

مدلسازی ریاضی خشک کردن لایه نازک قارچ خوراکی (۵۲۰)

حامد امیرنجات^۱، محمدهادی خوش تقاضا^۲

چکیده

برای جلوگیری از تغییر رنگ و حفظ کیفیت قارچ در طی انبارداری بایستی این محصول خشک شود. به منظور کاهش ضایعات محصول، در طی خشک کردن و افزایش بازده خشک‌کن، مدلسازی خشک کردن ضروری بوده و اولین گام، پیش‌بینی منحنی خشک شده لایه نازک قارچ و استخراج مدل‌های مناسب برای این منظور می‌باشد. در این تحقیق، خشک کردن لایه نازک قارچ دکمه‌ای مدلسازی شد. آزمایش در سه سطح دمای ($65, 55, 45^{\circ}\text{C}$) و دو سطح سرعت جریان هوا ($0.7, 1/4 \text{ m/s}$) خشک‌کن و ۳ تکرار اجرا شد. در هر بار آزمایش، نمونه‌ها بعد از تعیین رطوبت اولیه‌شان با استفاده از آون، خشک گردیدند. رطوبت لایه با وزن کردن نمونه‌ها طی فرایند خشک کردن اندازه‌گیری گردید. ۵ مدل ریاضی استاندارد بر داده‌های آزمایشی برازش داده شد و کیفیت برازش آنها بر حسب سه پارامتر ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مدل‌های مذکور عبارت‌اند از لویس (L)، پیچ (P)، هندرسون و پایبیس (HP)، لگاریتمی (L) و مدل تغییر یافته فیکس (SF)^۷. مامی مدل‌ها نتایج قابل قبولی را در بر داشتند ولی در کل مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها نتایج نزدیک‌تر به داده‌های آزمایش داشت.

کلیدواژه: خشک کردن، لایه نازک، قارچ دکمه‌ای، مدل رگرسیون، مدلسازی ریاضی.

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، Amirnejat@modares.ac.ir

۲- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، Khoshtag@modares.ac.ir

3 - Lewis

4 - Page

5 - Henderson & Pabis

6 - Logarithmic

7 - Simplified Ficks diffusion

مقدمه

تامین غذای کافی برای جمعیت کشورها امری بسیار مهم است. تغذیه خوب و استاندارد تنها از طریق دریافت کالری کافی تامین نمی‌شود بلکه غذا باید حاوی مواد معدنی، ویتامین‌ها و مقدار کافی از پروتئین باشد. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که قارچ‌ها برای تکمیل جیره غذایی که کمبود پروتئین دارد بسیار مناسب هستند. تحقیقات لینتنزل (۱۹۴۱، ۱۹۴۳) نشان می‌دهد که ۱۰۰ تا ۲۰۰ گرم قارچ بر اساس وزن خشک قادر به حفظ تعادل تغذیه‌ای در یک فرد عادی به وزن ۷۰ کیلوگرم است. برای جلوگیری از تغییر رنگ و حفظ کیفیت قارچ در طی انبارداری بایستی این محصول خشک شود [۲].

خشک کردن مواد غذایی، یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری آنهاست. در اثر کاهش مقدار رطوبت ماده غذایی امکان فساد میکروبی از بین می‌رود و از طرف دیگر واکنش‌های مضر نیز به مقدار قابل توجهی کم می‌شود. خشک کردن ضمن اینکه بر روی محصول اثر حفاظتی دارد، وزن و حجم آن را نیز به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد و در نتیجه از هزینه‌های حمل و نقل و ذخیره سازی محصول می‌کاهد.

معادلات خشک کردن لایه نازک را می‌توان به سه دسته تجربی، نیمه تجربی و نظری تقسیم کرد. در معادلات تجربی از مقاومت در برابر انتقال جرم در داخل دانه صرف نظر شده و صرفاً رابطه‌ای بین رطوبت متوسط دانه با زمان ارایه می‌گردد [۱۳]. در معادلات نیمه تجربی مقاومت در برابر انتقال جرم در سطح محصول صرف نظر می‌شود [۱۲]. به عبارتی سطح محصول بدون صرف زمان با رطوبت هوای اطراف خود به تعادل می‌رسد [۹]. از مشهورترین معادلات نیمه تجربی خشک کردن لایه نازک می‌توان به معادلات لوئیس^۱ و پیچ^۲ اشاره نمود. با گذشت زمان برای افزایش دقت مدل‌های بدست آمده، با انجام آزمایش اصلاحاتی روی مدل‌های گذشته انجام شد [۱۰].

