

استخراج مدل سینتیک خشک شدن شلتوک رقم فجر در خشک کن لایه نازک

محمود امید^{۱*}، علیرضا یدالهی نیا^۲ و شاهین رفیعی^۳

^۱ دانشیار، ^۲ کارشناس ارشد، و ^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۵/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۴/۲۲)

چکیده

برنج یکی از محصولات مهم کشاورزی می باشد. با توجه به اهمیت سالم ماندن دانه برنج در طی فرآیند شالی کوبی و تاثیر شرایط خشک کردن بر میزان شکستگی برنج در طی فرآوری، کنترل دقیق شرایط خشک کردن آن مهم می باشد. هدف از این مطالعه ارائه مدل سینتیک خشک شدن شلتوک رقم فجر می باشد. برای این منظور آزمایشاتی در پنج سطح دمای ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس و چهار سطح سرعت هوای ۰/۲۵ تا یک متر بر ثانیه و در سه تکرار (جمعا ۶۰ سری آزمایش) بر روی توده بستر نازک شلتوک داخل خشک کن مورد بررسی قرار گرفت. رطوبت محصول در شروع خشک شدن در تمامی آزمایشها در حدود ۲۷ درصد (بر پایه خشک) بود. رطوبت تعادلی با توجه به رطوبت نسبی و دمای خشک کن از معادلات همدمایی تجربی مرسوم محاسبه شد. رطوبت توده محصول در طی خشک شدن هر ۵ ثانیه توسط یک ترازوی دیجیتالی اندازه گیری و در رایانه ذخیره شد. نمودارهای نسبت رطوبت و آهنگ خشک شدن در طی خشک کردن به دست آمد. مدل سینتیک خشک شدن توده شلتوک با هشت مدل تجربی رایج و براساس سه شاخص آماری شامل ضریب تعیین، مربع کای و RMSE با هم مقایسه شد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری حاکی از آن است که برای شلتوک رقم فجر مدل تقریب پخش نسبت به سایر مدلها از دقت بالاتری برخوردار است. مقدار ضریب تعیین این مدل در دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۹، ۰/۹۹۹، ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۹ بود که نشان می دهد مدل تقریب پخش می تواند با دقت بالایی تغییرات رطوبت شلتوک را شبیه سازی کند.

واژه های کلیدی: شلتوک، خشک کن لایه نازک، سینتیک خشک شدن، مدل سازی

مقدمه

خشک کردن شلتوک برنج باعث می شود بازده تبدیل شلتوک به برنج سفید نیز افزایش یافته و کیفیت محصول در طی انبارداری بهتر و به مدت طولانی تر حفظ شود. رطوبت مناسب برای انبار کردن یا پوست کنی برنج حدود ۱۴ درصد است. بنابراین محصول برنج بایستی بلافاصله بعد از برداشت تا ۱۴ درصد رطوبت خشک شود (Rafiee, 1998; Yadollahinia, 2006). فرایند خشک شدن شلتوک بایستی به آرامی و کاملا یکنواخت انجام شود، به همین دلیل استفاده از خشک کن هایی که شرایط فرایند خشک شدن در آنها قابل مهار باشد امری ضروری به نظر می رسد.

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه خشک کردن لایه نازک، مدل سازی و استخراج منحنی سینتیک خشک شدن محصولات کشاورزی شامل شلتوک (Wang & Singh, 1978; Sheri & Chen, 1998; Cihan & Mehmet, 2001; Chen & Wu, 2001; Basunia & Abe, 2001)، گندم (Sun & Woods, 1994)، گندم نیم جوش شده (Mohapatra & Srinivasa, 2005)، دانه های کلزا (Patak, 1991)، ذرت (Doymaz, 2003)، سیب زمینی و انگور فرآوری شده (Miyamoto et al., 2002)، فندق (Demirtas et al., 1998; Özdemir & Devres, 1999)

برنج یکی از قدیمی ترین و مهمترین مواد غذایی بشر بوده و هست و تقریبا یک سوم مردم جهان به این ماده مهم غذایی به عنوان غذای اصلی وابسته اند. برنج بعد از گندم به عنوان مهمترین ماده غذایی در ایران محسوب می شود و هر ساله سطح وسیعی از اراضی کشور به کشت این محصول با ارزش اختصاص می یابد. برنج به صورت شلتوک برداشت می شود که دارای رطوبت نسبتا زیادی (۳۵٪-۲۵٪) است (Rafiee, 1998). این محصول در زنجیره تبدیل می بایستی از مراحل مختلفی عبور کرده تا قابل استفاده گردد. یکی از مهمترین مراحل که شلتوک بایستی قبل از هر فرایند دیگری از آن بگذرد مرحله خشک شدن است، که یکی از حساس ترین مراحل در زنجیره تولید محسوب می گردد. چه بخواهند شلتوک را در انبار نگه داری کنند و یا آن را برای مرحله پوست کنی و سفید کنی به کارخانجات شالی کوبی تحویل دهند، انجام فرایند خشک کردن الزامی می باشد. لذا رعایت اصول دقیق علمی و فنی در فرایند

* نویسنده مسئول: Omid@ut.ac.ir

فرآیند خشک شدن بود. خشک شدن لایه نازک گندم نیم جوش شده به طور کاملاً دقیق به وسیله مدل دوجمله‌ای که ثابت‌های خشک شدن در آن رابطه‌ای خطی با دما داشتند بیان شد. Patak (1991) و Sun & Woods (1994) پس از انجام تحقیقات روی خشک کردن کلزا و گندم به روش لایه نازک دریافتند که دما اثر زیادی بر روی سرعت خشک شدن دارد در حالی که سرعت هوای ورودی و رطوبت نسبی هوای خشک کن تاثیر کمی بر روی سرعت خشک شدن این محصولات دارند.

