

تاثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر سینتیک خشک شدن کلزا (۳۰۹)

حمید رضا گازر^۱، سعید میندی^۲

چکیده

در این تحقیق با بکارگیری یک دستگاه خشک کن آزمایشگاهی سه واحدی قابل اتصال به کامپیوتر فرایند خشک شدن کلزا بصورت تک لایه و پیوسته بررسی شد و با استفاده از طرح آماری کاملاً تصادفی تاثیر تغییرات دو عامل مهم دمای خشک کردن و سرعت جابجایی هوای گرم بر روی پارامتر زمان و تغییرات آهنگ خشک کردن، ضرایب نفوذ رطوبت، انرژی فعال سازی و مدل سازی فرایند خشک شدن کلزا رقم اوپرا در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ درجه سلسیوس و دو سرعت جابجایی هوای گرم ۱ و ۲ متر بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که تاثیر فاکتورهای دما و سرعت جابجایی هوا بر روی فرایند خشک شدن محصول کلزا معنی دار می باشد. تغییر دمای فرایند از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، ۶۶/۴ درصد از زمان خشک شدن آن را کم نمود. تغییر سرعت هوای گرم، از ۱ به ۲ متر بر ثانیه موجب ۲۹/۴ درصد کاهش در زمان خشک شدن آن گردید. ضریب نفوذ رطوبت دانه کلزا در محدوده دمایی تحقیق از $2/05694 \times 10^{-8}$ تا $5/8061 \times 10^{-8}$ مجذور متر بر ثانیه تغییر می کند. انرژی فعال سازی نیز در حدود ۲۷/۳۴ تا ۳۷/۴۹ کیلو ژول بر مول بدست آمد. در مدل سازی فرایند خشک شدن کلزا مدل پیچ دارای برازش بهتری بود ولی بدلیل کم بودن ضرایب ثابت در مدل نیوتن و اختلاف جزئی در شاخصهای مورد ارزیابی کاربرد مدل نیوتن دارای ارجحیت می باشد

کلیدواژه: انرژی فعال سازی، خشک کردن، خشک کن آزمایشگاهی، کلزا

^۱- استادیار پژوهش بخش تحقیقات مکانیک ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج

