

مدل سازی خشک شدن ورقه نازک پرتقال رقم تامسون

شاهین رفیعی*^۱، محمد شریفی^۲، علیرضا کیهانی^۳، محمود امید^۴ و علی جعفری^۵
۱، ۲، ۳، ۴، ۵، دانشیار، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیاران و استادیار، پردیس کشاورزی
و منابع طبیعی دانشگاه تهران
(تاریخ دریافت: ۸۵/۸/۱۳ - تاریخ تصویب: ۸۷/۳/۹)

چکیده

مرکبات جایگاه بسیار مهمی را در میان تولیدات کشاورزی در دنیا به خود اختصاص داده است. یکی از گونه‌های مرکبات که از نظر اقتصادی و صنعتی حائز اهمیت زیادی است پرتقال می‌باشد. این محصول به صورت میوه تازه، آب میوه غلیظ شده و یا ورقه‌های نازک خشک شده مورد مصرف قرار می‌گیرد. در این تحقیق، با استفاده از خشک‌کن آزمایشگاهی خشک کردن بستر نازک پرتقال رقم تامسون مدلسازی شد. آزمایش‌ها در پنج سطح دمای خشک‌کن (۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد) و سرعت هوای ۰/۵ m/s و ضخامت ورقه ۴ میلی‌متر در سه تکرار اجرا شدند. رطوبت اولیه پرتقال در طی آزمایش ۵/۴ تا ۵/۷ g/g بر پایه خشک بود. رطوبت توده با توزین نمونه‌ها طی فرآیند خشک شدن محاسبه شد. سیزده مدل ریاضی استاندارد بر داده‌های آزمایشی برازش داده شد و کیفیت برازش آن‌ها برحسب سه پارامتر ضریب تبیین (R^2) مربع کای (χ^2) و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها ($RMSE$) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مدل جدیدی که در این مقاله اولین بار استفاده شده است نیز مورد بررسی قرار گرفت. ضریب تبیین، مربع کای و ریشه متوسط مربع خطای داده‌های مدل جدید نسبت به سایر مدل‌ها بهتر و به ترتیب برابر ۹۹/۹۸٪، ۰/۰۰۱۵۴۰۹۲ و ۰/۰۳۴۶۰۹۵۵ بود. بنابراین مدل جدید برای پیش‌بینی تغییرات رطوبتی در فرآیند خشک شدن در بستر نازک ورقه‌های پرتقال بسیار مناسب تشخیص داده شد.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی خشک کردن، ورقه پرتقال رقم تامسون، توده بستر نازک،

رگرسیون چندگانه

مقدمه

مشخصی رساند. برای دستیابی به این هدف باید خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی را مدلسازی نمود تا بتوان بر اساس الگوی به دست آمده از مدل، روند خشک شدن محصول را پیش‌بینی کرد. محققان زیادی در تدوین مدل‌های خشک کردن به روش جابجایی طبیعی و اجباری هوا در محصولات فعالیت نموده‌اند (۸، ۱۸). مرکبات در دنیا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و یکی

خشک‌کردن، فرآیند گرفتن رطوبت به کمک انتقال حرارت و رطوبت است (۷) و یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی می‌باشد که به علت امکان تغییرات نامطلوب در کیفیت مواد غذایی در اثر خشک شدن، کنترل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نتیجه برای نگهداری مطمئن مواد غذایی لازم است آنها را به رطوبت

اکپینار و همکاران (۲۰۰۳) پس از تقسیم فلفل به قطعاتی به طول و عرض ۲cm آنها را در دماهای ۵۵، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و در سرعت جریان هوای ۱/۵ m/s خشک کردند. مدل انتشاری در مقایسه با مدل های دیگر برازش خوبی برای داده‌های خشک‌کن آزمایشگاهی نشان داد.

دویماز (۲۰۰۴) لایه‌های نازک هویج به ضخامت ۰/۵ سانتیمتر را در چهار دمای ۵۰، ۶۵، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت هوای ۰/۵ تا ۱m/s بوسیله خشک‌کن آزمایشگاهی خشک کرد. مدل پیچ نسبت به مدل هندرسون و پابیس نتیجه بهتری نشان داد.

شارما و همکاران (۲۰۰۵) ورقه‌های نازک پیاز را در یک خشک‌کن لایه نازک که انرژی گرمایی آن توسط پرتو فرو سرخ تأمین می‌شد، خشک کردند. آزمایش‌ها در دماهای ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت‌های هوای ورودی ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ متربرثانه انجام شد. مدل پیچ به علت دارا بودن بیشترین میزان R^2 و کمترین میزان χ^2 به عنوان بهترین مدل برای خشک‌کردن ورقه‌های نازک پیاز پیشنهاد شد.

