساد در طول دوره نگهداری جلوگیری می‌کند (زجاجی و همکاران، ۱۳۹۵). کیفیت محصول خشک شده تابع نحوه خشک شدن بوده و از طرفی بیش خشک کردن محصول به‌ویژه میوه‌ها باعث خسارت و کاهش کیفیت آن‌ها می‌شود. به‌همین دلیل برای انجام و سازماندهی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی، خشک کردن کنترل شده و برای تخمین شرایط خشک شدن محصول می‌توان مدل‌هایی به‌دست آورد (باینی و لانگریش، ۲۰۰۸).

پژوهشگران زیادی بر روی خشک کردن لایه نازک محصولات کشاورزی فعالیت داشته‌اند که از جمله آنها می‌توان به مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک شدن لایه نازک میوه گلابی توسط حیدری و نصیری (۱۳۹۴)، مدل‌سازی خشک شدن ورقه نازک برش‌های خربزه توسط آزادبخت و همکاران (۲۰۱۲)، مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه‌نازک انگور توسط طهماسبی‌پور و همکاران (۱۳۹۳)، بررسی مدل سازی خشک کردن لایه نازک گوجه‌فرنگی در خشک‌کن هوا گرم در تحقیقات سادین و همکاران (۲۰۱۷) و غیره اشاره کرد.

از قانون دوم فیک در فرآیند خشک کردن استفاده می‌گردد. این قانون بر انتشار جرم در طی دوره سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد (کوچکی و همکاران، ۲۰۰۷). فرض بر این است که محصول یک‌بعدی است و این لازمه استفاده از قانون دوم فیک است. رطوبت اولیه دارای یکنواختی بوده و همچنین حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت عمده در برابر انتقال رطوبت است.

هدف از این پژوهش بررسی مدل‌های مختلف خشک شدن لایه‌های نازک کامکوات و انتخاب بهترین مدل سینتیک خشک شدن در دماهای مختلف بر مبنای مفهوم تابع مطلوبیت است تا به الگویی کارآمد جهت خشک کردن این میوه با ضخامت‌های متفاوت دست یافت.

۲- مواد و روش‌ها

ابتدا کامکوات ایرانی از سطح شهر کرمانشاه تهیه و تا زمان انجام آزمایش‌ها در یخچال دمای ۳ درجه سلسیوس نگهداری شد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه

مطلوبیت جزئی پاسخ مینیم (شاخص آماری مورد نظر y) عبارت است از:

$$d_i = \frac{U-y}{U-L} \quad (۸)$$

تابع مطلوبیت کل (Desirability Function) برای هر مدل عبارت است از:

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{1/n} \quad (۹)$$

که در آن‌ها d_i , y , L , U , D و n به ترتیب مطلوبیت جزئی هر پاسخ، مقدار پاسخ (شاخص مربوطه)، کمترین مقدار پاسخ بدست آمده، بیشترین مقدار پاسخ بدست آمده، تابع مطلوبیت کل و تعداد پاسخ‌ها (شاخص‌های آماری) هستند. البته لازم به یادآوری است که وزن و اهمیت هر کدام از شاخص‌ها یکسان فرض شده است.

هم‌چنین محاسبه ضریب نفوذ مؤثر یکی از مسائل مهم در صنایع غذایی موضوع انتقال رطوبت است. با توجه به قانون دوم فیک که معمولاً برای توصیف پدیده نفوذ توسط رطوبت کاربرد دارد خواهیم داشت (ساسیلیک و همکاران، ۲۰۰۶):

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} \quad (۱۰)$$

که در آن، X مقدار رطوبت موضعی در مینای خشک، t زمان، x مشخصه فضایی و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m^2/s) می‌باشد. هم‌چنین حل معادله فیک مورد استفاده در فرایند خشک کردن برای یک تیغه استوانه‌ای شکل به صورت زیر می‌باشد.

$$\text{MR} = \left(\frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \right) = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot D_{\text{eff}} \cdot t}{L^2} \right) \quad (۱۱)$$

که در آن D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر، L نیمی از ضخامت لایه بر حسب متر و t زمان خشک شدن بر حسب دقیقه می‌باشد. رابطه دما و ضریب نفوذ مؤثر توسط معادله آرنیوس بیان می‌شود (ساسیلیک و همکاران، ۲۰۰۶).

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT} \right) \quad (۱۲)$$

در اینجا D_0 ضریب پیش‌نمایی (m^2/s)، E_a انرژی فعال‌سازی برای نفوذ رطوبت (kJ/mol)، T دمای مطلق (K)، R ثابت جهانی گازها ($8.3134 \times 10^{-3} \text{ kJ/mol.K}$) است. با رسم نمودار معکوس دما بر حسب درجه کلون در برابر $\text{Ln}D_{\text{eff}}$ و محاسبه شیب خط برازش شده بر آن، مقدار انرژی فعال‌سازی به دست آمد.

می‌باشد. رطوبت تعادلی به معنای رطوبتی است در دمای مربوط به کاهش وزن ثابت مانده است. نسبت رطوبت در هر لحظه طی خشک شدن به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها وابسته است (دویماز، ۲۰۰۷).

