

مدلسازی ریاضی فرایند خشک کردن زردآلو در یک خشک کن خورشیدی با جریان اجباری در دو حالت مختلط و غیر مستقیم

مجتبی. داداش زاده^{1*}، علی. زمردیان² و حمید. مرتضی پور³

1- کارشناس ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی از دانشگاه شیراز و دبیر آموزش و پرورش شهرستان آمل

2- عضو هیات علمی گروه مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه شیراز

3- عضو هیات علمی گروه مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان

* m.dadashzad@gmail.com

چکیده

در تحقیق حاضر فرایند خشک شدن لایه نازک زردآلو در یک خشک کن خورشیدی کابینتی با جریان هوای اجباری مورد بررسی قرار گرفت. خشک کن خورشیدی مورد استفاده دارای یک جمع کننده ی خورشیدی دو راهه، محفظه ی محصول، مکند و کانال های هوا بوده که در دو حالت مختلط و غیر مستقیم بکار گرفته شد. آزمایش ها در محوطه ی باز دانشکده ی کشاورزی دانشگاه شیراز صورت پذیرفت. به منظور انتخاب بهترین مدل برای توصیف فرایند خشک شدن، نتایج حاصل از آزمایش های تجربی با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی با ده مدل ریاضی مختلف، تطبیق داده شدند. از پارامترهای آماری r ، χ^2 و RMSE برای مقایسه نتایج حاصل از تطبیق مدل ها استفاده گردید. نتایج تحقیق حاکی از این بود که مدل two-term با $r=0/999$ و $\chi^2 = 3/374 \times 10^{-3}$ برای حالت خشک کردن مختلط و $r=0/999$ و $\chi^2 = 1/243 \times 10^{-4}$ برای خشک کردن غیر مستقیم، بهترین توصیف را برای فرایند خشک کردن زردآلو در شرایط مختلف خشک شدن ارائه می دهد.

کلمات کلیدی: زردآلو، خشک کن خورشیدی، مدل ریاضی

مقدمه

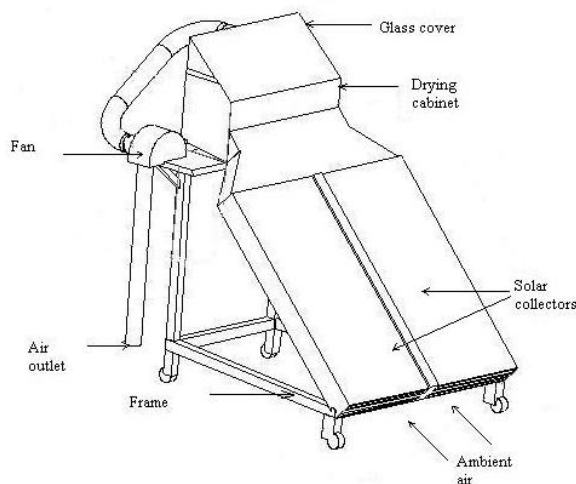
خشک کردن یکی از معمول ترین فرایندها به منظور حفظ کیفیت ماندگاری غذا می باشد. این فرایند با کاهش قابل ملاحظه ی فعالیت آبی مواد سبب کاهش فعالیت های میکروبی و کمینه شدن تغییرات فیزیکی و شیمیایی غذا می گردد. خشک کردن به روش پهن کردن در معرض آفتاب از ابتدای زندگی بشر مورد توجه بوده است. در این روش، کیفیت محصول تا حد زیادی تحت تاثیر شرایط آب و هوایی قرار می گیرد و خشک کردن نیازمند صرف زمان طولانی می باشد. برای رفع محدودیت های مربوط به روش خشک کردن در آفتاب و همچنین استفاده از منبع انرژی رایگان، پاک و تجدیدپذیر خورشید، خشک کن های خورشیدی مورد نظر قرار گرفتند [Pangavhane et al., 2002]. خشک کن های خورشیدی می توانند جایگزین مناسبی برای خشک کن های هوای گرم و روش خشک کردن در آفتاب، به خصوص در مناطقی که دارای تابش مناسب خورشید در فصل برداشت محصول هستند، باشند [Sacilik et al., 2006]. استفاده از این خشک کن ها می تواند سبب کاهش تلفات و بهبود کیفیت محصول خشک شده در مقایسه با روش های سنتی خشک کردن گردد.

