

تعیین سینتیک خشک شدن لایه نازک قارچ خوراکی به روش تابش فرسوخ

حامد امیر نجات^۱، محمدهادی خوش تقاضا^{۲*} و حسن پهلوانزاده^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد و ^۲ دانشیار مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

^۳ استاد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۱۱/۲۵)

چکیده

یکی از روش‌های جدید در خشک کردن مواد غذایی، استفاده از انرژی تابشی فرسوخ است که باعث افزایش سرعت خشک شدن و حفظ کیفیت محصول خشک شده و کاهش هزینه‌های فرآیند می‌شود. در این تحقیق، فرآیند خشک کردن لایه نازک قارچ دکمه‌ای به روش فرسوخ مدل‌سازی شد. آزمایش‌های خشک کردن با نمونه‌های برش خورده قارچ خوراکی دکمه‌ای در سه سطح شدت تابش (0.49 ، 0.31 ، 0.22 W/cm²) و سه سطح سرعت جریان هوا (1 ، 0.7 ، 0.5 m/s) اجرا شد. تغییرات رطوبت با وزن کردن نمونه‌ها طی فرآیند خشک کردن اندازه‌گیری گردید. مدل‌های استاندارد جهت بررسی سینتیک خشک شدن بر داده‌های آزمایشی برازش داده شد و کیفیت برازش آنها بر حسب سه پارامتر ضریب تبیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مدل‌های به کار رفته عبارت بودند از: لوئیس، پیچ، هندرسون و پاییس، لگاریتمی، لوجستیک، پیچ اصلاح شده، دو قسمتی، درجه دو و انتشار. تمامی مدل‌ها نتایج قابل قبولی را در بر داشتند ولی در کل مدل لوجستیک نسبت به سایر مدل‌ها با بزرگترین مقدار R^2 و کوچکترین مقادیر χ^2 و RMSE (به ترتیب 0.9997 ، 0.0022 و 0.0049) نتایج نزدیک‌تر به داده‌های آزمایش را داشت.

واژه‌های کلیدی: خشک شدن، مادون قرمز، لایه نازک، قارچ دکمه‌ای، مدل رگرسیون، مدل‌سازی ریاضی.

مقدمه

آنجایی که هوا انرژی تابشی فرو سرخ را از خود عبور می‌دهد، بدون اینکه هوای محیط گرم شود، انرژی پرتوی فرو سرخ، ماده‌ی مورد نظر را گرم می‌کند (Nowak & Lewicki, 2004). در خشک کردن به روش فرو سرخ سرعت جریان هوا در گرفتن رطوبت از سطح ماده غذایی کمک کرده و از اشباع شدن آن جلوگیری می‌کند. آن طور که از تحقیقات پیشین بر می‌آید، یک راه برای کاهش زمان خشک کردن، انتقال حرارت با استفاده از پرتوی فرو سرخ است (Pankaj & Sharma 2006; Sharma et al., 2004; Dilip & Pathare, 2004). این روش به خصوص برای لایه‌های نازک محصول که در معرض پرتو می‌باشند، مناسب است و استفاده از آن در سال‌های اخیر به واسطه‌ی پیشرفت در نوع رادیاتورهای فرو سرخ رو به افزایش است. در این روش عمل حرارت دهی به مواد بدون تغییر در ساختمان آن انجام می‌گیرد، بنابراین کیفیت مواد از نظر ساختمانی بهبود یافته، فعالیت بیولوژیکی مواد بالا رفته و هزینه فرآیند کاهش می‌یابد (Strumilo & Kudra, 1998).

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 رابطه‌ی بین رطوبت متوسط دانه با زمان ارائه می‌گردد.

قارچ‌های خوراکی دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) به عنوان منبع غذایی سرشار از پروتئین و کم کالری و همچنین مصارف دارویی، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. به دلیل فساد پذیری سریع این ماده غذایی، انجام اقداماتی به منظور افزایش زمان نگهداری آن بسیار اهمیت دارد. خشک کردن یکی از روش‌های نگهداری قارچ خوراکی است که باعث افزایش زمان نگهداری آن از چند روز به چند ماه و تا یک سال و سهولت حمل و نقل و نگهداری آن می‌شود (Hajizadeh, 1995). یکی از روش‌های جدید در خشک کردن مواد غذایی، استفاده از انرژی تابشی فرو سرخ است. وقتی که پرتو فرو سرخ به سمت محصول تابانده شود، بسته به محصول و طول موج پرتو تابیده شده، قسمتی از پرتو از محصول عبور کرده، درصدی از آن منعکس می‌شود و بالاخره بخشی هم جذب شده و به داخل محصول نفوذ می‌کند و به انرژی حرارتی تبدیل می‌گردد. سپس جسم به شدت گرم شده و گرادیان حرارتی در داخل جسم در طی یک مدت کوتاهی به شدت کاهش پیدا می‌کند. از

* نویسنده مسئول: khoshtag@modares.ac.ir

کانال تعبیه شده بود قرار داده شد. حد فاصل بین کانال و محفظه‌ی فرو سرخ شیشه میرال (شیشه‌ای است که با حرارت-های بالا بازیخت شده و در برابر حرارت دیدن مقاوم است) با ضخامت ۱۰mm قرار گرفت تا ضمن ثابت ماندن سرعت هوای مورد نظر در کانال، پرتوهای فرو سرخ از دریچه‌ی فوقانی کانال به محصول تابانده شود. دیواره‌های محفظه فرو سرخ از ورق آلومینیوم پوشانده شد تا بازده تابشی پرتو افزایش یابد، همچنین این محفظه به گونه‌ای ساخته شد تا برای حصول شدت‌های تابش گوناگون، بتوان فاصله بین منبع فرو سرخ و نمونه را از طریق جابه‌جایی منبع مادون قرمز، تغییر داد. خشک کن آزمایشگاهی دارای مکنده سانتریفوژ بود که هوا را به صورت موازی بر بستر مواد جریان می‌داد و برای تامین پرتوی فرو سرخ، از دو لامپ ۲۵۰ واتی فرو سرخ ساخت شرکت Osram کشور اسلواکی، استفاده گردید.