۴-۲- مدل سازی ریاضی

برای مدل سازی خشک کردن لایه‌ای کامکوات، رطوبت نسبی لایه‌های با ضخامت مختلف از محصول برش داده شده به وسیله دوازده مدل رایج ارزیابی می‌شد که در جدول شماره ۱ نمایش داده شده‌اند. برای ارزیابی این مدل‌ها و انتخاب مدل برتر، بیشترین مقدار ضریب تعیین (R^2)، کمترین مقدار میانگین نسبی درصد انحراف (MRPD)، کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و کمترین مقدار مربع کای (X^2) در نظر گرفته شد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۱):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_E) * \sum_{i=1}^N (MR_p - MR_E)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (MR_p - MR_E)^2] * [\sum_{i=1}^N (MR_p - MR_E)^2]}} \quad (۳)$$

$$\text{MRPD} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|MR_p - MR_E|}{MR_E} \quad (۴)$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_p - MR_E)^2 \right]^{1/2} \quad (۵)$$

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_p - MR_E)^2}{N - Z} \quad (۶)$$

که در آن‌ها MR_p همان نسبت رطوبت پیش‌بینی شده، MR_E نیز نسبت رطوبت به دست آمده از آزمایش، N معرف تعداد داده‌ها و Z نیز بیانگر تعداد ضریب ثابت در هر مدل می‌باشد.

در این پژوهش پس از وارد کردن داده‌ها در نرم‌افزار Matlab 2013 نسخه b13، چهار شاخص آماری R^2 ، MRPD، RMSE و X^2 برای این میوه در سه ضخامت، سه دما و سه تکرار محاسبه شد. برای تحلیل نتایج و تعیین بهترین مدل ریاضی از میانگین شاخص‌های آماری استفاده شد.

از آنجایی که ممکن است چهار شاخص آماری مورد بررسی برای مدل‌های مختلف متفاوت باشند و مدلی به تنهایی و هم‌زمان از نظر همه شاخص‌ها بهینه نباشد؛ لذا با تعریف تابع مطلوبیت کل به صورت زیر، هر مدلی که دارای تابع مطلوبیت کل بالایی باشد به عنوان مدل بهینه برای فرایند خشک کردن معرفی می‌شود (مایرز و همکاران، ۲۰۱۶):

اگر بخواهیم پاسخ (شاخص آماری مورد نظر y) بیشینه شود مطلوبیت جزئی آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d_i = \frac{y-L}{U-L} \quad (۷)$$

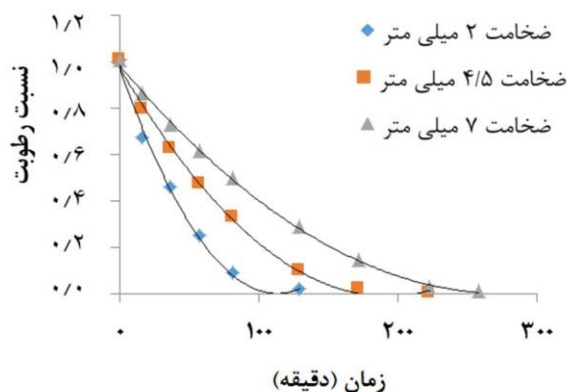
جدول ۱ - مدل‌های رگرسیون خشک شدن مورد استفاده در مدل‌سازی

ردیف	نام مدل	مدل	مرجع
۱	نیوتون	$MR = \exp(-kt)$	لیو و باکر ارکما، ۱۹۹۷
۲	پیچ	$MR = \exp(-ktn)$	دویماز، ۲۰۰۷
۳	پیچ اصلاح شده	$MR = \exp[-(kt)n]$	ورما و همکاران، ۱۹۸۵
۴	هندرسون و پابیس	$MR = a \exp(-kt)$	سیلان و همکاران، ۲۰۰۷
۵	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	یالدز و همکاران، ۲۰۰۱
۶	دوجمله‌ای	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	یالدز و همکاران، ۲۰۰۱
۷	دوجمله‌ای نمایی	$MR = a \exp(-kt) + \exp(-mt)$	امید و همکاران، ۲۰۰۶
۸	تقریب پخش	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	یالدز و همکاران، ۲۰۰۱
۹	میدیلی	$MR = a \exp(-ktn) + ct$	لساسنی و همکاران، ۲۰۰۴
۱۰	هندرسون و پابلیس اصلاح شده	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	اوزدمیر و دورس، ۱۹۹۹
۱۱	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	چینر و ماشرونی، ۲۰۰۲
۱۲	سه‌می وار	$MR = a + bt + ct^2$	هندرسون، ۱۹۷۴

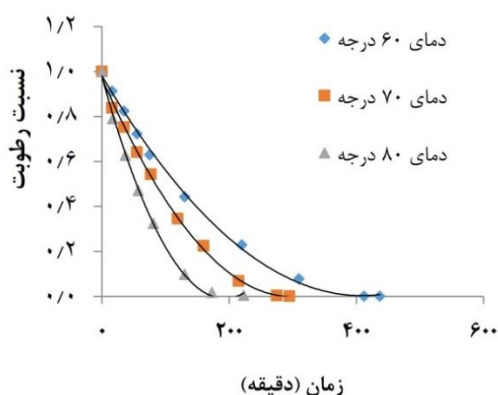
MR: رطوبت (d.b.)، t: زمان (min) و a، b، c: ضرایب g، h، k، m. ثابت‌های مدل است.

