

یادداشت تحقیقاتی

انتخاب مدل ریاضی مناسب برای خشک کردن ورقه‌های گوجه فرنگی در خشک کن

خورشیدی

هادی باقری^{*۱} - اکبر عرب حسینی^۲ - محمدحسین کیانمهر^۳

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱/۲۸

چکیده

در این تحقیق مناسب‌ترین مدل ریاضی خشک کردن ورقه‌های گوجه فرنگی، در یک خشک‌کن خورشیدی، انتخاب شد. آزمایش‌های خشک کردن بر روی ورقه گوجه فرنگی در سه سطح ضخامت 3mm، 5mm و 7mm و در دو سطح سرعت هوای 0.5 m s^{-1} و 1 m s^{-1} انجام شد. به منظور پیدا کردن مناسب‌ترین مدل ریاضی خشک کردن، نتایج حاصل از آزمایش با ۹ مدل مختلف، تطبیق داده شد تا بهترین ضرایب در هر مدل بدست آید. نتایج حاصل از آزمایش با ۹ مدل متداول که برای خشک کردن محصولات کشاورزی کاربرد دارند، برآزش داده شد و ضرایب هر مدل بدست آمد. سرانجام مدل Page با $R^2 = 0.9974$ ، $R^2 = 0.01351$ و $RMSE = 0.002$ به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برگزیده شد.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، خشک کن خورشیدی، مدل ریاضی، ورقه گوجه فرنگی

مقدمه

نسبتاً مفید است، ولی این روش نمی‌تواند از مواد غذایی در برابر حمله پرندگان، حشرات، خطر باران زدگی و کپک زدگی محافظت نماید. به علاوه این روش به فضا و زمان زیادی نیاز دارد و ممکن است میزان تلفات مواد غذایی خیلی بالا برود لذا این نحوه خشک کردن اقتصادی نمی‌باشد (Koyuncu et al., 2007). یکی از انواع سبزیجات گوجه فرنگی^۴ می‌باشد. گوجه فرنگی یک گیاه لطیف گرمسیری است که بیشتر در قاره آمریکا رشد می‌کند. کاشت گوجه فرنگی در ایران، حدود ۱۵۰ سال سابقه دارد. گوجه فرنگی از جمله سبزیجاتی است که به دلایل فراوان کشت آن با صرفه است، زیرا این محصول در غذاهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و در شرایطی که امکان استفاده از محصول تازه وجود نداشته باشد به صورت رب، کنسرو، گوجه خشک شده و حتی به صورت پودر استفاده می‌گردد (Ekechukwu and Norton, 1999). بنابر اطلاعات سازمان خواربار و کشاورزی جهانی^۵ میزان سطح زراعی زیر کشت گوجه فرنگی در جهان، در سال 2009 برابر $4.4 \times 10^6 \text{ ha}$ بوده است که تولیدی برابر $153 \times 10^6 \text{ Ton}$ در سال را به خود اختصاص

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها برای نگهداری محصولات کشاورزی و غذایی می‌باشد. با عمل خشک کردن آب آزاد یا آبی که از نظر بیولوژیکی فعال است و موجب رشد میکروارگانیسم‌ها و فعالیت آنزیم‌ها می‌شود، از ماده غذایی حذف شده و مدت نگهداری محصول بسیار طولانی‌تر می‌شود. به‌منظور خشک کردن محصولات کشاورزی روش‌های مختلفی مانند استفاده از حرارت، امواج الکترومغناطیس و سرد کردن سریع وجود دارد. اما از زمان‌های گذشته از تابش خورشید نیز برای خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده شده است. اهمیت این موضوع، از یک طرف صرفه‌جویی در مصرف سوخت و از طرف دیگر جلوگیری از تخریب محیط زیست می‌باشد. همین دلایل، طراحی سیستمی جهت خشک کردن مواد غذایی با استفاده از نور خورشید را اقتصادی و مهم جلوه می‌دهد. اگرچه خشک کردن مواد غذایی به صورت سنتی و در محوطه باز در معرض نور خورشید یک روش قدیمی و در مناطق روستایی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناس ارشد و دانشیاران گروه فنی کشاورزی،

دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان

(Email: h_b13179@yahoo.com)

*- نویسنده مسئول:

4- Tomato (*Lycopersicon esculentum*)

5- FAO

فرنگی مدل Page بدست آمد (Doymaz, 2007). اما در زمینه استفاده از مدل های سینتیک جهت خشک کردن ورقه های گوجه فرنگی در خشک کن خورشیدی اطلاعات بسیار کمی در دست است که ضرورت تحقیق حاضر را بیش از پیش ایجاب می نماید. با توجه به مطالب بیان شده از طریق خشک کردن محصولات کشاورزی می توان فعالیت میکروارگانیسم ها و تغییرات شیمیایی و فیزیکی آن را بطور قابل ملاحظه ای کاهش داد، به ماندگاری بیشتر و سهولت انبارداری و حمل و نقل آسان تر محصول کمک نمود، به عبارتی خشک کردن جایگزین مناسب به منظور بهبود در دسترس بودن محصول می باشد. جهت نیل به این هدف، باید سینتیک خشک شدن، مدل سازی گردد تا بتوان روند خشک کردن را به طور صحیح پیش بینی نمود، تا از بیش خشک شدن محصولات کشاورزی که باعث کاهش کیفیت، تغییر رنگ، طعم و همچنین اتلاف زمان و انرژی می گردد، جلوگیری شود. اهداف انجام این تحقیق عبارتند از: ۱- بررسی روند خشک شدن ورقه های گوجه فرنگی توسط خشک کن خورشیدی ۲- مقایسه نتایج تجربی بدست آمده با مدل های تعریف شده برای سیستم های لایه نازک ۳- استفاده از نرم افزار مطلب و انجام روش های تجزیه و تحلیل آماری جهت انتخاب بهترین مدل روند خشک کردن ورقه های گوجه فرنگی ۴- پیشنهاد یک مدل ریاضی مناسب برای پیش بینی خصوصیات خشک کردن گوجه فرنگی با دقت بالا.

