

## انتخاب مناسب‌ترین مدل ریاضی برای خشک کردن زیره سبز در حالت تابش غیر مستقیم در خشک کن خورشیدی فعال (۲۹)

مهدی مرادی<sup>۱</sup>، علی زمردیان<sup>۲</sup>

### چکیده

در این تحقیق مناسب‌ترین مدل ریاضی خشک کن خورشیدی زیره سبز در حالت تابش غیر مستقیم، انتخاب شد. آزمایش‌ها خشک کردن بر روی دانه‌های زیره سبز در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در خرداد ماه ۱۳۸۶ انجام گرفت. رطوبت اولیه محصول، ۴۳/۵ درصد (براساس پایه خشک) بوده و دانه‌ها تا رطوبت نهایی ۸ درصد (میانگین) در مدت زمان تقریبی ۹۰ دقیقه، در یک خشک کن خورشیدی از نوع کابینتی خشک شدند. به منظور پیدا کردن مناسب‌ترین مدل ریاضی خشک کردن، نتایج حاصل از آزمایش با یازده مدل مختلف، تطبیق داده شدند تا بهترین ضرایب در هر مدل بدست آید. سپس پارامترهای آماری  $\chi^2$ ، R، و RMSE برای هر مدل محاسبه شدند. سرانجام مدل Midilli با  $R=0.996795$ ،  $\chi^2=0.022578$  و  $RMSE=0.04588$  به عنوان مناسب‌ترین مدل برگزیده شد.

**کلیدواژه:** خشک کن فعال، مدل ریاضی، خشک کردن لایه نازک، زیره سبز

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه راز

۲- دانشیار بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه شیراز

### جدول علامت ها

$a, b, c, n$	ضرایب تجربی در مدل های خشک کن
$k, k_0, k_1$	ثابت های تجربی در مدل های خشک کن
$M$	محتوی رطوبت محصول
$M_e$	رطوبت تعادلی محصول
$M_0$	رطوبت اولیه محصول
$MR$	نسبت رطوبتی
$MR_{pre,i}$	آمین نسبت رطوبتی پیش بینی شده
$MR_{exp,i}$	آمین نسبت رطوبتی مشاهده شده
$\overline{MR}_{exp}$	میانگین مجموع نسبت های رطوبتی مشاهده شده
$\overline{MR}_{pre}$	میانگین مجموع نسبت های رطوبتی پیش بینی شده
$N$	تعداد مشاهدات
$p$	تعداد ثابت ها در مدل
$R$	ضریب همبستگی
$R^2$	مربع ضریب همبستگی
$RH$	رطوبت نسبی
RMSE	ریشه میانگین مربعات خطا
$t$	زمان خشک شدن
$T$	دمای هوای خشک کننده
$\chi^2$	کای مربع

### مقدمه:

خشک کردن محصولات کشاورزی یکی از مهمترین فعالیت ها جهت نگهداری مواد غذایی می باشد [۱]. اهمیت این موضوع از یک طرف و اهمیت صرفه جویی در مصرف سوخت از طرف دیگر طراحی سیستمی جهت خشک کردن خورشیدی مواد غذایی را اقتصادی و مهم جلوه می دهد. اگرچه خشک کردن مواد غذایی به صورت سنتی و در محوطه باز در معرض نور خورشید یک روش قدیمی و نسبتاً مفید در مناطق روستایی است، ولی این روش نمی تواند از مواد غذایی در برابر حمله پرندهگان، حشرات، خطر باران زدگی، کپک زدگی محافظت نماید. به علاوه اینکه این روش به فضا و زمان زیادی جهت خشک کردن مواد غذایی نیاز دارد. بنا براین ممکن است میزان تلفات مواد غذایی خیلی بالا رفته و لذا این نحوه خشک کردن اقتصادی نمی باشد [۲]. خشک کردن با خشک کن خورشیدی یک روش خوب برای کم کردن رطوبت مواد غذایی بوده که جهت جلوگیری از تخریب آنها به کار می رود [۳]

زیره سبز یکی از مهمترین گیاهان دارویی است که با آب و هوای گرم و خشک سازگار است. بیشترین میزان تولید آن در کشور های خاورمیانه علی الخصوص ایران می باشد. حدود ۹۵ درصد محصول زیره سبز تولیدی در ایران مربوط به منطقه خراسان می باشد. در سال ۲۰۰۶ کل سطح زیر کشت این محصول در ایران حدود ۵۰۰۰۰ هکتار بوده که از این سطح، مقدار حدود ۱۵۰۰۰ تن زیره خشک برداشت شده است.

