

مدلسازی آماری خشک شدن بستر نازک دانه گندم (رقم تجن)

*شاهین رفیعی

استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی بیوسیستم کشاورزی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۳/۶/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۸۴/۱۱/۱۸

چکیده

در این تحقیق، خشک کردن بستر نازک گندم (رقم تجن) مدلسازی شد. برای این منظور از خشک کن آزمایشگاهی استفاده گردید. آزمایش در پنج سطح دمای خشک کن (۳۵، ۴۵، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد) و چهار تکرار اجرا شد. نمونه‌ها پس از تهیه با رطوبت اولیه ۲۶ درصد (بر پایه وزن خشک) تحت شرایط کنترل شده تا دمای مورد نظر خشک شد. رطوبت توده با وزن کردن نمونه‌ها طی فرآیند خشک کردن اندازه‌گیری گردید. چهار مدل ریاضی استاندارد بر داده‌های آزمایشی برازش داده شد و کیفیت برازش آنها برحسب سه پارامتر ضریب تعیین (R^2) مربع کای (χ^2) و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها ($RMSE$) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تابعیت ضرایب و ثابت‌های مناسب‌ترین مدل آماری برازش یافته از درجه حرارت، مشخص و در مدل پایانی وارد گردید. از روش رگرسیون چندگانه برای شبیه‌سازی خشک شدن توده در دماهای متفاوت خشک کن براساس مدل دو جمله‌نمایی استفاده گردید که ضریب تعیین، مربع کای و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها مدل به ترتیب ۹۹/۳۸ درصد، ۰/۰۰۰۰۱۸ و ۰/۰۰۰۴ بود که برای تخمین تغییرات رطوبت در طی خشک کردن مناسب است.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی خشک کردن، گندم، توده بستر نازک، رگرسیون چندگانه

مقدمه

خشک کردن، فرآیند گرفتن رطوبت به کمک انتقال حرارت و رطوبت است (کاگوس، ۱۹۹۴) و یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است که به‌علت 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 مشخصی رساند. برای دستیابی به این هدف باید خشک کردن

محصولات مختلف کشاورزی را مدلسازی نمود تا بتوان براساس الگوی به‌دست 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 (دیامنت و مونرو، ۱۹۹۳؛ رتی و موجودر، ۱۹۹۷).

مطالعه رفتار خشک کردن مواد مختلف موضوع جالبی برای بررسی تئوری و تجربی در ۶۰ سال گذشته بوده است.

واتسون و بارگوا، ۱۹۷۴)، گندم نیم پز (چاکراورتی و کاوشال، ۱۹۸۲) و شلتوک برنج (ونگ و سینگ، ۱۹۷۸) استفاده شد. این مدل فقط در مرحله نرخ کاهش خشک شدن محصولات کشاورزی معتبر است.

۲- مدل لگاریتمی^۳ که یاگشیاگلو و همکاران در سال ۱۹۹۹ برای مدلسازی فرآیند خشک کردن برگ بو از این مدل استفاده کردند. یالدیز و ارتکین نیز در سال ۲۰۰۱ برای شبیه سازی خشک شدن خورشیدی سبزی‌های مختلف از این مدل بهره بردند.

۳- مدل دو جمله‌ای نمایی^۴ که برای شرح خشک شدن لوبیای سفید و سویا (هاتچینسون و اتن، ۱۹۸۳) استفاده شد.

۴- مدل اصلاح شده هندرسون و پابیس که برای برازش منحنی سینتیک خشک شدن میوه‌ها استفاده شد (کاراتانسون، ۱۹۹۹).

کاسادا (۲۰۰۲) براساس مدل پایچ، داده‌های جذب رطوبت را در طی انبارداری گندم 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 (۲۰۰۵) از شش مدل برای برازش منحنی سینتیک خشک شدن استفاده نمودند و با ارزیابی مدل‌های رگرسیونی، مدل دو جمله نمایی را مناسب‌تر معرفی کردند.

هدف از این تحقیق، استخراج منحنی خشک شدن براساس بهترین مدل رگرسیون چندگانه^۵ بود. مدل مذکور براساس متغیر وابسته (رطوبت توده) و دو متغیر مستقل (زمان و دمای خشک شدن) بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد. منحنی خشک شدن برای پیش بینی رطوبت توده در طی خشک شدن بستر نازک گندم می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

برای خشک کردن محصولات کشاورزی به‌طور عمومی و برای دانه‌ها به‌طور خصوصی کارهای تئوری و آزمایشگاهی قابل توجه‌ای انجام شده است (بکر و سالاز، ۱۹۵۵). خوشحال و مینایی (۱۳۸۰) روابط بین پارامترهای مؤثر بر فرآیند خشکاندن شلتوک برنج (رطوبت دانه، دما و رطوبت هوای خروجی و زمان خشک کردن) به روش مداوم را تعیین نمودند و مدل‌های ریاضی مربوطه را ارائه دادند (خوشحال و مینایی، ۱۳۸۰).