مواد و روش ها

برای انجام آزمایشات یک خشک کن خورشیدی در گروه آموزشی فنی کشاورزی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران طراحی و ساخته شد (Bagheri et al., 2010). دستگاه در محوطه باز زیر نور مستقیم خورشید به صورتی قرار داده شد تا زاویه جمع کننده با افق برابر باشد. برای انجام آزمایش، گوجه فرنگی به صورت تازه از بازار تهیه شد و ابتدا در آزمایشگاه کاملاً شسته شده، سطح آن توسط دستمال خشک شده و سپس در ضخامت ورقه های 5mm، 3mm و 7mm بریده شدند (Rajkumar et al., 2007).

داده است، در حالیکه سطح زیر کشت در ایران در سال ۱۳۸۹ برابر 1.64×10^5 ha و میزان تولید محصول برابر 5.9×10^6 Ton بوده است (Anonymous, 2011). بطور کلی محققین زیادی در زمینه استفاده از مدل های سینتیک در خشک کردن محصولات کشاورزی نظیر خشک کردن قارچ، فندق، سیب زمینی، فلفل سبز و لوبیا سبز، فلفل قرمز، برگ نعنا، زردآلو، انبه، موز، cassava و پسته تحقیق نموده اند که در اکثر آنها مدل Page بعنوان مدل قابل قبول در زمینه خشک کردن محصولات کشاورزی معرفی شده است (Akpınar and Bicer, 2006; Midilli and Kucuk, 2003; Ozdemir and Devres, 1999; Yaldiz and Ertekin, 2001; Aghbashlo et al., 2009; Koua et al., 2009; Tunde-Akintunde, 2011; Saleh and Badran, 2009; Rafiee and Kashaninejad, 2008; Akpınar, 2010). همچنین (Doymaz, 2004) لایه های نازک هویج به ضخامت 0.5 cm را در چهار دمای $50^\circ C$ ، $60^\circ C$ ، $65^\circ C$ و $70^\circ C$ با سرعت هوای 0.5 m s^{-1} تا 1 m s^{-1} به وسیله خشک کن آزمایشگاهی خشک کرد. مقایسه مدل ها در این تحقیق نشان داد که مدل Page نسبت به مدل Henderson and Pabis مناسبتر است (Doymaz, 2004). در سال ۲۰۰۵، Beltagy و همکاران به طراحی خشک کن خورشیدی برای خشک کردن توت فرنگی پرداختند. در این سیستم هوا به صورت اجباری توسط فن در داخل خشک کن جریان پیدا می کرد. در این تحقیق بهترین مدل برای خشک شدن توت فرنگی، مدل Newton با $r = 97\%$ و $\chi^2 = 0.012 - 0.0064$ (Beltagy et al., 2005) به دست آمد. در سال ۲۰۰۷، موقرنژاد و نیکزاد به مطالعه مقایسه داده های حاصل از مدل های برآزش شده جهت خشک کردن گوجه فرنگی در خشک کن و داده های حاصل از طریق شبکه عصبی پرداختند. آن ها دریافتند که به ترتیب شبکه عصبی و مدل Page بهترین برآزش را بر داده های آزمایشگاهی دارند (Movagharnjad and Nikzad, 2007). در سال ۲۰۰۷، Doymaz به آزمایش در زمینه خشک کردن و مدل نمودن گوجه فرنگی در چهار دمای $55^\circ C$ ، $60^\circ C$ ، $65^\circ C$ و $70^\circ C$ در سرعت هوای 1.5 m s^{-1} در خشک کن آزمایشگاهی پرداخت. در این تحقیق بهترین مدل جهت خشک کردن گوجه

جدول علامت ها (Nomenclature)

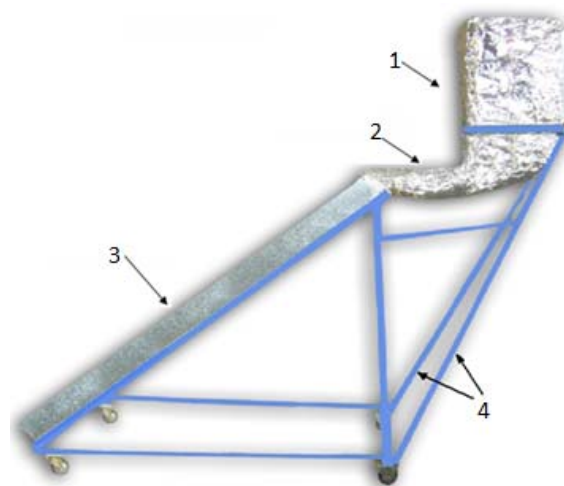
\overline{MR}_{pre}	میانگین مجموع نسبت های رطوبتی پیش بینی شده	a, b, c, g, n	ضرایب تجربی در مدل های خشک کن
N	تعداد مشاهدات	k, k_0, k_1	ثابت های تجربی در مدل های خشک کن
P	تعداد ثابت ها در مدل	M	محتوی رطوبت محصول (%)
R^2	ضریب همبستگی	M_e	رطوبت تعادلی محصول (%)
RH	رطوبت نسبی	M_0	رطوبت اولیه محصول (%)
$RMSE$	ریشه میانگین مربعات خطا	MR	نسبت رطوبتی
t	زمان خشک شدن (min)	$MR_{pre,i}$	i امین نسبت رطوبتی پیش بینی شده
T	دمای هوای خشک کننده ($^\circ C$)	$MR_{exp,i}$	i امین نسبت رطوبتی مشاهده شده
χ^2	مربع کای	\overline{MR}_{exp}	میانگین مجموع نسبت های رطوبتی مشاهده شده

شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه دارای قسمت‌های مختلف از جمله جمع‌کننده خورشیدی، محفظه اصلی خشک‌کن، کانال ارتباطی هوا، شاسی متحرک و همچنین فن الکتریکی می‌باشد. پس از محاسبه زمان برای خشک شدن ورقه نازک گوجه فرنگی تا نسبت رطوبت ۱۰٪ برای شرایط مختلف خشک شدن، داده‌های به دست آمده بوسیله آزمایش فاکتوریل با دو فاکتور سرعت هوای خشک کردن در دو سطح 0.5 m s^{-1} و 1 m s^{-1} و ضخامت در سه سطح 3mm، 5mm و 7mm بر اساس طرح کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل شد. برای ارزیابی سیستم خشک‌کن، بدست آوردن نرخ خشک شدن محصول ضروری است. اما گاهی اوقات انجام تمام آزمایشات برای همه محصولات اقتصادی نمی‌باشد. بنابراین استفاده از مدل‌ها به منظور شبیه‌سازی و جهت پیش‌بینی نرخ خشک شدن محصولات مختلف یک راه حل آسان و مفید است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

نسبت رطوبتی مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود (Shanmugam and Natarajan, 2005)، ولی با توجه به نوسانات مداوم در رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده و با توجه به کوچک بودن مقدار M_e برای زمان‌های طولانی و صرف نظر از این پارامتر، از رابطه (۲) برای تعیین نسبت رطوبت استفاده شد (Aktaş et al., 2008; Doymaz, 2007).

در طول آزمایشات، میزان دما و رطوبت هوای محیط، دمای خروجی جمع‌کننده خورشیدی، دمای خروجی محفظه خشک‌کن و دمای صفحه جاذب، بطور جداگانه توسط ترموکوپل (مدل K با دقت $\pm 1^\circ \text{C}$) و رطوبت سنج‌های (مدل Tivan, HT.3006 با دقت $\pm 3\% \text{ RH}$) نصب شده در سیستم قرائت شد. برای قرائت دمای صفحه جاذب از دو ترموکوپل نوع K، یکی در فاصله 50cm از قسمت بالای جمع‌کننده و دیگری در فاصله 50cm از پایین جمع‌کننده استفاده گردید. مقدار متوسط داده‌های برداشت شده توسط دو ترموکوپل بعنوان دمای جمع‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. برای قرائت میزان دمای ورودی و خروجی در محفظه اصلی خشک‌کن از ترموکوپل‌هایی استفاده شد که دقیقاً یکی در قسمت ورودی محفظه خشک‌کن بعد از کانال انتقال هوا از جمع‌کننده به خشک‌کن و دیگری در قسمت خروجی محفظه خشک‌کن قبل از فن قرار داشتند. برای قرائت میزان تابش خورشیدی در هر ساعت، از دستگاه شیدسنج (مدل PSP-EPPLY با دقت $1 \text{ cal min cm}^{-2}$) استفاده شد که دستگاه مذکور در محیط باز و در راستای عمود بر راستای نور خورشید نصب شد. همچنین برای ثبت میزان دمای هوای محیط از دماسنج جیوه‌ای و برای ثبت سرعت هوای محیط نیز از سرعت سنج (مدل Taiwan, AVM-07 با دقت $\pm 3\% + 0.1 \text{ ms}^{-1}$) استفاده شد. آزمایشات بر روی ورقه‌های گوجه فرنگی در ضخامت ورقه‌های 3mm، 5mm و 7mm و دو سرعت هوای 0.5 m s^{-1} و 1 m s^{-1} انجام شد و هر آزمایش سه بار تکرار شد. دستگاه خشک‌کن خورشیدی استفاده شده در این تحقیق در



شکل ۱- خشک‌کن خورشیدی مورد استفاده در این تحقیق: ۱- محفظه خشک‌کن ۲- کانال ارتباطی هوا ۳- جمع‌کننده خورشیدی ۴- شاسی

Fig. 1. Schematic of solar dryer in experimental: 1- Dryer chamber 2- Air channel 3- Collector 4- Chassi

(Akpınar *et al.*, 2003)**نتایج و بحث****اثر سرعت و ضخامت روی زمان خشک شدن**

نتایج به دست آمده از آزمایشات خشک شدن ورقه گوجه فرنگی با سرعت هوای 0.5 m s^{-1} و 1 m s^{-1} و ضخامت های 3mm، 5mm و 7mm در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که جدول ۲ نشان داده شده است، اثر فاکتور ضخامت بر روی مدت زمان خشک شدن در سطح ۱ درصد معنی دار بوده و اثر فاکتور سرعت هوا معنی دار نمی‌باشد. میانگین زمان خشک شدن بر اساس ضخامت ورقه‌های گوجه فرنگی در محفظه خشک کن به وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن مقایسه شد و نتایج در شکل ۲ آورده شده است. حروف غیر هم نام نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح یک درصد است. بر اساس شکل ۲، با کاهش ضخامت 3mm تا 7mm زمان خشک شدن به طور معنی دار افزایش می‌یابد. بیشترین زمان خشک شدن مربوط به ضخامت 7mm و کمترین زمان مربوط به ضخامت 3mm می‌باشد.