لامپ فرو سرخ در فواصل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری نمونه قرار داده شد. شدت تابش در این فاصله‌ها به وسیله یک دستگاه تابش‌سنج OPHIR ساخت کشور آمریکا با دقت $\pm 0.3\%$ وات بر سانتی‌متر مربع اندازه‌گیری شد و به ترتیب ۰/۴۹، ۰/۳۱ و ۰/۲۲ وات بر سانتی‌متر مربع به دست آمد. شدت تابش‌های ذکر شده در این آزمایش، به ترتیب دماهای ۶۰، ۵۰ و ۴۰ درجه سلسیوس را در سطح نمونه ایجاد نمودند. دمای سطح نمونه با استفاده از دماسنج لیزری (Raytek مدل RAYST6XLG) ساخت کشور ایالات متحده آمریکا با دقت $\pm 2^\circ\text{C}$ اندازه‌گیری شد. در این آزمایش سرعت جریان هوا، توسط دریچه‌ای در بدنه خشک کن تنظیم گردید و برای واسنجی آن، از بادسنج مدل Testo 400, hot wire anemometer با دقت $\pm 0.1\%$ متر بر ثانیه ساخت کشور آلمان استفاده شد. سرعت جریان هوا هنگام آزمایش در وسط کانال جریان هوا و محل قرارگیری ظرف توری نمونه‌ها توسط سرعت سنج پره‌ای از نوع Loutron AM-4202 با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه ساخت کشور تایوان اندازه‌گیری شد. این نوع سرعت سنج سرعت میانگینی از سرعت جریان هوا در بستر خشک کن را ارائه می‌دهد. ترازوی استفاده شده، EK-3000i مدل A&D ساخت کشور ژاپن بود که وزن نمونه را بدون نیاز به برداشتن نمونه از داخل خشک کن به طور پیوسته (هر یک دقیقه) اندازه گرفته و برای ثبت از طریق سیم رابط RS232C به رایانه منتقل می‌کرد. دقت اندازه‌گیری این ترازو ۰/۱ گرم بود. نحوه خشک کردن بدین صورت است که پرتوی تابیده شده به محصول، سطح آن را گرم کرده و همچنین موجب افزایش گرادیان حرارتی بین سطح محصول و سطوح داخلی شده و باعث خروج رطوبت از داخل محصول گردیده که

در معادلات نیمه تجربی از مقاومت در برابر انتقال جرم در سطح محصول صرف نظر می‌شود. به عبارتی سطح محصول بدون صرف زمان با رطوبت هوای اطراف خود به تعادل می‌رسد (Strumilo & Kudra, 1998). از مشهورترین معادلات نیمه تجربی خشک کردن لایه نازک می‌توان به معادلات لوپس^۱ و پیچ^۲ اشاره نمود (Rafiee & Kashaninejhad, 2008; Ertekin & Yaldiz, 2004).

Arora et al., (2003) با در نظر گرفتن چند سطح دمایی برای خشک کردن قارچ دکمه‌ای به روش جابه‌جایی به بررسی مدل خشک کردن پرداختند و مدل پیچ را برای این منظور پیشنهاد نمودند. همچنین Cao et al., (2003) در خشک کردن قارچ دکمه‌ای، با در نظر گرفتن چند سطح دمایی و همچنین رطوبت نسبی هوای ورودی خشک کن، مدل اصلاح شده‌ی صفحه‌ای^۳ را مناسب ارزیابی نمودند. در دمای ۲۱ تا ۲۵ درجه سلسیوس کیفیت قارچ‌های تازه معمولاً حدود ۱۲ ساعت پس از برداشت در حد قابل قبول باقی می‌ماند و در صورت نگهداری قارچ در دمای حدود ۵ درجه سلسیوس بهترین تاریخ مصرف قارچ تازه حداکثر تا ۱۰ روز پس از برداشت توصیه شده است و پس از آن به تدریج از کیفیت محصول کاسته شده و تغییر رنگ می‌دهد (Hajizadeh, 1995). 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 این تحقیق عبارتند از:

- ۱- مشخص نمودن روند خشک شدن قارچ دکمه‌ای به روش فرو سرخ در سطوح مختلف شدت تابش و سرعت‌های جریان هوای خشک کن
- ۲- استخراج مدل مناسب خشک کردن لایه نازک قارچ خوراکی دکمه‌ای

مواد و روش‌ها

خشک کن و ابزار اندازه‌گیری

برای انجام آزمایش از دستگاه خشک کن آزمایشگاهی فرو سرخ (شکل ۱) استفاده شد. این خشک کن به طور عمده از دو قسمت کانال تامین جریان هوا و محفظه‌ی تامین پرتو فرو سرخ تشکیل شده است. نمونه‌های مورد آزمایش در وسط کانال بر روی ظرفی که از توری ساخته شده بود و بر روی ترازوی دیجیتال که در زیر و خارج از کانال تعبیه شده بود قرار گرفته بود. محفظه فرو سرخ در بالای دریچه‌ای که در قسمت فوقانی

1. Lewis
2. Page
3. Modified Plate Drying

ثابت می‌گشت، نمونه‌ها برای شروع آزمایش‌ها بر روی بستر خشک کن قرار داده می‌شدند و پس از شروع آزمایش وزن نمونه‌ها در هر یک دقیقه، توسط ترازو اندازه‌گیری شده و در رایانه ثبت می‌گردید. خشک کردن نمونه تا زمانی که وزن نمونه‌ها در دفعات متوالی اندازه‌گیری تغییر نکند، ادامه داشت و برای تحلیل و مقایسه اثرات سطوح مختلف خشک کردن بر روی زمان خشک شدن قارچ خوراکی، رسیدن محصول به رطوبتی معادل ۱۰٪ (بر پایه خشک) منظور گردید. دما و رطوبت نسبی محیط اطراف خشک‌کن از متغیرهای تعیین کننده در خشک کردن مواد غذایی می‌باشند. از اینرو در هر آزمایش خشک کردن دما و رطوبت نسبی هوای اطراف خشک‌کن به ترتیب با استفاده از دماسنج دیجیتال Testo 925 با دقت $\pm 0.1^\circ\text{C}$ و رطوبت‌سنج Testo 400 با دقت ± 0.1 ساخت کشور آلمان اندازه‌گیری و ثبت شد. در طول آزمایش‌های خشک کردن، محدوده میانگین تغییرات دمای محیط 3 ± 30 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوا 5 ± 30 درصد بود.