دمای زیاد خشک کن، سرعت خشک شدن محصول را افزایش ولی از طرف دیگر پتانسیل شکستگی دانه را نیز افزایش می‌دهد. مدل‌های سینتیک پخش رطوبت برای تفسیر پدیده خشک شدن مواد دانه‌ای یا خشک کردن توده بستر نازک^۱ بکار می‌رود (بروس، ۱۹۸۵). هدف از استخراج مدل خشک شدن محصولات کشاورزی، پیش‌بینی نحوه خشک شدن محصولات می‌باشد (جینر و بروس، ۱۹۹۸). اثر تعدادی از پارامترهای مربوط به شرایط خشک شدن مانند ضخامت بستر خشک کردن، دمای خشک کن، رطوبت نسبی هوا و غیره توسط محققینی مورد بررسی قرار گرفته است (هندرسون، ۱۹۷۴؛ ازد میر و دورس، ۱۹۹۹؛ یالدیز و ارتکین، ۲۰۰۱). مدلسازی رفتار خشک شدن محصولات مختلف کشاورزی اغلب نیاز به روش‌های آماری برای استخراج مدل رگرسیونی و ضریب تعیین متغیرها دارد. مدل‌های خطی و غیر خطی ابزار بسیار مهمی برای به‌دست آوردن رابطه بین متغیرهای مختلف خشک کردن می‌باشد. انتخاب مدل استاندارد که بتوان براساس آن مدل خشک شدن محصول مورد نظر را به‌دست آورد نقش مهمی بر میزان دقت مدل برازش شده دارد. در این زمینه می‌توان به مدل‌های متداول زیر اشاره کرد:

۱- مدل هندرسون و پابیس^۲ که برای مدلسازی خشک کردن ذرت (میشرا و بروکر، ۱۹۸۰)، گندم (بکر، ۱۹۵۹؛

3- Logarithmic
4- Two term exponential
5- Multiple regression

۱- توده بستر نازک محصول را ضخامتی از محصول دانستند که دما و رطوبت نسبی هوا در هنگام عبور از آن تغییر نکند.

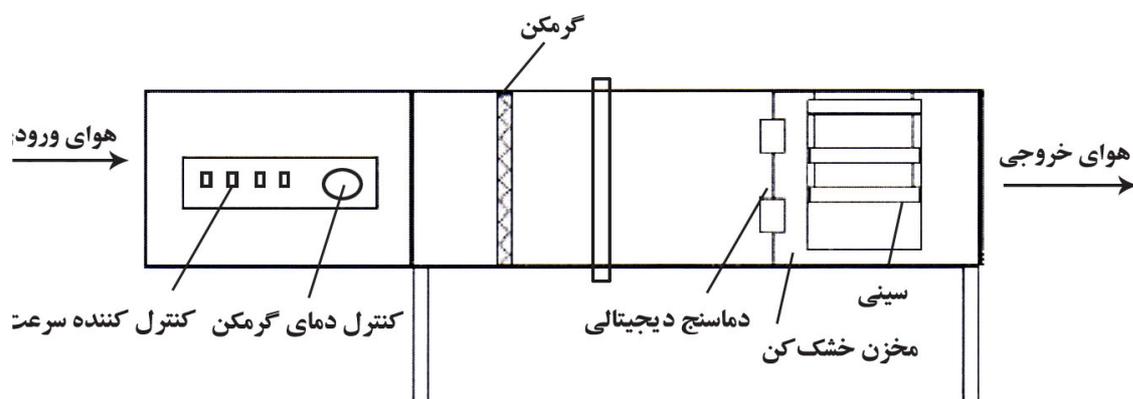
2- Henderson and Pabis

مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش از دستگاه خشک کن آزمایشگاهی توده بستر نازک استفاده شد (شکل ۱). خشک کن آزمایشگاهی با دمنده سانترفوژ (حداکثر ۳۰۰۰ دور در دقیقه) و گرمکن الکتریکی با ۴ المنت با مجموع توان ۴۰۰۰ وات، رطوبت و دما سنج هوا با محدوده اندازه‌گیری رطوبت نسبی ۱۰ تا ۹۵ درصد و با حساسیت ۳ تا ۷۰ درصد رطوبت^۱، سرعت سنج هوا از نوع سیم داغ^۲ با حساسیت ۰/۰۱ متر بر ثانیه، ترازوی دیجیتالی با حساسیت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. نحوه خشک کردن بدین صورت است که هوای جریان یافته بوسیله دمنده از گرمکن گذشته و گرم شده و بوسیله کانال به سمت توده گندم هدایت می‌شود. جریان هوا هنگامی که از توده می‌گذرد، رطوبت گندم را جذب و باعث گرم شدن آن می‌شود. توده گندم بر روی دو سینی بگونه‌ای ریخته شد که روی هر سینی یک لایه از محصول قرار گرفته بود.