نتایج برآزش مدل‌ها

پس از بدست آوردن مقادیر نسبت رطوبت حاصل از داده های آزمایشی در سرعت های مختلف خشک کردن، ۹ مدل نشان داده شده در جدول ۲ روی منحنی های خشک شدن برآزش داده شدند. سپس با توجه به مقادیر ضریب همبستگی (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) مدل های مختلف خشک شدن لایه نازک ارزیابی شدند. نتایج حاصل از برآزش داده های آزمایشگاهی با مدل های ارائه شده نشان داد که تقریباً همه مدل ها مناسبند اما دو مدل Page و مدل Tow-term، فرآیند خشک شدن ورقه های گوجه فرنگی را با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل ها پیش بینی می‌کنند. با توجه به اینکه مدل Tow-term نسبت به مدل پیچ دارای ضرایب بیشتری است، مدل Page بعنوان مناسبترین مدل انتخاب شد. ضرایب و شاخص های آماری مربوط به این مدل ها در جداول ۳ الی ۵ آورده شده است.

با توجه به نتایج موجود در جداول ۳ تا ۵ برای خشک شدن ورقه‌های گوجه فرنگی در ضخامت های 3mm، 5mm و 7mm، در هر دو سطح سرعت جریان هوا، از میان مدل‌های بکار رفته در این تحقیق، مدل Page خشک شدن ورقه های گوجه فرنگی را با دقت بیشتری پیش بینی کرد.

در سرعت 1 m s^{-1} برای ضخامت 3mm مقدار ضریب همبستگی در مدل Page، برابر 0.995 و میانگین $RMSE$ و χ^2 به ترتیب برابر 0.008846 و 0.0006261 بود و همچنین مقدار ضریب همبستگی

$$MR = (M - M_e) / (M_o - M_e) \quad (1)$$

$$MR = M / M_o \quad (2)$$

برای مدل سازی خشک شدن لایه نازک گوجه فرنگی از نسبت رطوبت در طی خشک شدن نمونه‌ها استفاده شد. نسبت رطوبت به دست آمده در طی آزمایش‌ها با ۹ مدل از مدل‌های استاندارد خشک شدن لایه نازک محصولات کشاورزی که در جدول ۱ نشان داده شده است، مقایسه گردید.

برآزش منحنی های خشک کردن

مدلهای مذکور بر اساس متغیر وابسته (نسبت رطوبت ورقه های گوجه فرنگی) و دو متغیر مستقل (زمان خشک شدن و ضخامت ورقه ها) بر داده‌های آزمایشگاهی برآزش داده شدند. برای برآزش مدل های استاندارد خشک شدن لایه نازک با داده‌های آزمایشی، از محیط برآزش منحنی‌های نرم افزار MATLAB 2007 استفاده شد. برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب همبستگی R^2 ، مربع کای χ^2 و ریشه میانگین مربعات خطا $RMSE$ استفاده شد. این پارامترها از روابط (۳) الی (۵) بدست می‌آیند (Sacic and Elicin, 2006).

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{per,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{per} - MR_{exp,i})^2} \right] \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^P ((MR_{exp})_i - (MR_{pre})_i)^2}{P - z} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i=1}^P ((MR_{pre})_i - (MR_{exp})_i)^2} \quad (5)$$

که در این معادلات p تعداد مشاهدات (داده‌ها) و z تعداد ثابت می‌باشند.

برای هر یک از دماهای خشک کن، معادلات جدول ۱ استخراج شده و متوسط شاخص های دقت برآزش در دماهای مختلف برای هر مدل بدست آمد و با یکدیگر مقایسه شده و مدل برتر انتخاب و برای مدل های ارائه شده ضرایب و ثابت ها به دست آمد و نمودار منحنی خشک شدن ورقه گوجه فرنگی نیز رسم شد. مدلی که R^2 بالاتر، χ^2 و $RMSE$ پایینتری را به خود اختصاص داده باشد، تغییرات نسبت رطوبت را در طی خشک شدن مناسب تر پیش بینی می‌کند

1- Curve fitting

2- Correlation coefficient

3- Chi-square

4- Root mean square error

و χ^2 به ترتیب برابر 0.00992 و 0.00108 بود. در ضخامت 7mm مقدار ضریب همبستگی در سرعت 1 m s^{-1} در مدل Page برابر 0.9991 و میانگین $RMSE$ و χ^2 به ترتیب برابر 0.01264 و 0.001917 بود و همچنین مقدار ضریب همبستگی در سرعت 0.5 m s^{-1} برای مدل Page برابر 0.9974 و میانگین $RMSE$ و χ^2 به ترتیب برابر 0.02147 و 0.005529 بود.