ملاحظات تئوری

مدل‌های منحنی خشک کردن لایه نازک قارچ بر اساس ۹ مدل توصیه شده در تحقیقات گذشته انتخاب گردید که در جدول (۱) آورده شده است (Sharma et al., 2004; Sharma et al., 2005) در اکثر تحقیقات مدل سینتیک خشک کردن بر اساس نسبت رطوبت (MR) به دست آمده است که در آن رطوبت نمونه در طی خشک شدن به طور غیر مستقیم به دست می‌آید (Nowak & Lewicki., 2004; Ertekin & Yaldiz, 2004). 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 (۱) به دست می‌آید:

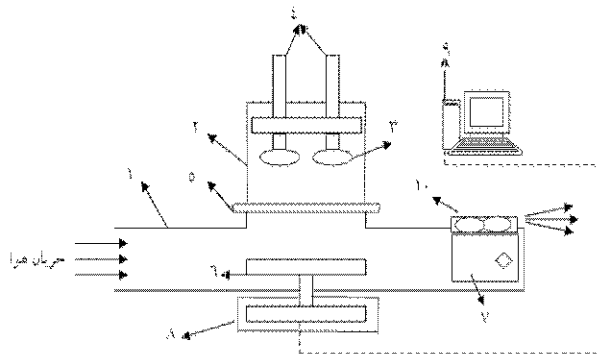
$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

که در آن، MR نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t میزان رطوبت در هر لحظه، M_0 میزان رطوبت اولیه و M_e رطوبت تعادل می‌باشد. کلیه رطوبت‌ها بر حسب درصد و بر پایه خشک (d.b.) است. مقدار M_e در مقایسه با M_0 و M_t کوچک بوده، لذا با در نظر نگرفتن M_e ، رابطه‌ی (۱) به صورت رابطه‌ی ساده‌تر (۲) تبدیل خواهد شد (Diamante & Munro, 1991):

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

سه معیار ضریب تبیین^۱ (R^2)، مربع کای^۱ (χ^2) و ریشه

این رطوبت به واسطه جریان هوای ایجاد شده توسط دمنده از محیط اطراف محصول خارج می‌گردد.



شکل ۱- طرحواره خشک‌کن آزمایشگاهی فرورسرخ. ۱. کانال، ۲. محفظه مادون قرمز، ۳. لامپ‌های فرورسرخ، ۴. پیچ‌های تنظیم ارتفاع، ۵. شیشه میرال، ۶. سینی قرارگیری نمونه، ۷. دریچه جانبی کانال، ۸. ترازو، ۹. رایانه، ۱۰. مکنده سانتریفیوژ هوا

آماده‌سازی نمونه‌ها

برای خشک کردن از قارچ دکمه‌ای که در منطقه ملارد کرج پرورش می‌یابد، استفاده شد. نمونه‌های مورد آزمایش به صورت تازه تهیه می‌گردید تا رطوبت اولیه نمونه‌ها در تمامی آزمایش‌ها ثابت باشد. قارچ‌ها بعد از شسته شدن با آب توسط چاقو به ضخامت ۳ mm بریده شده و یک لایه از آن روی بستر توری خشک کن قرار داده می‌شد. برای تعیین میزان رطوبت اولیه قارچ از استاندارد (AOAC, 1980) استفاده شد. بر طبق این استاندارد نمونه‌هایی از قارچ خوراکی دکمه‌ای در دمای 100°C و به مدت ۳ تا ۴ ساعت در اجاق برقی قرار گرفت و با ثبت وزن نمونه‌ها قبل و بعد از قرارگیری در اجاق برقی وزن اولیه نمونه‌ها محاسبه شد.

شرایط خشک کردن و انجام آزمایش‌ها

خشک کردن لایه نازک قارچ در سه سطح پرتوی تابشی (0.49W/cm^2 ، 0.31 ، 0.22) که حدود دمای (40°C ، 50 ، 60) را در سطح لایه نازک قارچ ایجاد می‌کنند و در سه سطح سرعت هوای (1m/s ، 0.7 ، 0.5) انجام پذیرفت. سطوح شدت تابش و سرعت هوا بر اساس تحقیقات پیشین انتخاب گردیده‌اند (Arora et al., 2003; Cao et al., 2003; Pankaj & Sharma, 2006). آزمایش‌ها به وسیله‌ی آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 11.5 انجام شد و کلیه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطوح یک درصد و پنج درصد با یکدیگر مقایسه شدند.

برای شروع آزمایش ابتدا دستگاه روشن شده سپس بعد از ۱۵ دقیقه کار کردن دستگاه که دما و سرعت هوای خشک کن

1. Coefficient of determination

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (۴)$$

که در آن‌ها، $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت به دست آمده در طی i امین اندازه‌گیری، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت پیش‌بینی شده از مدل در i امین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهده‌ها (داده‌ها) و n تعداد ثابت‌های به کار رفته در معادله است. مقدار ضرایب و ثابت‌های مدل‌های جدول (۱) در دماهای مختلف به روش رگرسیون محاسبه گردید.

متوسط مربع خطای داده‌ها $(RMSE)$ برای سنجش بهترین مدل استفاده شد. بر این اساس مدلی که دارای R^2 بزرگتر و χ^2 و $RMSE$ کوچکتری بود، به عنوان مدل بهتر در نظر گرفته شد (Akpınar et al., 2003; Strumilo & Kudra, 1998).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (۳)$$

- 1 Chi-square
- 2 .Root mean square error

جدول ۱- مدل‌های خشک‌شدن لایه نازک مورد استفاده در مدل‌سازی

ردیف	نام مدل	مدل*	مرجع (Sharma et al., 2004,) (Sharma et al., 2005)
۱	لویس	$MR = \exp(-kt)$	Lewis(1921)
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	Page(1949)
۳	پیچ اصلاح شده	$MR = \exp[-(kt)^n]$	Diamante & Munro(1993)
۴	هندرسون و پابیس	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	Henderson & Pabis(1961)
۵	لگاریتمی	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$	Diamante & Munro(1991)
۶	لوجستیک	$MR = a / (1 + b \cdot \exp(kt))$	Chandra & Singh(1995)
۷	دو قسمتی	$MR = a \cdot \exp(-k_0t) + b \cdot \exp(-k_1t)$	Yaldiz et al.(2001)
۸	درجه دو	$MR = 1 + at + bt^2$	Ozdemir & Devres (1999)
۹	انتشار	$MR = (8/\pi^2) \exp(-(\pi^2 D_{eff}t)/4l^2)$	Crank(1975)

* MR : نسبت رطوبت؛ t : زمان (min)، D_{eff} : ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s)، a, b, c : ضرایب و k_0, k_1 و k : ثابت‌های مدل و l ضخامت (m) است.

