

## بررسی سینتیک خشک شدن دانه های آفتابگردان در شرایط بستر ثابت، نیمه سیال و سیال

مرتضی همتی<sup>1</sup>، حسین حاجی آقا علیزاده<sup>2</sup>، رضا امیری چایجان<sup>2</sup> و ابراهیم احمدی<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

2- استاد کلر مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

m.hemmati33@gmail.com

### چکیده

در این پژوهش، به منظور بررسی سینتیک خشک شدن دانه های آفتابگردان و تخمین ضریب پخش رطوبت موثر و مقادیر انرژی فعال سازی، آزمایش های تجربی خشک کردن در سه سطح سرعت هوا (1/83، 0/94 و 2/71 m/s) و چهار سطح دما (30، 60.45 و 75°C) در یک خشک کن مقیاس آزمایشگاهی در سه تکرار در پائیز 1390 در آزمایشگاه گروه مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام گرفت. داده های تجربی با انواع مدل های نیمه نظری و تجربی ارزیابی شد و از میان 5 مدل مورد نظر، مدل *Midili et al* با توجه به معیارهای بیشترین ضریب تعیین ( $R^2$ ) و کمترین مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. ضریب موثر انتشار رطوبت موثر دانه های آفتابگردان در حین انجام آزمایش بین  $6/6 \times 10^{-11}$  تا  $8/08 \times 10^{-10}$   $m^2/s$  بدست آمد. انرژی فعال سازی با استفاده از یک رابطه نمایی بر مبنای رابطه آرنیوس محاسبه شد و مقدار آن بین 44/61 تا 47/34 kJ/mol به دست آمد.

کلمات کلیدی: آفتابگردان، انرژی فعال سازی، خشک کردن، ضریب پخش رطوبت موثر

### مقدمه

دانه های روغنی پس از غلات، دومین ذخایر غذایی جهان را تشکیل می دهند. براساس گزارشات سازمان خواروبار جهانی (FAO) میزان تولید جهانی روغن در طول سال 2006-2005 حدود 2 درصد افزایش یافته است و بیشترین میزان افزایش روغن نیز مربوط به روغن دانه آفتابگردان می باشد. در ایران علیرغم وجود اراضی وسیع قابل کشت وزمینه های نسبتاً زیادی که برای تولید دانه های روغنی وجود دارد، هنوز بیش از 85 درصد از روغن مورد نیاز به ارزش تقریبی 647 میلیون دلار (سال 1388) به صورت واردات تامین می شود. [vafaei et al., 2010]. آفتابگردان (*Helianthus annuus L.*) یکی از دانه های روغنی مهم جهان می باشد، که سطح زیر کشت آن در ایران 100 هزار هکتار با عملکرد یک تن در هکتار می باشد [vafaei et al., 2010]. اندازه گیری برخی از خواص مکانیکی و خشک کردن تخمه آفتابگردان، در طراحی تجهیزات فرآیندهای جابجایی، حمل و نقل، جداسازی، پوست گیری، خشک کردن، تجهیزات استخراج روغن، سیستم های انبارداری و سایر فرآیندها ضروری به نظر می رسد و نقش اساسی را ایفا می کند [Gupta and Das., 1997].

برای جلوگیری از تلفات به دلیل شکسته شدن ساقه، آسیب پرندگان و شرایط آب و هوایی نامساعد، آفتابگردان اغلب در رطوبت بالاتر از سطح ذخیره سازی ایمن، برداشت می شود [Syarief *et al.*, 1984]. از این رو برای جلوگیری از رشد میکروبهها و حفاظت محصول، خشک کردن امری ضروری است. [Bax *et al.*, 2004]. با وجود مطالعات فراوانی که در زمینه خواص خشک کردن لایه نازک محصولات مختلف کشاورزی از جمله زرشک [Aghbashlo *et al.*, 2008]، دانه های ذرت [Amiri Chayjan *et al.*, 2011]، انجیر [Babalís and Belessiotis, 2004]، انجام شده است، بررسی منابع نشان داد که اطلاعات کمی در خصوص خواص خشک کردن دانه های آفتابگردان وجود دارد. بنابراین هدف از این پژوهش، مدل سازی سینتیک خشک کردن، تعیین ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی فعال سازی دانه آفتابگردان رقم روغنی در خشک کن آزمایشگاهی می باشد.