به منظور دستیابی به عملکرد مناسب خشک کن با توجه به کیفیت محصول تولیدی و بازدهی انرژی مصرفی، طراحی خشک کن از اهمیت ویژه ای برخوردار است [Mühlbauer, 1986]. در این خصوص، معادلات شبیه سازی

فرایند خشک شدن در طراحی خشک کن و بهینه سازی عملکرد آن مفید می باشند. سینتیک خشک شدن می تواند با استفاده از خواص محصول و محیط خشک شدن شامل ضریب انتقال حرارت، ضریب انتشار رطوبت و ضریب انتقال جرم و حرارت بین محصول و محیط توصیف گردد [Steinteld and Segal, 1986] معادلات ریاضی متنوعی برای شبیه سازی خشک شدن محصولات مختلف در شرایط گوناگون ارائه گردیده است [Chin *et al.*, 2009; Vega-Gálvez *et al.*, 2010; Zomorodian and Dadashzadeh, 2009]. در این تحقیق فرایند خشک شدن لایه نازک زردآلو در یک خشک کن خورشیدی جریان اجباری در دو حالت مختلط و غیر مستقیم مورد بررسی قرار گرفت و یک مدل ریاضی برای توصیف خشک شدن زردآلو در این خشک کن معرفی شد.

مواد و روش های آزمایش

در شکل 1 طرحواره ای از خشک کن خورشیدی مورد استفاده در تحقیق نشان داده شده است. کلیه مراحل طراحی و ساخت این خشک کن در دانشکده ی کشاورزی دانشگاه شیراز انجام گرفت. خشک کن شامل دو جمع کننده ی خورشیدی صفحه ای تخت (با مجموع مساحت 4 m^2) که با توجه به عرض جغرافیایی محل آزمایش (30 درجه)، تحت زاویه ی 45 درجه بر روی پایه نصب گردیدند، محفظه ی محصول و مکنده ی الکتریکی بود.



شکل 1: طرحواره ای از خشک کن خورشیدی با جریان هوای اجباری

از آنجا که خشک کن مورد نظر قرار بود در حالت مختلط نیز کار کند، در سطح جلویی محفظه یک پوشش شیشه ای نصب گردید تا به نور خورشید اجازه ی نفوذ به داخل محفظه و برخورد با سطح محصول را بدهد. در زمان استفاده از خشک کن به حالت غیرمستقیم، سطح شیشه با یک پارچه ی تیره رنگ بطور کامل پوشیده می شد. محفظه دارای دو سینی با ابعاد $96 \times 46 \text{ cm}$ و $96 \times 26 \text{ cm}$ برای قرار گرفتن محصول بود. برای به جریان درآوردن هوا از قسمت های مختلف خشک کن، از یک مکنده ی گریز از مرکز با توان 750 W و سرعت 1400 rpm استفاده گردید. یک دریچه ی دمپر در لوله ی خروجی از مکنده نصب شد که از طریق آن امکان تنظیم دبی های مختلف هوای خشک کننده وجود داشت.

انجام آزمایش ها

آزمایش های تجربی در تیرماه سال 1385 در محوطه ی باز بخش مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه شیراز از ساعت 8 صبح تا 4 عصر انجام شد. در طی مدت انجام آزمایش ها، هوایی آفتابی و بدون باران در منطقه حاکم بود. در هر آزمایش دمای هوای ورودی و خروجی جمع کننده ی خورشیدی و محفظه ی محصول، جرم نمونه ی محصول در حال خشک شدن و دما و رطوبت نسبی محیط در فاصله های زمانی نیم ساعته اندازه گیری و ثبت گردید. آماده سازی محصول شامل شستن، ورقه کردن و گوگرد دهی بود. در ادامه محصول گوگرد داده شده بصورت یکنواخت و در یک لایه ی نازک روی سینی پهن شده و داخل محفظه قرار می گرفت. جرم اولیه ی زردآلو در هر آزمایش 25 کیلوگرم بود و برای بدست آوردن رطوبت اولیه ی آن از روش آن خلای و در دمای 70 °C و زمان 24 ساعت استفاده شد. متوسط رطوبت اولیه ی زردآلو 2/33 کیلوگرم آب بر هر کیلوگرم ماده ی خشک بدست آمد.