نتایج و بحث

نتایج بررسی اثر متقابل و مقایسه میانگین عوامل شدت تابش پرتو و سرعت جریان هوا بر زمان خشک شدن در شکل (۲) نشان داده شده است. در هر سرعت جریان هوا زمان خشک شدن در شدت تابش 0.49 W/cm^2 کوتاه‌تر از دو شدت تابش 0.22 W/cm^2 و 0.31 بود (شکل ۴). این موضوع به این دلیل است که با افزایش شدت تابش پرتو (افزایش دمای سطح لایه نازک قارچ) گرادبان حرارتی داخل قارچ با سطح بیرونی، افزایش یافته و رطوبت با سرعت بیشتری از محصول خارج می‌شود. این نتایج، یافته‌های (Mohajeran et al., 2006) در مورد خشک‌کردن شلتوک به روش تابش مادون‌قرمز را تایید می‌کند. همچنین زمان خشک کردن، در سرعت جریان هوای 0.5 S/m و در هر سه شدت تابش کمتر از زمان خشک کردن، در سرعت جریان هوای 0.7 m/s و 1 بوده است (شکل ۳). علت این پدیده را می‌توان ناشی از عمل خنک‌سازی سطح نمونه به واسطه هوای عبوری از کانال دانست به طوری که با افزایش سرعت هوا عمل خنک‌سازی هوا نیز افزایش می‌یابد. این نتیجه با سایر تحقیقات انجام گرفته مطابقت دارد (Doymaz, 2006; Mohajeran, 2005; Sharma et al., 2004).

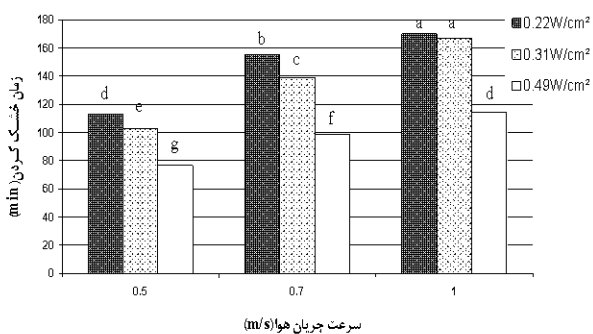
رطوبت اولیه قارچ دکمه‌ای مورد آزمایش به طور متوسط برابر $1.132/9$ (d.b.) بود. خشک کردن نمونه‌ها تا 10 ٪ (d.b.) ادامه داشت. بر اساس نتایج تجزیه واریانس در جدول (۲)، اثر فاکتورهای شدت تابش پرتو (دمای سطح لایه نازک قارچ) و سرعت جریان هوا در سطح 1 درصد معنی‌دار می‌باشد. همچنین اثر متقابل شدت تابش پرتو و سرعت جریان هوا نیز در سطح 1 درصد معنی‌دار است.

جدول ۲- تجزیه واریانس زمان خشک کردن لایه نازک قارچ دکمه‌ای

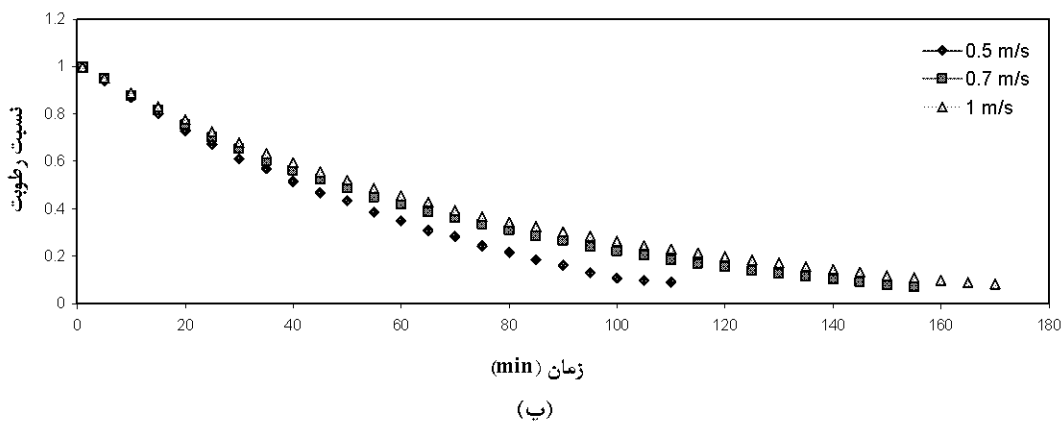
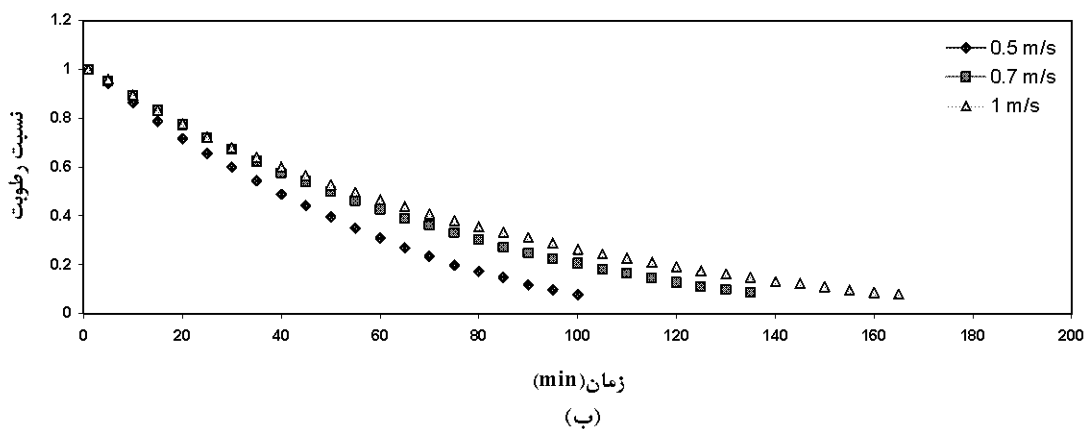
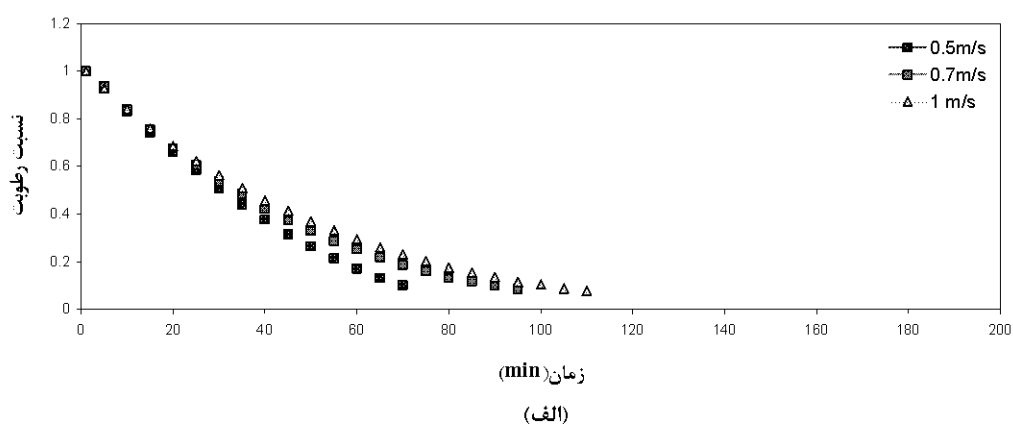
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
تکرار	۳		
شدت تابش پرتو	۲	۱۷۶۱۲/۷۰۳	**۲۸۶۴/۷۱۷
سرعت	۲	۲۰۴۴۰/۲۵۹	**۳۳۲۴/۶۲
شدت تابش پرتو×سرعت	۴	۴۰۷۱/۷۰۳	**۶۶۲/۲۶۵
خطای آزمایشی	۱۸	۶/۱۴۸	
کل	۲۷		