### مواد و روشها

دانه های آفتابگردان از مزارع کشت آفتابگردان نهاوند، استان همدان تهیه شد و برای انجام آزمایشها در یخچال در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  نگهداری شد. رطوبت اولیه دانه ها توسط روش استاندارد آون- هوای داغ تعیین گردید. نمونه های 10 گرمی در آون در دمای  $130 \pm 1^{\circ}\text{C}$  به مدت 3 ساعت قرار گرفتند. این روند 5 مرتبه تکرار شد و مقدار رطوبت اولیه دانه ها 0/223 (d.b) بر پایه خشک به دست آمد [ASAE S352.2 APR1988 R2008]. برای انجام آزمایشات از یک خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی استفاده شد. آزمایشها در سه سطح سرعت 0/94، 1/83 و  $2/91\text{m/s}$  و در چهار سطح دمایی 30، 45، 60 و  $75^{\circ}\text{C}$  در شرایط آزمایشگاهی که مقدار رطوبت نسبی محیط آزمایشگاه در طی آزمایشها 20/43 تا 25/88٪ بود و دمای محیط آزمایشگاه بین 24/55 تا  $27/94^{\circ}\text{C}$  اندازه گیری شده بود، انجام شد. برای به دست آوردن ضریب پخش رطوبت موثر دانه های آفتابگردان شبیه کره فرض شد. [Santalla and Mascheroni, 2010].

قانون دوم فیک که توسط کرانک برای شرایط لایه نازک در محصولات کروی ارائه شد با نادیده گرفتن اثرات دما و مجموع گرا دیان فشار می تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند [Crank, 1975]. با فرض اینکه در فرآیند خشک کردن، پخش رطوبتی موثر ثابت و شعاعی است می توان مقدار آن را از معادله زیر محاسبه نمود:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (1)$$

که در آن  $n$  تعداد جملات معادله (1، 2، 3، ...)،  $t$  زمان خشک شدن (s)،  $r$  شعاع هندسی دانه (m)،  $MR$  نسبت رطوبت،  $M$  رطوبت در یک زمان (d.b.)،  $M_o$  مقدار رطوبت اولیه (d.b.)،  $M_e$  مقدار رطوبت تعادل (d.b.)،  $D_{eff}$  ضریب پخش رطوبت موثر ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). وقتی  $t$  افزایش می یابد، تمام جملات به غیر از جمله اول، صفر می شوند در نتیجه خواهیم داشت [Babalís and Belessiotis, 2004].

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (2)$$

بعد از ساده شدن، معادله بالا را می توان به صورت خطی نوشت. با اعمال لگاریتم از طرفین معادله می توان آن را به صورت خطی درآورد.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff} \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (3)$$

با رسم  $\ln(MR)$  نسبت به زمان، خطی با شیب  $K_0$  به دست می آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب  $t$  در رابطه 3، ضریب نفوذ را می توان به دست آورد. با استفاده از معادله آرینوس رابطه بین دما و ضریب پخش رطوبت موثر حاصل می شود که می توان انرژی فعال سازی را به دست آورد [Akpinar *et al.*, 2003].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T_a}\right) \quad (4)$$

$E_a$  انرژی فعال سازی (kJ/mol)،  $R_g$  ثابت جهانی گازها که برابر (8/3143 kJ/mol)،  $T_a$  دمای هوای داخل محفظه خشک کن (K)،  $D_0$  عرض از مبدا که مقدار آن ثابت است. با لگاریتم گیری از طرفین معادله (5)، معادله به صورت زیر در می آید:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \quad (5)$$

با رسم نمودار  $\ln(D_{eff})$  در مقابل  $(1/T_a)$  خطی با شیب  $K_1$  به دست می آید:

$$K_1 = \left(\frac{E_a}{Rg}\right)$$

همچنین برای به دست آوردن پارامترهای پیش بینی رطوبت از معادلات 10.9 و 11 استفاده شد. معادله (1) را می توان به عنوان مثال به صورت زیر نوشت.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt) \quad (7)$$