به منظور پیدا کردن مناسب ترین مدل خشک شدن زیره سبز، روش خشک کردن لایه نازک انتخاب گردید. سه نوع مدل جهت توصیف مشخصات خشک کردن به روش لایه نازک محصولات کشاورزی وجود دارد: مدل تئوری، مدل نیمه تئوری و مدل تجربی. مدل تئوری به مشخصات فیزیکی دانه ها بستگی دارد، مدل تجربی از اصول نظری خشک کردن صرف نظر می کند و یک تجزیه و تحلیل رگرسیونی بین میانگین میزان رطوبت دانه و زمان خشک شدن آن ایجاد می نماید. روش نیمه تئوری میانگینی بین روش تجربی و تئوری است که از قانون دوم Fick مدل ساده شده ای را برای تجزیه و تحلیل ارائه می کند و به میزان زیادی مورد استفاده قرار می گیرد. مدل های Page, Midilli, Henderson و... که در جدول ۱ آورده شده اند، از این روش بدست آمده اند [۴ و ۵].

تا کنون هیچ گونه مطالعه تحقیقاتی بر روی مدل خشک کردن خشک کن خورشیدی زیره سبز تحت جریان چندگانه هوا گزارش نشده است. اما کار های زیادی روی محصولات مشابه انجام گرفته است. شاید شبیه ترین محصول به زیره سبز، شالی برنج باشد. Basunia و Abe [۶] گزارشی در مورد خشک کن خورشیدی برنج در سال ۲۰۰۱ منتشر کردند. این کار در Matsuyama ژاپن بر روی دانه های برنج در اندازه متوسط صورت گرفته است. در این تحقیق از یک دستگاه خشک کن خورشیدی در حالت مختلط استفاده شد که نتایج حاصل از این آزمایش در مناسب ترین حالت با مدل Page تطبیق داده شدند. RMSE این آزمایش در مدل مذکور ۰/۰۰۳۷۸ گزارش شد که نسبت به دیگر مدل ها کمترین بود. دو پارامتر n و k تابع خطی از دما و رطوبت نسبی هوای خشک کننده بودند. نتایج حاصل به شرح زیر بودند:

$$n=0.68293+0.01094T+0.17036RH$$

$$k=0.00561-0.000073T-0.0469RH$$

که میزان  $R^2$  آن ۰/۸۶ بود.

### ۲. مواد و روش ها

زیره سبز مورد استفاده در این تحقیق از مزارع شهرستان فردوس واقع در شرق ایران در بهار ۸۶ تهیه گردید و آزمایشات در بخش مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در بهار و تابستان ۸۶ انجام گرفت. محصول با دست تمیز شده و در طول ۲۱ روز مدت آزمایش در یخچال تحت دمای ۴ درجه سانتیگراد نگهداری شد. رطوبت اولیه دانه ها ۴۳/۵ درصد (پایه خشک) بود.