در سرعت 0.5 m s^{-1} برای مدل Page برابر 0.9999 و میانگین $RMSE$ و χ^2 به ترتیب برابر 0.01225 و 0.001201 بود. مقدار ضریب همبستگی در سرعت 1 m s^{-1} برای ضخامت 5mm در مدل Page برابر 0.9989 و میانگین $RMSE$ و χ^2 به ترتیب برابر 0.01351 و 0.00201 بود و همچنین مقدار ضریب همبستگی در سرعت 0.5 m s^{-1} برای مدل Page برابر 0.9995 و میانگین $RMSE$

جدول ۱- معادلات ریاضی خشک کردن بکار رفته در خشک کن خورشیدی

Table 1. Mathematical models given for the solar drying curves

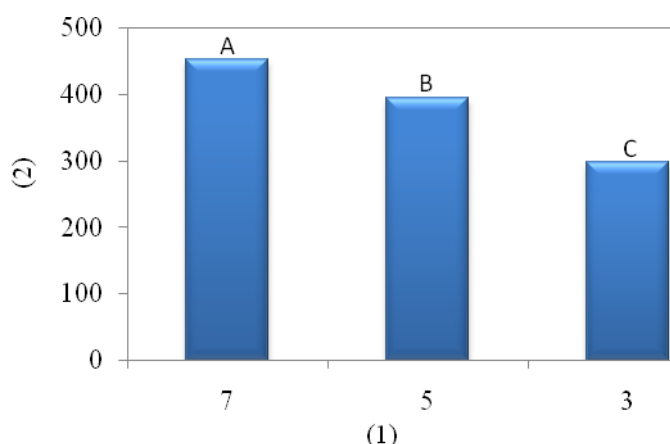
منبع	مدل	نام مدل	ردیف
(Aghbashlo et al., 2009)	$MR = \exp(-kt)$	Newton	1
(Aghbashlo et al., 2009)	$MR = \exp(-kt^n)$	Page	2
(Aghbashlo et al., 2009)	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis	3
(Aghbashlo et al., 2009)	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic	4
(Aghbashlo et al., 2009)	$MR = a \exp(-kt) + c \exp(-gt)$	Tow-term	5
(Hayaloglu, 2007)	$MR = \exp[-(kt)^n]$	Modified Page	6
(Hayaloglu, 2007)	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Two-term exponential	7
(Hayaloglu, 2007)	$MR = 1 + at + ct^2$	Wang and Singh	8
(Hayaloglu, 2007)	$MR = a \exp(-kt) + ct$	Midilli et al	9

جدول ۲- نتایج واریانس متغیرها برای پارامتر زمان خشک شدن در محفظه خشک کن

Table 2. parameter variation results for drying time in the dryer chamber

مقدار F	مقادیر میانگین مربعات زمان خشک شدن (M.S)	درجه آزادی (df)	منابع تغییرات (sov)
0.05 ^{ns}	34.7222	1	سرعت هوا
80.44 ^{**}	51616.6667	2	ضخامت
0.11 ^{ns}	72.2222	3	سرعت هوا × ضخامت
-	641.6667	12	خطا

** وجود اختلاف معنی دار در سطح ۱٪، ^{ns} عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵٪



شکل ۲- اثر ضخامت ورقه های گوجه فرنگی بر میانگین زمان خشک شدن:

۱- ضخامت (میلیمتر) ۲- میانگین زمان خشک شدن (دقیقه)

Fig. 2. Effect of thickness of tomato slice on the average drying time: 1- Thickness (mm) 2-Average of drying time (min)

جدول ۳- نتایج حاصل از برآزش کردن مدل های Newton، Henderson and Pabis، Modified Page، Two-term، Wang and Singh،

و Logarithmic، Page، Midilli *et al* و Tow-term exponential برای ورقه گوجه فرنگی با ضخامت 3mm

Table 3. Statistical results of 9 thin layer drying models at different drying conditions with 3 mm thickness

<i>n</i>	<i>g</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	χ^2	RMSE	R^2	مدل	سرعت هوا
-	-	-	-	0.01671	0.01812	0.04487	0.987	Newton	
-	-	-	1.054	0.01787	0.01287	0.04011	0.9900	Henderson and Pabis	
1.314	-	-	-	0.00480	0.00063	0.00885	0.9995	Page	
-	-	0.042	1.088	0.01663	0.00959	0.03701	0.9910	Logarithmic	
-	0.0302	5.195	-4.172	0.35710	0.00064	0.01032	0.9991	Tow-term	1 m s ⁻¹
1.402	-	-	-	0.00492	0.00065	0.00905	0.9904	Modified Page	
-	-	-	4.547	0.38090	0.00187	0.03909	0.9900	Two-term exponential	
-	-	0.152	2.410	-	0.01785	0.01425	0.9836	Wang and Singh	
1.759	-	0.054	2.025	0.00748	0.00074	0.04258	0.9899	Midilli et al	
-	-	-	-	0.01270	0.03149	0.05920	0.9770	Newton	
-	-	-	1.068	0.01390	0.02162	0.05200	0.9840	Henderson and Pabis	
1.41	-	-	-	0.00230	0.00120	0.01230	0.9990	Page	
-	-	0.094	1.145	0.01150	0.01230	0.04190	0.9910	Logarithmic	
-	0.0264	12.54	-11.6	0.02790	0.00186	0.01760	0.9980	Tow-term	0.5 m s ⁻¹
1.512	-	-	-	0.00330	0.00065	0.00179	0.9914	Modified Page	
-	-	-	11.20	0.03140	0.00187	0.02800	0.9930	Two-term exponential	
-	-	0.171	3.001	-	0.01785	0.01521	0.9801	Wang and Singh	
1.801	-	0.051	2.173	0.00728	0.00274	0.03058	0.9829	Midilli et al	

جدول ۴- نتایج حاصل از برآزش کردن مدل های Newton، Henderson and Pabis، Modified Page، Two-term، Wang and Singh،

و Logarithmic، Page، Midilli *et al* و Tow-term exponential برای ورقه گوجه فرنگی با ضخامت 5mm

Table 4. Statistical results of 9 thin layer drying models at different drying conditions with 5 mm thickness