که از این مدل ها مقادیر  $R^2$  و RMSE و  $\chi^2$  به دست می آیند [Aghbashlo *et al.*, 2008]. همچنین مقدار  $\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$  را می توان به صورت زیر ساده نمود. مقدار  $M_e$  را صفر در نظر گرفته می شود و به شکل زیر ارائه می شود:

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [MR_{exp,i} - MR_{pre,i}]^2}{\sum_{k=1}^N \left[ \frac{\sum_{i=1}^n MR_{pre,i}}{N} - MR_{pre,i} \right]^2} \quad (9)$$

(10)

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

(11)

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

N تعداد مشاهدات، z تعداد ثابت‌های خشک کردن،  $MR_{\text{exp},i}$  مین نسبت رطوبت آزمایش،  $MR_{\text{pre},i}$  مین پیش بینی نسبت رطوبت. برای مدل کردن رفتار خشک شدن دانه های آفتابگردان از مدل 5 مدل ریاضی لایه نازک استفاده شد (جدول 1). برای محاسبه مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) از نرم افزار Curve Expert (Ver 1.4) استفاده شد.

### نتایج و بحث

مدل های مورد استفاده برای خشک کردن لایه نازک دانه های آفتابگردان در جدول (1) نشان داده شده و نتایج به دست آمده از مدل سازی سینتیک دانه های آفتابگردان در جدول (2) نشان داده شده اند. نتایج نشان داد که مدل Midilli با توجه به معیارهای بیشترین ضریب تعیین ( $R^2$ ) و کمترین مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) دارای بهترین عملکرد بود زیرا  $R^2=0/9999$ ،  $\chi^2=0/000026$  و  $RMSE=0/004$  به دست آمدند.

جدول 1- مدل های لایه نازک مورد استفاده برای خشک کردن دانه آفتابگردان

نام مدل	معادله مدل	مراجع
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Liu and bakker (1997)
Page	$MR = a \exp(-kt^n)$	Zhang and Litchfield (1991)
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + b$	Midilli <i>et al.</i> (2002)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yaldiz <i>et al.</i> (2001)
Regression	$MR = \exp(-(bt + at^2))$	Junling <i>et al.</i> (2008)

شکل های (1) نسبت رطوبت در مقابل زمان (طبقه) را در سرعت ها و دماهای مختلف نشان می دهد. در این آزمایش ها درجه حرارت، بیشترین نقش را در کاهش رطوبت محصول ایفا می کند. با توجه به شکل ها، با افزایش دمای محفظه خشک کن، رطوبت محصول سریعتر کاهش می یابد. با افزایش دمای هوای ورودی در محفظه خشک کن کاهش رطوبت سریعتر انجام می شود. (شکل 1).

همچنین تاثیر سرعت و درجه حرارت هوای ورودی بر روی ضریب پخش رطوبت موثر ( $D_{\text{eff}}$ ) در شکل (2) نشان داده شده است. نمودارها بیانگر این است که با افزایش سرعت هوا در دماهای پایین انداره  $D_{\text{eff}}$  تغییر معنی داری نمی یابد. بیشترین مقدار  $D_{\text{eff}}$  ( $8/08 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) در دمای  $75^\circ\text{C}$  و سرعت  $1/83 \text{ m/s}$  (حالت نیمه سیال) به دست آمده است و کمترین مقدار آن ( $6/68 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ) در دمای  $30^\circ\text{C}$  به دست آمد. درجه حرارت، تاثیر