صندوق پستی ۳۱۵۸۵-۸۴۵، پست الکترونیک: hgazor@yahoo.com

^۲- دانشیار بخش مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

مقدمه

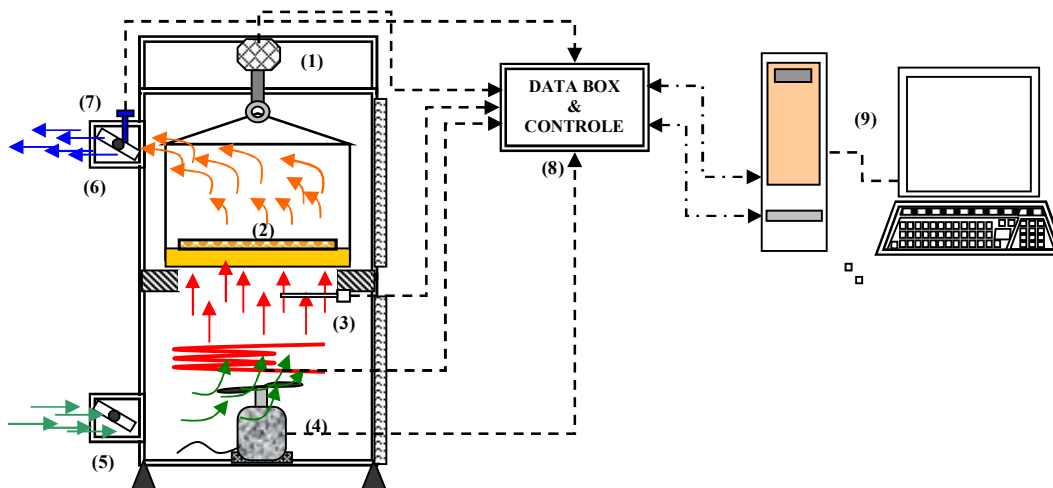
در یک خشک کن مقدار هوای گرم و سرعت جابجایی آن از فاکتورهای مهم می باشد که بایستی قبل از ورود هوای گرم به توده محصول اندازه گیری شوند. همچنین سیستم اندازه گیری بایستی قابلیت تنظیم و اندازه گیری تغییرات دما را نیز داشته باشد [۵]. محدوده دمایی مجاز برای خشک کردن غلات و دانه های روغنی بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس می باشد. ضخامت مناسب لایه محصول در خشک کنهای مخزنی صنعتی بین ۱ تا ۱/۵ متر می باشد [۸]. در تحقیقی اثرات دماهای خشک کردن بر فشار لازم برای استحصال روغن کلزا بررسی شد. دماهای آزمایش عبارت بودند از ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سلسیوس و کلزا در دماهای فوق تا سطح ۶/۵ درصد بر پایه تر خشک شده بود. نتایج نشان داد که هر چه مقدار رطوبت در دانه بیشتر و دمای خشک کردن آن پایین تر باشد، مقدار فشار لازم برای استحصال روغن کمتر است. در واقع همبستگی مناسبی میان تغییرات دمای خشک کردن و مقدار فشار لازم برای خروج روغن از دانه وجود دارد [۲۱]. در تحقیق دیگری مقاومت به عبور هوا و دماهای مطلوب برای خشک کردن دو دانه روغنی آفتابگردان و کلزا بررسی شد. نتایج نشان داد که دماهای مناسب برای خشک کردن آفتابگردان با رطوبت اولیه ۱۲ تا ۱۶ درصد محدوده ۵۵ تا ۶۵ درجه سلسیوس می باشد [۲۲]. در یک تحقیق نتیجه گیری شد که اگر برای خشک کردن کلزا با رطوبت اولیه ۱۱، ۱۳ و ۱۵ درصد دستگاه خشک کن دارای تهویه مناسب شد، برای خشک کردن این محصول تا سطح رطوبت ۶ درصد، میزان مصرف انرژی به میزان ۳۰ تا ۶۰ درصد کاهش می یابد [۱۸]. چهار دانه روغنی بنامهای گلرنگ، سویا، آفتابگردان و کلزا در یک مقطع ۰/۱۲ متر و در خشک کن بستر سیال در معرض گرما قرار گرفتند تا دماهای مجاز برای خشک کردن این محصولات تعیین گردند. نتایج بدست آمده نشان داد که دمای ۶۰ تاثیر معنی داری بر روی عدم امکان جوانه زنی محصولات ذکر شده ندارد [۱۰]. رفیعی و کاشانی نژاد در تحقیق خود بر روی سینتیک خشک شدن سویا در محدوده دمایی ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس، نتیجه گیری کردند که مدل مناسب برای تخمین روند خشک شدن سویا مدل پیچ می باشد [۱]. محققین زیادی در زمینه کاربرد مدل های سینتیک در خشک کردن محصولات کشاورزی نظیر خشک کردن فندق، فلفل سبز و لوبیا سبز، زردآلو، پسته و توت فرنگی تحقیق نموده اند که در بسیاری از آنها مدل پیچ بعنوان مدل قابل قبول در زمینه خشک کردن محصولات کشاورزی معرفی شده است [۴] [۱۶] [۲۰] [۲۳]. هدف از انجام این تحقیق ارزیابی تاثیر تغییرات دو عامل مهم دمای خشک کردن و سرعت جابجایی هوای گرم بر روی سینتیک خشک شدن کلزا در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس بود علاوه بر آن مدل سازی فرایند خشک کلزا نیز در تحقیق بررسی شد.

مواد و روش ها

در این تحقیق با استفاده از یک خشک کن دقیق آزمایشگاهی سه واحدی و قابل اتصال به کامپیوتر (شکل ۱)، در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و دو سرعت جابجایی هوای گرم ۱ و ۲ متر بر ثانیه، در سه تکرار اقدام به خشک کردن محصول کلزا رقم اپرا (Opera) به صورت تک لایه (لایه نازک) گردید متغیرهای مستقل و سطوح تغییرات مربوطه در جدول ۱ ملاحظه می گردد.