جهت بیشترین کارایی زاویه جمع کننده با افق باید ۱۵ درجه بیشتر از عرض جغرافیایی محل باشد از آنجایی که عرض جغرافیایی شیراز ۳۰ درجه است این زاویه ۴۵ درجه انتخاب گردید. دمای هوا به وسیله سنسورهای حرارتی<sup>۱</sup> (۷ عدد) در قسمت های مختلف سیستم اندازه گیری شد دقت این حسگرها ۰/۵°C بوده و دما توسط سیستم پردازش داده ها<sup>۲</sup> در کامپیوتر نمایش داده و ذخیره شد. دو عدد از این حسگرها در مدخل ورودی هوا به جمع کننده خورشیدی و سه عدد از این ها در مدخل ورودی هوا به اتاقک خشک کن و دو تای دیگر در قسمت خروجی هوا از خشک کن نصب شدند. این اندازه گیری دما در هر ۵ دقیقه انجام گرفت. شدت نور خورشید نیز مرتباً و در هر ۵ دقیقه به وسیله شیدسنج<sup>۳</sup> اندازه گیری شد و در کامپیوتر ثبت گردید. این دستگاه در کنار خشک کن خورشیدی و جمع کننده و مانند آن تحت زاویه ۴۵ درجه قرار داده شد. میزان رطوبت دانه ها توسط دستگاه آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۱۶ ساعت بدست آورده شد [۷]. در هر آزمایش ۶ بار نمونه گیری صورت گرفت که فواصل نمونه برداری در شروع آزمایش به دلیل نرخ بالای رطوبت دهی محصول کمتر بود. در این تحقیق از یک دستگاه خشک کن خورشیدی کابینتی مطابق شکل ۱ استفاده شد.

شکل ۱- خشک کن خورشیدی مورد استفاده در تحقیق



جمع کننده خورشیدی

اتاقک خشک کن

شاسی قابل حمل

این دستگاه شامل یک جمع کننده خورشیدی تخت، یک کابینت و یک سبد جهت نگهداری محصول بود. هوا از روی جمع کننده خورشیدی که روی آن یک شیشه شفاف بود، توسط فن مکنده، مکیده می شد. سپس هوا از زیر سبد محصول از سوراخهای آن عبور کرده و موجب انتقال حرارت به دانه های زیره سبز می شد. این مطالعه بیشتر جهت تعیین مناسب ترین مدل ریاضی برای خشک کردن خورشیدی زیره سبز انجام گرفت. برای ارزیابی سیستم خشک کن، بدست آوردن نرخ خشک شدن محصول ضروری است. اما گاهی اوقات انجام تمام آزمایشات برای همه محصولات اقتصادی نمی باشد. بنا براین استفاده از مدل های شبیه سازی جهت پیش گویی نرخ خشک شدن محصولات مختلف یک راه حل آسان و مفید است [۸].

### تجزیه و تحلیل داده ها:

اگر چه نسبت رطوبتی مطابق رابطه  $MR = (M - M_e) / (M_0 - M_e)$  [۹] تعریف می شود، ولی به دلیل نوسانات مداوم در رطوبت نسبی هوای خشک کننده، نسبت رطوبتی به رابطه  $MR = M / M_0$  ساده می شود [۱۰].

- 1- Thermistor
- 2- Data acquisition system
- 3- Solarimeter

به منظور بررسی و انتخاب مناسب ترین نرخ خشک شدن محصول، یازده مدل از بین مدل های استاندارد ارائه شده در مقالات معتبر دنیا انتخاب شدند (جدول ۱).

جدول ۱- مدل های ریاضی خشک کن ها

شماره معادله	نام مدل	مدل	منبع
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Westerman, et al, 1973[11]
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Guarte, 1996[12]
3	Modified page	$MR = \exp(-kt)^n$	Yaldiz et al, 2001[13]
4	Henderson and pabis	$MR = a. \exp(-kt)$	Yagcioglu et al, 1999[14]
5	Logaritmic	$MR = a. \exp(-kt) + c$	Yaldiz et al, 2001[13]
6	Two term	$MR = a. \exp(-k_0t) + b. \exp(-k_1t)$	Rahman et al, 1998[15]
7	Exponential two term	$MR = a. \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Yaldiz et al, 2001[13]
8	Wang and sing	$MR = 1 + at + bt^2$	Ozdemir et al, 1999[5]
9	Thompson	$t = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2$	Yaldiz and Ertekin, 2001[16]
10	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Yaldiz and Ertkin, 2001[16]
11	Midilli et al	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Sacilik et al, 2006[1]

برای انتخاب بهترین مدل از بین این مدل ها، در هر مدل RMSE،  $\chi^2$  و R محاسبه شد. می دانیم هر چه RMSE و  $\chi^2$  کمتر بوده و R بیشتر باشد، میزان تطابق آن مدل با داده های آزمایش بیشتر است [۱۳]. هر کدام از این پارامترها از روابط زیر بدست می آیند [۱۷].