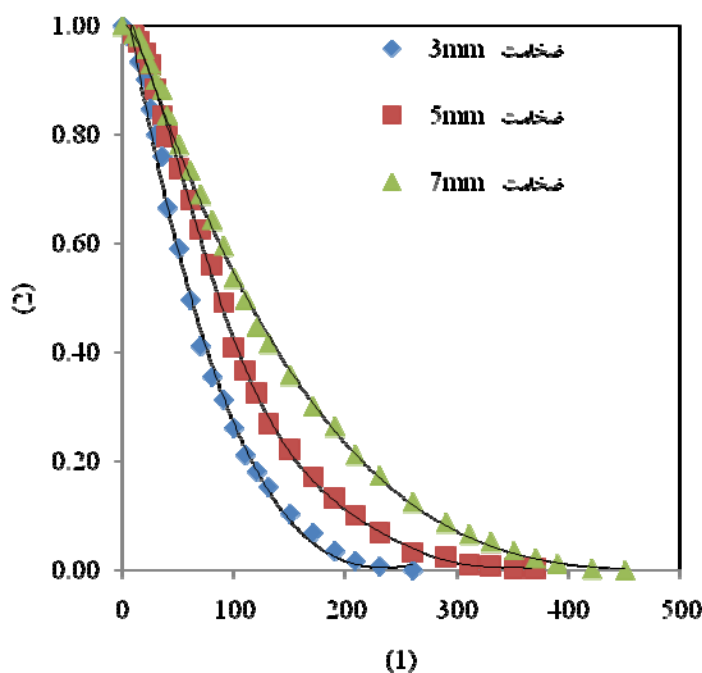
<i>n</i>	<i>g</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	χ^2	RMSE	R^2	مدل	سرعت هوا
-	-	-	-	0.01003	0.02429	0.04499	0.9872	Newton	
-	-	-	1.054	0.01077	0.01710	0.03943	0.9910	Henderson and Pabis	
1.304	-	-	-	0.00258	0.00201	0.01351	0.9999	Page	
-	-	-0.051	1.093	0.00955	0.00097	0.00307	0.9994	Logarithmic	
-	0.01862	6.494	-5.50	0.02122	0.01399	0.00176	0.9991	Tow-term	1 m s ⁻¹
1.112	-	-	-	0.00322	0.00315	0.01905	0.9991	Modified Page	
-	-	-	4.219	0.03109	0.01187	0.00391	0.9911	Two-term exponential	
-	-	0.242	2.201	-	0.01501	0.02405	0.9899	Wang and Singh	
1.852	-	0.049	2.321	0.0174	0.01371	0.04351	0.9889	Midilli et al	
-	-	-	-	0.00835	0.04239	0.05944	0.9788	Newton	
-	-	-	1.077	0.00921	0.02603	0.04864	0.9870	Henderson and Pabis	
1.399	-	-	-	0.00129	0.00108	0.00992	0.9995	Page	
-	-	-0.094	1.151	0.00747	0.01271	0.03565	0.9936	Logarithmic	
-	0.01645	7.433	-6.43	0.01865	0.00165	0.01354	0.9992	Tow-term	0.5 m s ⁻¹
1.714	-	-	-	0.00393	0.00185	0.00279	0.9991	Modified Page	
-	-	-	10.98	0.01314	0.00188	0.01809	0.9970	Two-term exponential	
-	-	0.169	3.201	-	0.02180	0.01624	0.9882	Wang and Singh	
1.512	-	0.062	2.071	0.04718	0.03174	0.04258	0.9899	Midilli et al	

جدول ۵- نتایج حاصل از برآزش کردن مدل های Newton, Henderson and Pabis, Modified Page, Two-term, Wang and Singh.

Page, Midilli et al, Logarithmic, Tow-term exponential برای ورقه گوجه فرنگی با ضخامت 7mm

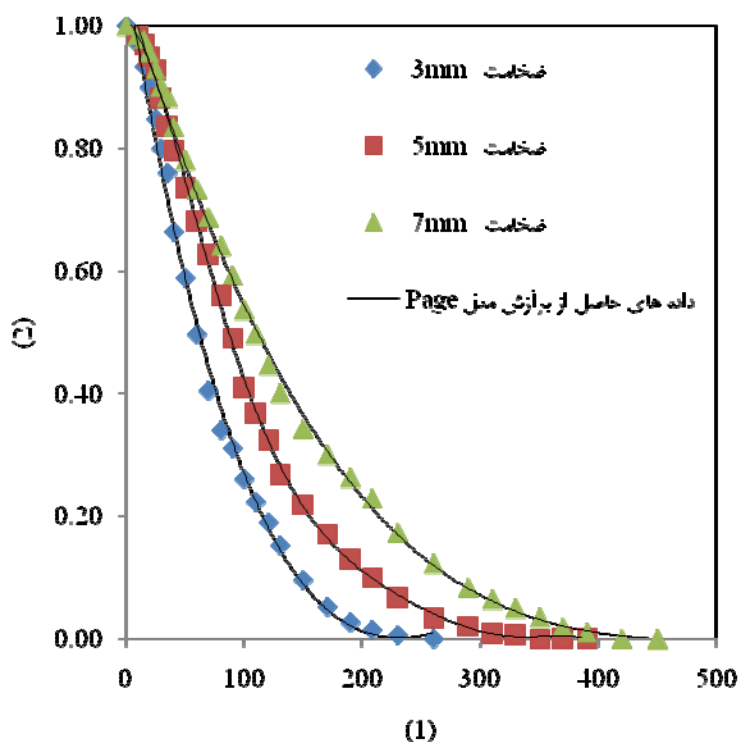
Table 5. Statistical results of 9 thin layer drying models at different drying conditions with 7 mm thickness