جدول ۱- معرفی متغیرهای مستقل و سطوح تغییرات مربوطه در تحقیق

سطوح تغییرات			متغیر
۶۰ (T3)	۵۰ (T2)	۴۰ (T1)	دما (درجه سلسیوس)
۲ (V2)		۱ (V1)	سرعت هوای گرم (متر بر ثانیه)



شکل ۱- شماتیک خشک کن مورد استفاده در تحقیق
(۱) لود سل، (۲) سینی حاوی نمونه، (۳) حسگر هوای ورودی به محصول، (۴) موتور DC، (۵) دریچه هوای ورودی، (۶) دریچه هوای خروجی، (۷) حسگر دمای هوای خروجی، (۸) کارت اخذ اطلاعات و کنترل کننده (۹) کامپیوتر

شکل ۱- شماتیک خشک کن مورد استفاده در تحقیق

پارامترهای اندازه گرفته شده در خشک کن عبارت بودند از تغییرات دمای ورودی که به وسیله دما سنج دیجیتال آتین مدل AT400-K با دقت ۱ درجه سلسیوس تنظیم و ثبت می گردید. تغییرات وزن با دقت ۱ گرم و دمای خروجی با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس بصورت خودکار توسط سیستم جمع آوری داده ها از بازه های زمانی ۱۵ دقیقه ای از خشک کن به کامپیوتر منتقل می گردید. تغییرات سرعت هوا نیز توسط باد سنج/ رطوبت سنج، لوترون مدل AM- 4205 در زیر سطح نمونه ها با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه اندازه گیری شد. به منظور ایجاد یکنواختی در رطوبت نمونه های آزمایشی برای هر کدام از محصولات ۲۴ ساعت قبل از شروع فرایند خشک کردن، نمونه ها به وسیله آب مقطر و با استفاده از رابطه (۱) عملیات مشروط سازی (conditioning) انجام شد [۱۴].

$$W_a = \frac{W_i(M_f - M_i)}{(100 - M_i)} \quad (1)$$

در این رابطه:

$$M_i = \text{مقدار رطوبت اولیه (\% d.b)} \quad W_a = \text{وزن آب اضافه شده (g)}$$

$$M_f = \text{مقدار رطوبت خواسته ده (\% d.b)} \quad W_i = \text{وزن اولیه نمونه (g)}$$

سپس رطوبت اولیه محصول با استفاده از آون و روش وزنی تعیین شد [۶]. رطوبت اولیه محصول کلزا در حدود ۲۰ درصد بر پایه خشک بدست آمد. محدوده تغییرات رطوبت نسبی هوای آزمایشگاه نیز با استفاده از باد سنج/ رطوبت سنج، لوترون مدل AM- 4205 در طول آزمایشات در محدوده ۳۳ تا ۴۹ درصد اندازه گیری شد. پس از اتمام عملیات خشک شدن (رسیدن به حدود رطوبت تعادلی در مراحل انتهایی فرایند) عملیات خشک کردن خاتمه یافته و با استفاده از آزمایشات فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، شاخص هایی نظیر متوسط های زمان و آهنگ خشک شدن برای تیمارهای آزمایش تا زمان رسیدن کلزا به محدوده مجاز رطوبتی (۶ تا ۸ درصد بر پایه خشک) بررسی شد. همچنین نحوه تغییرات رطوبت محصول در واحد زمان و تغییرات آهنگ خشک شدن نیز برای هر تیمار بدست آمد [۸] [۹] [۱۰] [۱۱] [۱۵].

در مرحله بعدی برای هر کدام از تیمارهای آزمایش در ۵۰ تکرار، سه بعد a , b , c دانه های کلزا با استفاده کولیس ورنیه با دقت ۰/۰۲ میلیمتر اندازه گیری و قطر میانگین دانه کلزای خشک شده را برای هر سه دما بدست آمد و با شعاع میانگین دانه به شرح جدول ۲ ارائه شد [۱۷].