هدف این مقاله مدلسازی و استخراج منحنی سینتیک خشک شدن شلتوک (رقم فجر) و ارزیابی مدل‌های تجربی مرسوم می باشد. برای این منظور ابتدا با استفاده از یک خشک کن لایه نازک آزمایشگاهی آزمایش‌های بر روی توده بستر نازک شلتوک صورت گرفت که جزئیات آن در بخش‌های بعد ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

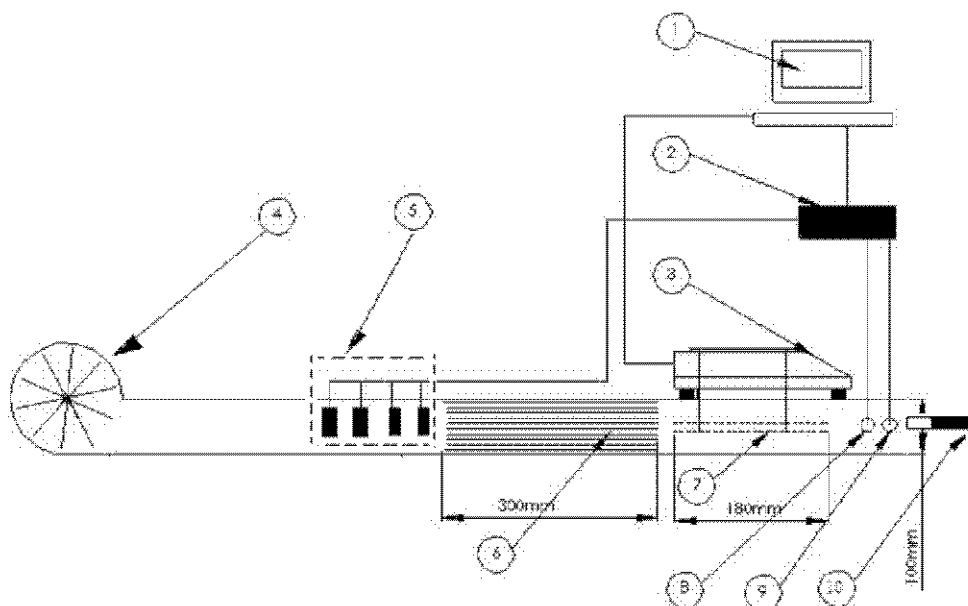
مشخصات دستگاه خشک کن. برای انجام آزمایشات، در این تحقیق از یک خشک کن لایه نازک آزمایشگاهی با ویژگی‌های زیر استفاده شد. طرحواره و ابعاد خشک کن در شکل (۱) نشان داده شده است. این خشک کن از یک رایانه برای جمع‌آوری داده، مدار الکترونیکی جهت کنترل فرآیند، یک فن سانتریفوژ برای دمیدن هوا، چهار عدد هیتر برقی برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه خشک کن، سه عدد حسگر (برای اندازه‌گیری دما، رطوبت نسبی هوای خشک کننده و سرعت هوا)، یک ترازوی دیجیتال برای اندازه‌گیری وزن توده محصول، یک محفظه مستقیم کننده و دو عدد سینی مشبک برای قرار دادن نمونه‌ها تشکیل شده است. در جدول (۱) مشخصات و دقت وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده ارائه شده است. این مشخصات در گستره پیشنهادی انجمن مهندسان کشاورزی آمریکا می باشد (ASAE, 2002). سخت افزار پایش و کنترل دستگاه شامل یک رایانه، برد اصلی، حسگرها، مدار کنترل و مدار تغذیه می‌باشند. اطلاعات مربوط به این خشک کن همراه با نقشه مدارهای الکترونیکی، کدهای اسمبلی برنامه میکروکنترلر و نرم افزار تحصیل داده در پایان نامه Yadollahinia (2006) و Yadollahinia et al. (2008) موجود است.

جدول ۱- مشخصه ابزارهای اندازه‌گیری همراه با دقت نامی آنها

نام ابزار	مدل	دقت ابزار	شرکت سازنده
ترازوی دیجیتالی	GF3000	$\pm 1\%$	A&D, Japan
حسگر دما	LM35	$\pm 1^\circ C$	NSC, USA
حسگر رطوبت	Capacitive	$\pm 3\%$	Philips, UK
حسگر سرعت هوا	405-V1	$\pm 3\%$	TESTO, GR