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

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

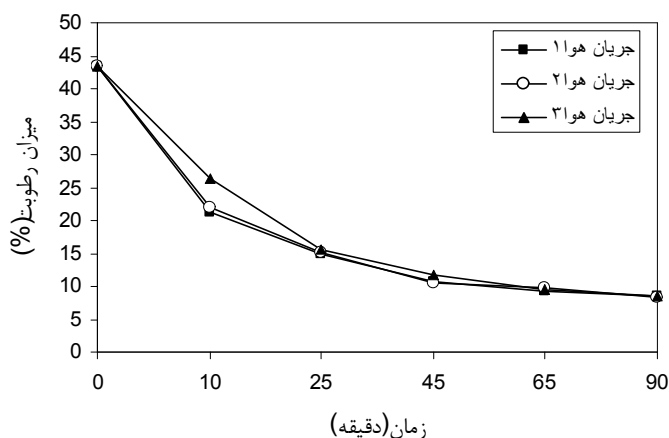
$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})(MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2}} \quad (3)$$

### ۳. نتایج و بحث:

لایه نازک زیره سبز (۱۰ میلی متر) داخل خشک کن خورشیدی کابینتی تحت سه جریان هوا {۰/۰۰۴، (جریان هوا)، ۰/۰۰۶، (جریان هوا) و ۰/۰۰۷، (جریان هوا)} متر مکعب بر ثانیه در سه تکرار در قالب طرح بلوک های کاملاً تصادفی خشک شدند. به دلیل تاثیر منفی تابش مستقیم نور خورشید بر کیفیت دانه ها، حالت تابش غیرمستقیم برای خشک کردن زیره سبز انتخاب گردید. رطوبت اولیه محصول ۴۳/۵ درصد (بر پایه خشک) بوده و محصول تا رطوبت نهایی میانگین ۸ درصد خشک شد. زمان خشک کردن رای همه محصولات ثابت نگه داشته شد (۹۰ دقیقه)

و بنابراین رطوبت نهایی محصول به نرخ هوای عبوری بستگی داشت.

نمودار تغییر رطوبت دانه در طول مدت زمان خشک شدن در شکل ۲ نمایش داده شده است.



## شکل ۲- تغییرات رطوبت محصول در برابر زمان در سه جریان متفاوت هوا

در این نمودارها رطوبت محصول با نرخ نزولی نسبت به زمان خشک شدن تغییر می کند که کاملاً با کارهای انجام گرفته توسط محققین دیگر بر روی محصولات مشابه در تطابق است. پر شیب ترین نمودار متعلق به نرخ هوای کمتر (۰/۰۰۴) است. این می تواند از آن رو باشد که دمای هوای عبوری از جمع کننده خورشیدی به دلیل سرعت کمتر جریان هوا، بیشتر است. سپس نسبت های رطوبتی در هر نرخ هوا در برابر زمان خشک شدن در نمودار جداگانه ای ترسیم شدند. بهترین مدل آماری بر اساس پارامتر های آماری (RMSE،  $\chi^2$  و R) مدل Midilli انتخاب شد (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج آماری بدست آمده از مدل های مختلف خشک کردن