آزمایش ها در دو حالت خشک کردن مختلط و غیر مستقیم انجام شد. به منظور بررسی تاثیر سرعت هوای عبوری بر آهنگ خشک شدن زردآلو، آزمایش ها در سه سطح سرعت هوای خشک کننده شامل 3/8، 6/3 و 8/7 /s متر بر ثانیه انجام گرفت. برای اندازه گیری شدت تابش خورشید بر روی سطح جمع کننده ی خورشیدی یک شیدسنج با زاویه ی 45 درجه موازی با سطح جمع کننده در کنار آن نصب شد. داده های مربوط به شیدسنج و حسگرهای دما از طریق یک دیتالاگر بر روی یک رایانه ی شخصی نمایش و ثبت می گردید.

مدلسازی ریاضی خشک شدن زردآلو

به منظور تعیین مناسب ترین مدل برای توصیف فرایند خشک شدن زردآلو در خشک کن خورشیدی مورد استفاده در این تحقیق، منحنی های خشک شدن بدست آمده از آزمایش های تجربی با 10 معادله ی ریاضی مختلف (جدول 1) تطبیق داده شدند. نسبت رطوبت محصول (MR) در هر لحظه از رابطه ی ساده شده ی $MR = M/M_0$ بدست آمد [Mousavi and Javan, 2009; Zomorodian and Moradi, 2010] که در این رابطه M مقدار رطوبت بر پائ ی خشک محصول در هر لحظه و M_0 مقدار رطوبت اولیه برپایه ی خشک آن می باشد. ضرایب مدل ها با استفاده از آنالیز رگرسیونی غیر خطی و از طریق نرم افزار SPSS 16 محاسبه شدند. از پارامترهای آماری ضریب همبستگی (r) انحراف مربع میانگین یا کی دو (χ^2) و ریشه ی اختلاف مربع میانگین (RMSE) برای تعیین میزان نزدیکی داده های اندازه گیری شده با داده های محاسبه شده توسط مدل ها استفاده شد. بر این اساس، معادله ای که دارای بیشترین مقدار ضریب همبستگی و کمترین مقادیر کی دو و RMSE بود به عنوان مناسب ترین معادله برای توصیف فرایند خشک شدن زردآلو در خشک کن خورشیدی جریان اجباری انتخاب گردید. برای محاسبه ی پارامترهای آماری از روابط زیر استفاده شد.

جدول 1: مدل های ریاضی مورد استفاده برای مدلسازی فرایند خشک شدن زردآلو

شماره	نام مدل	مدل	منابع
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Ayensu (1997)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Diamente and Munro (1993)
3	Henderson and Pabis	$MR = \text{aexp}(-kt)$	Westerman et al. (1973)
4	Logarithmic	$MR = \text{aexp}(-kt) + c$	Yagcioglu et al. (1999)
5	Two term	$MR = \text{aexp}(-k_0t) + \text{bexp}(-k_1t)$	Henderson (1974)
6	Two term exponential	$MR = \text{aexp}(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Sharaf-Eldeen et al. (1980)
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh (1978)
8	Approximation of diffusion	$MR = \text{aexp}(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Yaldız and Ertekin (2001)
9	Modified Henderson and Pabis	$MR = \text{aexp}(-kt) + \text{bexp}(-gt) + \text{cexp}(-ht)$	Karathanos (1999)
10	Verma et al.	$MR = \text{aexp}(-kt) + (1 - a) \exp(-kgt)$	Verma, Bucklin, Endan, and Wratten (1985)