۳- نتایج و بحث

در شکل‌های ۱ و ۲ تغییرات نسبت رطوبت مشهود است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود نسبت رطوبت نمونه‌ها به‌طور مداوم طی فرآیند خشک‌کردن به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر کاهش ضخامت و افزایش دما تاثیر معنی‌داری بر زمان خشک‌شدن ورقه‌های کامکوات داشته‌اند. این تاثیر در هر دو شکل به روشنی دیده می‌شود به‌طوری‌که باعث متمایز شدن سینتیک خشک‌شدن لایه‌های کامکوات در ضخامت‌ها و دماهای مختلف شده است. سیدلو و همکاران (۱۳۹۲) علاوه بر این‌که به این موضوع اشاره کرده‌اند، بیان نموده‌اند که دما و سرعت‌های بالا زمان خشک کردن ورقه سیب را کاهش داده است. به‌عبارت دیگر هر چه ضخامت کمتر باشد دمای بالاتر سبب کاهش زمان فرآیند و شیب مربوطه در نمودار نسبت رطوبت خواهد شد. آهنگ تبخیر در لحظات اولیه باگذشت زمان به‌سرعت افزایش می‌یابد و به نقطه اوجی که بیشترین مقدار آهنگ تبخیر است می‌رسد و بعد از آن با گذشت زمان آهنگ تبخیر به‌طور مداوم کاهش می‌یابد (وانگ، ۲۰۰۱).



شکل ۱- تغییرات نسبت رطوبت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس



شکل ۲ - تغییرات نسبت رطوبت در ضخامت ۴/۵ میلی‌متر

کامکوات به وسیله خشک کن هوای داغ و نرم افزار sigma plot بهترین مدل را میدلی معرفی کرده‌اند. در پژوهش محمدی و همکاران (۱۳۸۷) بر روی مدل سازی خشک کردن کیوی به ترتیب مدل های میدلی رگرسیونی و تقریب پخش به عنوان بهترین مدل ارزیابی انتخاب شدند. در تحقیق پیش رو مقادیر ثابت و ضرایب مدل های میدلی و تقریب پخش به دست آمده از مدل سازی در جداول ۳ و ۴ نمایش داده شده است.

مقادیر آزمایشگاهی و مدل شده نسبت رطوبت بر اساس مدل میدلی در شکل ۳ برای دماها و ضخامت های مختلف به نمایش گذاشته شد. بر اساس این نتایج، مدل انتخابی پیش بینی قابل قبول از مقادیر آزمایشگاهی ارائه کرده است.

سرعت خشک شدن لایه های میوه کامکوات در همه دماهای این پژوهش در جدول ۵ نشان داده شده است. بیشترین سرعت در رابطه با دما مربوط به ۸۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۲ میلی متر بود. با توجه به این جدول واضح است که با افزایش دما در ضخامت های کمتر، آهنگ خشک کردن بیشترین مقدار را خواهد داشت. محمدی و همکاران (۱۳۹۰ ب) در بررسی سینتیک خشک کردن برش های میوه ی به، دمای ۸۰°C و ضخامت ۳ میلی متر را به عنوان بیشترین آهنگ خشک کردن معرفی کردند.

آهنگ سرعت خشک کردن لایه نازک انگور نیز به صورت دوره سرعت نزولی نشان داده شد (طهماسبی پور و همکاران، ۱۳۹۳). از طریق رابطه (۱۱) به محاسبه ضریب نفوذ پرداخته شد. بر این اساس، بیشترین دما و ضخامت، حداکثر ضریب نفوذ را به خود اختصاص داده‌اند. این نتایج با محاسبات شعبانی و توکلی پور (۱۳۹۱) مطابقت دارند.

نتایج محاسبه ضریب نفوذ رطوبت بر اساس قانون دوم فیک در جدول ۷ نشان داده شد. کاملاً مشهود است که با افزایش دما و ضخامت این ضریب روندی افزایشی را نشان داده است. محمدی و همکاران (۱۳۹۰ الف) نتایج مشابه را گزارش کردند. برای محاسبه مقدار انرژی فعال سازی که بیانگر ارتباط بین دما و ضریب نفوذ رطوبت است از رابطه (۱۲) استفاده شد و نتایج در جدول ۶ ارائه شده است مقدار انرژی فعال سازی مختلفی توسط محققین برای محصولات مختلف کشاورزی معرفی شده است (فهمی و همکاران، ۱۳۹۳).