روش تهیه نمونه: برای خشک کردن گندم از رقم تجن که یکی از ارقام متداول گندم می‌باشد استفاده شد. به علت آنکه آزمایش در پنج سطح دما (۳۵، ۴۵، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد) انجام گرفت و برای هر سطح دما، چهار تکرار انجام شده است در نتیجه ۵ نمونه ۴۰۰ گرمی

انتخاب شد و در داخل سه کیسه پلاستیکی قرار داده شد تا با محیط هیچ گونه تبادل رطوبتی نداشته باشد. بوسیله سرنگ مقدار مشخص و یکسانی آب در داخل کیسه پاشیده شد. مقدار آب پاشیده شده با توجه به مقدار رطوبت اولیه و وزن نمونه تعیین می‌شود. برای یکنواخت شدن رطوبت توده، نمونه طی ۷۲ ساعت در داخل یخچال در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید و برای یکنواختی بهتر توده، در طی این مدت چندین بار نمونه بهم زده شد تا رطوبت به طور یکنواخت در توده نفوذ کند (جینر و ماسچرونی، ۲۰۰۲) هر نمونه ۴۰۰ گرمی به چهار زیر نمونه مساوی (۱۰۰ گرمی) تقسیم شد. در نتیجه تعداد ۲۰ نمونه آماده گردید. از هر نمونه ۳۰ گرم برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه توده برداشته شد و متوسط رطوبت کلیه نمونه‌ها تقریباً ۰/۲۶ (بر پایه وزن خشک، d.b.)^۳ محاسبه شد. برای هر سطح دما چهار نمونه مشابه ۷۰ گرمی تحت شرایط یکسان خشک شد. برای به دست آوردن رطوبت، نمونه وزن شده و در اجاق برقی با دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد در طی ۲۴ ساعت کاملاً خشک و دوباره وزن شد. از محاسبه تفاضل این دو وزن تقسیم بر وزن خشک نمونه، رطوبت به دست می‌آید (انجمن مهندسی کشاورزی آمریکا^۴، ۱۹۸۲).



شکل ۱- طرحواره خشک کن آزمایشگاهی.

3- Dry basis, decimal
4- ASAE

2- Hot Wire

۱- مدل Testo 610

زمینه کار کرده‌اند انتخاب گردید و در جدول ۲ آورده شده است. در اکثر تحقیقات مدل سینتیک خشک کردن براساس نسبت رطوبت (MR)^۱ به دست آمده است که علت آن کاهش پراکندگی و خوش فرم کردن داده‌ها می‌باشد که برای محاسبه نسبت رطوبت، نیاز به رطوبت تعادلی نیز می‌باشد، به عبارتی رطوبت توده در طی خشک کردن به‌طور غیر مستقیم به دست می‌آید (اکپینار و همکاران، ۲۰۰۳). در این تحقیق به‌طور ابتکاری گنجایش رطوبتی (MC)^۲ توده به‌طور مستقیم مدلسازی شده است. برای مدلسازی ریاضی خشک شدن گندم، با توجه به یکی بودن روند تغییرات نسبت رطوبت با رطوبت توده، از معادلات جدول (۲) استفاده شد که از این مدل‌ها در تحقیقات پیشین برای استخراج نسبت رطوبت استفاده شده است. مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک شدن براساس متغیر مستقل زمان بوسیله نرم‌افزار اسپ پی اس اس^۳ استخراج شد. از سه معیار ضریب تعیین (R^2)، مربع کای^۴ (χ^2) و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE)^۵ برای سنجش بهترین مدل استفاده شد که برای هر مدل هرچه مقدار R^2 بیشتر و χ^2 و RMSE کمتر باشد مدل بهتر است (گارت، ۱۹۹۶):

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

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

خشک کردن تا زمانی ادامه داشت که تغییرات رطوبت توده بسیار کم شده، در نتیجه شدت خشک شدن تقریباً صفر شود و نیازی به خشک کردن تا رطوبت تعادلی نیست (جینر و ماسچرونی، ۲۰۰۲؛ گاستون و همکاران، ۲۰۰۴). مدت خشک کردن نمونه‌ها برای دماهای مختلف متفاوت بود (جدول ۱). رطوبت براساس وزن توده گندم که در زمان‌های مختلف (برحسب دقیقه) خشک شدن اندازه‌گیری شد، محاسبه گردید. در زمانی که باید وزن توده به دست می‌آمد سینی خشک کن به سرعت روی ترازوی دیجیتالی قرار داده می‌شد و پس از ثبت عدد نمایش داده شده توسط ترازو، بلافاصله سینی در جای خود قرار داده شده و خشک کردن ادامه می‌یافت. مدت هر بار وزن کردن توده تقریباً ۲۰ ثانیه طول می‌کشید. زمان خشک کردن بوسیله یک کورنومتر ثبت می‌شد و هر بار که وزن کردن توده شروع می‌شد زمان متوقف شده و پس از اتمام وزن کردن توده زمان ثبت می‌گردید (ارتکین و یالدیز، ۲۰۰۴). سرعت خشک شدن توده گندم براساس معادله (۱) محاسبه می‌گردد (اکپینار و همکاران، ۲۰۰۳).