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

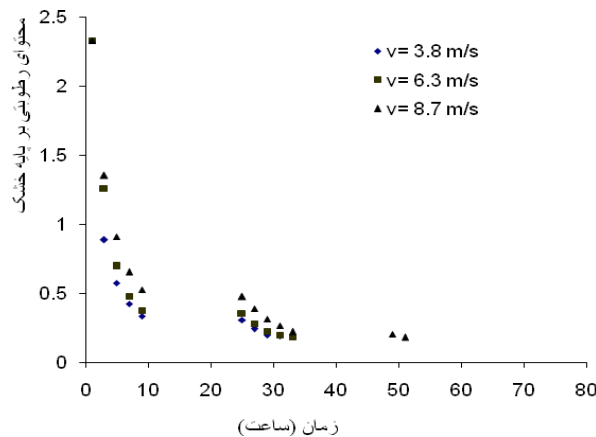
9

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

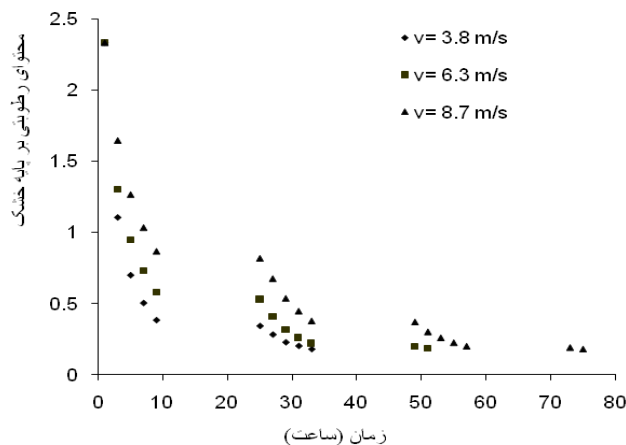
که در آن $MR_{exp,i}$ امین نسبت رطوبت اندازه گیری شده، $MR_{pre,i}$ امین نسبت رطوبت محاسبه شده، N تعداد مشاهدات و n تعداد ضرایب مدل می باشد [Hayaloglu *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007].

نتایج و بحث

در طول زمان آزمایش دمای محیط بین 25 تا 30 °C، رطوبت نسبی آن بین 10 تا 15٪ و شدت تابش خورشید در محدوده 420 تا 1012 W/m² تغییر کردند. دمای هوای خشک کننده از 40 °C برای سرعت هوای 3/8 m/s و در حالت خشک کردن مختلط 8/7 و در حالت خشک کردن غیر مستقیم تا 61 °C در سرعت هوای 3/8 m/s و در حالت خشک کردن مختلط متغیر بود. تغییرات مقدار رطوبت محصول با گذشت زمان در شکل های 2 و 3 نشان داده شده است. در هر یک از شکل ها، جهش بوجود آمده در منحنی نشان دهنده تغییرات در طول شب در مدت خشک شدن محصول می باشد. با توجه به شکل ها، واضح است که تمام فرآیند خشک شدن زردآلو در مرحله ی نزولی رخ داده و مرحله ی خشک شدن با نرخ ثابت مشاهده نشده است. این نتیجه با یافته های پیشین مطابقت دارد [San Martin *et al.*, 2004; Toğrul and Pehlivan, 2001]. همچنین می توان گفت که در دبی های مختلف هوای عبوری، آهنگ خشک شدن در حالت مختلط بیشتر از حالت غیر مستقیم بوده که دلیل اصلی آن این است که در حالت مختلط دمای محصول بدلیل برخورد مستقیم نور خورشید با سطح آن از حالت غیر مستقیم بیشتر است. بعلاوه، افزایش سرعت هوای عبوری سبب افزایش سرعت خشک شدن زردآلو گردید. این بدان دلیل است که با افزایش سرعت هوا ضرایب انتقال حرارت و انتقال رطوبت در هوای عبوری و محصول زیاد می شود که این خود افزایش نرخ تبخیر رطوبت از سطح محصول را بدنبال دارد. این یافته مطابق نتایج [Fatouh *et al.*, 2006] است.