ارقام اوحدی (Rafiee & Kashaninejad, 2005) و اکبری (Omid et al. 2009) صورت گرفته است که در ادامه بعضی از آنها را مرور می‌کنیم. Wang & Singh (1978) خشک شدن شلتوک را به صورت لایه نازک مدل کردند. آنها از یک معادله درجه دوم برای برازش داده‌های به دست آمده در یک خشک کن لایه نازک استفاده نمودند. Shei & Chen (1998) خشک شدن به صورت متناوب شلتوک را به صورت لایه نازک مورد آزمایش قرار دادند. آزمایش‌ها در پنج سطح دمای ۳۵ تا ۶۰ درجه سلسیوس و دو سطح سرعت هوای ورودی ۰/۱۵ و ۰/۲۵ متر بر ثانیه انجام شد. طول یک دوره خشک کردن از ۵ تا ۱۵ دقیقه و طول دوره هوادهی از ۴۰ تا ۱۲۰ دقیقه متغیر بود. داده‌های به دست آمده از این آزمایش‌ها با چهار مدل تجربی تامسون، هندرسون - پاپیس، دو جمله‌ای و ونگ-سینگ برازش داد و در نهایت مدل هندرسون - پاپیس را به عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی خشک شدن شلتوک ارائه نمودند. Chen & Wu (2001) نیز خشک شدن شلتوک را به صورت لایه نازک مدل کردند. آنها آزمایش‌ها در پنج سطح دمای ۳۵ تا ۶۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰ تا ۵۰ درصد انجام دادند. داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها با چهار مدل نمایی، پیچ، دوجمله‌ای و ونگ-سینگ مورد بررسی قرار گرفت. آنها از ضریب تبیین (R^2) به عنوان معیاری برای مقایسه کمی و از باقیمانده وزنی برای مقایسه کیفی ارزیابی نکویی برازش^۲ مدل‌ها استفاده نموده و در نهایت مدل دو جمله‌ای را به عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی خشک شدن لایه نازک شلتوک معرفی کردند. Doymaz (2003) خشک شدن ذرت به صورت لایه نازک را مورد بررسی قرار داد. آزمایش‌ها در یک خشک کن کابینتی در سه سطح دمای ۵۵، ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی ۰/۴۳ متر بر ثانیه و در سه تکرار صورت گرفت. رطوبت اولیه ذرت در شروع خشک کردن ۳۰ درصد (بر پایه خشک) بود که در پایان خشک کردن به ۱۴ درصد (بر پایه خشک) رسید. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با مدل‌های تجربی پیچ و نمایی مورد بررسی قرار گرفتند که مدل پیچ نسبت به مدل نمایی بهتر می‌توانست خشک شدن ذرت را پیش‌بینی کند. Mohapatra & Srinivasa (2005) خشک شدن گندم نیم جوش شده را در دماهای ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس آزمایش کردند. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با مدل‌های تجربی و نیمه تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. پایان خشک شدن در مرحله نزولی خشک شدن صورت گرفت که نشان‌دهنده اثر انتشار رطوبت در

3. Goodness of fit



شکل ۱- طرحواره خشک کن ساخته شده شامل رایانه ①، میکروکنترلر و مدارات کنترل ②، ترازوی دیجیتال ③، فن سانتریفیوژ ④، چهار عدد گرمکن الکتریکی ⑤، محفظه مستقیم کننده ⑥، سینی نمونه ها ⑦، حسگر دما ⑧، ⑨- حسگر رطوبت و حسگر سرعت هوا ⑩ (Yadollahinia, 2006)

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

که در آن M_d میزان رطوبت بر پایه خشک (درصد)، W_w وزن شلتوک تر و W_d وزن شلتوک خشک است. خشک شدن تا زمانی که نسبت رطوبت توده شلتوک به 0.2 (تقریباً ثابت) برسد ادامه می یافت.

آزمایش‌ها در پنج سطح دمایی 30 ، 40 ، 50 ، 60 و 70 درجه سلسیوس، چهار سطح سرعت هوای ورودی 0.25 ، 0.5 ، 0.75 و 1 متر بر ثانیه و در سه تکرار (جمعا 60 سری) انجام شد. رطوبت اولیه شلتوک در شروع تمامی آزمایش‌ها به محدوده رطوبتی 27% (بر پایه خشک) رسانده شد. برای آماده سازی نمونه‌ها و رساندن آنها به رطوبت معین ابتدا رطوبت اولیه شلتوک با روش آون تعیین شد. به این ترتیب که سه نمونه شلتوک در سه ظرف مجزا قرار گرفته و پس از وزن کردن، نمونه‌ها به مدت 12 ساعت در آون با دمای 130 درجه سلسیوس خشک شدند (Pabis et al., 1998). پس از بیرون آوردن نمونه‌ها از داخل آون، نمونه‌ها مجدداً وزن شده و با استفاده از رابطه (۱) رطوبت نمونه‌ها (بر پایه خشک) محاسبه شد که مقدار آن برابر 8.33% درصد به دست آمد. به کمک رابطه (۲) مقدار آب مورد نیاز برای اضافه کردن به توده برای رساندن رطوبت از رطوبت اولیه به رطوبت 27% محاسبه شد:

$$W_w = \frac{W_1}{1 + M_{d1}} (M_{d2} - M_{d1}) \quad (2)$$

که در آن M_{d1} و M_{d2} به ترتیب رطوبت قبل و بعد از اضافه کردن آب (بر پایه خشک) می باشد. W_1 وزن توده

در این تحقیق از شلتوک رقم فجر استفاده شد. این رقم با وزن هزار دانه 23.2 گرم دارای عملکرد 6 تا 6.5 تن در هکتار می‌باشد. شلتوک مورد نیاز برای آزمایش از مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات برنج کشور در آمل تهیه گردید. این رقم با وزن هزار دانه 23.2 گرم دارای عملکرد 6 تا 6.5 تن در هکتار می‌باشد، البته در بعضی از مزارع تا 8 تن در هکتار نیز برداشت شده است (Anon., 2009). ارتفاع، ضخامت و عرض 50 عدد شلتوک رقم فجر با استفاده از یک کولیس (با دقت 0.1 میلی متر) اندازه گیری شد. ارتفاع، ضخامت و عرض میانگین به ترتیب برابر 10.98 ، 2.24 و 1.92 میلی‌متر به دست آمد.

برای آماده کردن خشک‌کن، پس از روشن کردن رایانه، فن، ترازو، المنت‌ها و سرعت فن برای آزمایش مورد نظر تنظیم و دمای مورد نظر برای آزمایش در نرم افزار تنظیم می‌گردید. هرچند که فن سانتریفیوژ مورد استفاده دارای قابلیت تغییر میزان هوای ورودی به محفظه فن برای تنظیم سرعت هوا در خروجی می‌باشد، با این حال برای تنظیم دقیق تر سرعت هوا و ثابت نگه داشتن آن در خروجی فن از یک مدار الکترونیکی استفاده شد (Yadollahinia, 2006). این مدار با تغییر در ولتاژ ورودی به موتور، دور آن را تغییر می‌دهد. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار کلیه آزمایش‌ها نیم ساعت بعد از روشن کردن دستگاه شروع می‌شد. سپس سینی حاوی نمونه‌ها در محفظه خشک کن قرار می گرفت. وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی 5 ثانیه به صورت خودکار توسط نرم افزار ترازوی دیجیتال ثبت و در رایانه ذخیره می‌گردید. با استفاده از رابطه (۳) رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه محاسبه شد:

که در آن MR نسبت رطوبت، M رطوبت توده در لحظه جاری، M_e رطوبت تعادلی و M_0 رطوبت اولیه توده محصول است. M_e با توجه به رطوبت نسبی و دمای خشک کن و براساس استاندارد *ASAE* محاسبه شد (ASAE, 2002).