آرورا و همکاران در سال ۲۰۰۳ با در نظر گرفتن چند سطح دمایی برای خشک کردن قارچ دکمه‌ای به بررسی مدل خشک کردن پرداختند و مدل پیچ را برای این منظور پیشنهاد نمودند [۴]. همچنین واو و همکاران نیز در سال ۲۰۰۳ با در نظر گرفتن چند سطح دمایی و همچنین رطوبت نسبی هوای ورودی خشک کن، مدل تغییر یافته صفحه‌ای^۳ را مناسب ارزیابی نمودند [۵].

بهترین تاریخ مصرف قارچ تازه تا ۱۰ روز پس از برداشت می‌باشد و پس از آن به تدریج از کیفیت محصول کاسته شده و تغییر رنگ می‌دهد. بنابراین برای حفظ کیفیت قارچ در طی انبارداری بایستی این محصول خشک گردد. آگاهی از نحوه خشک شدن محصول منجر به کاهش مصرف انرژی و ضایعات محصول می‌گردد. هدف از انجام تحقیق مشخص نمودن روند خشک شدن قارچ دکمه‌ای در دماها و سرعت‌های جریان هوای خشک‌کن و استخراج مدل خشک کردن لایه نازک قارچ دکمه‌ای می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش از دستگاه خشک کن آزمایشگاهی لایه نازک استفاده شد. خشک کن آزمایشگاهی دارای دمنده سانتریفوژ بود که هوا را بصورت عمود بر بستر مواد جریان می‌داد و برای تامین هوای گرم، از گرمکن الکتریکی استفاده شده بود. در این آزمایش سرعت جریان هوا توسط سرعت سنج پره‌ای از نوع Loutron A-M-4202 که ساخت کشور تایوان است، اندازه‌گیری شد، چرا که این نوع سرعت سنج میانگینی از سرعت جریان هوا در بستر خشک‌کن را ارایه می‌دهد. ترازوی استفاده شده، EK-3000i مدل A&D ساخت کشور ژاپن بود. دقت اندازه‌گیری این ترازو ۰/۰۱ گرم بود. نحوه خشک کردن بدین صورت است که هوای جریان یافته بوسیله دمنده از گرمکن گذشته و گرم شده و بوسیله کانال به سمت لایه قارچ هدایت می‌شود

برای خشک کردن از قارچ دکمه‌ای که در منطقه ملارد کرج پرورش می‌یابد، استفاده شد. نمونه‌های مورد آزمایش بصورت تازه تهیه می‌گردید. قارچ‌ها بعد از شسته شدن با آب توسط چاقویی به ضخامت ۵-۶ mm بریده شده و یک لایه از آن

1 - Lewis, 1921

2 - Page, 1949

3 - Modified Plate Drying

روی بستر توری خشک کن قرار داده می‌شد. برای تعیین میزان رطوبت اولیه قارچ نمونه‌هایی در اجاق برقی قرار داده شده و طبق استاندارد AOAC (۱۹۹۱) و با استفاده از رابطه (۱) میزان رطوبت اولیه (بر پایه خشک) تعیین می‌گردید:

$$M_o = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (1)$$

که در آن M_o میزان رطوبت اولیه بر پایه خشک (اعشار)، M_2 وزن اولیه نمونه قبل از قرار دادن در اجاق برقی (گرم) و M_1 وزن نمونه بعد از خشک شدن (گرم) در اجاق برقی می‌باشد.