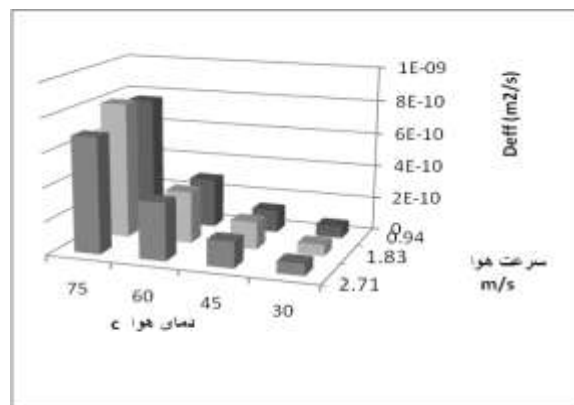
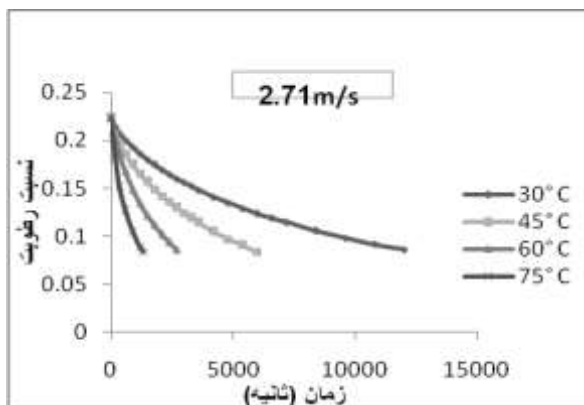
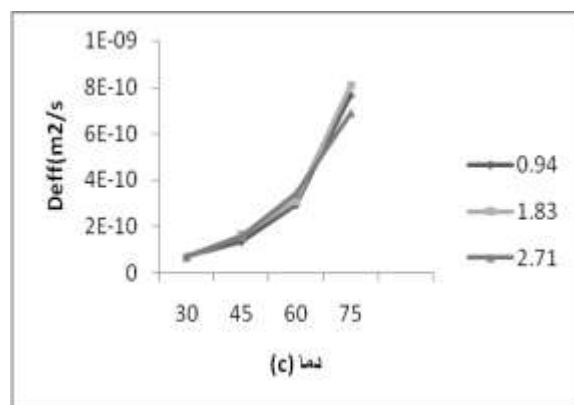
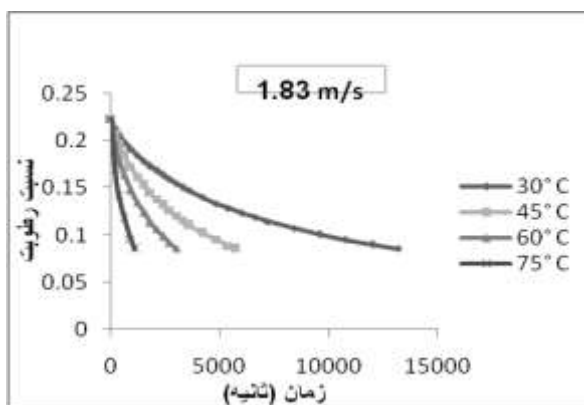
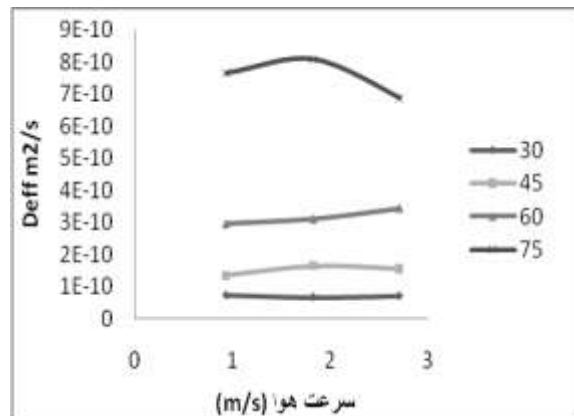
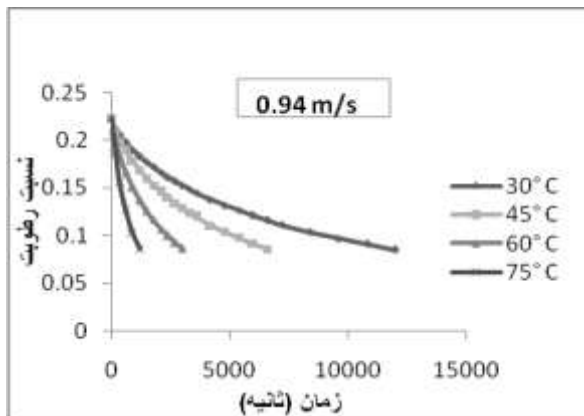
بیشتری بر روی ضریب پخش رطوبت موثر دارد (شکل 2). با توجه به شکل (2) با افزایش دما میزان ضریب پخش رطوبت موثر افزایش می‌یابد. محاسبات نشان می‌دهد رابطه مستقیمی بین ضریب نفوذ موثر رطوبت با درجه حرارت وجود دارد. معمولا مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت در آزمایش‌ها بین  $10^{-9}$  و  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  می‌باشد که مقادیر به دست آمده برای آفتابگردان نیز در این محدوده می‌باشد.