جدول ۲- شعاع میانگین دانه کلزا خشک شده در تیمارهای آزمایش

r (متر)	d_g (متر)	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)
۰/۰۰۱۰۱۵	۰/۰۰۲۰۳	۱	۴۰
۰/۰۰۱۰۰۵	۰/۰۰۲۰۱	۲	
۰/۰۰۰۹۹۰	۰/۰۰۱۹۸	۱	۵۰
۰/۰۰۰۹۷۰	۰/۰۰۱۹۴	۲	
۰/۰۰۰۹۶۵	۰/۰۰۱۹۳	۱	۶۰
۰/۰۰۰۹۵۵	۰/۰۰۱۹۱	۲	

سپس به منظور تعیین ضریب نفوذ از حل معادله فیک برای اجسام کروی شکل به شرح رابطه (۲) استفاده شد [۱۹].

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

در این معادله

MR = نسبت رطوبت (بدون بعد)

M_t = رطوبت در لحظه t (کیلوگرم بر کیلوگرم ماده خشک)

M_e = رطوبت تعادلی (کیلوگرم بر کیلوگرم ماده خشک)

M_o = رطوبت اولیه (کیلوگرم بر کیلوگرم ماده خشک)

D_{eff} = ضریب نفوذ (مجذور متر بر ثانیه)

t = زمان (ثانیه)

r = شعاع کره (متر)

مشابه با تحقیقات قبل [۷]، [۱۱]، [۱۳] و با توجه به شرایط آزمایش و محصول خشک شده، در معادله (۲) اگر $n=1$ باشد خواهیم داشت:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \right] \quad (3)$$

از طرفین معادله (۳) لگاریتم گرفته می شود.

$$\ln \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{D_{eff} \pi^2 t}{r^2} \quad (4)$$

با استفاده از ضریب زاویه خط ترسیم شده داده های $\ln \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$ بر حسب زمان (ثانیه) و شعاع میانگین هر دانه

ضریب نفوذ (D_{eff}) مربوطه بدست خواهد آمد.

برای هر تیمار از ضریب نفوذهای بدست آمده میانگین گرفته و نتیجه برای هر تیمار اعلام می گردد. با توجه به تابعیت

ضریب نفوذ با دما، برای تعیین انرژی فعال سازی هر تیمار از رابطه آرنیوس (۵) استفاده شد [۱۱] [۱۹].

$$D_{eff} = D_o \exp \frac{-E_a}{RT} \quad (5)$$

در این رابطه

D_{eff} = ضریب نفوذ (مجذور متر بر ثانیه)

D_o = ضریب نفوذ در دمای مبنا (مجذور متر بر ثانیه)

E_a = انرژی فعال سازی (کیلو ژول بر کیلوگرم در مول)

R = ثابت جهانی گازها (۸/۳۱۴ ژول بر مول در کلوین)

T = دما (کلوین)

به منظور بدست آوردن یک رابطه بین دماهای آزمایش و زمان خشک شدن کلزا، با استفاده از روش حداقل مربعات تاثیر دما بر زمان خشک شدن کلزا در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس بصورت رگرسیون خطی مدل سازی انجام شد.

مدل سازی سینتیک خشک شدن کلزا

به منظور مدل سازی نسبت رطوبت (MR) کلزا در فرایند خشک شدن کلزا از دو مدل شناخته شده نیوتن و پیچ که کاربرد زیادی در خشک کردن محصولات کشاورزی دارند به شرح جدول ۳ استفاده شد [۸] [۴] [۱۲]. مدلها رگرسیونی تغییرات نسبت رطوبت در طی خشک شدن براساس متغیر مستقل زمان بوسیله نرم افزار Statistica حل شد. از سه معیار ضریب رگرسیون (r)، مربع کای^۱ (χ^2) و ریشه متوسط مربع خطای داده ها (RMSE)^۲ برای سنجش بهترین مدل استفاده شد که برای هر مدل هرچه مقدار r^2 بیشتر و χ^2 و RMSE کمتر باشد مدل بهتر است [۴] [۱۲].