برای به دست آوردن مدل سینتیک خشک شدن توده شلتوک رقم فجر، تغییرات MR در طی آزمایش ها با ۸ مدل تجربی رایج خشک کردن به روش لایه نازک مقایسه شد (جدول ۲). ثابت ها و ضرایب این مدل ها ($A, B, k, k_1, k_2, n, b, g$) براساس متغیر مستقل زمان با استفاده از نرم افزار SPSS 10.5 برای دماها و سرعت های مختلف استخراج گردید (Yadollahinia, 2006).

محاسبه نرخ خشک شدن. شدت یا نرخ خشک شدن (DR) شلتوک در طی خشک شدن به عوامل زیادی نظیر رقم و اندازه دانه، درجه حرارت و رطوبت نسبی هوای خشک کن، دبی جریان هوا، زمان در معرض قرارگرفتن توده در مقابل جریان هوا، محتوای رطوبت اولیه و غیره بستگی دارد که در این میان درجه حرارت و رطوبت نسبی هوای خشک کن، دبی جریان هوا و زمان در معرض قرارگرفتن توده در مقابل جریان هوا جزء متغیرهای مهم و اساسی خشک شدن به شمار می آیند. عموماً برای محاسبه DR از رابطه ساده (۴) استفاده می شود (Akpınar et al., 2003):

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (4)$$

که در آن M_{t+dt} و M_t به ترتیب رطوبت توده شلتوک در زمان t و $t+dt$ و dt میزان افزایش زمان در هر گام زمانی می باشد. گام زمانی (dt) برای تمام محاسبات ۱۵ ثانیه انتخاب گردید.

محصول (با رطوبت ۰/۸۳۳ درصد بر پایه خشک) است که در این تحقیق ۱۳۰ گرم در نظر گرفته شد. با معلوم بودن M_{d1} ، M_{d2} و W_1 که به ترتیب برابر ۰/۰۸۳۳ و ۰/۲۷ و ۱۳۰ گرم می باشند، میزان آب لازم برای رساندن رطوبت نمونه به ۰/۲۷ با استفاده از رابطه (۲) برابر ۲۲/۴ گرم به دست آمد.

یعنی حجم آبی که باید اضافه گردد تا رطوبت محصول از مقدار اولیه به رطوبت ۰/۲۷ برسد تقریباً ۲۲/۴ سی سی است. برای تهیه نمونه ها، ۱۳۰ گرم شلتوک را در کیسه پلاستیکی ریخته و با سرنگ ۲۲/۴ سی سی آب به آن اضافه شد. پس از آن درب کیسه ها را محکم بسته و به مدت ۷۲ ساعت قبل از هر سری آزمایش در داخل یخچال با دمای ۱۰ درجه سلسیوس نگهداری شدند. برای یکنواختی بهتر نمونه ها هر ۲۴ ساعت یک بار به طور کامل بهم زده می شدند. قبل از انجام هر آزمایش نمونه ها از داخل کیسه ها به ظرف مخصوصی منتقل و در هوای آزاد قرار داده می شدند تا با خارج شدن مقداری کمی آب از محصول رطوبت آنها به ۰/۲۷ (بر پایه خشک) برسد. رسیدن به این سطح رطوبت با وزن کردن نمونه ها مشخص می شد. سپس نمونه ها به دو قسمت تقریباً مساوی تقسیم شده و هر قسمت در یک طبقه از سینی خشک کن قرار می گرفت و آزمایش شروع می شد.

مدلسازی ریاضی منحنی خشک شدن. برای مدلسازی

ریاضی خشک شدن توده بستر نازک شلتوک از نسبت رطوبت در طی خشک شدن توده استفاده گردید. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک شدن از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

جدول ۲- مدل های خشک کردن به روش لایه نازک

مدل	نام مدل	معادله*	مرجع
۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	Lewis (1921)
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
۳	هندرسون-پابیس	$MR = A \exp(-kt)$	Henderson & Pabis (1961)
۴	لگاریتمی	$MR = A \exp(-kt) + B$	Yaldız & Ertekin (2001)
۵	دو جمله ای	$MR = A \exp(-k_1t) + B \exp(-k_2t)$	Pabis et al. (1998)
۶	تقریب پخش	$MR = A \exp(-kt) + (1 - A) \exp(-kbt)$	Yaldız & Ertekin (2001)
۷	ورما و همکاران	$MR = A \exp(-kt) + (1 - A) \exp(-gt)$	Akpınar et al. (2003)
۸	ونگ و سینگ	$MR = 1 + At + Bt^2$	Wang & Singh (1978)

* g, k, k_1, k_2 و n, A, B به ترتیب ضرایب و ثابت های مدل تجربی هستند.