** = معنی‌دار در سطح 1 درصد

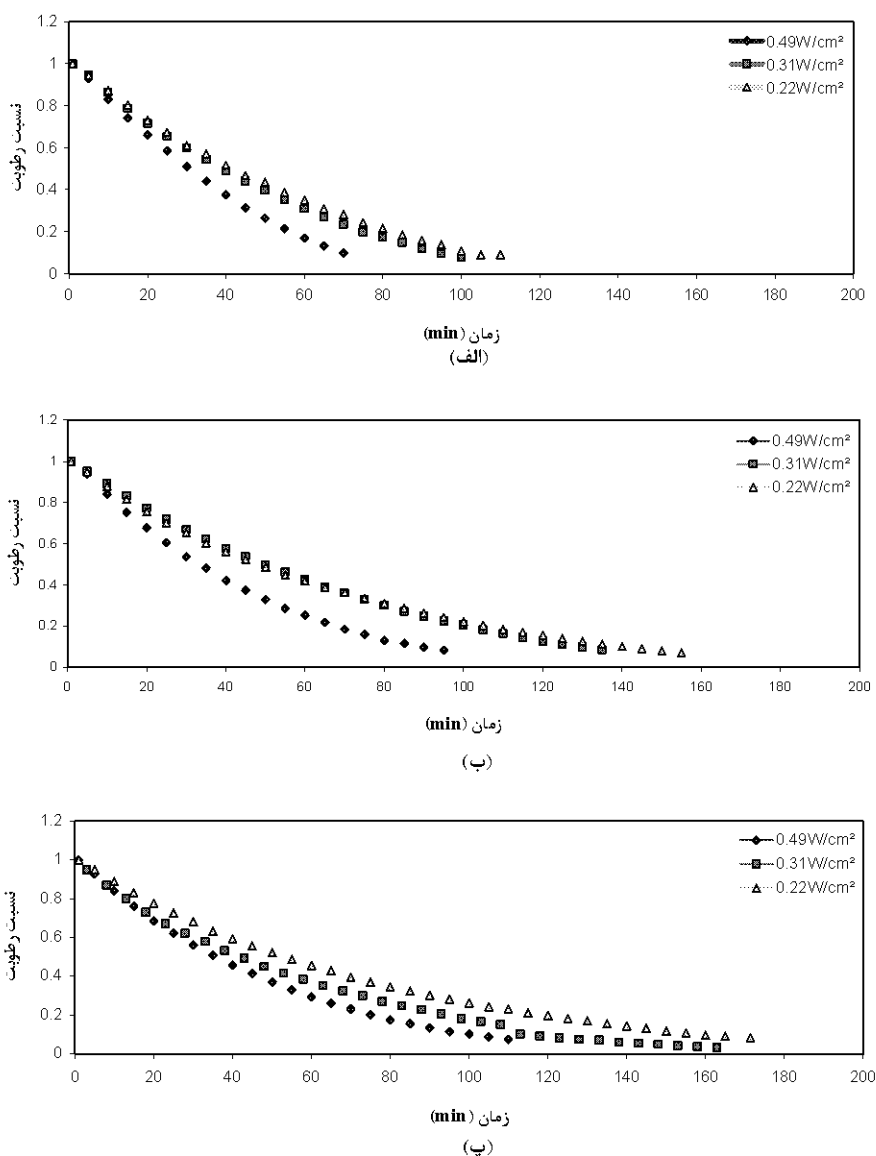
شکل (۴) منحنی‌های خشک شدن قارچ خوراکی در شدت‌های تابش متغیر و سرعت ثابت را نشان می‌دهند. همان‌طور که پیداست، با افزایش شدت تابش پرتو فرو سرخ سرعت خشک‌شدن افزایش و در نتیجه زمان خشک شدن نمونه‌ها کاهش یافته است. همچنین در سرعت‌های پایین‌تر هوا و در شدت‌های تابشی پایین پرتو فرو سرخ، شدت‌های تابشی اثر معنی‌دارتری بر روی زمان خشک‌شدن دارد به طوری که در سرعت ثابت ۱ متر بر ثانیه و در شدت‌های تابشی ۰/۳۱ و ۰/۲۲ متر بر سانتی‌متر مربع تقریباً زمان خشک شدن یکسان می‌باشد.