شماره مدل	ضرایب مدل	R	RMSE	$\chi^2$
1	k= 0.035602	۰/۹۵۷۲۲۳	۰/۱۱۱	۰/۰۴۴۴۵۱
2	k=0.234183,n= 0.450329	۰/۹۹۵۱۸۴	۰/۰۲۷۶۷۹	۰/۰۳۴۴۸
3	k= 0.0398,n= 0.4503	۰/۹۹۵۱۸۴	۰/۰۲۷۶۷۹	۰/۰۳۴۴۸
4	a=0.894384,k= 0.029743	۰/۹۴۲۹۵۹	۰/۱۰۱۶۱۱	۰/۰۴۶۴۶۲
5	a=0.775738,k=0.081182 ,c=0.216791	۰/۹۹۴۰۳	۰/۰۳۰۷۹۱	۰/۰۰۵۶۸۸
6	$k_0=0.029743$ , a=0.447192, $k_1=0.029743$ , b=0.447192	۰/۹۴۲۹۵۹	۰/۱۰۱۶۱۱	۰/۰۹۲۹۲۳
7	a=0.222129, k=0.121909	۰/۹۷۰۰	۰/۰۸۶۲۵۴	۰/۰۳۳۴۷۹
8	a=-0.02789, b=0.000218	۰/۹۴۳۸۴۲	۰/۱۱۱	۰/۰۷۴۷۳۵
9	a=0.008813, b=0.337745	۰/۹۹۴۵۱۷	۰/۰۲۹۹۲۸	۰/۰۰۴۰۳۱
10	a=0.766617, k=0.11179,b=0.053014	۰/۹۹۴۵۵۵	۰/۰۱۹	۰/۰۲۸۷۷۷
11	<b>a=1.000105, k=0.163617, n=0.600566, b=0.001252</b>	۰/۹۹۶۷۹۵	۰/۰۲۲۵۷۸	۰/۰۰۴۵۸۸

بنا بر این مدل Midilli جهت تعیین مشخصات لایه نازک در حال خشک شدن زیره سبز در حالت های مختلف دمایی و سرعتی جریان هوا بهترین مدل شناخته شد.

در این مدل چهار ضریب وجود دارد که به دما و سرعت هوای خشک کننده بستگی دارند. جهت تعیین این وابستگی و پیدا کردن فرمولهای مربوط به هر کدام، از رگرسیون چند متغیر استفاده شد و نتایج زیر بدست آمد:

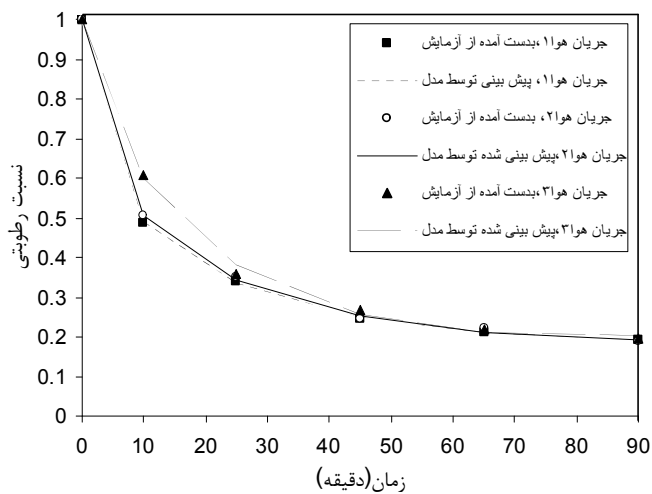
$$a=-0.003\ln v-0.006\ln t+1.024, \quad R^2 = 0.905$$

$$b= -0.002\ln v-0.003\ln t+0.013, \quad R^2 = 0.939$$

$$k= 1.503\ln v+0.2\ln t-0.774v, \quad R^2 = 0.997$$

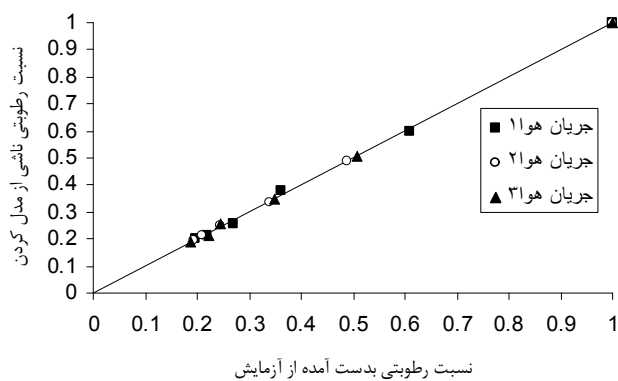
$$n= -2.665\ln v-0.107\ln t+1.372v, \quad R^2 = 1$$

در شکل ۴ میزان تطابق مدل Midilli با نتایج آزمایش در سه جریان متفاوت هوا نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات نسبت رطوبتی بدست آمده از آزمایش و مدل Midilli در برابر زمان خشک شدن در سه جریان متفاوت هوا

در شکل ۴ این تطابق در دو محور افقی و عمودی نیز نشان داده شده است.