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (1)$$

که DR سرعت خشک شدن (d.b./s)، M_{t+dt} رطوبت گندم در زمان $t+dt$ (d.b.)، M_t رطوبت گندم در زمان t (d.b.)، dt نمو زمان در هر گام زمانی (s) می‌باشد. مدل‌های منحنی خشک شدن توده بستر نازک گندم براساس مدل‌های توصیه شده توسط محققینی که در این

جدول ۲- مدل‌های رگرسیون خشک شدن توده بستر نازک مورد استفاده در مدلسازی.

| ردیف | نام مدل | مدل # | مرجع |
|------|---------------------------|---|--------------------------|
| ۱ | هندرسون و پاییس | $M = a \exp(-kt)$ | زنگ و لیچفیلد، ۱۹۹۱ |
| ۲ | لگاریتمی | $M = a \exp(-kt) + c$ | یاماگوشی و همکاران، ۱۹۸۵ |
| ۳ | دوجمله نمایی | $M = a \exp(-kt) + c \exp(-mt)$ | هندرسون، ۱۹۷۴ |
| ۴ | اصلاح شده هندرسون و پاییس | $M = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ | کاراتانوس، ۱۹۹۹ |

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

- 1- Moisture Ratio
- 2- Moisture Content
- 3- SPSS
- 4- Chi-square
- 5- Root Mean Square Error

توده گندم گرفته می‌شود و سپس کمتر می‌گردد. با افزایش سرعت خشک شدن پتانسیل انتقال حرارت بین هوا و توده گندم افزایش می‌یابد در نتیجه رطوبت با سرعت بیشتری بخار شده و از سطح دانه گندم خارج می‌گردد (هندرسون، ۱۹۷۴). سرعت خشک شدن با گذشت زمان و کاهش رطوبت در طی خشک کردن کاهش می‌یابد. در نتیجه آزمایش در مرحله نرخ کاهنده خشک شدن بود (تگرو و پلیوان، ۲۰۰۲؛ یالدیز و ارتکین، ۲۰۰۱؛ یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱؛ اکینار و همکاران، ۲۰۰۳).

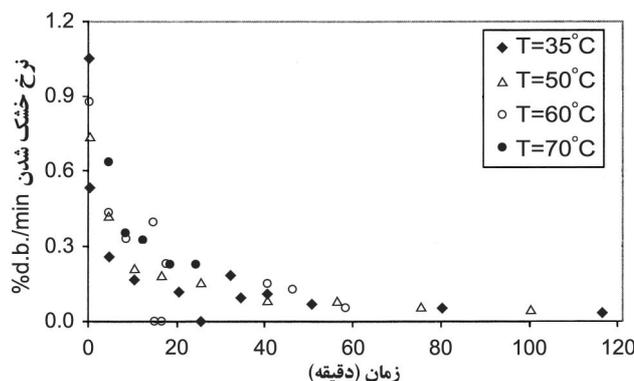
با توجه به رطوبت توده در طی خشک شدن آزمایشگاهی گندم در دماهای متفاوت، از مدل‌های جدول ۲ برای برازش منحنی خشک شدن در دامنه دمای خشک کن ۳۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. مقادیر ضرایب و ثابت‌های مدل‌ها در جدول‌های ۶-۳ آورده شده است. با توجه به مقادیر r^2 ، χ^2 و RMSE، مدل‌های رگرسیونی مختلف اول، دوم، سوم و چهارم جدول ۲ به ترتیب تغییرات رطوبت در طی خشک کردن را بهتر برازش کرد به طوری که ضریب تعیین متوسط چهار مدل به ترتیب عبارت از ۹۳/۹۶ درصد، ۹۹/۲۰ درصد، ۹۹/۷۳ درصد و ۹۹/۹۸ درصد بود. مدل رگرسیونی ضرایب و ثابت‌های چهار مدل براساس متغیر مستقل دما برازش داده شد و با قرار دادن مدل‌های ضرایب و ثابت‌ها در مدل‌های رگرسیونی خشک شدن، مدل رگرسیونی چندگانه خشک شدن برای هر چهار مدل جدول ۲ به دست آمد که نتایج ارزیابی مدل‌ها رگرسیونی چندگانه در جدول ۷ آورده شده است.

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

مقدار ضرایب و ثابت‌های مدل‌های جدول ۲ در دماهای مختلف به روش رگرسیون محاسبه گردید. برای هر مدل، با توجه به مقادیر مختلف ضرایب و ثابت‌های، مدل ضرایب و ثابت‌ها براساس متغیر مستقل دمای خشک کن به دست آمد که در نهایت رگرسیون چندگانه برای هر مدل استخراج شد. براساس شاخص‌های ارزیابی، مدل مناسب‌تر مشخص شد. در مدل رگرسیونی چندگانه، رطوبت متغیر وابسته و زمان خشک کردن (بی واسطه) و دمای خشک کن (با واسطه) متغیر مستقل است. البته دمای خشک کن (بی واسطه) متغیر مستقل برای ضرایب و ثابت‌های مدل است.

نتایج و بحث

رطوبت اولیه و نهایی گندم در طی آزمایش به ترتیب ۲۶ و ۱۰/۵ (d.b.) بود (جدول ۱). سرعت خشک شدن توده بستر نازک گندم بوسیله اندازه‌گیری رطوبت توده در طی خشک شدن و معادله (۱) به دست آمد که شکل ۲ سرعت خشک شدن را در دماهای متفاوت در طی خشک شدن محصول نشان می‌دهد. با توجه به شکل هرچه دمای خشک کن بیشتر باشد سرعت خشک شدن نیز افزایش می‌یابد. برای مثال، دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد رطوبت در ۴۰ دقیقه اولیه خشک کردن سریع‌تر از دماهای دیگر از



شکل ۲- منحنی سرعت خشک شدن توده بستر نازک گندم با رطوبت اولیه ۲۶ درصد.