آهنگ خشک کردن میوه کامکوات نیز در رویه ای مشابه با شکل ۲، مانند سایر محصولات کشاورزی ابتدا دارای آهنگ تقریباً ثابتی از خشک شدن است؛ یعنی آب بدون تأثیر بافت یا جسم، مجزا تبخیر می شود. شکل ۲ نشان می دهد که بیشترین شیب نمودار مربوط به زمان های ابتدایی است، به عبارت دیگر بالاترین افت رطوبت در کمترین زمان اتفاق می افتد (کمترین مقاومت به تبخیر در لایه های برشی). مدتی بعد از شروع فرآیند این شیب کاهش پیدا کرده و در واقع کمترین کاهش رطوبت در زمان بیش تری انجام گرفته است (بیشترین مقاومت به تبخیر در لایه های برشی). در این بازه شاهد رطوبت بحرانی محصول خواهیم بود؛ زیرا مایع درون سلول های میانی کمتر از دما تأثیر پذیرفته است. به صورت کلی شیب این نمودار به تدریج با کاهش رطوبت همراه با تأثیر منفی بافت و ساختار میوه، کاهش یافت. هرچه دمای آزمایش بیش تر باشد افت رطوبت و شیب نمودار بیش تر است.

رطوبت کامکوات طی فرآیند خشک کردن، ۳/۰۵ بر مبنای خشک و ۷۹ درصد بر مبنای تر بود. بررسی خشک شدن لایه های نازک میوه کامکوات در دماهای مختلف نشان داد که با افزایش ضخامت لایه ها و کاهش دما فرآیند خشک کردن بیشتر به طول خواهد انجامید. بدین صورت که دمای ۶۰ و ضخامت ۷ میلی متر بیشترین زمان را به خود اختصاص داده است و کوتاهترین مدت زمان مربوط به دمای ۸۰ و ضخامت ۲ میلی متر بود. لایه های برش خورده در دمای ۸۰ درجه بیشترین انرژی جهت تبخیر آب موجود را دارا هستند لذا در زمان کوتاه تر آب بیشتری از بافت میوه تبخیر می شود. همان طور که گفته شد ضخامت تأثیر معکوس در زمان خشک شدن میوه دارد چون لایه ضخیم تر نه تنها دارای رطوبت بیشتری است بلکه بر بافت های درونی اثر پوششی داشته و عمق اثر دما بر لایه کاهش می یابد، در نتیجه سبب افزایش زمان خشک شدن گردید.

با انجام مدل سازی از ۱۲ مدل پیشنهادی، بیشترین مقدار ضریب تبیین (R^2)، کمترین مقدار میانگین نسبی درصد انحراف (MRPD)، کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و کمترین مقدار مربع کای (X^2) توسط تابع مطلوبیت کل اشاره شده در رابطه (۹) مورد ارزیابی قرار گرفته و مدل های میدلی و تقریب پخش به ترتیب دارای تابع مطلوبیت ۱ و ۰/۹۸۸۲ بودند. مقادیر مربوط به پارامترهای R^2 ، MRPD، RMSE، X^2 و تابع مطلوبیت برای همه مدل های مورد بررسی در جدول ۲، گزارش شده است. محمدی و همکاران (۱۳۹۰ الف) نیز در مدل سازی سینتیک خشک کردن لایه های ۳، ۵ و ۷ میلی متری

جدول ۲ - میانگین مقادیر R^2 و $RMSE$ و X^2 و $MRPD$ برای مدل‌های بررسی شده

مدل	MRPD	X^2	RMSE	R^2	مطلوبیت کل D
نیوتن	۱۳/۰۷۰۹۶	۰/۰۰۵۵۰۸	۰/۰۵۲۷۳۵	۰/۹۶۲۹	۰/۰۰
پیچ	۵/۹۳۹۶۸۲	۰/۰۰۱۲۰۵	۰/۰۲۵۳۶۹	۰/۹۸۴۶۰۹	۰/۶۹۲۴۹
پیچ اصلاح شده	۵/۹۳۹۷۹۷	۰/۰۰۱۲	۰/۰۲۵۴	۰/۹۸۴۶	۰/۶۹۲۴۶۳
هندرسون و پاییس	۱۰/۶۷۹۲۴	۰/۰۰۴۴۱۲	۰/۰۴۴۹۳	۰/۹۴۷۲۷۸	۰/۰۰
لگاریتمی	۲/۷۷۸۷۰۳	۰/۰۰۰۳۱۶	۰/۰۱۲۷۶۸	۰/۹۹۸۱۴۷	۰/۹۴۴۸۳
دو جمله‌ای	۴/۸۱۲۷۲۶	۰/۰۰۱۲۸۹	۰/۰۱۹۷۱۲	۰/۹۸۸۹۵۶	۰/۷۷۰۰۹۶
دو جمله‌ای نمایی	۹/۹۷۶۶۶۵	۰/۰۰۳۵۶۶	۰/۰۳۹۶۵۴	۰/۹۷۲۲۸۲	۰/۳۴۴۴۸۶
میدیلی	۱/۷۵۹۸۴۱	۰/۰۰۰۱۵۴	۰/۰۰۸۸۳۲	۰/۹۹۸۵۵۹	۱
تقریب پخش	۱/۹۸۴۱۹۴	۰/۰۰۰۱۶۳	۰/۰۰۹۸۷۲	۰/۹۹۸۴۷۱	۰/۹۸۸۲۴۴
هندرسون و پاییس اصلاح شده	۴/۶۰۷۰۱۸	۰/۰۰۱۷۸۴	۰/۰۱۹۹۰۳	۰/۹۸۹۶۰۹	۰/۷۵۲۹۰۸
ونگ و سینگ	۷/۳۶۱۸۵۴	۰/۰۰۰۲۷	۰/۰۳۴۴۹۸	۰/۹۷۹۰۵۶	۰/۵۱۰۹۲۷
سه‌می وار	۵/۳۲۰۱۷۱	۰/۰۰۱۷۶۵	۰/۰۲۶۱۰۵	۰/۹۷۹۸۲۲	۰/۶۵۵۳۲۲