شکل ۴- مقایسه نسبتهای رطوبتی بدست آمده از آزمایش و مدل کردن

نتیجه گیری:



به منظور تعیین نرخ خشک شدن لایه نازک زیره سبز از یک دستگاه خشک کن خورشیدی کابینتی در حالت تابش غیرمستقیم استفاده شد. پس از پیدا کردن پارامترهای آماری بهترین مدل، مدل Midilli انتخاب شد. همچنین اثر سرعت و دمای هوای خشک کننده بر روی ثابت های این مدل مورد بررسی قرار گرفت.

#### منابع:

- [1] Sacilik, K. Keskin, R and Elicin, A. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. Journal of food engineering. 73: 231-238.
- 2- Pangavhane, D. Sawhney, R and Sarsavadia, L. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. Energy . 27: 579-590.
- 3 - Midilli, A.Kucuk, H and Yapar, Z.A. 2002. New model for single-layer drying. Drying Technology. 20(7): 1503-1513.
- 4-Demirats, C. Ayhan, T and Kaygusuz, K. 1998. Drying behavior of hazelnuts. Journal of the Science of Food and Agriculture. 76: 559-564.
- 5 - Ozdemir, M. Devres, Y. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. Journal of Food Engineering. 42(4): 225-233.
- 6-Basunia, M and Abe, A. 2001. Thin layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. Journal of Food Engineering. 47(4): 295-301.
- 7- AOAC. (1990). Official method of analysis. Association of Official Analytical Chemists, (No. 934.06), Washington, DC.
- 8- Steinfeld, A. and Segal, L. 1986. A simulation model for solar thin layer drying process. Drying Technology. 4: 536-554.
- 9- Akgun, N. and Doymaz, I. 2005. Modeling of olive cake thin-layer drying process. Journal of food engineering. 68: 455-461.
- 10- Wang, Z. Sun, J and Liao, X. 2007. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer of apple pomace. Food Research International. 40: 39-46.
- 11- Westerman, P and White, W. 1973. Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled corn. Transaction of American Society of Agricultural Engineering. 16: 1136-1139.
- 12-Guarte, R. 1986. Modeling the drying behavior of copra and development of a natural convection dryer for production of high quality copra in the Philippines. Ph.D. dissertation, 287. Hohenheim University, Stuttgart, Germany.





- 13-Yadlitz, O. Ertekin, C and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of Sultana grapes. Energy. 42: 167-171.
- 14- Yagcioglu, A. Degirmencioglu, A and Cagatay, F. 1999. Drying characteristics of laurel leaves under different drying conditions. In proceedings of the 7<sup>th</sup> international congress on agricultural mechanization and energy. (pp. 565-569), 26-27 May, Adana, Turkey.
- 15-Rahman, M.1998. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. Food international Research. 30(7): 485-491.
- 16-Yaldiz, O. and Ertekin, C. 2001. Thin layer solar drying some different vegetables. Drying Technology. 19(3): 583-596.
- 17- Madamba, P. Driscoll, R and Buckle, K. 1996. The thin layer drying characteristics of garlic slices. Journal of Food Engineering. 29: 75-97.



### Abstract

In this research mathematical modeling of thin layer forced convection solar drying for Cuminum Cyminum in indirect method were conducted at different operating conditions. The initial moisture content of the product was 43.5%(d.b) and the product was dried to average 8%(d.b) for roughly 90 minutes in a solar cabinet dryer. In order to find the most suitable form of thin layer solar drying model, eleven different mathematical models were fitted against the experimental values to determine pertinent coefficients in each model. The degree of fitting goodness was determined by calculating and comparing the values of R(correlation coefficient),  $\chi^2$ (reduced chi-square) and RMSE(root of mean square error) for any of the models. The Midilli model with  $R = 0.996795$  ,  $\chi^2 = 0.004588$  ,  $RMSE = 0.022578$  showed the best results.

**Key words:** Active, thin layer model, mathematical model, Cuminum Cyminum