نتیجه برای هر یک از ضرایب و ثابت‌ها نمی‌توان مدل خاصی را برحسب متغیر مستقل دما برازش داد. بنابراین مدل رگرسیون چندگانه حاصل از مدل اصلاحی هندرسون و پاییس مناسب نیست.

باید توجه شود با اینکه برای هر یک از دمای خشک کن مدل اصلاح شده هندرسون و پاییس داده‌های آزمایشگاهی را بهتر برازش داد ولی ضرایب و ثابت‌های مدل با تغییر دمای خشک کن، نوسان زیادی نمود، در

جدول ۳- مقادیر ثابت و ضریب مدل رگرسیونی (۱) به تفکیک دمای خشک کن.

| RMSE | χ^2 | r^2 | k | a | دما (°C) |
|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| ۰/۰۱۴۸۰۲ | ۰/۰۰۰۳۰۱ | ۰/۹۲۹۰۹ | ۰/۰۰۴۲۲۴ | ۰/۲۴۳۴۹۷ | ۳۵ |
| ۰/۰۰۹۶۸۱ | ۰/۰۰۰۱۲۹ | ۰/۹۲۲۴۸ | ۰/۰۰۶۶۲۹ | ۰/۲۴۱۸۵۸ | ۴۵ |
| ۰/۰۱۰۸۱۸ | ۰/۰۰۰۱۶۱ | ۰/۹۳۶۱۷ | ۰/۰۰۸۰۶۳ | ۰/۲۴۲۱۴۱ | ۵۰ |
| ۰/۰۰۸۵۵۲ | ۰/۰۰۰۱۰۱ | ۰/۹۴۲۶۳ | ۰/۰۱۲۵۳۶ | ۰/۲۴۵۳۵۳ | ۶۰ |
| ۰/۰۰۹۱۱۷ | ۰/۰۰۰۱۱۴ | ۰/۹۳۹۶۵ | ۰/۰۱۶۸۴۴ | ۰/۲۴۳۴۹۱ | ۷۰ |

جدول ۴- مقادیر ثابت و ضرایب مدل رگرسیونی (۲) به تفکیک دمای خشک کن.

| RMSE | χ^2 | r^2 | C | k | A | دما (°C) |
|----------|----------|---------|-----------|-----------|-----------|----------|
| ۰/۰۰۴۶۳۹ | ۰/۰۰۰۰۳۰ | ۰/۹۹۰۸۳ | ۰/۱۰۷۱۴۵۶ | ۰/۰۱۴۰۵۹۳ | ۰/۱۵۱۴۲۴۵ | ۳۵ |
| ۰/۰۰۵۵۰۵ | ۰/۰۰۰۰۴۲ | ۰/۹۸۶۷۳ | ۰/۱۰۵۱۸۵۵ | ۰/۰۲۱۱۵۳۶ | ۰/۱۵۳۲۱۳۰ | ۴۵ |
| ۰/۰۰۵۴۷۸ | ۰/۰۰۰۰۴۱ | ۰/۹۸۷۶۰ | ۰/۱۰۵۲۶۶۷ | ۰/۰۲۶۰۰۰۴ | ۰/۱۵۳۵۲۱۳ | ۵۰ |
| ۰/۰۰۳۸۹۵ | ۰/۰۰۰۰۳۹ | ۰/۹۹۳۱۴ | ۰/۱۰۵۹۴۰۸ | ۰/۰۳۸۳۱۴۸ | ۰/۱۵۶۳۳۱۸ | ۶۰ |
| ۰/۰۰۴۳۰۵ | ۰/۰۰۰۰۴۳ | ۰/۹۹۲۰۴ | ۰/۱۰۰۴۲۱۵ | ۰/۰۴۹۷۷۴۰ | ۰/۱۶۱۷۳۸۰ | ۷۰ |

جدول ۵- مقادیر ثابت‌های و ضرایب مدل رگرسیونی (۳) به تفکیک دمای خشک کن.

| RMSE | χ^2 | r^2 | m | C | k | a | دما (°C) |
|---------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| ۰/۰۰۳۲۷ | ۰/۰۰۰۰۱۴۶۶ | ۰/۹۹۵۶۸ | ۰/۰۰۲۳۴ | ۰/۱۸۷۱۸ | ۰/۰۳۴۱۲ | ۰/۰۷۶۶۵ | ۳۵ |
| ۰/۰۰۲۱۵ | ۰/۰۰۰۰۰۶۳۸ | ۰/۹۹۷۹۷ | ۰/۰۰۴۷۴ | ۰/۲۰۸۹۳ | ۰/۰۹۵۵۸ | ۰/۰۵۸۸۲ | ۴۵ |
| ۰/۰۰۲۱۳ | ۰/۰۰۰۰۰۶۲۶ | ۰/۹۹۸۱۲ | ۰/۰۰۵۳۳ | ۰/۱۹۹۴۶ | ۰/۰۸۹۵۲ | ۰/۰۶۷۹۸ | ۵۰ |
| ۰/۰۰۲۳۷ | ۰/۰۰۰۰۰۸۳۸ | ۰/۹۹۷۲۴ | ۰/۰۰۶۹۷ | ۰/۱۸۶۶۳ | ۰/۰۸۳۶۹ | ۰/۰۸۰۲۴ | ۶۰ |
| ۰/۰۰۲۵۳ | ۰/۰۰۰۰۰۸۸۱ | ۰/۹۹۷۲۵ | ۰/۰۱۰۳۷ | ۰/۱۹۱۵۸ | ۰/۱۲۹۰۵ | ۰/۰۷۶۶۱ | ۷۰ |