جدول ۳ - مقادیر ثابت و ضرایب مدل میدلی به تفکیک ضخامت و دما

ضریب تبیین R^2	ثابت مدل				دما (°C)	ضخامت (mm)
	A	K (min ⁻¹)	N	c		
	$a = +1.36 - 1.97 E-03 \times t - 9.63 E-03 \times T - 6.10 E-05 \times t \times T + 5.92 E-04 \times t^2 + 6.50 E-05 \times T^2$	$k = +0.17 - 6.31 E-03 \times t - 4.18 E-03 \times T - 7.88 E-05 \times t \times T + 9.59 E-04 \times t^2 + 3.18 E-05 \times T^2$	$n = +1.88 + 0.08 \times t + 0.07 \times T + 6.58 E-04 \times t \times T - 0.01 \times t^2 - 4.64 E-04 \times T^2$	$c = +0.10 + 1.02 E-03 \times t - 2.76 E-03 \times T - 2.76 E-06 \times t \times T - 1.42 E-04 \times t^2 + 1.86 E-05 \times T^2$		
۰/۹۹۸۷	۱/۰۰۲	۰/۰۱۷۵۱	۰/۸۵۸۱	۰/۰۰۰۵۲۳	۶۰	
۰/۹۹۹۸	۱	۰/۰۰۴۲۳۵	۱/۰۲۵	۰/۰۰۰۲۴۷	۷۰	۲
۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۷۴	۰/۰۰۳۳۸۳	۰/۹۷۹۹	۳/۱۱×۱۰ ^{-۸}	۸۰	
۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۵۲	۰/۰۱۷۴۵	۰/۹۳۳۴	۰/۰۰۰۶۳۹	۶۰	
۰/۹۹۷۷	۰/۹۸۷۹	۰/۰۰۵۶۱	۱/۰۱۸	۰/۰۰۰۲۵۱	۷۰	۴/۵
۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۲۳	-۰/۰۰۰۳۴	۱/۱۳	-۰/۰۰۵۰۲	۸۰	
۰/۹۹۵۱	۱/۰۰۴	۰/۰۲۷۰۸	۰/۸۷۹۴	۰/۰۰۱۰۴۳	۶۰	
۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۳۱	۰/۰۰۷۲۵۹	۱/۰۷۵	۰/۰۰۰۸۷۳	۷۰	۷
۰/۹۹۹۰	۰/۹۹۳۳	۰/۰۰۵۰۷۳	۱/۰۶۷	۰/۰۰۰۲۴۳	۸۰	

جدول ۴ - مقادیر ثابت و ضرایب مدل تقریب پخش به تفکیک دمای آزمایش

R^2	A	K (min-1)	C	دما °C
۰/۹۹۹۱	۰/۷۴۳۶	۰/۰۱۳۷۷	۹/۰۰×۱۰ ^{-۶}	۶۰
۰/۹۹۷۴	۰/۸۰۰۱	۰/۰۱۷۴۲	۱/۴۰×۱۰ ^{-۹}	۷۰
۰/۹۹۶۳	۰/۷۲۰۳	۰/۰۲۶۲۴	۱/۲۶×۱۰ ^{-۱۰}	۸۰

جدول ۵- سرعت متوسط خشک شدن در دماها و ضخامت‌های مختلف

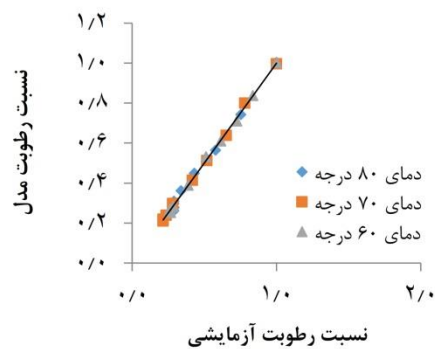
دما			ضخامت Mm	سرعت متوسط خشک شدن (kgw.kgdm ⁻¹ .h ⁻¹)
۸۰ °C	۷۰ °C	۶۰ °C		
۱/۳۴۳۵۰۵	۱/۱۱۲۱۵۶	۰/۸۸۴۷۱	۲	
۰/۹۴۰۱۷۱	۰/۷۷۷۰۴۲	۰/۶۴۹۰۳۴	۴/۵	
۰/۸۶۹۸۹۶	۰/۶۰۲۳۴۱	۰/۳۸۰۳۷۵	۷	