مجموع ۶۰ سری داده برداری صورت گرفت. پس از محاسبه رطوبت تعادلی با توجه به رطوبت نسبی و دمای خشک کن نسبت رطوبت برحسب زمان از رابطه (۳) محاسبه شد. از برازش داده‌های به دست آمده با رابطه (۳) و مدل‌های تجربی (جدول ۲)، مقادیر R^2 ، χ^2 و $RMSE$ برای همه آزمایش‌ها به دست آمد. برای ارزیابی مدل‌ها، ابتدا مقدار بیشتر ضریب تبیین و سپس مقادیر کوچکتر χ^2 و $RMSE$ مورد بررسی قرار گرفت. در آخر، با استفاده از نرم افزار SPSS 10.5 ثابت‌ها و ضرایب هر هشت مدل برای دماها و سرعت‌های مختلف همراه با سه شاخص آماری (معادلات ۵ تا ۷) محاسبه شد. خلاصه نتایج تجزیه و تحلیل آماری در جداول (۳) و (۴) آمده است. مطابق با جدول (۳) بیشترین ضریب تبیین برای همه دماها با مدل تقریب پخش حاصل آمد و مدل‌های لگاریتمی و دوجمله‌ای در رتبه های بعدی قرار گرفتند. برای این مدل، مقادیر متوسط R^2 در دماهای ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۸، ۰/۹۹۹، ۰/۹۹۹، ۰/۹۹۹، ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۹ و مقادیر متوسط χ^2 برابر ۰/۰۱۱، ۰/۰۱۶، ۰/۰۳۰، ۰/۰۴۶، ۰/۰۸۵ و ۰/۰۷۲، ۰/۰۰۷۲، ۰/۰۰۲۱، ۰/۰۰۰۹، ۰/۰۰۰۳، ۰/۰۰۰۱ برابر $RMSE$ بود که نشان از دقت بالای مدل تقریب پخش است. در جدول (۴) کلیه ضرایب و ثابت‌های این مدل برتر همراه با سه شاخص آماری R^2 ، χ^2 و $RMSE$ در دماها و سرعت‌های مختلف برای تعیین نسبت رطوبت شلتوک رقم فجر ارائه شده است.

ارزیابی مدل‌ها. برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تبیین (معادله ۵)، مربع کای (معادله ۶) و متوسط خطای داده‌ها (معادله ۷)، استفاده شد (Akpınar et al., 2003):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{ave,i})^2} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (6)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

که در آن $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت به دست آمده در طی خشک شدن، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت پیش بینی شده توسط مدل، $MR_{ave,i}$ میانگین نسبت رطوبت مشاهدات، N تعداد مشاهدات و n تعداد ثابت‌های مدل می‌باشد. در مقایسه بین هشت مدل تجربی ارائه شده در جدول (۲)، مدلی بهتر است که دارای R^2 بزرگتر، مقادیر χ^2 و $RMSE$ کوچکتر باشد زیرا بهتر می‌تواند تغییرات نسبت رطوبت را در طی خشک شدن پیش‌بینی کند.

نتایج و بحث

همان گونه که در بخش قبلی اشاره شد، آزمایش‌ها در پنج سطح دمایی (بین ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس) و چهار سطح سرعت هوای ورودی (از ۰/۲۵ تا یک متر بر ثانیه) و در سه تکرار بر روی توده بستر نازک شلتوک رقم فجر انجام شد. در

جدول ۳- مقایسه دقت برازش مدل‌های تجربی مختلف براساس متوسط شاخص‌های آماری در دماهای مختلف

نام مدل	حرارت خشک کردن (درجه سلسیوس)									
	۷۰		۶۰		۵۰		۴۰		۳۰	
	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$
۶ تقریب پخش	۰/۹۹۹	۰/۰۶۰	۰/۹۹۹	۰/۰۲۶	۰/۹۹۹	۰/۰۲۶	۰/۹۹۸	۰/۰۱۷	۰/۹۹۶	۰/۰۳۱
۴ لگاریتمی	۰/۹۹۹	۰/۰۵۸	۰/۹۹۹	۰/۰۲۵	۰/۹۹۹	۰/۰۲۷	۰/۹۹۷	۰/۰۱۴	۰/۹۹۱	۰/۰۳۴
۵ دو جمله‌ای	۰/۹۹۹	۰/۰۵۹	۰/۹۹۹	۰/۰۲۶	۰/۹۹۹	۰/۰۲۶	۰/۹۸۴	۰/۰۱۹	۰/۹۶۲	۰/۰۳۴
۲ پیچ	۰/۹۹۲	۰/۰۶۴	۰/۹۹۵	۰/۰۳۲	۰/۹۹۷	۰/۰۲۹	۰/۹۹۳	۰/۰۱۸	۰/۹۹۰	۰/۰۳۴
۳ هندرسون و پابیس	۰/۹۷۶	۰/۰۶۶	۰/۹۷۷	۰/۰۴۵	۰/۹۸۳	۰/۰۳۴	۰/۹۵۳	۰/۰۳۷	۰/۹۲۹	۰/۰۵۴
۸ ونگ و سینگ	۰/۹۸۱	۰/۰۶۱	۰/۹۷۲	۰/۰۴۹	۰/۹۷۵	۰/۰۳۳	۰/۹۲۵	۰/۰۴۷	۰/۸۲۶	۰/۰۶۷
۷ ورما و همکاران	۰/۹۶۸	۰/۰۶۳	۰/۹۷۵	۰/۰۴۱	۰/۹۶۵	۰/۰۳۳	۰/۸۷۴	۰/۰۶۲	۰/۸۸۸	۰/۰۷۳
۱ نیوتن	۰/۹۶۶	۰/۰۶۶	۰/۹۵۶	۰/۰۵۵	۰/۹۶۵	۰/۰۲۸	۰/۸۷۴	۰/۰۴۹	۰/۸۴۳	۰/۰۸۳

شدن توده شلتوک را پیش بینی می‌کند. پس از مدل تقریب پخش، مدل‌های دو جمله‌ای، لگاریتمی، پیچ، هندرسون-پابیس، ونگ-سینگ، ورما و همکاران و نیوتن (جدول ۲) به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. بررسی سایر نتایج به دست آمده برای سایر سرعت‌ها (۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه) نشان می‌دهد که مدل تقریب پخش تغییرات نسبت رطوبت توده شلتوک رقم فجر