بازکر (۲۰۰۵) خشک‌شدن لایه نازک زردآلو را مورد آزمایش قرار داد. آزمایش‌ها در چهار سطح دمایی 35°C ، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ و شش سطح سرعت جریان هوای ورودی ۱، ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶، ۱/۸ و ۲ متربرثانه انجام شد. در هر آزمایش از دو کیلوگرم زردآلو با رطوبت اولیه (d.b.) ۱۸٪ استفاده شد که پس از شسته شدن رطوبت آن به (d.b.) ۲۵٪ می‌رسید. نمونه‌ها در طول آزمایش در هر ۱۰ دقیقه یکبار تا رسیدن به وزن اولیه با رطوبت (d.b.) ۱۸٪ وزن می‌شدند. به علت نوسان بسیار زیاد رطوبت هوا در طی خشک‌شدن، معادله نسبت رطوبت به M/M_0 خلاصه شد (M و M_0 به ترتیب محتوای رطوبت در هر زمان مشخص کار خشک‌کن و محتوای رطوبت اولیه می‌باشند). پس از تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست آمده از آزمایش با مدل پیچ، در حالی که ثابت خشک‌شدن (k) ثابت فرض شده بود، رابطه‌ای برای توان یا نمای خشک‌شدن (n) به دست آمد. تجزیه و تحلیل‌های بعدی نشان دهنده کارایی بهتر مدل به دست آمده نسبت به مدل پیچ در خشک‌کردن زردآلوی شسته شده بود.

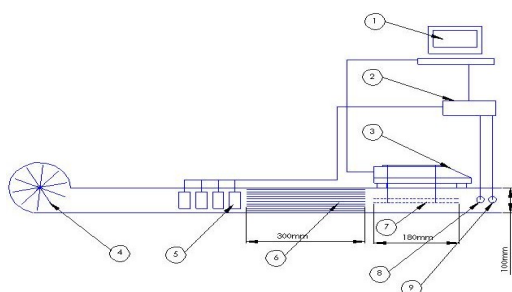
از منابع پر درآمد برای کشورهای تولیدکننده می‌باشند. یکی از مهم‌ترین انواع مرکبات پرتقال است که به صورت میوه تازه، آب میوه غلیظ شده و یا ورقه‌های نازک خشک شده مورد مصرف قرار می‌گیرد و از پوست و دانه آن روغن مرکبات و اسانس برای مصارف طبی استخراج می‌گردد.

مدل‌های سینتیک پخش رطوبت برای تفسیر پدیده خشک شدن مواد دانه ای یا خشک کردن توده بستر نازک^۱ به کار می‌رود (۵). هدف از استخراج مدل خشک شدن محصولات کشاورزی، پیش‌بینی نحوه خشک شدن محصولات می‌باشد (۱۱). اثر تعدادی از پارامترهای مربوط به شرایط خشک شدن مانند ضخامت بستر خشک کردن، دمای خشک کن، رطوبت نسبی هوا و غیره توسط برخی محققین مورد بررسی قرار گرفته است (۱۳، ۲۵). مدلسازی رفتار خشک شدن محصولات مختلف کشاورزی اغلب نیاز به روش‌های آماری برای استخراج مدل رگرسیونی و ضریب تبیین متغیرها دارد. مدل‌های خطی و غیرخطی ابزار بسیار مهمی برای به‌دست آوردن رابطه بین متغیرهای مختلف خشک‌کردن می‌باشد. انتخاب مدل استاندارد که بتوان بر اساس آن مدل خشک شدن محصول مورد نظر را به دست آورد نقش مهمی بر میزان دقت مدل برازش شده دارد.

محققین زیادی در زمینه خشک‌کردن لایه نازک محصولات کشاورزی کار کرده‌اند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها می‌شود. ساسیلیک و همکاران (۲۰۰۶) گوجه‌فرنگی را به صورت ورقه‌های نازک در دمای 70°C به مدت ۲۴ ساعت خشک کردند. متوسط محتوای رطوبتی ۹۳/۳۵٪ بود. مدل تقرب انتشار (توزیع) به علت دارا بودن بیشترین میزان R^2 و کمترین میزان χ^2 به عنوان بهترین مدل برای خشک‌کردن ورقه‌های نازک گوجه‌فرنگی پیشنهاد شد.