جدول ۶- انرژی فعال‌سازی در ضخامت‌های مختلف

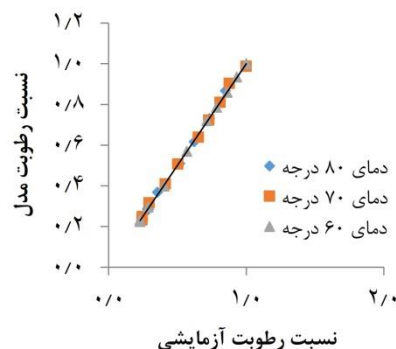
Ea (کیلوژول بر مول)	ضخامت (میلی متر)
۳۴/۲۹	۲
۷۶/۶۸	۴/۵
۸۰/۵۶	۷

جدول ۷- مقادیر ضریب نفوذ رطوبت (m²/s) در دما و ضخامت‌های مختلف خشک کردن

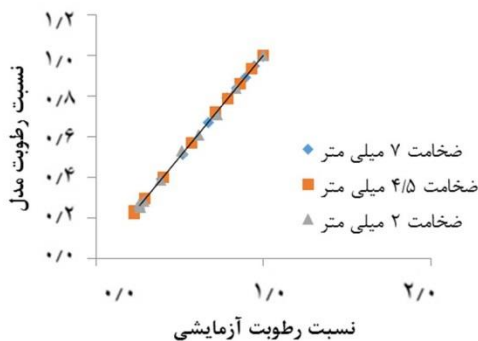
دما	۲ میلی‌متر	۴/۵ میلی‌متر	۷ میلی‌متر
۶۰ °C	۱/۰۱۹ × ۱۰ ^{-۹}	۱/۰۱۴ × ۱۰ ^{-۹}	۱/۵۳۲ × ۱۰ ^{-۹}
۷۰ °C	۱/۱۰۷ × ۱۰ ^{-۹}	۲/۳۹۸ × ۱۰ ^{-۹}	۳/۷۲۱ × ۱۰ ^{-۹}
۸۰ °C	۱/۸۳۴ × ۱۰ ^{-۹}	۴/۶۵۳ × ۱۰ ^{-۹}	۷/۵۹۴ × ۱۰ ^{-۹}



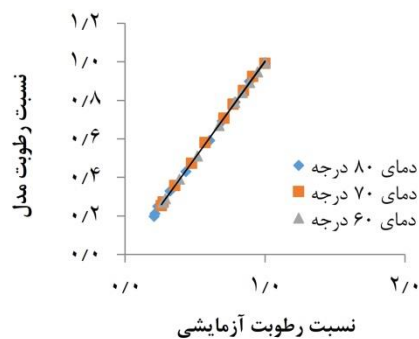
ب



الف



ت



پ

شکل ۳- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و برازش شده داده‌ها توسط مدل میدلی الف- ضخامت ۲ میلی‌متر، ب- ضخامت ۴/۵ میلی‌متر، پ- ضخامت ۷ میلی‌متر، ت- تمام ضخامت‌ها در دمای ۶۰ درجه

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان دادند که در فرآیند خشک شدن کامکوات، آهنگ کاهش رطوبت در دمای بالاتر و ضخامت کمتر، از مقدار بالاتری برخوردار بود. هم‌چنین، مدل میدلی می‌تواند تغییرات ضخامت نمونه را بهتر از سایر مدل‌های مورد مطالعه برآورد کند. براساس نتایج بدست آمده بیشترین دما و ضخامت، حداکثر ضریب نفوذ را به خود اختصاص داده‌اند. ضخامت تأثیر معکوس در زمان خشک شدن میوه دارد چون لایه ضخیم‌تر نه تنها دارای رطوبت بیشتری است بلکه بر بافت‌های درونی اثر پوششی داشته و عمق اثر دما بر لایه کاهش