خشک کردن لایه نازک قارچ در سه سطح دمایی (45.5565°C) و در دو سطح سرعت هوای (0.7 ، $1/4$) انجام پذیرفت. این سطوح دمایی و سرعت هوا بر اساس تحقیقات پیشین انتخاب گردیده اند [۴]، [۵] و [۱۱]. برای شروع آزمایش ابتدا دستگاه روشن شده سپس بعد از ۱۵ دقیقه کار کردن دستگاه که دما و سرعت هوای خشک کن ثابت می‌گشت، نمونه‌ها برای شروع آزمایش‌ها بر روی بستر خشک کن قرار داده می‌شدند. خشک کردن تا زمانی ادامه داشت که تغییرات رطوبت لایه بسیار کم شده ($m < 0.01g$) در نتیجه شدت خشک شدن تقریباً صفر شود و بنابراین نیازی به خشک کردن تا رطوبت تعادلی نیست [۶]. رطوبت بر اساس وزن لایه نازک قارچ که در زمان‌های مختلف (بازه ۱۰ دقیقه) خشک شدن اندازه‌گیری شد محاسبه گردید. در زمانی که باید وزن نمونه بدست می‌آمد ظرف خشک کن به سرعت روی ترازوی دیجیتالی قرار داده می‌شد و پس از ثبت عدد نمایش داده شده توسط ترازو، بلافاصله ظرف در جای خود قرار داده شده و خشک کردن ادامه می‌یافت. مدت هر بار وزن کردن نمونه تقریباً ۱۰ ثانیه طول می‌کشید. زمان خشک کردن بوسیله یک کورنومتر ثبت می‌شد. هر بار که وزن کردن نمونه شروع می‌شد زمان متوقف شده و پس از اتمام وزن کردن نمونه، زمان ثبت می‌گردید [۷].

مدل‌های منحنی خشک کردن لایه نازک قارچ بر اساس ۵ مدل توصیه شده توسط محققینی که در این زمینه کار کرده‌اند انتخاب گردید و در جدول (۱) آورده شده است. در اکثر تحقیقات مدل سینتیک خشک کردن بر اساس نسبت رطوبت (MR) بدست آمده است، که علتش کاهش پراکندگی و خوش فرم کردن داده‌ها می‌باشد به عبارتی رطوبت نمونه در طی خشک شدن به طور غیر مستقیم بدست می‌آید [۳]. در این تحقیق نیز برای این کار نمودار تغییرات نسبت رطوبت (MR) در برابر طول مدت زمان خشک شدن نمونه (t) رسم شد، و سپس مدل‌های ریاضی آن توسط نرم افزار MATLAB 7.1 استخراج گردید. نسبت رطوبت (MR) مطابق رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (2)$$

که در آن MR نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t میزان رطوبت در هر لحظه (کیلو گرم ماده خشک / کیلوگرم رطوبت)، M_e محتوای رطوبت تعادلی (کیلو گرم رطوبت / کیلوگرم ماده خشک) و M_o محتوای رطوبت اولیه (کیلو گرم رطوبت / کیلوگرم ماده خشک) می‌باشد. برای مدل‌سازی ریاضی خشک شدن قارچ، از معادلات جدول (۱) استفاده شد که این مدل‌ها در تحقیقات پیشین برای استخراج نسبت رطوبت استفاده شده است. مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک شدن بر اساس متغیر مستقل زمان بوسیله نرم افزار MATLAB 7.1 استخراج شد. از سه معیار ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) برای سنجش بهترین مدل استفاده شد که برای هر مدل هر چه مقدار R^2 بیشتر و χ^2 و RMSE کمتر باشد مدل بهتر است [۸].

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i}) \right]^{1/2} \quad (4)$$

که $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت بدست آمده در طی i امین اندازه گیری، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت پیش بینی شده از مدل در i امین اندازه گیری، N تعداد مشاهدات (داده ها) و n تعداد ثابت های به کار رفته در معادله است. مقدار ضرایب و ثابت های مدل های جدول (۱) در دماهای مختلف به روش رگرسیون محاسبه گردید.