منحنی نسبت رطوبت بر اساس داده‌های آزمایشگاهی (رابطه ۳) و داده‌های استخراج شده توسط مدل تقریب پخش در سرعت ۰/۲۵ متر بر ثانیه در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به نتایج موجود در جدول (۳) و شکل (۲)، می‌توان نتیجه گرفت که در سرعت ۰/۲۵ متر بر ثانیه مدل تقریب پخش در هر پنج سطح دمایی نسبت به سایر مدل‌ها با دقت بیشتری خشک

سرعت‌های مختلف به دست آمد. آهنگ خشک شدن توده بستر نازک شلتوک در سرعت‌های ۰/۲۵ و ۰/۷۵ متر بر ثانیه شده در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۵) و نتایج ارائه شده در شکل (۴)، نتیجه می‌گیریم که هر چه دمای خشک کن بیشتر باشد آهنگ خشک شدن (DR) نیز سریعتر می‌شود. برای مثال، در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت ۰/۷۵ متر بر ثانیه، آهنگ خشک شدن در ۴۵ دقیقه ابتدایی سریعتر از سایر دماها می‌باشد و سپس کاهش می‌یابد. این روند در سرعت‌های دیگر نیز وجود دارد (Yadollahinia, 2006). با توجه به اینکه DR با گذشت زمان و کاهش رطوبت نسبی هوا در طی خشک کردن کاهش می‌یابد، در نتیجه خشک شدن در مرحله نزولی انجام می‌گیرد. با افزایش سرعت خشک شدن پتانسیل انتقال حرارت بین هوا و توده شلتوک افزایش یافته و رطوبت با سرعت بیشتری بخار شده و از سطح دانه شلتوک خارج می‌گردد.

جدول ۵- مدت زمان لازم برای خشک کردن نمونه‌ها در دماهای مختلف

دما ($^{\circ}C$)	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰
زمان (دقیقه)	۱۴۴۰	۷۲۰	۳۹۰	۳۳۰	۲۷۰

را در طی خشک شدن با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها پیش بینی می‌کند. ضرایب و ثابت‌های این مدل، یعنی A ، b و k در جدول (۲)، برای تعیین MR همراه مقادیر R^2 ، χ^2 و $RMSE$ در دماها و سرعت‌های مختلف در جدول (۴) ارائه شده است.

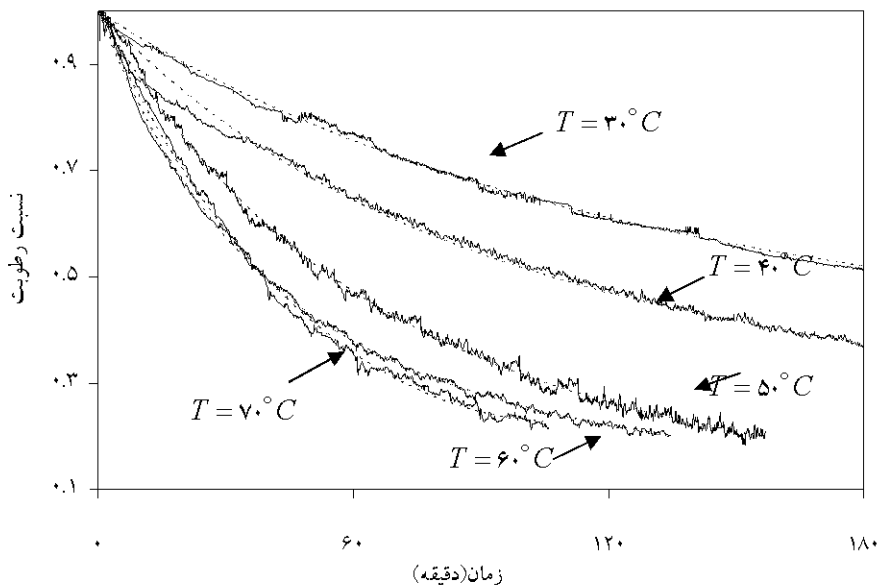
منحنی خشک شدن در سرعت‌های مختلف و دمای ثابت ۶۰ درجه سلسیوس در شکل (۳) نشان داده شده است. این روند برای سایر دماها (۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) نیز مشاهده گردید (Yadollahinia, 2006). یعنی، افزایش سرعت هوا (از ۰/۲۵ تا یک متر بر ثانیه) بر روی مدت زمان خشک شدن توده لایه نازک شلتوک رقم فجر در دماهای بررسی شده (۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس) اثر چندانی ندارد. این نتیجه‌گیری با نتایجی که توسط Patak (1991) برای کلزا و Sun & Woods (1994) برای گندم به دست آوردند مطابقت دارد.

مدت زمان خشک کردن توده محصول در دماهای مختلف در جدول (۵) آورده شده است. هر چه دمای خشک کن بیشتر باشد توده بستر نازک شلتوک سریعتر خشک می‌شود. با استفاده از رابطه (۴) آهنگ خشک شدن بر حسب زمان برای توده لایه نازک شلتوک رقم فجر در طی خشک شدن برای