شکل ۲- اثر متقابل و مقایسه میانگین زمان خشک کردن در شدت تابش‌های ۰/۲۲ و ۰/۳۱ و ۰/۴۹ W/cm² و سرعت‌های مختلف جریان هوا



شکل ۳- منحنی سینتیک خشک شدن لایه نازک قارچ خوراکی در سرعت‌های مختلف و شدت تابش الف - ۰/۴۹ وات بر سانتی‌متر مربع، ب - ۰/۳۱ وات بر سانتی‌متر مربع و پ - ۰/۲۲ وات بر سانتی‌متر مربع



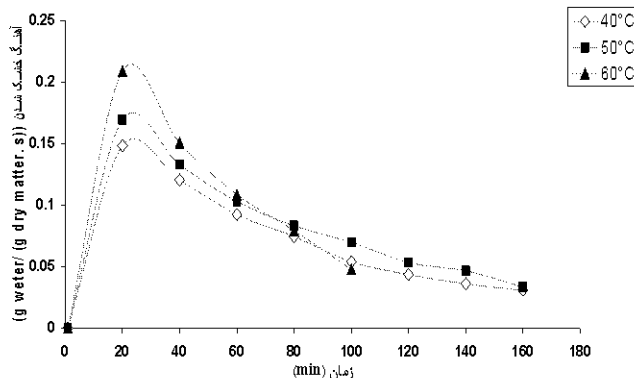
شکل ۴- منحنی خشک شدن لایه نازک قارچ خوراکی در شدت تابش‌های مختلف و سرعت الف- ۰/۵ متر بر ثانیه، ب- ۰/۷ متر بر ثانیه و پ- ۱ متر بر ثانیه

از شکل (۵) پیداست در لحظات اولیه پروسه خشک کردن آهنگ خشک شدن در سرعت ثابت جریان هوا ۱ m/s با افزایش شدت تابش از 0.22 W/cm^2 به 0.49 W/cm^2 ، افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن به انتهای زمان خشک کردن آهنگ خشک شدن در سه شدت تابش، به یکدیگر نزدیک می‌شود. علت این پدیده را می‌توان در کاهش رطوبت آزاد قارچ، در انتهای زمان خشک شدن دانست که به علت ناچیز بودن رطوبت تعادلی قارچ خوراکی در هر سه شدت تابش تقریباً به یک میزان می‌باشد. (Pal & Chacravertya, 1997). همچنین در زمان‌های اولیه خشک شدن تا حدود ۲۰ min افزایش دمای ماده و وجود آب کافی در حوالی سطح ماده، آهنگ خشک شدن افزایشی است تا اینکه آب در حوالی سطح ماده کاهش می‌یابد و نفوذ آب از درون ماده به سطح شروع می‌شود که از این لحظه به بعد نفوذ رطوبت کنترل کننده‌ی آهنگ خشک شدن می‌گردد، لذا

در فرآیند خشک کردن، انتقال جرم داخلی با پخش مایع، بخار و نیروهای موئینه در محصول همراه است و آب موقع رسیدن به سطح تبخیر می‌شود. وقتی که رطوبت قارچ بالا باشد، کاهش رطوبت به وسیله نیروهای موئینه اتفاق می‌افتد (Pal & Chacravertya, 1997). با گذشت زمان منافذ و فضاهای آزاد، آب خود را از دست داده و نسبت مواد جامد ماده افزایش می‌یابد، در نتیجه آهنگ خشک شدن و انتقال حرارت به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. در شروع پروسه خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد بوده و آهنگ خشک شدن آن سریع است، به تدریج با پیشرفت زمان میزان رطوبت محصول به طور طبیعی کاهش پیدا کرده و آهنگ خشک شدن به طور طبیعی کاهش می‌یابد. محصول عمده رطوبت خود را در مراحل اولیه پروسه خشک کردن از دست می‌دهد و زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقیمانده لازم است (شکل ۵). همان‌طور که

جدول (۳) تا (۵) نتایج برازش مدل‌های ذکر شده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. بهترین مدلی که می‌تواند سینتیک خشک شدن لایه نازک قارچ دکمه‌ای را توصیف کند با توجه به بزرگترین مقدار میانگین R^2 و کوچکترین مقادیر میانگین χ^2 و RMSE انتخاب شد. مدل لوجستیک در سرعت‌های ۰/۷ و ۱ متر بر ثانیه بهترین مدل برای توصیف داده‌های آزمایشگاهی بوده و مدل درجه دوم به همراه مدل لوجستیک و پیچ در سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه مدل‌های مطلوب بوده‌اند. با توجه به اینکه مدل لوجستیک در تمامی سطوح تیماری، قابل قبول بوده، مدل پیشنهادی در این آزمایش می‌باشد. مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE برای مدل لوجستیک به ترتیب بین ۰/۹۹۹۷-۰/۹۹۱۹، ۰/۱۳۴-۰/۰۰۲۲ و ۰/۰۲۴۶-۰/۰۰۴۹ قرار داشت. بعد از مدل لوجستیک، درجه دوم نیز مدل مناسبی در این آزمایش می‌باشد.

آهنگ خشک شدن کاهشی می‌گردد که در شکل (۵) کاملاً مشخص می‌باشد. منحنی آهنگ خشک شدن در سرعت جریان هوای ۰/۷ و ۰/۵ نیز همانند سرعت ۱ m/s مشاهده گردید.



شکل ۵- منحنی نرخ از دست دادن رطوبت لایه نازک قارچ خوراکی در شدت تابش‌های مختلف و سرعت ۱ m/s