جدول ۶- مقادیر ثابت‌های و ضرایب مدل رگرسیونی (۴) به تفکیک دمای خشک کن.

| RMSE | χ^2 | r^2 | H | C | g | b | k | a | دما (°C) |
|---------|-------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| ۰/۰۰۰۴۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۲۴ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۰۲۵ | ۰/۱۰۵۴۷ | ۰/۲۰۳۶۸ | ۰/۰۲۶۲۴ | ۰/۰۱۱۰۵ | ۰/۱۳۷۵۵ | ۳۵ |
| ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۵ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۱۸۷۱۹ | ۰/۰۳۷۱۱ | ۰/۰۱۳۶۱ | ۰/۱۲۷۸۷ | ۰/۰۰۱۰۲ | ۰/۱۰۴۴۳ | ۴۵ |
| ۰/۰۰۰۶۸ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۶۵ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۰۰۳۲۳ | ۰/۱۵۲۶۷ | ۰/۲۳۵۸۸ | ۰/۰۳۲۰۲ | ۰/۰۲۶۵۹ | ۰/۰۸۴۸۱ | ۵۰ |
| ۰/۰۰۱۴۲ | ۰/۰۰۰۰۰۰۲۷۷ | ۰/۹۹۹۱ | ۰/۸۴۶۴۵ | ۰/۰۱۶۱۶ | ۰/۰۴۳۹۰ | ۰/۱۰۶۸۱ | ۰/۰۰۴۰۹ | ۰/۱۴۶۴۳ | ۶۰ |
| ۰/۰۰۰۷۴ | ۰/۰۰۰۰۰۰۰۷۵ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۰۱۶۱۷ | ۰/۲۲۲۶۵ | -۰/۰۵۴۶ | ۰/۰۰۰۷۹ | ۰/۲۵۰۷۱ | ۰/۰۴۶۰۷ | ۷۰ |

جدول ۷- معیار ارزیابی مدل‌های رگرسیونی خشک شدن توده بستر نازک گندم براساس جدول (۲).

| معیارهای ارزیابی | مدل (۱) | مدل (۲) | مدل (۳) | مدل (۴) |
|------------------|------------|------------|------------|-----------|
| r^2 | ۹۲/۶۰ | ۹۸/۶۸ | ۹۹/۳۸ | ۳/۹۹ |
| χ^2 | ۰/۰۰۰۲۱۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰۰۳۵۹ | ۰/۰۰۰۰۰۱۷۹ | ۰/۵۲۸۵۵۸۶ |
| RMSE | ۰/۰۱۳۹۱۳ | ۰/۰۰۵۸۱۵ | ۰/۰۰۴۰۶۴ | ۰/۶۸۲۹۱۷ |

براساس تجزیه و تحلیل مدل رگرسیونی، با قرار دادن ضرایب و ثابت‌ها به صورت تابعی از دمای خشک کن، مدل نهایی خشک شدن گندم رقم تجن به دست می‌آید:

(۴)

$$(-0.00000547 T^3 + 0.000883 T^2 - 0.04583 T + 0.833365) \exp(-(0.0021 T - 0.02366)t) + (0.00000617 T^3 - 0.001 T^2 + 0.052089 T - 0.6739) \exp(-(0.0002 T - 0.0053)t)$$

مدل ارایه شده را می‌توان برای تخمین رطوبت توده در هر زمان در طی خشک کردن با دقت تخمین مناسب استفاده نمود. سازگاری مدل با داده‌های آزمایشگاهی و رابطه بین ضرایب و دمای خشک کن براساس شاخص‌های ارزیابی $r^2 = ۰.۹۹/۳۸$ ، $RMSE = ۰/۰.۰۴$ و $\chi^2 = ۰/۰۰۰۰۰۱۸$ ، مورد قبول است.

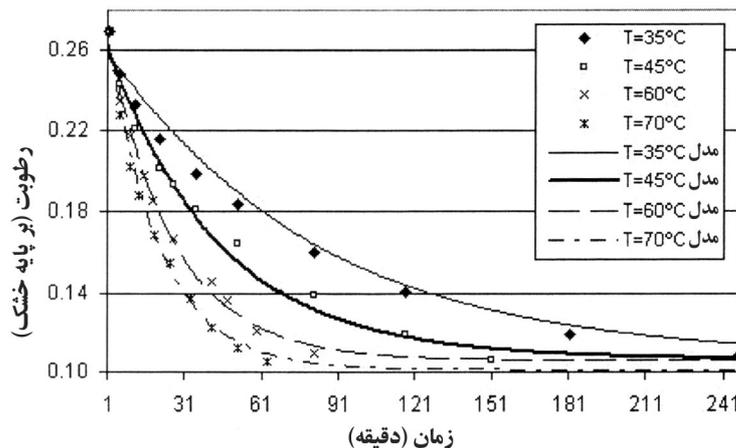
رطوبت توده بستر نازک به دست آمده براساس مدل رگرسیون چندگانه (معادله ۴) و رطوبت توده حاصل از آزمایش در دمای خشک کن ۳۵، ۴۵، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد در طی خشک شدن در شکل ۳ نمایش داده شده است. برای جلوگیری از شلوغ شدن نمودار، منحنی تغییر رطوبت گندم با دمای خشک کن ۵۰ درجه سانتی‌گراد حذف شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود منحنی برازش داده شده با داده‌های آزمایشگاهی نزدیک است.