ساسیلیک و الیسین (۲۰۰۶) ورقه‌های نازک سیب را با ضخامت‌های ۵ و ۹ میلی‌متر در دماهای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه خشک کردند. محصول ۲۴۰ تا ۴۶۰ دقیقه تحت شرایط خشک شدن قرار داشت. با توجه به آزمایش‌های انجام شده رگرسیون غیرخطی، مدل لگاریتمی نسبت به سایر مدل‌ها برازش بهتری نشان داد.

۱. توده بستر نازک محصول را ضخامت از محصول دانستند که دما و رطوبت نسبی هوا در هنگام عبور از آن تغییر نکند (۴).



۱. رایانه، ۲. میکروکنترلر، ۳. ترازوی دیجیتال، ۴. فن سانتریفیوژ، ۵. گرم‌کن‌ها
۶. محفظه مستقیم‌کننده، ۷. سینی نمونه‌ها، ۸. حسگر دمای هوای خشک‌کن
۹. حسگر رطوبت هوای ورودی

شکل ۱- طرحواره خشک‌کن آزمایشگاهی (۱)

برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا از یک سرعت‌سنج نوع سیم داغ مدل TESTO 405-V1 (ساخت آلمان) با حساسیت $0.1/1 \text{ m/s}$ استفاده شد. نحوه اندازه‌گیری بدین صورت بود که پایه حسگر (سیم داغ) در نقاط مختلف کانال ورودی هوا قرار داده شده و سرعت‌ها قرائت گردید و سرعت متوسط منظور شد. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار کلیه آزمایش‌ها ۳۰ دقیقه بعد از روشن کردن سیستم شروع می‌شد. سپس سینی حاوی نمونه‌ها در محفظه خشک‌کن قرار داده می‌شد. نحوه خشک کردن بدین صورت است که هوای جریان یافته در کانال به وسیله دمنده از گرم‌کن گذشته و پس از گرم شدن به وسیله کانال به سمت توده پرتقال هدایت می‌شود. جریان هوا هنگام گذر از توده رطوبت پرتقال را جذب و باعث گرم شدن آن می‌شود. بدین ترتیب افزایش دما باعث تسریع در خروج آب از بافت نمونه و در نتیجه خشک شدن محصول می‌گردد. 165 گرم ورقه نازک پرتقال بر روی دو سینی توری آلومینیمی مربعی به طول 25 سانتی‌متر به گونه‌ای ریخته شد که روی هر سینی یک لایه از محصول قرار گرفته بود.

روش تهیه نمونه

برای خشک کردن پرتقال از رقم تامسون استفاده شد که یکی از ارقام متداول پرتقال می‌باشد. این رقم با توجه به این‌که هسته ندارد به راحتی ورقه‌ای می‌گردد در نتیجه برای انجام آزمایش مناسب است. پس از شستن سطح پرتقال، به وسیله دستگاه کالباس بر ورقه‌های پرتقال با ضخامت 4 میلی‌متر تهیه شد. آزمایش‌ها خشک کردن در

کاسادا در سال 2002 براساس مدل پیچ، داده‌های جذب رطوبت در طی انبارداری گندم و جو را برازش و سرعت جذب و از دست دادن رطوبت را در شرایط یکسان با هم مقایسه نمود و به این نتیجه رسید که سرعت کاهش رطوبت بیشتر از سرعت جذب رطوبت است. موهاپاترا و سرینیواسا راو در سال 2005 از شش مدل برای برازش منحنی سینتیک خشک شدن گندم استفاده نمود و با ارزیابی مدل‌های رگرسیونی، مدل دو جمله نمایی را مناسب‌تر معرفی کرد.

نحوه خشک کردن بر کیفیت محصول خشک شده تأثیر داشته و از طرفی بیش خشک کردن محصولات به ویژه میوه‌ها باعث خسارت و کاهش کیفیت آن‌ها می‌شود. لذا لازم است برای مدیریت خشک کردن محصولات کشاورزی، نحوه خشک کردن کنترل شده و مدل‌هایی برای پیش‌بینی شرایط خشک شدن محصول به دست آورد.