منابع

- حیدری م. م و نصیری س. م. ۱۳۹۴. مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک شدن لایه نازک میوه گلابی و بررسی اثر دما و سرعت هوای خشک‌کن بر تغییر رطوبت نسبی هوای خروجی. فصلنامه علوم و صنایع غذایی، دوره ۱۲، شماره ۴۸، صفحه ۲۱۵-۲۲۹.
- رفیعی ش. ۱۳۸۵. اصلاح رطوبت تعادلی شلتوک برنج (سپیدرود) برای شبیه‌سازی خشک‌کردن توده‌ی بستر نازک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، دوره ۱۰، شماره ۳، صفحه ۱۷۵-۱۸۳.
- زارع نهندی ف. و محمدی سیلابی ن. ۱۳۹۴. تغییر در الگوی گلدهی و تولید میوه‌ی کامکوات ناگامی با استفاده از پا کلوبوترازول. به زراعی کشاورزی، دوره ۱۷، شماره ۲، صفحه ۵۵۷-۵۶۹.
- زجاجی م.، مظاهری ا. ف.، نماینده س. و مهدیه ا. ۱۳۹۵. بررسی سینتیک خشک‌کردن توت سیاه و میزان انرژی مصرفی در آون ماکروویو. علوم زراعی و تغذیه، دوره ۱۶، شماره ۳، صفحه ۵۷-۶۴.
- سیدلو س. ص.، نعلبندی ح.، قاسم‌زاده ح. ر. و همدی ن. ۱۳۹۲. مدل‌سازی چروکیدگی ورقه‌های سیب در خشک‌کردن همرفتی به‌منظور اعمال در شبیه‌سازی فرآیند انتقال رطوبت و گرما. نشریه مکانیزاسیون کشاورزی، دوره ۱، شماره ۲، صفحه ۲۵-۳۵.
- شعبانی ب. و توکلی‌پور ح. ۱۳۹۱. مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک‌کردن لایه‌نازک فلفل دلمه‌ای. مجله نوآوری در علوم و فناوری غذایی، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۳۳-۴۲.
- طهماسبی‌پور م.، دهقان نیا ج.، سیدلو هریس س. ص. و قنبرزاده ب. ۱۳۹۳. مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه‌نازک انگور پیش تیمار شده اولتراسوند و کربوکسی متیل سلولز. نشریه مکانیزاسیون کشاورزی، دوره ۲، شماره ۱، صفحه ۱-۱۵.
- فهیمی ر.، عسگری ب.، قره بگلو پ.، مختاری ف. و فرزبود پ. ۱۳۹۳. ارزیابی بهترین مدل سینتیک در خشک‌کردن لایه‌ای نازک کدوی سبز به روش جابجایی با هوای داغ. نشریه علوم و تغذیه، دوره ۱۱، شماره ۲، صفحه ۶۳-۷۲.
- قربانی ر.، دهقان نیا ج.، سیدلو هریس س. ص. و قنبرزاده ب. ۱۳۹۲. مدل‌سازی دانسیته ظاهری در طی خشک‌کردن آلوی پیش تیمار شده با اولتراسوند و آبیگری اسمزی. فصلنامه علوم و فناوری‌های نوین غذایی، دوره ۱، شماره ۲، ۲۳-۳۸.
- کرمی ز.، امام‌جمعه ز.، صادقی ماهونگ ع. و شهریاری ز. ۱۳۹۱. بهبود ویژگی‌های کیفی کامکوات نیمه مرطوب با فرآیندهای آبیگری اسمزی و اولتراسونیک. نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، دوره ۲۲، شماره ۴، صفحه ۳۹۵-۴۰۹.

می‌یابد، در نتیجه سبب افزایش زمان خشک‌شدن می‌گردد. نسبت رطوبت نمونه‌ها به‌طور مداوم طی فرآیند خشک‌کردن به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. براساس نمودارهای ارائه شده، افت اولیه رطوبت در نمونه‌ها دارای شیب بیش‌تری است؛ لذا حجم بالایی از رطوبت در مدت زمان کمتری از محصول خارج می‌شود. عمده زمان فرآیند خشک‌شدن به بخش دوم نمودار که دارای شیب کمتری است مربوط می‌شود. لذا با استفاده از دمای بالاتر در مراحل اولیه فرایند، می‌توان زمان لازم برای خشک‌شدن محصول را کاهش داد. هم‌چنین به‌دلیل وجود رطوبت بالا در این مرحله آسیب کمتری به بافت میوه وارد می‌شود.

کریمی س. ر.، شاه‌حسینی ر. و ذاکری س. ۱۳۹۱. ارزیابی فرایند خشک شدن، کمیت اسانس و مدل‌سازی ریاضی گیاه دارویی به‌لیمو (*Lippia citriodora* H. B. et K) با استفاده از جریان هوای گرم. فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، دوره ۲۸، شماره ۴، صفحه ۶۹۸-۶۸۴.

محمدی م.، اسدی م.، پور فلاح ز. و نهاردانی م. ۱۳۹۰ الف. مدل‌سازی ریاضی و محاسبه‌ی ضریب نفوذ مؤثر در فرآیند خشک کردن لایه‌ی نازک برش‌های میوه‌ی کامکوات. مجله‌ی علمی پژوهشی علوم و فناوری غذایی، دوره ۴، شماره ۲، صفحه ۵۶-۴۷.

محمدی م.، پورفلاح ز.، مسکوک‌ی ع. و نهاردانی م. ۱۳۹۰ ب. بررسی سینتیک خشک کردن برش‌های میوه‌ی به (*Cydonia oblonga*) به روش جابجایی هوای داغ. مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری غذایی، دوره ۴، شماره ۲، صفحه ۵۵-۶۴.

محمدی ع.، رفیعی ش.، کیهانی ع. و امام‌جمعه ز. ۱۳۸۷. بررسی مدل خشک کردن ورقه‌های نازک کیوی (رقم هایوارد) در خشک‌کن لایه‌نازک. پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، مشهد، انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران، ۶-۷ شهریورماه، دانشگاه فردوسی مشهد.

Azadbakht M., Darvishi H., Rezaeiasl A. and Asghari A. 2012. **Thin layer drying characteristics and modeling of melon slices (*Cucumismelo*)**. Journal of Agricultural Technology. 8(6): 1867-1880.

Baini R. and Langrish T. A. G. 2008. **An assessment of the mechanisms for diffusion in the drying of bananas**. Journal of food engineering. 85(2): 201-214.

Barreca D., Bellocco E., Caristi C., Leuzzi U. and Gattuso G. 2011. **Kumquat (*Fortunella japonica* Swingle) juice: Flavonoid distribution and antioxidant properties**. Food Research International. 44(7): 2190-2197.