جدول ۱- مدل های خشک شدن لایه نازک مورد استفاده در مدلسازی

ردیف	نام مدل	مدل*	مرجع [۳] و [۴].
۱	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Lewis(1921)
۲	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page(1949)
۳	Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson & Pabis(1961)
۴	Logaritmik	$MR = a \exp(-kt) + c$	Diamante & Munro(1991)
۵	Simplified ficks diffusion	$MR = a \exp(-kt/l^2)$	Diamante & Munro(1991)

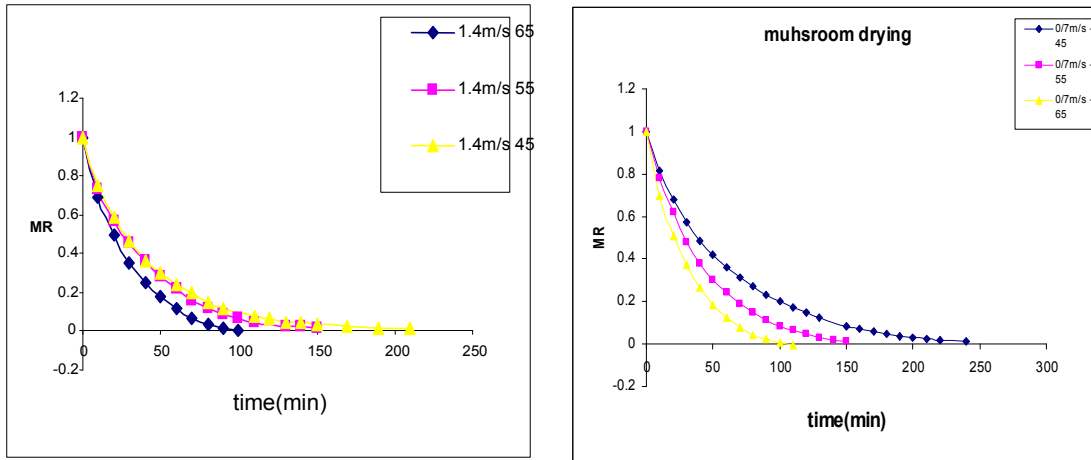
* MR : نسبت رطوبت؛ t : زمان (min)، c : ضرایب و a و k : ثابت های مدل است.

نتایج و بحث:

رطوبت اولیه قارچ دکمه ای مورد آزمایش به طور متوسط برابر ۹۲/۶٪ (بر پایه خشک) بود. همان طور که از شکل (۱) پیداست، کمترین زمان برای خشک شدن مربوط به دمای 65°C و سرعت هوای $1/4 \text{ m/s}$ بود که ۹۰ دقیقه به طول انجامید و بیشترین زمان لازم برای خشک شدن نیز مربوط به دمای 45°C و سرعت هوای $0/7 \text{ m/s}$ بود که ۲۴۰ دقیقه طول کشید.

اثر دما بر زمان خشک شدن

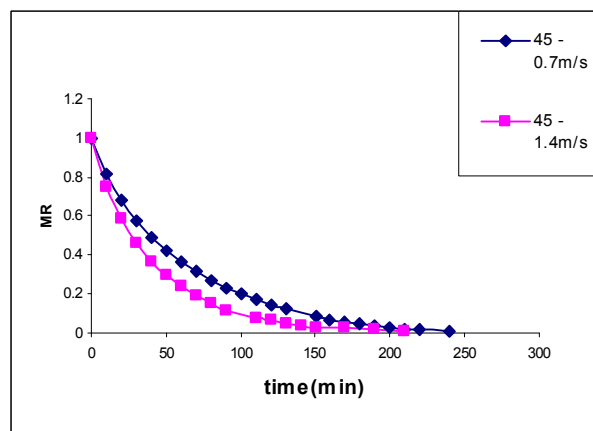
همان طور که از شکل (۱) پیداست، زمان خشک شدن قارچ خوراکی در سرعت هوای $0/7$ متر بر ثانیه با افزایش درجه حرارت از هوا از 45 به 65 درجه سلسیوس کاهش می یابد. این پدیده در اثر گرم تر شدن سطح محصول و در نتیجه افزایش گرادیان حرارتی سطح محصول و سطح زیرین محصول و در نتیجه انتقال حرارت بالاتر بین هوای عبوری از روی محصول و محصول گردیده و موجب سریع تر خشک شدن محصول می گردد. به طور مشابه سریع تر خشک شدن محصول با افزایش درجه حرارت هوا در سرعت هوای $1/4$ متر بر ثانیه نیز مشاهده گردید. ولی در سرعت $1/4$ متر بر ثانیه در دماهای پایین تر افزایش کمتری در سرعت خشک شدن مشاهده می گردد به طوری که از شکل (۲) نیز پیداست. نحی های خشک شدن در سرعت هوای $1/4$ متر بر ثانیه و در دو سرعت هوای 45 و 55 درجه سلسیوس تقریباً بر روی هم منطبق می باشند.