هدف از انجام این تحقیق، ارائه مناسب‌ترین مدل برای خشک شدن ورقه‌های نازک پرتقال بود. مدل مذکور بر اساس متغیر وابسته (رطوبت توده) و دو متغیر مستقل (زمان و دمای خشک شدن) بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از یک خشک‌کن لایه نازک آزمایشگاهی استفاده شد (شکل ۱). این خشک‌کن از یک فن سانتریفیوژ برای ایجاد جریان هوا و چهار گرم‌کن برقی 500 وات جمعاً به قدرت 2000 وات برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه خشک‌کن و دو حسگر دما (LM35) و رطوبت (خازنی، ساخت فیلیپین) برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده و یک ترازوی دیجیتالی با حساسیت $0.1/1$ و ظرفیت 3100 گرم تشکیل شده است. برای اجرای الگوریتم کنترل و پایش اطلاعات، نرم افزاری در محیط ویژوال بیسیک ۶ پیاده‌سازی شده که اطلاعات مربوط به حسگرهای دما و رطوبت و نیز روشن یا خاموش بودن هر یک از گرم‌کن‌ها را در هر لحظه نمایش می‌دهد (۱).

در این تحقیق به‌طور ابتکاری گنجایش رطوبتی (MC)^۲ توده به‌طور مستقیم مدلسازی شده است. برای مدلسازی ریاضی خشک‌شدن پرتقال، با توجه به یکی بودن روند تغییرات نسبت رطوبت و رطوبت توده نسبت به زمان خشک شدن، از معادلات جدول (۱) استفاده شد که این مدل‌ها در تحقیقات پیشین برای استخراج نسبت رطوبت استفاده شده‌است. مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک‌شدن براساس متغیر مستقل زمان به وسیله نرم‌افزار SPSS 13 استخراج شد. از سه معیار ضریب تبیین (R^2)، مربع کای (χ^2)^۳ و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE)^۴ برای سنجش بهترین مدل استفاده شد که برای هر مدل هرچه مقدار R^2 بیشتر و χ^2 و RMSE کمتر باشد مدل بهتر ارزیابی می‌شود (۱):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{exp,i} - M_{pre,i})^2}{N - n} \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_{pre,i} - M_{exp,i}) \right]^{1/2} \quad (3)$$

که $M_{exp,i}$ رطوبت پرتقال مشاهده شده در i امین اندازه‌گیری، $M_{pre,i}$ رطوبت پرتقال پیش‌بینی شده از مدل در i امین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و n تعداد ثابت‌های به کار رفته در معادله است.

برای هر یک از دماهای خشک‌کن معادلات جدول (۱) استخراج شده و متوسط شاخص‌های دقت برازش در دماهای مختلف برای هر مدل به‌دست‌آمد و با یکدیگر مقایسه‌شده و سه مدل برتر انتخاب و برای مدل‌های برتر ضرایب و ثابت‌ها برای دماهای مختلف به‌دست‌آمد و نمودار منحنی خشک‌شدن ورقه پرتقال نیز رسم شد.

نتایج و بحث

رطوبت اولیه پرتقال در طی آزمایش ۵/۴ تا ۵/۷ g/g بود. با توجه به رطوبت توده در طی خشک شدن آزمایشگاهی پرتقال در دماهای متفاوت، از مدل‌های جدول (۱) برای برازش منحنی خشک شدن در دامنه دمای

پنج سطح دمایی ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان هوای ورودی ۰/۵ m/s و سه تکرار انجام شد. در طی خشک شدن، وزن ورقه‌ها به وسیله ترازوی دیجیتال متصل به رایانه و رطوبت و دمای هوای خشک‌کن در هر ۵ ثانیه اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. خشک شدن تا زمان ثابت شدن تقریبی وزن ورقه‌های نازک پرتقال (تغییرات وزن نمونه تقریباً صفر شد) ادامه داشت. سپس نمونه‌ها در داخل آون قرار داده شد با دمای ۱۰۵°C و پس از خشک‌شدن به مدت ۲۴ ساعت وزن خشک نمونه‌ها به دست آمد (۳). البته از آن‌جا که برای پرتقال مرجعی موجود نبود در نهایت رطوبت ورقه‌ها طی خشک شدن به وسیله معادله زیر محاسبه شد:

$$M = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (1)$$

که در آن:

M: رطوبت نمونه ورقه‌های پرتقال بر پایه خشک (d.b.)

W_w: وزن نمونه پرتقال در طی خشک شدن

W_d: وزن نمونه پرتقال خشک

خشک کردن تا زمانی ادامه داشت که تغییرات رطوبت توده بسیار کم شده در نتیجه شدت خشک شدن تقریباً صفر می‌شد. در این حالت نیازی به خشک کردن تا لحظه رطوبت تعادلی نبود (۱۰، ۱۲). مدت خشک کردن نمونه‌ها برای دماهای مختلف متفاوت بود. رطوبت براساس جرم توده پرتقال محاسبه گردید. که این اندازه‌گیری خشک‌شدن، در زمان‌های مختلف (بر حسب دقیقه) انجام شد.