Ceylan İ., Aktaş M. and Doğan H. 2007. **Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits**. Applied Thermal Engineering. 27(11): 1931-1936.

Doymaz I. 2007. **Air-drying characteristics of tomatoes**. Journal of Food engineering. 78(4): 1291-1297.

Giner S. A. and Mascheroni R. H. 2002. PH—Postharvest Technology: diffusive drying kinetics in wheat, Part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. Biosystems Engineering. 81(1): 85-97.

Henderson S. M. 1974. **Progress in developing the thin layer drying equation**. Transactions of the ASAE. 17(6): 1167-1172.

Jaliliantabar F., Lorestani A. N. and Gholami R. 2013. **Physical properties of kumquat fruit**. International Agrophysics. 27(1): 107-109.

Jaliliantabar F. and Lorestani A. N. 2014. **Mass modeling of kumquat fruit (cv. Nagami) with some physical attributes**. International Journal of Biosciences. 5(1): 82-88.

Koocheki A., Razavi S. M. A., Milani E., Moghadam T. M., Abedini M., Alamiyan S. and Izadkhah S. 2007. **Physical properties of watermelon seed as a function of moisture content and variety**. International Agrophysics. 21(4): 349.

Lahsani S., Kouhila M., Mahrouz M., Idlimam A. and Jamali A. 2004. **Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*)**. Energy. 29(2): 211-224.

Lin C. C., Hung P. F. and Ho S. C. 2008. Heat treatment enhances the NO-suppressing and peroxy-nitrite-intercepting activities of kumquat (*Fortunella margarita* Swingle) peel. Food chemistry. 109(1): 95-103.

Liu Q. and Bakker-Arkema F. W. 1997. **Stochastic modelling of grain drying: Part 2. Model development**. Journal of Agricultural Engineering Research. 66(4): 275-280.

Myers R.H., Montgomery D. C. and Anderson-Cook C. M. 2016. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**, 4th Edition, Wiley published, 856 pp.

- Omid M., Yadollahinia A. R. and Rafiee S. 2006. **A thin-layer drying model for paddy dryer**. In Proc. of the International conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies, AIT, Pathumthani, Thailand, 12th (pp. 202-211).
- Özdemir M. and Devres Y. O. 1999. **The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting**. Journal of Food Engineering. 42(4): 225-233.
- Ramful D., Tarnus E., Aruoma O. I., Bourdon E. and T. Bahorun. 2011. **Polyphenol composition, vitamin C content and antioxidant capacity of Mauritian citrus fruit pulps**. Food Research International. 44(7): 2088-2099.
- Sacilik K., Keskin R. and Elicin A. K. 2006. **Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato**. Journal of food Engineering. 73(3): 231-238.
- Sadin R., Chegini G. and Khodadadi M. 2017. **Drying characteristics and modeling of tomato thin layer drying in combined infrared-hot air dryer**. Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 19(1): 150-157.
- Sun D. W. and Woods J. L. 1994. **Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers**. Transactions-American Society of Agricultural Engineers. 37: 1919-1919.
- Verma L. R., Bucklin R. A., Endan J. B. and Wratten F. T. 1985. **Effects of drying air parameters on rice drying models**. Transactions of the ASAE. 28(1): 296-301.
- Wong J. Y. 2001. **Theory of ground vehicles**. by John Wiley & Sons. Inc. ISBN 0-471-354619.
- Yaldiz O., Ertekin C. and Uzun H. I. 2001. **Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes**. Energy. 26(5): 457-465.

Evaluation of the Best Kinetic Model in Thin Layer Drying of Kumquat Based on Desirability Function

M. Pirmoradi¹ and M. Mostafaei^{1*}

Received: 24 June 2017

Accepted: 20 November 2017

¹Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

*Corresponding author: b.mostafaei@razi.ac.ir

Abstract

Drying process is an important and critical operation in the storage and transportation cycle of agricultural products. Drying is one of the best solutions to store and supply most of products throughout year. In this study, thin layer drying of Kumquat fruit was carried out at three temperature levels of 60, 70 and 80 degree of Celsius and three thickness levels of 2, 4.5 and 7 mm with three replications. In order to predict the correct drying process, the data from the experiment were fitted with twelve different models. The obtained results showed that Midilli model has the highest determination coefficient of 99.855, the lowest values of MRPD, RMSE, X^2 and the highest value for the desirability function in comparison with other drying models. Investigating of the thin layer drying of Kumquat fruit at different temperatures showed that increasing the thickness of layers and reducing the temperature, the drying process will last longer. The highest drying rate (1.34 kg/kg dry matter per hour) was obtained at 80 ° C and 2 mm thick. The activation energy has a direct relationship with thickness, which was 34.29, 76.68 and 80.56 kJ per moles in thicknesses of 2, 4.5 and 7, respectively. Also, the penetration coefficient showed an increasing trend by increasing the temperature and thickness. The maximum penetration coefficient was $7.594 \times E-10$ m²/s at the highest temperature and thickness.

Keywords: Desirability function, Drying, Kumquat, Kinetic model