شکل ۱- خشک شدن لایه نازک قارچ در سه درجه حرارت $65, 55, 45^{\circ}\text{C}$ و سرعت هوای ثابت 0.7 m/s
 شکل ۲- خشک شدن لایه نازک قارچ در سه درجه حرارت $65, 55, 45^{\circ}\text{C}$ و سرعت هوای ثابت 1.4 m/s

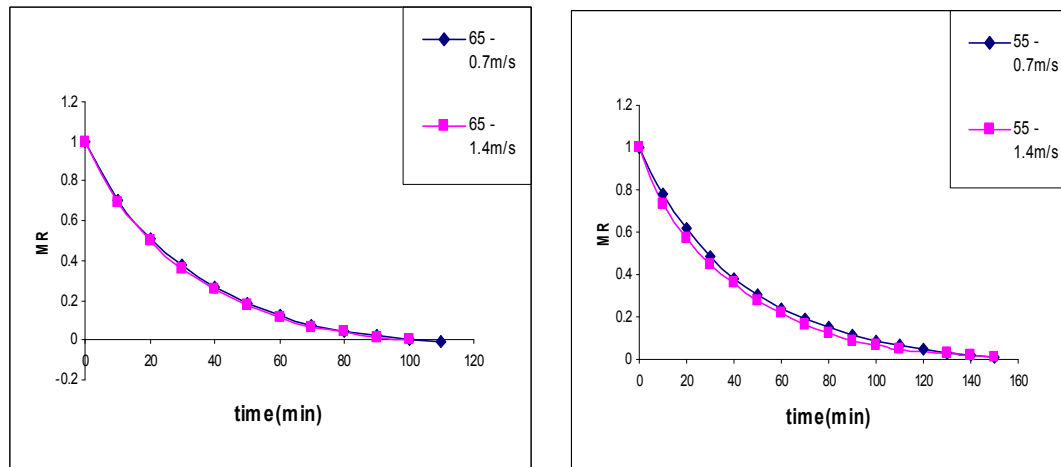
اثر سرعت هوا بر زمان خشک شدن

با توجه به نمودار شکل (۳)، در درجه حرارت ثابت 45°C درجه سلسیوس با افزایش سرعت هوای عبوری از روی محصول از 0.7 به 1.4 متر بر ثانیه سرعت خشک شدن محصول افزایش می یابد. علت این پدیده را این طور میتوان توجیه کرد که با افزایش سرعت هوای عبوری از روی محصول فشار بخار محیط اطراف محصول در حال خشک شدن کاهش یافته و در نتیجه رطوبت محصول با روبه رو شدن با مقاومت کمتری می تواند از محصول خارج گردد و محصول با سرعت بیشتری خشک می گردد.



شکل ۳- خشک شدن لایه نازک قارچ در دو سرعت هوای $0.7, 1.4 \text{ m/s}$ و درجه حرارت 45°C

همچنین مطابق شکل (۴) سرعت خشک شدن با افزایش سرعت هوای عبوری در دمای 55°C نیز مشابه با درجه حرارت 45°C افزایش یافته است، ولی افزایش نرخ سرعت خشک شدن با کاهش درجه حرارت کمتر می باشد یا به عبارت دیگر اثر سرعت هوای عبوری در خشک شدن محصول در درجه حرارت های پایین تر بیشتر است به طوری که در درجه حرارت 65°C با افزایش سرعت هوای عبوری از 0.7 به 1.4 متر بر ثانیه تغییری در زمان خشک شدن مشاهده نشده است (شکل ۵).