مدل‌های منحنی خشک شدن توده بستر نازک پرتقال بر اساس مدل‌های توصیه شده توسط محققانی که در این زمینه کار کرده‌اند طبق جدول (۱) انتخاب گردید. در این مقاله مدل دوجمله‌ای اصلاح شد و مدل جدیدی ارائه و میزان دقت آن مورد بررسی قرار گرفت. در اکثر تحقیقات مدل سینتیک خشک کردن بر اساس نسبت رطوبت (MR)^۱ به دست آمده‌است که علت آن کاهش پراکندگی و خوش فرم کردن داده‌ها می‌باشد. برای محاسبه نسبت رطوبت، رطوبت تعادلی نیز نیازاست به عبارتی رطوبت توده در طی خشک کردن به طور غیر مستقیم به دست می‌آید (۲).

2. Moisture Content
3. Chi-Square
4. Root Mean Square Error

1. Moisture Ratio

جدول ۱- مدل‌های رگرسیون خشک‌شدن توده بستر نازک مورد استفاده در مدل‌سازی

ردیف	نام مدل	مدل [#]	مرجع
۱	نیوتن	$M = \exp(-kt)$	(۲۴) ##
۲	پیچ	$M = \exp(-kt^n)$	(۱)
۳	اصلاح شده پیچ	$M = \exp[-(kt)^n]$	(۲۷)
۴	هندرسون و پابیس	$M = a \exp(-kt)$	(۲۸)
۵	لگاریتمی	$M = a \exp(-kt) + c$	(۲۶)
۶	دو جمله‌ای	$M = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(۱۷)
۷	دو جمله‌ای نمایی	$M = a \exp(-kt) + \exp(-mt)$	(۱۳)
۸	ونگ و سینگ	$M = 1 + at + bt^2$	(۱۶)
۹	تامسون	$t = a \ln(M) + b [\ln(M)]^2$	(۲۶)
۱۰	تقریب پخش	$M = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	(۲۶)
۱۱	ورما و همکاران	$M = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	(۲۳)
۱۲	هندرسون و «پابیس اصلاح شده»	$M = a \exp(kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	(۱۴)
۱۳	میدیلی و همکاران	$M = a \exp(-kt^n) + bt$	(۲۶)
۱۴	مدل جدید (دو جمله‌ای اصلاح شده)	$M = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c$	

#-M: رطوبت (d.b.); t: زمان (min) و a, b, c, ضرایب g, h, k و m, ثابت‌های مدل است.

##- در منابع MR است.

جدول ۲- مقایسه دقت برازش مدل‌ها براساس متوسط شاخص‌های آماری در دماهای مختلف

مدل	χ^2	RMSE	R^2
نیوتن	۰/۱۴۲۸۲	۱/۵۷۱۴	۰/۲۴۷۶۹۳
هندرسون و پابیس	۰/۰۱۶۹۹	۰/۱۲۵۲۲	۰/۹۹۲۲۸
لگاریتمی	۰/۰۰۵۰۲	۰/۰۶۵۲۶۰	۰/۹۹۷۸۵
دو جمله‌ای	۰/۰۱۲۲۶	۰/۰۹۲۴۵۲	۰/۹۹۵۵۱
دو جمله‌ای نمایی	۰/۰۵۸۶۶	۰/۲۳۹۲۳	۰/۹۷۰۲۸
ونگ و سینگ	۰/۰۱۶۹۹	۰/۱۲۵۵۲	۰/۹۸۲۸۵
تقریب پخش	۰/۰۵۴۴۴	۰/۲۱۹۷۹	۰/۹۹۵۰۶
ورما و همکاران	۰/۰۵۲۵۵	۰/۲۲۷۰۹	۰/۹۸۳۹۹
هندرسون و پابیس اصلاح شده	۰/۰۱۲۲۶	۰/۰۹۲۴۵۲	۰/۹۹۵۵۱
میدیلی و همکاران	۰/۰۵۶۲۳	۰/۱۵۹۴۰	۰/۹۷۰۵۸
جدید	۰/۰۰۱۵۴	۰/۰۳۴۶۰	۰/۹۹۹۸۶

ثابت‌های خشک‌کردن $k_1(\text{min}^{-1})$, $k_0(\text{min}^{-1})$, $k(\text{min}^{-1})$ و $g(\text{min}^{-1})$ و ضرایب a, b و c (بدون بعد) مدل رگرسیونی سه روش برتر برای هر یک از دماهای خشک‌کن به دست آمد. منحنی خشک شدن براساس داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل‌های جدید، لگاریتمی و دو جمله‌ای