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

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

در معادلات بالا، $M_{exp,i}$ رطوبت سویا مشاهده شده در i امین اندازه گیری، $M_{pre,i}$ رطوبت کلزا پیش بینی شده از مدل در i امین اندازه گیری، N تعداد مشاهدات (داده ها) و n تعداد ثابتهای بکار رفته در معادله است. مقدار ضرایب و ثابتهای مدلها مورد آزمون در شرایط مختلف آزمایش به روش رگرسیون محاسبه گردید. برای هر مدل، با توجه به مقادیر مختلف ضرایب و ثابتهای، مدل ضرایب و ثابتها براساس متغیرهای مستقل دما و سرعت هوای گرم در خشک کن بدست آمد که در نهایت رگرسیون چندگانه برای هر مدل استخراج شد. براساس شاخصهای ارزیابی، مدل مناسب تر مشخص شد [۴].

جدول ۳- مدلهای مورد استفاده در خشک شدن توده بستر نازک کلزا

ردیف	نام مدل	مدل #
۱	نیوتن (N)	$MR = \exp(-kt)$
۲	پیچ (P)	$MR = \exp(-kt^n)$

#-MR: نسبت رطوبت، t: زمان (min) و k ثابتهای مدلها می باشند.

^۱ - Chi-square

^۲ - Root Mean Square Error

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده های مربوط به زمان و متوسط آهنگ خشک شدن تیمارهای آزمایش بصورت جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس شاخص های فرایند خشک شدن کلزا

میانگین مربعات (MS)		درجه آزادی	منابع تغییرات
آهنگ خشک شدن	زمان خشک شدن	(df)	(SOV)
۰/۰۲۴۷**	۷۳۶۲/۵۰**	۲	دما
۰/۰۰۲۱*	۲۸۱۲/۵۰**	۱	سرعت هوا
۰/۰۰۰۳ n.s	۳۳۷/۵۰ n.s	۲	دما × سرعت هوا
۰/۰۰۰۴	۱۰۰/۰۰	۱۲	خطا
		۱۷	کل
۱۵/۲	۱۴/۵		CV

** وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱٪

* وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵٪

n.s عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵٪

همانگونه که در جدول ملاحظه می شود، تغییرات دما و سرعت هوا تاثیر معنی داری بر دو شاخص مستقل زمان و آهنگ خشک شدن دارد. همچنین بین دو عامل ذکر شده اثر متقابل معنی داری وجود ندارد. مقایسه میانگین های زمان و آهنگ خشک شدن (جدول ۵ و ۶) نشان می دهند که افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس موجب افزایش آهنگ خشک شدن به میزان بیش از دو برابر و کاهش ۶۶/۷ درصدی زمان خشک شدن می شود. با افزایش دما قابلیت جذب رطوبت در هوا افزایش یافته و تبادل رطوبت دانه با هوای پیرامون بسیار مناسب انجام می گیرد.

جدول ۵- مقایسه میانگین های زمان خشک شدن کلزا (دقیقه)*

دما (°C)				سرعت هوا (m/s)
میانگین	۶۰	۵۰	۴۰	
۸۱/۶۷ ^B	۴۰	۸۰	۱۲۵	۱
۵۶/۶۷ ^A	۳۰	۵۵	۸۵	۲
	۳۵ ^a	۶۷/۵ ^b	۱۰۵ ^c	میانگین

* میانگین های دما و سرعت هوا دارای اختلاف معنی دار در سطح ۱٪ می باشند.