شکل ۴- خشک شدن لایه نازک قارچ در دو سرعت هوای 0.7 و 1.4 m/s در دمای 55°C و درجه حرارت 45°C

و درجه حرارت 65°C

و درجه حرارت 55°C

مدل سازی خشک شدن

از ۵ مدل لوئیس، پیچ، هندرسون و پاییس، لگاریتمی و مدل تغییر یافته فیکس استفاده گردید. مقادیر ضرایب و ثابت های ۵ مدل مذکور در جداول (۲) تا (۶) آورده شده است. تمامی مدل ها برازش نسبتاً خوبی را ارائه داده اند و در عین حال مدل رگرسیونی پیچ نسبت به سایر مدلها برآورد بهتری را دارد. به طور کلی با افزایش دما و سرعت هوای خشک کن، سرعت خشک شدن نیز افزایش یافته است و این دو عامل اثر متقابلی بر یکدیگر نداشته اند. با توجه به مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE (جدول ۲ تا ۶)، مدل های رگرسیونی مختلف ارزیابی شد و با توجه به این نکته که مدل بهتر، مدلی است که دارای مقدار بیشتر R^2 و مقادیر کمتر χ^2 و RMSE باشد، مدل پیچ از بین این ۵ مدل بهترین و مدل لوئیس ضعیف ترین (در عین حال قابل قبول) مدل را ارائه داده اند.

جدول ۲- مقادیر ثابت ها و ضرایب مدل لوئیس به تفکیک دما و سرعت جریان هوای خشک کن

χ^2	RMSE	R^2	n	K	سرعت هوا (m/s)	($^{\circ}\text{C}$ دما)
۰/۰۰۱۷۵۹۸	۰/۰۱۴۳۲۷	۰/۹۹۸۹۸	۰/۹۲۹۷	۰/۰۲۲۸۹	۰/۷	۴۵
۰/۰۰۱۳۲۳۴	۰/۰۰۲۸۷۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۰۴۵	۰/۰۳۵۷۵	۱/۴	۴۵
۰/۰۰۱۰۷۰۷	۰/۰۰۸۴۴۸۹	۰/۹۹۹۱۳	۰/۸۹۶۴	۰/۰۳۱۱۶	۰/۷	۵۵
۰/۰۰۲۰۱۰۵	۰/۰۱۱۵۷۷	۰/۹۹۸۵	۰/۹۶۳	۰/۰۳۰۷۷	۱/۴	۵۵
۰/۰۰۲۹۵۷	۰/۰۱۷۱۹	۰/۹۹۷۳	۱/۰۴۶	۰/۰۲۹۱۷	۰/۷	۶۵
۰/۰۰۲۲۴۷	۰/۰۱۵۸	۰/۹۹۷۸	۱/۰۳۵	۰/۰۳۱۶	۱/۴	۶۵

جدول ۴- مقادیر ثابت‌ها و ضرایب مدل هندرسون و پابیس به تفکیک دما و سرعت جریان هوای خشک‌کن

χ^2	RMSE	R^2	A	K	سرعت هوا (m/s)	($^{\circ}\text{C}$ دما)
۰/۰۰۳۰۴۸۵	۰/۰۱۱۷۷۱	۰/۹۹۸۲۳	۰/۹۷۱۲	۰/۰۱۶۴۱	۰/۷	۴۵
۰/۰۰۲۴۷۱۷	۰/۰۱۲۴۲۹	۰/۹۹۸۱۹	۰/۹۷۱۹	۰/۰۲۳۹۱	۱/۴	۴۵
۰/۰۰۴۶۹۲۱	۰/۰۱۷۶۸۶	۰/۹۹۶۲	۰/۹۷۳۳	۰/۰۱۹۸۷	۰/۷	۵۵
۰/۰۰۲۰۵۲۹	۰/۰۱۱۶۹۹	۰/۹۹۸۴۷	۰/۹۸۲۶	۰/۰۲۶۲۱	۱/۴	۵۵
۰/۰۰۳۴۷۸	۰/۰۱۸۶۵	۰/۹۹۶۹	۱/۰۰۳	۰/۰۳۴۵۳	۰/۷	۶۵
۰/۰۰۲۵۳۵	۰/۰۱۶۷۸	۰/۹۹۷۵	۱/۰۰۲	۰/۰۳۵۸۵	۱/۴	۶۵