خشک‌کن ۳۰ تا ۷۰ درجه‌سانتی‌گراد استفاده شد. با توجه به مقادیر R^2 , χ^2 و RMSE، مدل‌های رگرسیونی جدید، لگاریتمی و دو جمله‌ای به ترتیب تغییرات رطوبت در طی خشک کردن را بهتر برازش کردند به طوری که ضریب تبیین متوسط سه مدل به ترتیب عبارت از ۰/۹۹/۹۹، ۰/۹۹/۷۸ و ۰/۹۹/۵۵ بود. البته مدل هندرسون و پابیس جوابی مشابه مدل دو جمله‌ای داد ولی به علت ضرایب و ثابت‌های کمتر، مدل دو جمله‌ای نسبت به هندرسون و «پابیس اصلاح شده» ارجحیت دارد. مقادیر ضرایب و ثابت‌های مدل‌ها در جداول ۳ الی ۵ آمده است.

برای ارزیابی مدل‌ها، مقدار بیشتر ضریب تبیین به عنوان اولین شاخص و سپس مقدار کمتر χ^2 و RMSE مورد بررسی قرار گرفت که مدل جدید بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۹/۹۸) و کمترین مقدار χ^2 و RMSE (به ترتیب ۰/۰۰۱۵۴ و ۰/۰۳۴۶۰) را دارا بود در نتیجه بهترین مدل در بین مدل‌های ارائه شده مدل جدید است. بنابراین مدل ارائه شده می‌تواند برای بررسی و پیش‌بینی روند خشک شدن توده بستر نازک پرتقال تامسون مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳- مقادیر ثابت و ضرایب مدل رگرسیونی جدید به تفکیک دمای خشک کن

R^2	C	$g (\text{min}^{-1})$	B	$k (\text{min}^{-1})$	A	دما ($^{\circ}\text{C}$)
۰/۹۹۹۹۵	۰/۴۲۴۶۶	۰/۰۱۲۷۰۲۰	-۱/۵۷۸	۰/۰۰۵۳۳۰	۶/۷۰۷۹	۳۰
۰/۹۹۹۶۸	۰/۵۱۶۱۸	۰/۰۰۵۶۹۵۸	-۶/۴۴۶	۰/۰۰۵۶۹۶	۱۱/۷۴۴۳	۴۰
۰/۹۹۸۱۲	۰/۰۷۶۹۳	۰/۰۱۳۷۰۱۱۸	-۶۸/۷۳۲	۰/۰۱۳۰۹۴	۷۴/۲۵۸۵	۵۰
۰/۹۹۹۹۵	-۶۱/۳۵۱۰۰	-۰/۰۰۰۴۱۸۴۳	۵۰/۸۱۶	۰/۰۰۴۷۲۲	۱۶/۲۰۷۹	۶۰
۰/۹۹۸۵	۱۸۰/۳۳۲۵۰	۰/۰۰۰۹۲۰۵۸	-۳۶۵/۶۱۶	۰/۰۰۲۱۱۴۵	۱۹۰/۷۷۲۷	۷۰

$$M = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c$$

جدول ۴- مقادیر ثابت و ضرایب مدل رگرسیونی لگاریتمی به تفکیک دمای خشک کن

R^2	c	$k (\text{min}^{-1})$	a	دما ($^{\circ}\text{C}$)
۰/۹۹۸۹۱	۰/۲۹۱۲۴۲	۰/۰۰۴۳۴۸	۵/۴۸۱۸۰۷	۳۰
۰/۹۹۹۹۶	۰/۵۱۶۱۷۹	۰/۰۰۵۶۹۶	۵/۳۹۷۹۰۷	۴۰
۰/۹۹۸۰۶	-۰/۰۴۲۴۸	۰/۰۰۸۲	۵/۹۶۰۱۹۲	۵۰
۰/۹۹۷۶۱	-۰/۳۲۵۵	۰/۰۱۰۸۲۲	۶/۳۰۳۹۰۴	۶۰
۰/۹۹۵۰۹	-۰/۲۶۵۹۹	۰/۰۱۶۴۳۵	۶/۰۵۸۱۲۲	۷۰