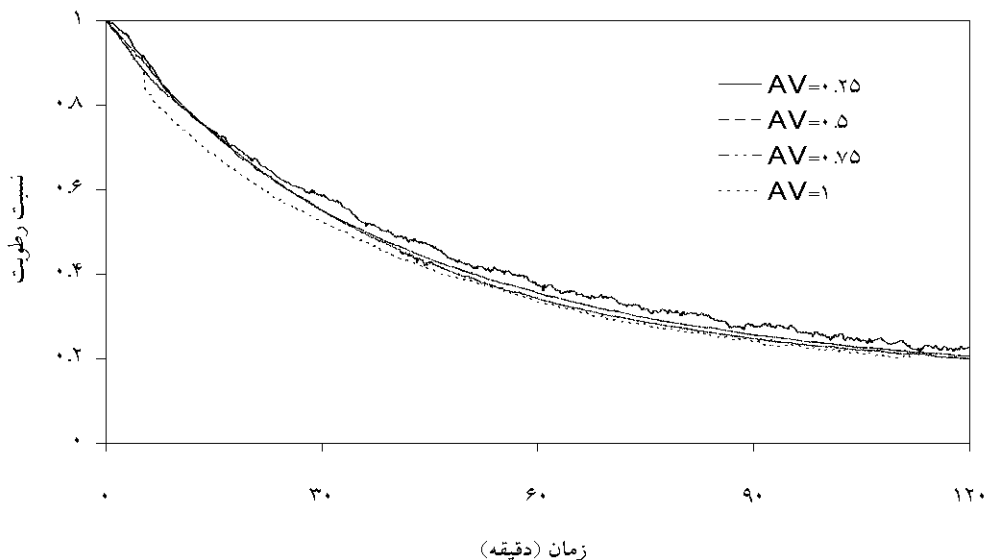
جدول ۴- مقادیر ثابت‌ها و ضرایب مدل تقریب پخش، $MR = A \exp(-kt) + (1-A) \exp(-kbt)$ جهت

تعیین نسبت رطوبت شلتوک رقم فجر در دماها و سرعت‌های مختلف

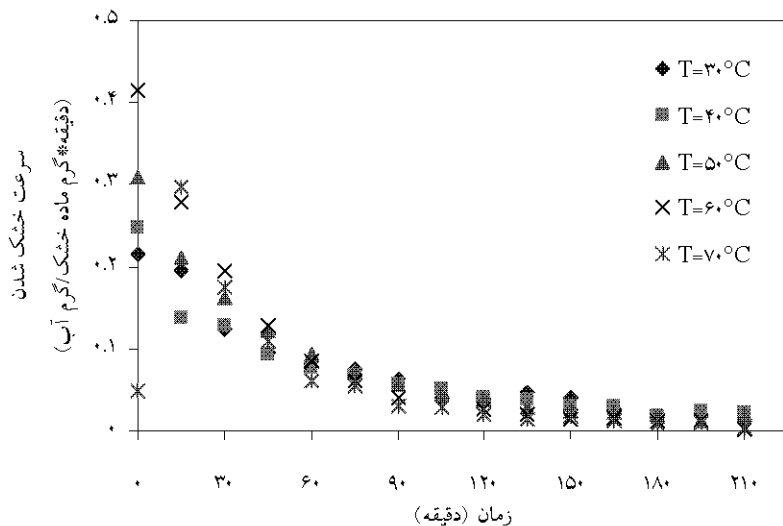
دما ($^{\circ}C$)	سرعت (m/s)	A	b	k	R^2	χ^2	$RMSE$
۳۰	۰/۲۵	۰/۴۷۵۷	۰/۰۹۵۳	۰/۰۱۰۰	۰/۹۹۸۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۶۹
۴۰	۰/۲۵	۰/۵۱۰۱	۰/۱۴۰۲	۰/۰۱۴۶	۰/۹۹۵۷	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۲۴
۵۰	۰/۲۵	۰/۶۵۸۳	۰/۲۵۰۴	۰/۰۱۸۶	۰/۹۹۷۶	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۰۸
۶۰	۰/۲۵	۰/۶۱۱۴	۰/۱۷۳۹	۰/۰۳۰۶	۰/۹۹۸۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۷۰
۷۰	۰/۲۵	۰/۹۹۶۷	-۱/۶۸۸	۰/۰۱۸۰	۰/۹۹۷۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۲۴
۳۰	۰/۵	۰/۵۴۳۲	۰/۰۶۱۴	۰/۰۱۵۲	۰/۹۹۳۵	۰/۰۰۴۳	۰/۰۶۵۹
۴۰	۰/۵	۰/۵۳۶۷	۰/۱۱۶۹	۰/۰۱۵۹	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۸۷
۵۰	۰/۵	۰/۳۸۰۸	۰/۱۹۸۳	۰/۰۳۸۷	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۱۵	۰/۰۳۸۴
۶۰	۰/۵	۰/۶۸۴۳	۰/۱۴۴۴	۰/۰۳۰۲	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۴	۰/۰۲۱۲
۷۰	۰/۵	۰/۸۱۶۰	۰/۰۰۹۸	۰/۰۳۲۷	۰/۹۹۸۳	۰/۰۰۴۶	۰/۰۶۸۱
۳۰	۰/۷۵	۰/۳۵۱۱	۰/۱۱۵۶	۰/۰۱۰۳	۰/۹۹۶۰	۰/۰۰۱۵	۰/۰۳۸۱
۴۰	۰/۷۵	۰/۵۳۶۷	۰/۱۱۶۸	۰/۰۱۵۹	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۸۷
۵۰	۰/۷۵	۰/۵۸۹۹	۰/۲۱۴۷	۰/۰۲۴۳	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۸	۰/۰۲۸۰
۶۰	۰/۷۵	۰/۸۴۰۸	-۰/۰۰۷۶	۰/۰۲۵۵	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۹	۰/۰۳۰۰
۷۰	۰/۷۵	۰/۸۹۴۱	۰/۱۳۰۲	۰/۰۳۲۷	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۵۸	۰/۰۷۶۰
۳۰	۱/۰	۰/۲۷۲۲	۰/۱۱۸۴	۰/۰۱۷۹	۰/۹۹۵۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۳۳
۴۰	۱/۰	۰/۴۰۶۳	۰/۱۴۸۰	۰/۰۱۷۱	۰/۹۹۶۴	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۸۵
۵۰	۱/۰	۰/۵۳۰۷	۰/۱۷۹۵	۰/۰۲۸۹	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۹	۰/۰۳۰۱
۶۰	۱/۰	۰/۳۸۴۲	۰/۱۷۹۱	۰/۰۵۸۵	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۲۱	۰/۰۴۵۸
۷۰	۱/۰	۰/۸۲۲۱	۰/۰۲۷۷	۰/۰۳۴۱	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۷۲	۰/۰۸۴۷