جدول ۳- مقادیر ثابت‌ها و ضرایب مدل پیچ به تفکیک دما و سرعت جریان هوای خشک‌کن

χ^2	RMSE	R^2	K	سرعت هوا (m/s)	($^{\circ}\text{C}$ دما)
۰/۰۰۴۷۲۰۹	۰/۰۱۴۳۲۷	۰/۹۹۷۲۶	۰/۰۱۶۹۱	۰/۷	۴۵
۰/۰۰۳۶۹۹	۰/۰۱۴۷۵۱	۰/۹۹۷۲۹	۰/۰۲۴۶۴	۱/۴	۴۵
۰/۰۰۵۹۳۰۲	۰/۰۱۹۲۵۲	۰/۹۹۵۲	۰/۰۲۰۴۵	۰/۷	۵۵
۰/۰۰۲۵۱۳۷	۰/۰۱۲۵۳۴	۰/۹۹۸۱۲	۰/۰۲۶۶۶	۱/۴	۵۵
۰/۰۰۳۴۹۱	۰/۰۱۷۸۱	۰/۹۹۶۹	۰/۳۴۴۳	۰/۷	۶۵
۰/۰۰۲۵۳۹	۰/۰۱۵۹۳	۰/۹۹۷۵	۰/۰۳۵۹	۱/۴	۶۵

جدول ۵- مقادیر ثابت ها و ضرایب مدل لگاریتمی به تفکیک دما و سرعت جریان هوای خشک کن

χ^2	RMSE	R^2	C	A	K	سرعت هوا (m/s)	($^{\circ}C$ دما)
۰/۰۰۳۰۴۵۸	۰/۰۱۲۰۴۳	۰/۹۹۸۲۳	۰/۰۰۰۹۱۵۷	۰/۹۷۰۸	۰/۰۱۶۴۶۰	۰/۷	۴۵
۰/۰۰۱۵۷۹۹	۰/۰۱۰۲۶۳	۰/۰۹۹۸۸۴	۰/۰۱۴۳۴	۰/۹۶۴۸	۰/۰۱۰۲۶۳	۱/۴	۴۵
۰/۰۰۰۲۴۰۸۱	۰/۰۰۴۱۴۷۴	۰/۹۹۹۸۱	۰/۴۶۵۵	۰/۹۴۸۶	۰/۰۲۳۰۷	۰/۷	۵۵
۰/۰۰۲۰۵۲۹	۰/۰۱۱۶۹۹	۰/۹۹۸۴۷	۱/۹۷۹E-۱۰	۰/۹۸۲۶	۰/۰۲۶۲۱	۱/۴	۵۵
۰/۰۰۳۴۷۸	۰/۰۱۸۶۵	۰/۹۹۶۹	۱/۵۵۹E-۱۰	۱/۰۰۳	۰/۰۳۴۵۳	۰/۷	۶۵
۰/۰۰۲۵۳۵	۰/۰۱۶۷۸	۰/۹۹۷۳	۹/۱۴۷E-۱۳	۱/۰۰۲	۰/۰۲۵۸۵	۱/۴	۶۵

جدول ۶- مقادیر ثابت ها و ضرایب مدل تغییر یافته فیکس به تفکیک دما و سرعت جریان هوای خشک کن