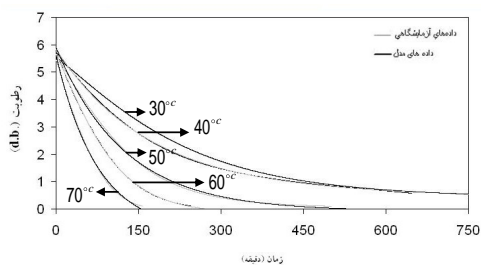
$$M = a \exp(-kt) + c$$

جدول ۵- مقادیر ثابت‌های و ضرایب مدل دو جمله ای به تفکیک دمای خشک کن

R^2	$k_1 (\text{min}^{-1})$	b	$k_0 (\text{min}^{-1})$	a	دما ($^{\circ}\text{C}$)
۰/۹۹۹۳۲	-۰/۰۰۳۳۶	۰/۰۲۱۶۴۴	۰/۰۰۴۰۰۴	۵/۷۰۹۲۱۲	۳۰
۰/۹۹۹۶۷	۰/۰۰۰۷۵	۰/۸۶۰۴۱۳	۰/۰۰۶۱۰۷	۴/۹۷۹۷۵۹	۴۰
۰/۹۹۷۸۷	۰/۰۰۸۴۰۹	۲/۸۰۷۷۷۴	۰/۰۰۸۴۰۹	۳/۱۴۲۹۸۸	۵۰
۰/۹۹۱۷۳	۰/۰۱۲۷۳۹	۳/۷۵۸۸۶۱	۰/۰۱۲۷۳۹	۲/۴۱۵۶۰۴	۶۰
۰/۹۸۸۹۷	۰/۰۱۸۹۷۶	۳/۸۵۰۸۴۹	۰/۰۱۸۹۷۶	۲/۱۱۴۱۶۸	۷۰

$$M = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$$

می‌دهد. با توجه به بررسی شاخص‌های ارزیابی مدل‌های رگرسیونی و بررسی شکل‌های، مدل‌های برتر، کاملاً مشخص می‌گردد که مدل جدید می‌تواند داده‌های آزمایشگاهی را بهتر پیش‌بینی کند.



شکل ۲- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل جدید

به ترتیب در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که از شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) مشاهده می‌شود داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های شبیه‌سازی بسیار نزدیک می‌باشند. با توجه به شکل تغییر رطوبت در طی خشک شدن می‌توان دریافت که هرچه دمای هوای خشک‌کننده بیشتر باشد در دقایق اول خشک شدن کاهش رطوبت سریع‌تر می‌باشد (تگرول و پلیوان، ۲۰۰۲؛ یالدیز و ارتکین، ۲۰۰۱؛ یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱؛ اکپینار و همکاران، ۲۰۰۳). مطابق شکل (۲) داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل بسیار به هم نزدیک بوده به طوری که منحنی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و منحنی حاصل از داده‌های مدل تقریباً روی یکدیگر منطبق شده‌اند ولی منحنی‌های مشابه در شکل (۳) و (۴) کمی انحراف نشان

نتیجه گیری

منحنی خشک شدن توده بستر نازک پرتقال رقم تامسون برای هریک از دماهای خشک کن ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد براساس سه مدل جدید، لگاریتمی و دو جمله‌ای، با تخمین قابل قبولی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد.

سه مدل برتر برای شبیه سازی تغییر رطوبت در طی خشک شدن ورقه نازک پرتقال به ترتیب جدید، لگاریتمی و دو جمله‌ای، با ضریب تبیین ۰/۹۹/۹۸، ۰/۹۹/۷۸ و ۰/۹۹/۵۵ بود.

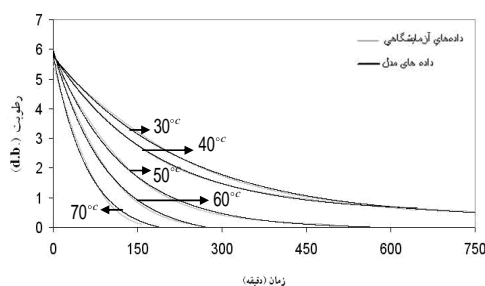
مدل جدید منحنی خشک شدن ورقه نازک پرتقال را با شاخص آماری R^2 ، χ^2 و RMSE به ترتیب برابر ۰/۹۹۹۸، ۰/۰۰۱۵۴ و ۰/۰۳۴۶۰ نسبت به مدل‌های دیگر بهتر برآورد کرد و می توان این مدل را به عنوان مدلی جدید به مدل های شبیه سازی موجود اضافه نمود.