جدول ۳- مقایسه مدل‌های برازش شده برای سرعت جریان هوای ۰/۵ متر بر ثانیه

مدل	۰/۲۲			۰/۳۱			۰/۴۹			شدت تابش (W/cm ²)
	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	
لوئیس	۰/۹۷۰۴	۰/۱۶۶۳	۰/۹۸۱۱	۰/۱۳۹۵	۰/۰۳۷۳	۰/۹۸۵۱	۰/۱۲۱۷	۰/۰۳۳۰	۰/۹۸۵۱	۰/۴۹
پیچ	۰/۹۹۷۹	۰/۰۱۷۷	۰/۹۹۷۹	۰/۰۱۵۹	۰/۰۱۲۷	۰/۹۹۸۱	۰/۰۱۵۴	۰/۰۱۱۸	۰/۹۹۸۱	۰/۳۱
پیچ اصلاح شده	۰/۹۹۷۹	۰/۰۱۷۷	۰/۹۹۷۹	۰/۰۱۵۹	۰/۰۱۲۷	۰/۹۹۸۱	۰/۰۱۵۴	۰/۰۱۱۸	۰/۹۹۸۱	۰/۳۱
هندرسون	۰/۹۸۵۹	۰/۰۷۹۵	۰/۹۹۰۱	۰/۰۷۲۸	۰/۰۲۷۱	۰/۹۹۱۹	۰/۰۶۶۰	۰/۰۲۴۴	۰/۹۹۱۹	۰/۲۲
لگاریتمی	۰/۹۸۵۹	۰/۰۷۹۵	۰/۹۹۰۱	۰/۰۷۲۸	۰/۰۲۷۱	۰/۹۹۸۸	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۹۵	۰/۹۹۸۸	۰/۲۲
لوجستیک	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۷۱	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۹۸	۰/۰۱۰۰	۰/۹۹۱۹	۰/۰۰۶۶	۰/۰۲۴۶	۰/۹۹۱۹	۰/۲۲
دو قسمتی	۰/۹۹۱۹	۰/۰۶۶۰	۰/۹۹۰۱	۰/۰۷۲۸	۰/۰۲۷۴	۰/۹۸۵۹	۰/۰۷۹۵	۰/۰۳۳۷	۰/۹۸۵۹	۰/۲۲
درجه‌ی دو	۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۵۰	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹۸۹	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۹۴	۰/۹۹۸۹	۰/۲۲
مدل انتشار	۰/۸۸۶۸	۰/۹۲۲۷	۰/۸۷۶۲	۰/۹۱۴۴	۰/۰۹۵۶	۰/۸۵۲۳	۰/۸۳۱۲	۰/۱۰۶۷	۰/۸۵۲۳	۰/۲۲

جدول ۴- مقایسه مدل‌های برازش شده برای سرعت جریان هوای ۰/۷ متر بر ثانیه

مدل	۰/۲۲			۰/۳۱			۰/۴۹			شدت تابش (W/cm ²)
	RMSE	χ^2	R^2	RMS E	χ^2	R^2	RMS E	χ^2	R^2	
لوئیس	۰/۹۸۹۰	۰/۰۷۷۱	۰/۹۸۸۶	۰/۱۱۱۱	۰/۰۲۸۶	۰/۹۹۶۸	۰/۰۳۳۷	۰/۰۱۴۸	۰/۹۹۶۸	۰/۲۲
پیچ	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۳۲	۰/۹۹۸۸	۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۹۲	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۷۲	۰/۹۹۹۲	۰/۲۲
پیچ اصلاح شده	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۳۲	۰/۹۹۸۸	۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۹۲	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۷۲	۰/۹۹۹۲	۰/۲۲
هندرسون	۰/۹۹۶۴	۰/۰۲۴۸	۰/۹۹۴۶	۰/۰۵۲۶	۰/۰۱۹۷	۰/۹۹۸۴	۰/۰۱۶۶	۰/۰۱۰۴	۰/۹۹۸۴	۰/۲۲
لگاریتمی	۰/۹۹۶۴	۰/۰۲۴۸	۰/۹۹۴۶	۰/۰۵۲۶	۰/۰۱۹۷	۰/۹۹۸۴	۰/۰۱۶۶	۰/۰۱۰۴	۰/۹۹۸۴	۰/۲۲
لوجستیک	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۲۲	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۷۷	۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۶۷	۰/۹۹۹۴	۰/۲۲
دو قسمتی	۰/۹۹۸۴	۰/۰۱۶۶	۰/۹۹۴۶	۰/۰۵۲۶	۰/۰۱۹۹	۰/۹۹۶۴	۰/۰۲۴۸	۰/۰۱۶۴	۰/۹۹۶۴	۰/۲۲
درجه‌ی دو	۰/۹۹۶۲	۰/۰۴۰۱	۰/۹۹۹۳	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۷۲	۰/۹۹۹۰	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۸۷	۰/۹۹۹۰	۰/۲۲
مدل انتشار	۰/۹۲۱۲	۰/۸۲۸۳	۰/۸۹۱۸	۱/۰۵۳۱	۰/۰۸۸۰	۰/۸۹۳۴	۰/۷۴۴۴	۰/۰۸۸۵	۰/۸۹۳۴	۰/۲۲

جدول ۵- مقایسه مدل های برازش شده برای سرعت جریان هوای ۱ متر بر ثانیه

مدل	شدت تابش (W/cm ²)			۰/۲۲			۰/۳۱			۰/۴۹		
	RMSE	χ^2	R ^۲	RMSE	χ^2	R ^۲	RMSE	χ^2	R ^۲	RMSE	χ^2	R ^۲
لوپس	۰/۹۹۴۴	۰/۰۴۳۲	۰/۹۹۵۸	۰/۰۴۶۵	۰/۰۱۶۸	۰/۹۹۸۳	۰/۰۱۶۷	۰/۰۱۹۷	۰/۹۹۸۳	۰/۰۱۶۷	۰/۰۱۹۷	۰/۹۹۸۳
پیچ	۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۴۵	۰/۹۹۸۵	۰/۰۱۶۲	۰/۰۱۰۰	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۴۹	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۴۹	۰/۹۹۹۶
پیچ اصلاح شده	۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۴۵	۰/۹۹۸۵	۰/۰۱۶۲	۰/۰۱۰۰	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۴۹	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۴۹	۰/۹۹۹۶
هندرسون	۰/۹۹۷۶	۰/۰۱۸۴	۰/۹۹۷۴	۰/۰۲۸۷	۰/۰۱۳۳	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۹۶	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۹۶	۰/۹۹۹۲
لگاریتمی	۰/۹۹۷۶	۰/۰۱۸۴	۰/۹۹۷۴	۰/۰۲۸۷	۰/۰۱۳۳	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۹۶	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۹۶	۰/۹۹۹۲
لوجستیک	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۳۱	۰/۹۹۸۸	۰/۰۱۳۴	۰/۰۰۹۱	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۴۲	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۴۲	۰/۹۹۹۶
دو قسمتی	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۹۶	۰/۹۹۷۴	۰/۰۲۸۹	۰/۰۱۳۴	۰/۹۹۷۶	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۸۵	۰/۹۹۷۶	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۸۵	۰/۹۹۷۶
درجه‌ی دو	۰/۹۹۵۵	۰/۰۵۱۰	۰/۹۹۶۵	۰/۰۳۸۹	۰/۰۱۵۵	۰/۹۹۸۴	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۲۰	۰/۹۹۸۴	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۲۰	۰/۹۹۸۴
مدل انتشار	۰/۹۲۶۳	۰/۸۴۳۴	۰/۹۱۶۶	۰/۹۲۰۸	۰/۰۷۴۹	۰/۹۱۱۸	۰/۰۷۸۷	۰/۶۷۴۳	۰/۹۱۱۸	۰/۰۷۸۷	۰/۶۷۴۳	۰/۹۱۱۸