برای ارزیابی مدل‌ها، مقدار بیشتر ضریب تعیین به عنوان اولین شاخص و سپس مقدار کمتر χ^2 و RMSE مورد بررسی قرار گرفت که مدل (۳) بیشترین ضریب تعیین (۹۹/۳۸) و کمترین مقدار χ^2 و RMSE (به ترتیب ۰/۰۰۰۰۰۱۷۹ و ۰/۰۰۰۴۰۶۴) را دارا بود در نتیجه بهترین مدل در بین مدل‌های ارایه شده مدل دو جمله نمایی (مدل ۳) است که می‌توان برای بررسی و پیش بینی روند خشک شدن توده بستر نازک گندم تجن از این مدل‌ها استفاده نمود.

ثابت‌های خشک کردن k (min^{-1}) و m (min^{-1}) ضرایب a و c (بدون بعد) مدل رگرسیونی (۳) برای هر یک از دماهای خشک کن به دست آمد. با توجه به ضرایب تعیین و میزان شاخص خطا (ستون ۶، ۷ و ۸ جدول ۵) که برای مدل رگرسیونی هر یک از دماها محاسبه گردید، مدل استخراج شده قابل قبول بود اما اثر دمای خشک کن در این مدل‌ها لحاظ نگردید. برای اعمال متغیر دمای خشک کن در مدل (۳)، از مدل رگرسیون چندگانه استفاده شد. برای این منظور مدل رگرسیونی خطی ثابت‌ها (k, m) و غیر خطی ضرایب (a, c) مدل (۳) براساس مقادیر جدول ۵ و متغیر مستقل دمای خشک کن برازش داده شده و در جدول ۸ ارایه شده است.

جدول ۸- مدل رگرسیونی ضرایب و ثابت‌های مدل دو جمله نمایی.

| ضرایب | مدل | r^2 | RMSE | χ^2 |
|-------|---|--------|-----------|------------|
| a | $-0.00000547 T^3 + 0.000883 T^2 - 0.04583 T + 0.833365$ | ۰/۹۶۸۴ | ۰/۰۰۱۷۸۰۲ | ۰/۰۰۰۰۰۹۵ |
| k | $0.0021 T - 0.02366$ | ۰/۷۲۱۰ | ۰/۰۲۰۵۷۷۰ | ۰/۰۰۰۰۴۲۳۰ |
| c | $0.00000617 T^3 - 0.001 T^2 + 0.052089 T - 0.6739$ | ۰/۹۶۸۵ | ۰/۰۰۱۹۳۴۷ | ۰/۰۰۰۰۱۱۲ |
| m | $0.0002 T - 0.0053$ | ۰/۹۷۴۰ | ۰/۰۰۰۵۵۱۱ | ۰/۰۰۰۰۰۰۳ |



شکل ۳- مقایسه منحنی خشک شدن براساس داده‌های آزمایشگاهی و مدل دو جمله‌نمایی.

۲- سرعت خشک شدن توده گندم در ۴۰ دقیقه اول خشک شدن با افزایش دما، افزایش می‌یابد.

۳- منحنی خشک شدن توده بستر نازک گندم رقم تجن برای هریک از دماهای خشک کن ۳۵، ۴۵، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد براساس چهار مدل هندرسون و پاییس، لگاریتمی، دو جمله‌نمایی و اصلاح شده هندرسون و پاییس با تخمین قابل قبولی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد.

۴- مدل رگرسیونی چندگانه خشک شدن گندم رقم تجن بوسیله مدل دو جمله‌نمایی با دو متغیر زمان خشک شدن و دمای خشک کن با دقت خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد.

مدل دو جمله‌نمایی که توسط موهاپاترا و سرینیواسا راو برای مدلسازی خشک کردن گندم نیم پز معرفی شد با ضریب تعیین ۹۹/۸ درصد برای دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و ۹۸/۲ درصد برای دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، داده‌های آزمایشگاهی را برازش داد. اکپینار و همکاران (۲۰۰۳) از همین روش برای استخراج مدل رگرسیونی چندگانه خشک شدن فلفل قرمز استفاده کردند که خطای مدل ارزیابی شده برای مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب ۰/۰۰۰۳۳۲ و ۰/۰۱۷۴ بود و ضریب تعیین ثابت و ضرایب مدل رگرسیونی که عبارت از k ، a و c به ترتیب ۰/۹۸۶۲، ۰/۹۹۴۵ و ۰/۷۸۲۰ بود.

نتیجه‌گیری

۱- آزمایش خشک کردن توده بستر نازک گندم رقم تجن در مرحله نرخ کاهش خشک شدن بود.