نتایج به دست آمده در مورد ارتباط ضریب پخش رطوبت موثر دانه‌های آفتابگردان با سرعت هوا و دمای خشک - کردن با نتایج محققان دیگر مانند خشک کردن دانه‌های ذرت [Amiri Chayjan *et al.*, 2011] و دانه آفتابگردان [Santalla and Mascheroni., 2010] مشابهت دارد.

جدول 2- نتایج آماری مدل‌های خشک کردن دانه آفتابگردان

مدل	دمای هوا	$R^2$			$\chi^2$			RMSE		
		0/94	1/83	2/71	0/94	1/83	2/71	0/94	1/83	2/71
Newton	30	0/9170	0/9066	0/9439	0/0598	0/0720	0/0459	0/2394	0/2629	0/2097
	45	0/9444	0/9405	0/9598	0/0332	0/0348	0/0279	0/1773	0/1814	0/1623
	60	0/9614	0/9472	0/9849	0/0167	0/0228	0/0081	0/1240	0/1446	0/0859
	75	0/9886	0/9550	0/9672	0/0030	0/0119	0/0103	0/0506	0/0998	0/0943
page	30	0/9997	0/9991	0/9998	0/0002	0/0006	0/0001	0/0137	0/0246	0/0101
	45	0/9998	0/9998	0/9999	0/0001	0/0001	0/0001	0/0101	0/0101	0/0056
	60	0/9999	0/9998	0/9996	0/0001	0/0001	0/0001	0/0044	0/0075	0/0111
	75	0/9988	0/9998	0/9993	0/0003	0/0002	0/0002	0/0145	0/0091	0/0120
Midilli	30	0/9999	0/9999	0/9999	0/0001	0/0001	0/0001	0/0058	0/0048	0/0032
	45	0/9999	0/9999	0/9999	0/0001	0/0001	0/0001	0/0040	0/0029	0/0034
	60	0/9999	0/9998	0/9999	0/0001	0/0001	0/0001	0/0023	0/0054	0/0051
	75	0/9998	0/9999	0/9998	0/0001	0/0001	0/0001	0/0033	0/0040	0/0039
logarithmic	30	0/9961	0/9965	0/9967	0/0027	0/0026	0/0023	0/0493	0/0481	0/0454
	45	0/9969	0/9964	0/9959	0/0018	0/0020	0/0023	0/0390	0/0414	0/0442
	60	0/9969	0/9956	0/9990	0/0013	0/0018	0/0004	0/0313	0/0376	0/0169
	75	0/9999	0/9970	0/9988	0/0001	0/0007	0/0003	0/0035	0/0199	0/0142
Regression	30	0/9874	0/9881	0/9907	0/0090	0/0091	0/0066	0/0911	0/0917	0/0781
	45	0/9925	0/9917	0/9906	0/0044	0/0048	0/0054	0/0631	0/0655	0/0693
	60	0/9948	0/9923	0/9987	0/0022	0/0033	0/0005	0/0431	0/0524	0/0212
	75	0/9999	0/9961	0/9986	0/0001	0/0010	0/0004	0/0038	0/0261	0/0177

برای محاسبه انرژی فعال سازی ابتدا مقدار  $1/T_a$  محاسبه شد. سپس مقدار آن در مقابل  $\ln(D_{eff})$  ترسیم شد. (شکل 4). انرژی فعال سازی  $E_a$  با استفاده از معادله 7 محاسبه شد. مقدار انرژی فعال سازی برای سطوح مختلف



سرعت هوا در شکل (3) نشان داده شده اند. کمترین و بیشترین مقدار انرژی فعال سازی دانه های آفتابگردان طی آزمایشات انجام شده به ترتیب 44/61 و 47/34 kJ/mol محاسبه شد. با توجه به شکل (3) بیشترین انرژی فعال سازی در سرعت 1/83 m/s (نیمه سیال) و کمترین مقدار در سرعت 2/71 m/s (سیال) به دست آمدند. از اینرو بیشترین مقدار انرژی فعال سازی در حالت نیمه سیال به دست آمد.