شکل 2: تغییرات مقدار رطوبت محصول با گذشت زمان در حالت خشک کردن مختلط



شکل 3: تغییرات مقدار رطوبت محصول با گذشت زمان در حالت خشک کردن غیر مستقیم

نتایج آنالیز آماری تطبیق داده های مدل با تجربی در حالت خشک شدن مختلط و غیر مستقیم بترتیب در جدول - های 2 و 3 آورده شده است. همان گونه که واضح است مدل two-term با $r=0/999$ ، $\chi^2 = 3/374 \times 10^{-3}$ و $\chi^2 = 1/243 \times 10^{-4}$ و $\chi^2 = 4/33 \times 10^{-3}$ برای حالت خشک کردن مختلط و $r=0/999$ و $\chi^2 = 8/64 \times 10^{-3}$ برای خشک کردن غیر مستقیم، دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین مقدار کی دو و RMSE از میان مدل ها بود و بنابراین به عنوان معادله ی ریاضی توصیف کننده ی فرایند خشک شدن زردآلو در خشک کن خورشیدی جریان اجباری در دو حالت مختلط و غیر مستقیم انتخاب شد.

جدول 2: نتایج آنالیز آماری تطبیق داده های مدل با تجربی در حالت خشک شدن مختلط

شماره مدل	ثابت ها و ضرایب مدل	r	RMSE	χ^2
1	$k = 0.2314$	0.951	9.07×10^{-2}	9.27×10^{-3}
2	$k = 0.2143; n = 1.0561$	0.951	9.04×10^{-2}	10.5×10^{-3}
3	$a = 1.2935; k = 0.3138$	0.976	7.46×10^{-2}	7.16×10^{-3}
4	$a = 1.4988; k = 0.5306; c = 0.111$	0.995	2.58×10^{-2}	1×10^{-3}

5	$a = 0.3432; k_0 = 0.09139; b = 1.6344; k_1 = 0.8673$	0.999	4.61×10^{-3}	3.84×10^{-5}
6	$a = 2.1045; k = 0.4233$	0.971	8.98×10^{-2}	10.4×10^{-3}
7	$a = -0.1594; b = 0.0065$	0.921	10.8×10^{-2}	15×10^{-3}
8	$a = 0.9837; k = 0.2596; b = -0.375$	0.968	8.32×10^{-2}	10.4×10^{-3}
9	$a = 0.5294; k = 0.6269; b = 0.4; g = 0.1068; c = 0.7144; h = 0.8$	0.996	2.52×10^{-2}	1.91×10^{-3}
10	$a = 0.9837; k = 0.2596; g = -0.0926$	0.976	7.46×10^{-2}	8.35×10^{-3}

جدول 3: نتایج آنالیز آماری تطبیق داده های مدل با تجربی در حالت خشک شدن غیر مستقیم

شماره مدل	ثابت ها و ضرایب مدل	r	RMSE	χ^2
1	$k = 0.1987$	0.965	7.45×10^{-2}	6.16×10^{-3}
2	$k = 0.1953; n = 1.01$	0.965	7.44×10^{-2}	6.93×10^{-3}
3	$a = 1.196; k = 0.2446$	0.98	7.1×10^{-2}	5.04×10^{-3}
4	$a = 1.306; k = 0.39; c = 0.1046$	0.996	2.14×10^{-2}	6.59×10^{-4}
5	$a = 0.3525; k_0 = 0.0833; b = 1.2343; k_1 = 0.6032$	0.999	4.04×10^{-3}	2.73×10^{-5}
6	$a = 0.461; k = 0.3088$	0.969	7.18×10^{-2}	6.45×10^{-3}
7	$a = -0.1399; b = 0.00506$	0.941	9.21×10^{-2}	10.5×10^{-3}
8	$a = 0.9836; k = 0.2225; b = -0.3592$	0.979	6.66×10^{-2}	6.34×10^{-3}
9	$a = 0.5142; k = 0.542; b = 0.466; g = 0.4365; c = 0.39; h = 0.058$	0.996	6.72×10^{-2}	11.2×10^{-3}
10	$a = 0.9837; k = 0.223; g = -0.08$	0.968	6.67×10^{-2}	6.36×10^{-3}

نتیجه گیری

در این تحقیق فرایند خشک شدن زردآلو در یک خشک کن خورشیدی جریان اجباری در دو حالت مختلط و غیر مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش ها در سه سطح سرعت هوای عبوری انجام شد. 10 مدل ریاضی برای تعیین مناسب ترین معادله برای توصیف خشک شدن زردآلو استفاده شد. در نهایت نتایج بدست آمد ه بطور خلاصه عبارتند از:

- 1- تمام فرایند خشک شدن زردآلو در مرحله ی نزولی اتفاق افتاد و مرحله ی خشک شدن با نرخ ثابت مشاهده نشد.
- 2- آهنگ خشک شدن محصول در حالت مختلط بیشتر از حالت غیر مستقیم بود.
- 3- افزایش سرعت هوای عبوری سبب افزایش سرعت خشک شدن زردآلو گردید.
- 4- مدل two-term با $r=0/999$ ، $\chi^2 = 3/374 \times 10^{-3}$ و $RMSE = 4/33 \times 10^{-2}$ برای حالت خشک کردن مختلط و $r=0/999$ و $\chi^2 = 1/243 \times 10^{-4}$ و $RMSE = 8/64 \times 10^{-3}$ برای خشک کردن غیر مستقیم، دارای بیشترین ضریب همبستگی، کمترین مقدار کی دو و $RMSE$ از میان مدل ها بود و به عنوان مناسب ترین معادله برای توصیف فرایند خشک شدن زردآلو در هر دو حالت مختلط و غیر مستقیم انتخاب شد.

منابع

- Chin, S.K., Law, C.L., Supramaniam, C.V.andCheng, P.G. (2009). Thin-Layer Drying Characteristics and Quality Evaluation of Air-Dried Ganoderma Tsugae Murrill. Drying Technology, 27(9): 975-984.
- Fatouh, M., Metwally, M., Helali, A.andShedid, M. (2006). Herbs Drying Using a Heat Pump Dryer. Energy conversion and management, 47(15-16): 2629-2643.
- Hayaloglu, A.A., Karabulut, I., Alpaslan, M.andKelbaliyev, G. (2007). Mathematical Modeling of Drying Characteristics of Strained Yoghurt in a Convective Type Tray-Dryer. J Food Eng, 78: 109-117.

- Mousavi, M. and Javan, S. (2009). Modeling and Simulation of Apple Drying , Using Artificial Neural Network and Neuro -Taguchi ' S Method. *Journal of Agricultural Science and Technology.*, 11: 559-571.
- Mühlbauer, W. (1986). Present Status of Solar Crop Drying. *Energy in agriculture*, 5(2): 121-137.
- Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L. and Sarsavadia, P.N. (2002). Design, Development and Performance Testing of a New Natural Convection Solar Dryer. *Energy*, 27(6): 579-590.
- Sacilik, K., Keskin, R. and Elicin, A.K. (2006). Mathematical Modelling of Solar Tunnel Drying of Thin Layer Organic Tomato. *Journal of food engineering*, 73(3): 231-238.
- San Martin, M., Mate, J., Fernandez, T. and Virseda, P. (2001). Modelling Adsorption Equilibrium Moisture Characteristics of Rough Rice. *Drying Technology*, 19(3-4): 681-690.
- Steinteld, A. and Segal, I. (1986). A Simulation Model for Solar Thin-Layer Drying Process. *Drying Technology*, 4(4): 535-554.
- Toğrul, İ.T. and Pehlivan, D. (2004). Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Some Fruits under Open-Air Sun Drying Process. *Journal of food engineering*, 65(3): 413-425.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Díaz, L.P., Lopez, L., Rodriguez, K. and Di Scala, K. (2010). Effective Moisture Diffusivity Determination and Mathematical Modelling of the Drying Curves of the Olive-Waste Cake. *Bioresource Technology*, 101(19): 7265-7270.
- Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X. and Hu, X. (2007). Mathematical Modelling on Thin Layer Microwave Drying of Apple Pomace with and without Hot Air Pre-Drying. *Journal of food engineering*, 80(2): 536-544.
- Zomorodian, A. and Moradi, M. (2010). Mathematical Modeling of Forced Convection Thin Layer Solar Drying for Cuminum Cyminum. *Journal of Agricultural Science and Technology.*, 12: 401-408.
- Zomorodian, A.A. and Dadashzadeh, M. (2009). Indirect and Mixed Mode Solar Drying Mathematical Models for Sultana Grape. *Journal of Agricultural Science and Technology.*, 11: 391-400.