منابع

- خوشحال، م.، و مینایی، س. ۱۳۸۰. تعیین روابط بین پارامترهای موثر در فرآیند خشکاندن شلتوک (برنج) به روش مداوم. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۸ (۳): ۱۳۳-۱۲۳.
- Akpinar, E.K., Bicer, Y., and Yildiz, C. 2003. Thin layer drying of red pepper. Journal of Food Engineering. 59: 99-104.
- ASAE. 1982. Moisture measurement: grain and seeds. ASAE Standard S352. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI 49085, USA
- Becker H.A. 1959. A study of diffusion in solids of arbitrary shape with application to the drying of the wheat kernel. Journal of Applied Polymer Science, 1(2): 212-226
- Becker, H.A., and Sallans, H.R. 1955. A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. Cereal Chemistry, 32: 212-226.

6. Bruce, D.M. 1985. Exposed- layer barley drying: three models fitted to new data up to 150 °C. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32: 337-347.
7. Casada, M.E. 2002. Moisture adsorption characteristics of wheat and barley. *Transactions of the ASAE*. 45(2): 361–368
8. Chakraverty, A., and Kaushal, R.T. 1982. Determination of optimum drying conditions and development of drying equations for thin layer drying of parboiled wheat. *AMA (winter)*, 33–36.
9. Cögüs, F. 1994. The effect of movement of solutes on maillard reaction during drying. Ph.D. thesis. Leeds University, Leeds.
10. Diamante, L.M., and Munro, P.A. 1993. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slice. *Solar Energy*. 51: 271-276.
11. Ertekin, C., and Yaldiz, O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*. 63: 349–359.
12. Gastón, A.L., Abalone, R.M., Giner, S.A., and Bruce, D.M. 2004. Effect of modelling assumptions on the effective water diffusivity in wheat. *Biosystems Engineering*. 88 (2): 175–185.
13. Giner, S.A., and Bruce, D.M. 1998. Two-dimensional model of steady-state mixed-flow grain drying. Part 2: Experimental validation. *Journal of Agricultural Engineering Research (71)*: 51–66.
14. Giner, S.A., and Mascheroni, R.H. 2002. Diffusive Drying Kinetics in Wheat, Part 2: Potential for a Simplified Analytical Solution. *Biosystems Engineering*. 81(1): 85d97.
15. 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.
16. Henderson, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*. 17: 1167–1172.
17. Hutchinson, D., and Otten, L. 1983. Thin layer air drying of soybeans and white beans. *Journal of Food Technology*. 18: 507–524.
18. Karathanos, V.T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*. 39: 337–344.
19. Mishra, M.K., and Brooker, D.B. 1980. Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. *Transactions of ASAE*. 23: 1254–1260.
20. Mohapatra, D., and Srinivasa Rao, P. 2005. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*. 66: 513–518.
21. Özdemir, M., and Devres, Y.O. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*. 42: 225–233.
22. Ratti, C., and Mujumdar, A.S. 1997. Solar drying of foods: modeling and numerical simulation. *Solar Energy*. 60: 151-157.
23. Tığrül, I.T., and Pehlivan, D. 2002. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*. 55: 209–216.
24. Wang, C.Y., and Singh, R.P. 1978. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. St. Joseph, MI: ASAE, ASAE paper 78-6505.
25. Watson, E.L., and Bhargava, V.K. 1974. Thin layer studies on wheat. *Canadian Journal of Agricultural Engineering*. 16: 18–22.
26. Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., and Cagatay, F. 1999. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In: A. Bascetincelik (Ed.), *Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy* (pp. 565–569), Adana, Turkey: Faculty of Agriculture, Çukurova University.
27. Yaldiz, O., and Ertekin, C. 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*. 19: 583-596.
28. Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*. 26: 457–465.
29. Yamaguchi, S., Wakabarashi, S., and Yamazawa, S. 1985. Properties of brown rice kernel for calculation of drying stresses. In *drying*, 80, pp. 438-444. New York: Hemisphere Publishing Corp.
30. Zhang, Q., and Litchfield, J.B. 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*. 9: 383–395.

Wheat (Tajan) thin layer drying statistical modeling

Sh. Rafiee

Assistant professor, Agricultural machinery engineering Dept, faculty of Biosystem engineering, College of Agricultural and Natural Resources, Tehran university, karaj, Iran

Abstract

This study, thin layer drying of wheat (Tajan) was modeled. A convective type experimental dryer was used. Drying experiments were conducted at inlet temperatures of drying air of 35, 45, 50, 60 and 70°C, initial moisture content %25 d.b., and four replications for each treatment. Four different thin layer mathematical drying models were compared according to their coefficient of correlation to estimate drying curves. The χ^2 , root mean square error (RMSE) and coefficient of determination r^2 were used as the primary criterion to select the best equation to account for variation in the drying curves of the dried samples. The effects of drying air temperature on the model constants and coefficients were predicted by regression models. The effects of drying air temperature on the Page model constants and coefficients were evaluated by a multiple regression technique. Multiple regression method used for calculating for simulation of moisture content during drying for each temperature values that χ^2 , RMSE and r^2 were used. The multiple regressions on the coefficients of that model for the effects of the drying air temperature gave r^2 , χ^2 and RMSE that are 99.38%, 000018 and 004, respectively. These results showed good agreement with the experimental data obtained.

Keywords: Modeling of Drying; Wheat; Thin Layer; Multiple regressions