χ^2	RMSE	R^2	L	A	K	سرعت هوا (m/s)	($^{\circ}C$ دما)
۰/۰۰۳۰۴۸۳	۰/۰۱۲۰۴۸	۰/۹۹۸۲۳	۳/۰۱۳	۰/۹۷۱۲	۰/۱۴۸۹	۰/۷	۴۵
۰/۰۰۲۴۷۱۷	۰/۰۱۲۸۳۷	۰/۹۹۸۱۹	۴/۵۱۴	۰/۹۷۱۹	۰/۴۸۷۰	۱/۴	۴۵
۰/۰۰۴۶۹۲۱	۰/۰۱۸۳۰۷۰	۰/۹۹۶۲	۳/۰۷۱	۰/۹۷۳۲	۰/۱۸۷۴	۰/۷	۵۵
۰/۰۰۲۰۵۲۹	۰/۰۱۲۱۰۹	۰/۹۹۸۴۷	۳/۰۱۲	۰/۹۸۲۶	۰/۲۳۷۸	۱/۴	۵۵
۰/۰۰۳۴۷۸	۰/۰۱۹۶۶	۰/۹۹۶۹	۳/۰۱۴	۱/۰۰۳	۰/۳۱۳۶	۰/۷	۶۵
۰/۰۰۲۵۳۵	۰/۰۱۷۸	۰/۹۹۷۵	۳/۰۱۳	۱/۰۰۲	۰/۳۲۵۴	۱/۴	۶۵

نتیجه گیری

- ۱- با افزایش دمای خشک کردن نرخ خشک کردن نیز افزایش می یابد.
- ۲- با افزایش سرعت جریان هوای خشک کن در دماهای $۵۵^{\circ}C$ و $۶۵^{\circ}C$ نرخ خشک کردن افزایش می یابد، ولی در دمای $۴۵^{\circ}C$ تغییری مشاهده نگردید. بنابراین تاثیر افزایش سرعت جریان هوای خشک کن در دماهای بالای خشک کن ملاحظه می گردد.
- ۳- تمامی ۵ مدل ارائه شده، نسبت رطوبت را نسبت به متغیر مستقل زمان به خوبی برازش می نمایند ولی مدل پیچ نسبت به ۵ مدل مذکور برتری دارد.



منابع

- ۱- رفیعی، ش. و کاشانی نژاد، م. ۱۳۸۵. مدل خشک شدن توده بستر نازک ذرت رقم ۷۰۴. مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون. صفحات ۵۱-۵۰.
- ۲- حاجی زاده، ر ۱۳۷۴. بررسی روش نگهداری قارچ خوراکی دکمه ای به صورت اسلایس و پودر. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۱۹۴ ص.
- 3- Akpinr, E.K., Y. Bicer and C. Yildiz.(2003). Thin layer drying of red pepper. Journal of Food Engineering. 59: 99- 104.
- 4- Arora, S., U.S. Shivhare, J. Ahmed and G.S.V. Raghvan.(2003). Drying kinetics of Agaricus Bisporus andpleurotus Florida mushrooms.Transactions of the ASAE. 46:721- 724.
- 5- Cao, W., Y. Nishiyoma and S. Koide.(2003). Thin- layer drying of maitake mushroom analyzed with a simplified model. Journal of Biosystem Engineering. 85:331- 337.
- 6- Doymaz, I. (2006). Convective drying kinetics of strawberry. Chemical Engineering and Processing xxx: xxx- xxx.
- 7- Ertekin, C. and O Yaldiz. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. Journal of Food Engineering. 63:349- 359
- 8- Guarte, R.C. (1996). Modeling the drying behavior 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.
- 9- Hustrulid, A. and Flikke, A. (1959). Theoretical drying curve for shelled corn. Transactions of the ASAE. 17:1167-1172.
- 10- Mishra, M. K. and D.B. Brooker. (1980). Thin layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. Transactions of the ASAE. 23:1254- 1260.
- 11- Pal, U.S. and A. Chacravertya.(1997). Thin layer convection- drying of mushrooms. Journal of Energy conversion and management. 38: 107-113.
- 12- Perry, J.H. (1963). Chemical Engineering's Handbook. New York: Mc Graw Hill Book Co.
- 13 - Thompson, T.L., R.M. Peart and Foster, G. H. (1968). Mathematical simulation of corn drying: A new model. Transactions of the ASAE. 11(4) :582- 586.