**حروف کوچک و بزرگ به ترتیب برای مقایسه میانگینهای مربوط به تغییرات دما و سرعت هوا می باشند.

جدول ۶- مقایسه میانگین های آهنگ خشک شدن کلزا (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک در ساعت) *

میانگین	دما (°C)			سرعت هوا (m/s)
	۶۰	۵۰	۴۰	
۰/۱۲۳ ^B	۰/۱۸۷	۰/۱۱۷	۰/۰۶۴	۱
۰/۱۴۵ ^A	۰/۲۱۱	۰/۱۳۷	۰/۰۸۸	۲
	۰/۱۹۹ ^a	۰/۱۲۷ ^b	۰/۰۷۶ ^c	میانگین

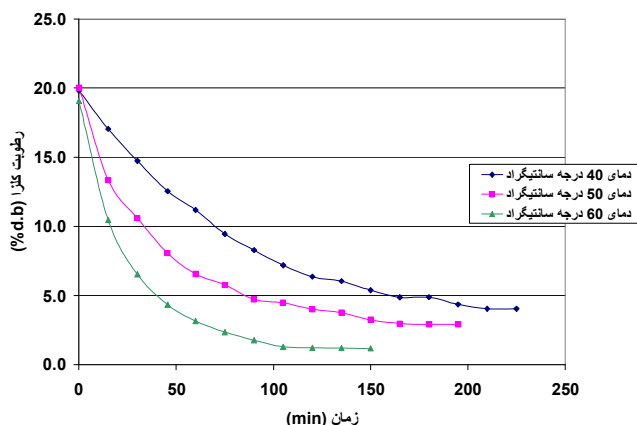
* میانگین های دما در سطح ۱٪ و میانگینهای سرعت هوا در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی دار می باشند.
** حروف کوچک و بزرگ به ترتیب برای مقایسه میانگینهای مربوط به تغییرات دما و سرعت هوا می باشند.

در این تحقیق، بطور متوسط افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ و از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۳۵/۶٪ و ۴۷/۷٪ زمان خشک شدن کلزا را کوتاهتر نمود (جدول ۷) نتایج حاضر با تحقیقات انجام شده قبلی نیز همخوانی دارد [۲] [۳].

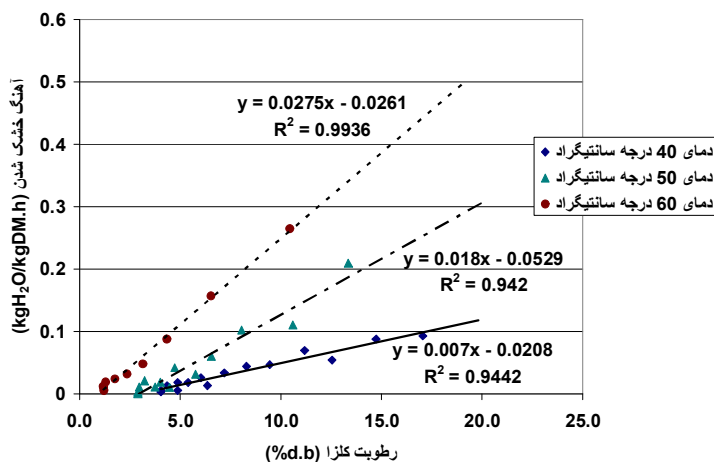
جدول ۷- اثر افزایش دما بر درصد کاهش زمان خشک شدن کلزا

میانگین	تغییرات دما (درجه سلسیوس)			سرعت هوا (متر بر ثانیه)
	۴۰→۶۰	۵۰→۶۰	۴۰→۵۰	
۵۱/۳	۶۸/۰	۵۰/۰	۳۶/۰	۱
۴۸/۵	۶۴/۷	۴۵/۵	۳۵/۳	۲
	۶۶/۴	۴۷/۷	۳۵/۶	میانگین

افزایش دما موجب شد که سرعت خروج رطوبت از کلزا افزایش یافته و منحنی های بدست آمده از تغییرات رطوبت محصول در واحد زمان و آهنگ خشک شدن دارای روندهای کاهشی قابل توجهی باشند. افزایش دما موجب شیب بیشتر منحنی های بدست آمده در مورد تغییرات رطوبت و آهنگ خشک شدن گشته و بیانگر سرعت بالای فرایند می باشد (شکل های ۲ و ۳). از داده های بدست آمده نیز می توان نتیجه گیری کرد که مشابه با مواد غذایی دیگر، رطوبت تعادلی کلزا با افزایش دما کم شده و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به حدود ۲/۲٪ بر پایه خشک برسد در حالیکه این مقدار برای دمای ۴۰ درجه سلسیوس حدود ۴/۵٪ بر پایه خشک بود [۹].