شکل 1- نسبت رطوبت در مقابل زمان (ثانیه) در سرعت های

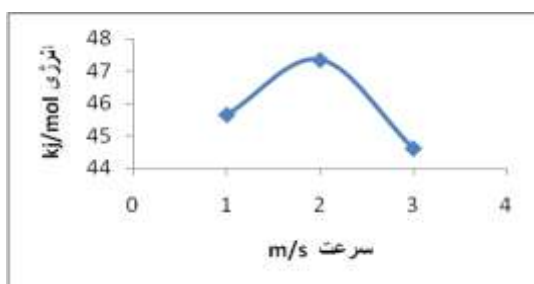
شکل 2- نمودار ضریب نفوذ در مقابل سرعت هوا و درجه حرارت هوا مختلف

شکل 4-  $\ln(D_{eff})$  در مقابل  $1/T_a$  در سرعت‌های مختلف

شکل 3- مقادیر انرژی فعال سازی در سرعت‌های مختلف خشک‌کردن

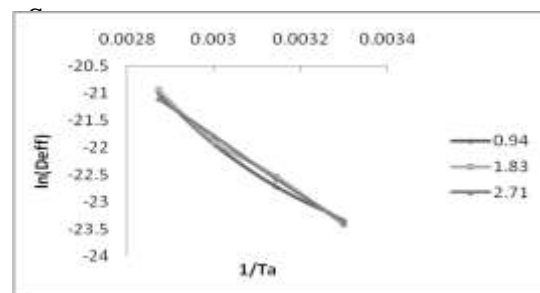
منابع

1. Aghbashlo, M., Kianmehr, M., Samimi-Akhijahani, H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49(10): 2865-2871.
2. Akpinar, E., Midilli, A., Bicer, Y. (2003). Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management* 44: 1689-1705.
3. Amiri Chayjan, R., Amiri parian, J., Esna-Ashari, M. (2011). Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of high moisture corn in a fixed, semi fluidized and fluidized bed drying. *Journal of Agricultural Research*. 9(1), 28-40.
4. ASAE S352.2APR1988 R2008. Moisture Measurement-Unground Grain and Seeds.
5. Babalis, S. J., and Belessiotis, V. G. (2004). Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65: 449-458.
6. Bax, M.M, Gely, M.C, Santalla, E.M. (2004). Prediction of crude sunflower oil deterioration after seed drying and storage processes. *Journal of the American oil chemists society* 81, 511-515.
7. Crank, J., (1975). *Mathematics of diffusion* (2nd ed.) London: Oxford University Press.
8. Gupta, R.K, Das, S.K. (1997). Physical properties of sunflower seeds. *Journal of food engineering* 66, 1-8.
9. Junling, J. S., Zhangli, P., Tara, H. M., Delilah, W., Hirschberg, E., Olson, D. (2008). Drying and quality characteristics of fresh and sugar infused blueberries with infrared radiation heating. *Food Science and Technology*, 41: 1962-1972.
10. Liu Q., Bakker-Arkema F.W., IU Q., (1997). Stochastic modeling of grain drying: model development. *J Agric Eng Res* 66, 275-280.
11. Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20:1503-1513.
12. Santalla, E. M, and Mascheroni, R. H. (2010). Moisture diffusivity in high oleic sunflower seeds and kernels. *International Journal of Food Properties*, 13: 464-474



13.

ya  
ri  
ef,  
A.  
M  
,  
M  
or



- cy, R.V, Gustafson, R.T. (1984). Thin-layer drying rates of sunflower seed. Journal of the American Society of Agricultural Engineers 21, 195-200.
14. Vafaei, N, Tavakolipour, H, Ghodsvali, A.R. (2010). Some biophysical properties of oily Sunflower achenes in Golestan province. Journal of food science and technology 7, 103-114.
15. Yaldiz O., Ertekin C., Uzun H.I., (2001). Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. Energy 26, 457-465.
16. Zhang, Q., Litchfield, J.B. (1991). An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. Drying Technology, 9: 383-395.