n	g	c	a	k	χ^2	RMSE	R^2	مدل	سرعت هوا
-	-	-	-	0.00757	0.03002	0.04805	0.9857	Newton	
-	-	-	1.06	0.00817	0.01934	0.04014	0.9900	Henderson and Pabis	
1.289	-	-	-	0.00187	0.00192	0.01264	0.9991	Page	
-	-	-0.096	1.134	0.00625	0.00585	0.02306	0.9972	Logarithmic	
-	0.01367	7.899	-6.89	0.01512	0.00225	0.01501	0.9989	Tow-term	1 m s^{-1}
1.214	-	-	-	0.00402	0.00305	0.01901	0.9991	Modified Page	
-	-	-	4.249	0.04001	0.00307	0.01391	0.9981	Two-term exponential	
-	-	0.342	3.001	-	0.02501	0.02501	0.9889	Wang and Singh	
1.383	-	0.054	2.331	0.0272	0.02331	0.04261	0.9901	Midilli et al	
-	-	-	-	0.00678	0.05972	0.04636	0.9782	Newton	
-	-	-	1.067	0.00736	0.03211	0.05173	0.9849	Henderson and Pabis	
1.349	-	-	-	0.00118	0.00553	0.02147	0.9974	Page	
-	-	-0.163	1.199	0.00522	0.00796	0.02691	0.9963	Logarithmic	
-	0.01645	7.433	-6.43	0.01865	0.00165	0.01354	0.9992	Tow-term	0.5 m s^{-1}
1.624	-	-	-	0.00439	0.00185	0.02279	0.9969	Modified Page	
-	-	-	11.01	0.01712	0.00598	0.02009	0.9911	Two-term exponential	
-	-	0.157	3.302	-	0.02230	0.01824	0.9892	Wang and Singh	
1.313	-	0.052	2.172	0.04610	0.04004	0.04450	0.9888	Midilli et al	



شکل ۳- نسبت رطوبت و منحنی حاصل از برآزش مدل Page برای خشک کردن ورقه های گوجه فرنگی در ضخامت های 3mm, 5mm و 7mm در سرعت هوای 1 m s^{-1} : ۱- زمان (دقیقه) ۲- نسبت رطوبت (بدون بعد)

Fig. 3. Moisture ratio and the fitted curves to Page model for drying of tomato slices with thicknesses of 3, 5 and 7 mm and air velocity of 1 m s^{-1} : 1- Drying time (min) 2- Moisture ratio (decimal)



شکل ۴- نسبت رطوبت و منحنی حاصل از برآزش مدل Page برای خشک کردن ورقه های گوجه فرنگی در ضخامت های 3mm، 5mm و 7mm در سرعت هوای 0.5 m s^{-1} : ۱- زمان (دقیقه) ۲- نسبت رطوبت (بدون بعد)

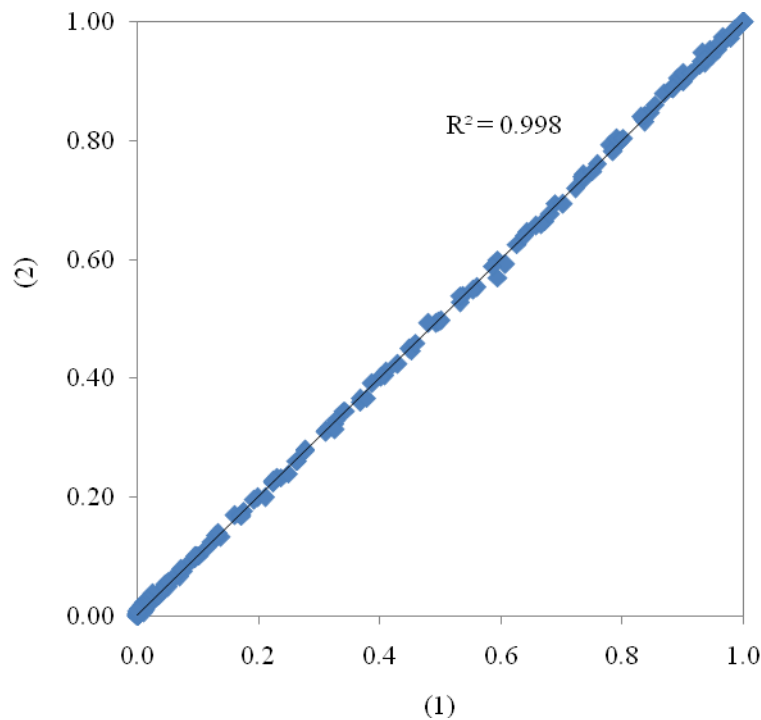
Fig. 4. Moisture ratio and the fitted curves to Page model for drying of tomato slices with thicknesses of 3, 5 and 7 mm and air velocity of 0.5 m s^{-1} : 1- Drying time (min) 2- Moisture ratio (decimal)

نتیجه گیری کلی

به منظور تعیین نرخ خشک شدن لایه نازک گوجه فرنگی از یک دستگاه خشک کن خورشیدی استفاده شد. از طریق استفاده از این دستگاه گوجه فرنگی از حمله حشرات، پرندگان، باران و گرد و غبار در امان بود. نمونه گوجه فرنگی خشک شده رنگ قرمزتری نسبت به سایر روش‌های خشک کردن داشت. اثر سرعت هوای خشک کننده و ضخامت‌های متفاوت بر روی خشک شدن ورقه‌های نازک گوجه فرنگی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به برآزش داده‌های حاصل از آزمایشات با ۹ مدل خشک کردن استفاده شده در این تحقیق و مقادیر پارامترهای آماری، مدل Page به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