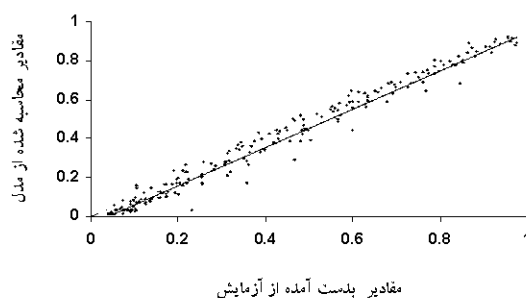
جدول ۶- ثابت‌های مدل لوجستیک برای آزمایش‌های مختلف

شدت تابش (W/cm ²)	سرعت (m/s)			۰/۵			۰/۷			۱		
	k	b	a	k	b	a	k	b	a	k	b	a
۰/۴۹	۱/۵۲۶	۰/۵۱۹۶	۰/۴۵۲۵	۲/۴۹۱	۱/۴۳۷	۰/۳۰۷۷	۲/۹۵۴	۱/۹۳۲	۰/۲۶۱	۲/۴۹۱	۱/۴۳۷	۰/۳۰۷۷
۰/۳۱	۱/۷۲	۰/۷۲۲۷	۰/۳۱۳۸	۲/۱۴۹	۱/۱۳۷	۰/۲۱۴۶	۳/۳۹	۲/۳۹	۰/۱۶۲۶	۲/۱۴۹	۱/۱۳۷	۰/۲۱۴۶
۰/۲۲	۱/۸۴۶	۰/۸۵۲۷	۰/۲۷۵۹	۴/۰۷۹	۳/۰۵۳	۰/۱۷۶۴	۵/۵۲۱	۴/۴۹۲	۰/۱۵۱۱	۴/۰۷۹	۳/۰۵۳	۰/۱۷۶۴

نتیجه گیری

منحنی آهنگ خشک شدن قارچ خوراکی در زمان‌های اولیه خشک شدن تا حدود ۲۰min به علت تبخیر رطوبت سطحی در مرحله صعودی و پس از این زمان به علت شروع نفوذ آب از درون ماده به سطح در مرحله نزولی اتفاق می‌افتد. سرعت هوا و شدت تابش پرتوی فرو سرخ اثر معنی‌داری ($P < 0.01$) بر زمان خشک شدن دارد. با افزایش سرعت هوا در یک دمای ثابت، به علت تاثیر خنک‌سازی سرعت جریان هوا بر سطح قارچ خوراکی، زمان خشک شدن طولانی‌تر می‌گردد و افزایش شدت تابش پرتوی فرو سرخ در هر سه سرعت جریان هوا، باعث کاهش زمان خشک کردن گردید. مدل لوجستیک بهترین مدل برای خشک کردن لایه نازک قارچ خوراکی دکمه‌ای، در خشک کردن به روش فرو سرخ می‌باشد.

مقادیر نسبت رطوبت برای شدت تابش‌های پرتو و سرعت‌های جریان هوای مختلف با استفاده از مدل لوجستیک (معادله ردیف ۶ جدول (۱) و ثابت‌های جدول (۶)) به دست آمد و میزان دقت تخمین نسبت رطوبت آنها در برابر مقادیر به دست آمده از آزمایش رسم گردید (شکل ۶). با توجه به عبور مدل یاد شده می‌توان نتیجه گرفت که مدل لوجستیک از دقت مناسبی برخوردار است.



شکل ۶- نسبت‌های رطوبت به دست آمده از آزمایش و محاسبه شده از مدل لوجستیک برای لایه نازک قارچ خوراکی

REFERENCES

Akpinar, E.K., Bicer, Y., & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59, 99- 104.

AOAC (1980). *Official methods of analysis* (13thed.). Washington, DC Association of Official Analytical Chemists.

Arora, S., Shivhare, U.S., Ahmed, J., & Raghvan, G.S.V. (2003). Drying kinetics of Agaricus Bisporus & pleurotus Florida mushrooms. *Transactions of the ASAE*, 46, 721- 724.

Cao, W., Nishiyoma, Y., & Koide, S. (2003). Thin-layer drying of maitake mushroom analyzed with a simplified model. *Biosystems Engineering*, 85: 331- 337.

- Diamante, L. M. & Munro, P. A. (1991). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51, 271-276.
- Dilip, J. & Pathare, B. (2004). Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices. *Biosystems Engineering*, 89 (3), 289-296.
- Doymaz, I. (2006). Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing*, 54, 325-332.
- Ertekin, C. & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349-359
- Hajizadeh, R. (1995). *Study of Preservation Method of Button Mushroom In Case Of Slice And Powder*. A Publication of Tarbiat Modarres University. (in Farsi)
- Mohajeran, S. H. (2005). *Development of Experimental Infrared Radiation Dryer for Rough Rice Drying*. A Publication of Tarbiat Modares University. Tehran, Iran. (in Farsi)
- Mohajeran, S. H., Khoshtaghaza, M. H. & Gudarzi, A. M. (2006). Effect of rough rice temperature and air velocity on grain crack during infrared radiation drying. *Journal of Food Science and Technology*, 3 (2), 57-66. (in Farsi)
- Nowak, D. & Lewicki, P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovation Food Science and Emerging Technologies*, 5, 353-360.
- Pal, U.S. & Chacravertya, A. (1997). Thin layer convection- drying of mushrooms. *Journal of Energy Conversion and Management*, 38, 107-113.
- Pankaj, B. P. & Sharma, G. P. (2006). Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystems Engineering*, 93(3), 285-291.
- Rafiee, S. & Kashaninejhad, M. (2008). Thin Layer Drying of Corn. *The 4th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization*. 42. (in Farsi)
- Sharma, G. P., Verma, R. C. & Pathare, P. B. (2004). Thin- layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 67, 361-366.
- Sharma, G. P., Verma, R. C. & Pathare, P. B. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 71, 282-286.
- Strumilo, C. & Kudra, T. (1998). *Drying: Principles, Applications and Design*. (Translated in Farsi by: H. Pahlevanzadeh). A Publication of Tarbiat Modares University. Tehran, Iran.