سپاسگزاری

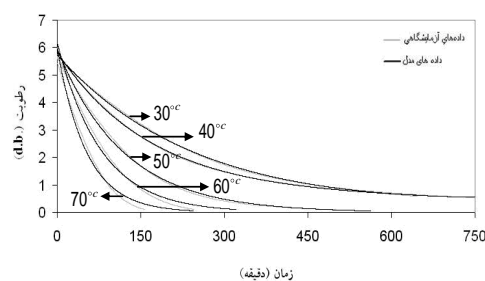
از گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی بیوسیستم دانشگاه تهران برای تأمین وسایل و امکانات مورد نیاز تشکر و قدردانی می‌گردد.

REFERENCES

- Guarte, R.C. 1996. Modelling the drying behaviour of copra and development of a natural convection dryer for production of high quality copra in the Philippines. Ph.D. dissertation, 287. Hohenheim University, Stuttgart, Germany.
- Akpinar, E.K., Y. Bicer, & C. Yildiz. 2003. Thin layer drying of red pepper. Journal of Food Engineering. Vol. 59: 99-104.
- ASABE. 1982. Moisture measurement: grain and seeds. ASABE Standard S352. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St Joseph, MI 49085, USA.
- ASABE. 1982. Moisture measurement: grain and seeds. ASABE Standard S356. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St Joseph, MI 49085, USA.
- Bozkir, O. 2006. Thin layer drying and mathematical modeling for washed dry apricots. Journal of food engineering. Vol. 77(1): 146-151.
- Bruce, D.M. 1985. Exposed- layer barley drying: three models fitted to new data up to 150 oC. Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 32: 337-347.
- Casada, M.E. 2002. Moisture adsorption characteristics of wheat and barley. Transactions of the ASAE. 45(2): 361-368
- C?güs, F. 1994. The effect of movement of solutes on Millard reaction during drying. Ph.D. thesis. Leeds University, Leeds.
- Diamante, L.M. & P.A. Munro. 1993. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slice. Solar Energy. Vol. 51: 271-276.
- Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering. Vol. 61: 359-364.



شکل ۳- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل لگاریتمی



شکل ۴- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل دو جمله‌ای

11. Gast?n, A.L., R.M. Abalone., S.A. Giner. & D.M. Bruce. 2004. Effect of modeling assumptions on the effective water diffusivity in wheat. *Biosystems Engineering*. Vol. 88 (2): 175–185.
12. Giner, S.A. & D.M. Bruce. 1998. Two-dimensional model of steady-state mixed-flow grain drying. Part 2: Experimental validation. *Journal of Agricultural Engineering Research* Vol. 71: 51–66.
13. Giner, S.A. & R.H. Mascheroni. 2002. Diffusive Drying Kinetics in Wheat, Part 2: Potential for a Simplified Analytical Solution. *Biosystems Engineering*. Vol. 81(1): 85d97.
14. Henderson, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*. 17: 1167–1172.
15. Karathanos, V.T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*. Vol. 39: 337–344.
16. Mohapatra, D. & P. Srinivasa Rao. 2005. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*. Vol. 66: 513–518.
17. ?zdemir, M. & Y.O. Devres. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*. Vol. 42: 225–233.
18. Rahman, M. S., C.O. Perera, & C. Thebaud. 1998. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food international research*. Vol. 30(7): 485-491.
19. Ratti, C. & A.S. Mujumdar. 1997. Solar drying of foods: modeling and numerical simulation. *Solar Energy*. Vol. 60: 151-157.
20. Sacilik, K. & A. Elicin. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of food engineering*. Vol. 73(3):281-289
21. Sacilik, K., R. Keskin, & A. K. Elicin. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*. Vol. 73: 231–238.
22. Sharma, G.P., R.C. Verma, & P. Pankaj. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of food engineering*. Vol. 71: 282-286.
23. T?grul, I. T., & D. Pehlivan. 2002. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*. Vol. 55: 209–216.
24. Verma, L. R., R. A. Bucklin., J. B. Endan, & F. T. Wratten. 1985. Effects of Drying Air Parameters on Rice Drying Models. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 28: 296–301.
25. Westerman, P. W., G. M. White., & I. J. Ross. 1973. Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled corn. *Transactions of the ASAE*, Vol. 16: 1136–1139.
26. Yadollahinia, A. 2006. A thin layer drying model for paddy dryer. Published thesis . University of Tehran, P. 107.
27. Yaldiz, O. & C. Ertekin. 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*. Vol. 19: 583-596.
28. Yaldiz, O., C. Ertekin, & H.I. Uzun. 2001. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*. Vol. 26: 457–465.
29. Zhang, Q., & J.B. Litchfield. 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*. Vol. 9: 383–395.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.