محققین دیگر نیز به نتایجی مشابه دست یافته اند (Praditwong and Janjai, 1990; Akpinar *et al.*, 2003; Aghbashlo *et al.*, 2009; Koua *et al.*, 2009; Tunde-Akintunde, 2011; Saleh and Badran, 2009; Akpinar and Bicer, 2006; Midilli and Kucuk, 2003; Rafiee and Kashaninejad, 2008; Akpinar, 2010; Doymaz, 2007; Movagharnjad and Nikzad, 2007). با توجه به اینکه مدل Page بهترین مدل در بین مدل‌های ارائه شده است، این مدل می‌تواند برای بررسی و پیش بینی روند خشک شدن لایه نازک گوجه فرنگی مورد استفاده قرار گیرد. شکل‌های ۳ و ۴ نتایج حاصل از برآزش مدل Page بر روی منحنی خشک کردن ورقه‌های گوجه فرنگی در ضخامت‌های 3mm، 5mm و 7mm را در دو سرعت هوای 0.5 m s^{-1} و 1 m s^{-1} نشان می‌دهد.

شکل ۵ مقایسه داده‌های آزمایشگاهی نسبت رطوبت، در مقابل داده‌های پیش بینی شده با استفاده از مدل Page برای خشک شدن لایه نازک ورقه‌های گوجه فرنگی را نشان می‌دهد. داده‌ها در نزدیکی یک خط 45° قرار گرفتند که نشان می‌دهد مدل Page قدرت تخمین خوبی دارد.



شکل ۵- مقایسه نسبت‌های رطوبتی به‌دست آمده از آزمایش و مدل کردن: ۱- نتایج حاصل از آمایش ۲- نتایج حاصل از برآزش مدل

Fig. 5. Comparison of moisture ratios obtained from experiments and modeling:
1- Experimental moisture ratio 2- Predicted moisture ratio

منابع

1. Āghbashlo, M., M. H. Kianmehr, and A. Arabhosseini. 2009. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. *Energy Conversion and Management* 50: 1348-1355.
2. Anonymous. 2011. Available from: www.faostat.com.
3. Akpınar, E. K., A. Midilli, and Y. Bicer. 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management* 44: 1689-1705.
4. Akpınar, E. K., and Y. Bicer. 2006. Mathematical Modeling and Experimental Study on Thin Layer Drying of Strawberry. *Food Engineering* 2: Art 5.
5. Akpınar, E. K. 2010. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. *Energy Conversion and Management* 51: 2407-2418.
6. Aktaşa, M., C. İlhan, and Y. Sezayi. 2008. Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer. *Desalination* 239: 266-275.
7. Bagheri, H., A. Arabhosseini, and M. H. Kianmehr. 2010. Design, Development and Evaluation of a Laboratory Solar Dryer. 6th national conference on agricultural machinery engineering and mechanization Conf., College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University – Karaj, Iran. (In Farsi).
8. Beltagy, A., G. R. Gamea, and A. H. Amer Essa. 2005. Solar drying characteristics of strawberry. *Food Engineering* 78: 456-464.
9. Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering* 61: 359-364.
10. Doymaz, I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Food Engineering* 78: 1291-1297.
11. Ekechukwu, O. V., and B. Norton. 1999. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar

- drying technology. *Energy Conversion & Management* 40: 615-655.
12. Hayaloglu, A. A., I. Karabulut, M. Alpaslan, and G. Kelbaliyev. 2007. Mathematical modeling of drying characteristics of strained yoghurt in a convective type tray-dryer. *Food Engineering* 78: 109-117.
 13. Koua, K. B., W. F. Fassinou., P. Gbaha, and S. Toure. 2009. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. *Energy* 34: 1594-1602.
 14. Koyuncu, T., Y. Pinar, and F. Lule. 2007. Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna* Jacq.) and yellow (*Crataegus aronia* Bosc.) fruits. *Food Engineering* 78: 1471-1475.
 15. Midilli, A., and H. Kucuk. 2003. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management* 44: 1111-1122.
 16. Movagharnejad, K., and M. Nikzad. 2007. Modeling of tomato drying using artificial neural network. *Computers and electronics in agriculture* 59: 78-85.
 17. Ozdemir, M., and Y.O. Devres. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Food Engineering* 42: 225-233.
 18. Praditwong, P., and S. Janjai. 1990. Performance studies of a solar drying storage system for paddy in Sayigh AAM, ed. *Proceedings of the 1st World Renewable Energy Congress*. UK.23-28.
 19. Rafiee, S., and M. Kashaninejhad. 2008. Thin Layer Drying of Corn. The 4th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Tabriz University - Tabriz, Iran. (In Farsi).
 20. Rajkumar, P., S. Kulanthaisami., G. S. V. Raghavan., Y. Garie'py, and V. Orsat. 2007. Drying Kinetics of Tomato Slices in Vacuum Assisted Solar and Open Sun Drying Methods *Drying Technology* 25: 1349-1357.
 21. Sacilic, K., and A. Elicin. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Food Engineering* 73: 231-238.
 22. Saleh, A., and I. Badran. 2009. Modeling and experimental studies on a domestic solar dryer. *Renewable Energy* 34: 2239-2245.
 23. Shanmugam, V., and E. Natarajan. 2005. Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renewable Energy* 31: 1239-1251.
 24. Tunde-Akintunde, T. Y. 2011. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. *Renewable Energy* 36: 2139-2145.
 25. Yaldiz, O., and C. Ertekin. 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology* 19: 583-596.