شکل ۲- مقایسه منحنی خشک شدن براساس داده های آزمایشگاهی (خطوط پیوسته) و مدل تقریب پخش (خطوط نقطه چین) در دماهای مختلف و سرعت هوای ورودی ۰/۲۵ متر بر ثانیه



شکل ۳- منحنی خشک شدن توده بستر نازک شلتوک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت های هوای ورودی مختلف



شکل ۴- آهنگ خشک شدن توده بستر نازک شلتوک رقم فجر در دماهای مختلف و سرعت هوای ورودی ۰/۷۵ متر بر ثانیه بر حسب زمان

نتیجه گیری کلی

اهم نتایج حاصل از تحقیق به قرار زیر است:

۱- مدل های تقریب پخش، لگاریتمی، دوجمله ای و پیچ به ترتیب خشک شدن توده بستر نازک شلتوک رقم فجر را با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل های تجربی مدلسازی می کنند. در این بین نیز مدل تقریب پخش به علت دارا بودن ضریب تبیین بالاتر و مربع کای و ریشه متوسط خطای داده پایین تر نسبت به سایر مدل ها، به عنوان بهترین مدل برای مدلسازی خشک کردن توده شلتوک رقم فجر انتخاب شد.

۲- با توجه به اینکه مدل پیچ به مقادیر بالای ضریب تبیین ($R^2 \geq 0.99$)، مربع کای و ریشه متوسط خطای

پایین تولید می کند و نیز سادگی معادله (تعداد کم ضرایب و پارامترهای خشک شدن آن، یعنی k و n)، می تواند به عنوان کاربردی ترین مدل تقریبی برای مدلسازی خشک کردن توده شلتوک رقم فجر انتخاب و یا توصیه گردد.

۳- افزایش دمای خشک کن باعث افزایش سرعت خشک کردن گردید، ولی افزایش سرعت هوای ورودی به خشک کن تاثیر چندانی بر آهنگ خشک شدن نداشت. به طور کلی، می توان نتیجه گرفت که دمای هوا خشک کن اثر بیشتری نسبت به سرعت هوای ورودی بر روی آهنگ خشک شدن توده شلتوک رقم فجر دارد.

REFERENCES

- Anonymous (2009). Technical instruction for Fajer new rice cultivar. Retrieved December 2009. Rice Research Institute of Iran. Available at: <http://berenj.areo.ir/>
- Akpinar, K.E., Bicar, Y. & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59, 99-104.
- ASAE Standards (2002). Standard engineering practices data: Thin-layer drying of grains and crops. *ASAE yearbook*, S448 DEC98, pp. 578-580.
- Basunia, M. A. & Abe, T. (2001). Thin layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *Journal of Food Engineering*, 47(4), 295-301.
- Chen, C. & Wu, P.C. (2001). Thin layer drying model for rough rice with high moisture content. *Journal of Agricultural Engineering Resource*, 80(1), 45-52.
- Cihan, A. & Mehmet, C. (2001). Liquid diffusion model for intermittent drying of rough rice. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 327-331.
- Demirtas, C., Ayhan, T. & Kaygusuz, K. (1998). Drying behaviour of hazelnuts. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76, 559-564.
- Doymaz, I. (2003). Thin layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60, 125-130.
- Henderson, S.M. & Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7, 85-89.
- Lewis, W.K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432.
- Miyamoto, K., Tan D.L.S. & Ishibashi, K. (2001). Thin layer drying of sweet potato chips and processed grapes. *Transactions of ASAE*, 44(3), 669-674.
- Mohapatra, D. & Srinivasa, P.R. (2005). A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, 66, 513-518.
- Omid, M., Baharlooei, A. & Ahmadi, H. (2009). Modeling drying kinetics of pistachio nuts with multilayer feed-forward neural network, *Drying Technology*, 27(10), 1069-1077.
- Özdemir, M. & Devres, Y.O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42, 225-233.
- Pabis, S., Jayas, D. & Cenkowski, S. (1998). *Grain Drying: Theory and Practice*, John Wiley & Sons.
- Page, G. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layer. MSc Thesis, Purdue University West Lafayette, Indiana: USA.
- Patak, P.T. (1991). Thin layer drying model for rapeseed. *Transactions of the ASAE*, 34(6), 2505-2508.
- Rafiee, S. (1998). *An investigation on paddy drying techniques*. MS thesis, Department of Agricultural Machinery, University of Tehran, Karaj, Iran, (In Farsi).
- Rafiee, S. & Kashaninejad, M. (2005). Pistachio nut (Ohadi) moisture simulation during drying with high temperature finite element method. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 2(1), 15-26. (In Farsi)
- Shei, H.J. & Chen, Y.L. (1998). Intermittent drying of rough rice. *Drying Technology*, 16 (3-5), 839-851.
- Sun, D.W. & Woods, J.L. (1994). Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers, *Transactions of the ASAE*, 37(6), 1919-1928.
- Wang, C.Y., & Singh, R.P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. *ASAE*: St. Joseph, MI: USA, Paper No. 78-3001.
- Yadollahinia, A.R. (2006). *A thin layer drying model for paddy dryer*, MSc thesis, University of Tehran, Karaj, Iran. (In Farsi)
- Yadollahinia, A.R., Omid, M. & Rafiee, S. (2008). Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products, *International Journal of Agriculture and Biology*, 10(1), 61-65.
- Yaldiz, O. & Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19, 583-596.