شکل ۲- تاثیر دما بر زمان خشک شدن کلزا با سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه بصورت تک لایه



شکل ۳- تاثیر دما بر آهنگ خشک شدن کلزا با سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه بصورت تک لایه

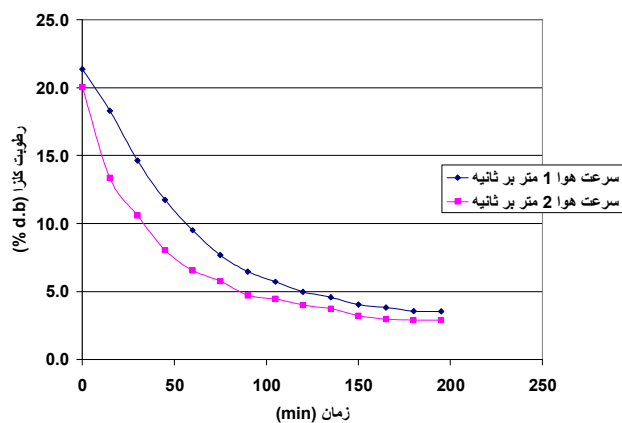
با توجه به داده های بدست آمده از تحقیق نتیجه گیری شد که تاثیر دما در دو سرعت هوای گرم آزمایش شده بر روی کاهش زمان خشک شدن خارج از انتظار بوده و متوسط تاثیر دما بر روی زمان خشک شدن در سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه ، ۵/۷۷٪ بیشتر از سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه می باشد(جدول ۶) . دلیل این مسئله متاثر از محدود بودن سرعت خروج رطوبت از محصول بوده و نتایج بدست آمده موید آن است که تاثیر دما بعنوان یک کاتالیزور در خروج سریعتر رطوبت از دانه کلزا در سرعت هوای گرم ۱ متر بر ثانیه بیشتر از زمانی است که سرعت هوای خشک کن ۲ متر بر ثانیه باشد. لذا چنانچه انتظار می رفت با افزایش سرعت هوا در خشک کن فرایند خشک کردن دانه ها سریعتر انجام نشد. لذا در خشک کردن این محصول نیازی به عبور هوای گرم با سرعتی بیش از ۱ متر بر ثانیه از لایه لای محصول نبوده و افزایش سرعت هوا بیش از مقدار ذکر شده منجر به اتلاف انرژی خواهد شد. در رابطه با تاثیر سرعت هوا در دماهای آزمایش بر کاهش زمان خشک شدن نتایج تحقیق نشان داد که در محدوده دمایی ۴۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس افزایش سرعت هوا از ۱ به ۲ متر بر ثانیه و تهویه بهتر در توده محصول موجب افزایش آهنگ و کاهش زمان خشک شدن محصول به میزان حدود ۳۳٪ می شود، اما با افزایش دمای خشک کن از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس بدلیل محدود شدن عبور رطوبت از میان آن نفوذ رطوبت از لایه داخلی به سطح ماده و خروج آن از سطح دانه، تاثیر افزایش

سرعت هوا کمتر شده و در این حالت تنها ۲۵٪ از زمان خشک شدن کاسته می شود (جدول ۸). لذا می توان نتیجه گیری نمود در فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی همیشه با افزایش دما، زیاد شدن سرعت جابجایی هوا در خشک کن مطلوب نبوده و گاهی موجب اتلاف انرژی خواهد شد. کاربرد صحیح این دو عامل در طراحی خشک کنها و بهینه سازی فرایند خشک کردن مهم می باشد.

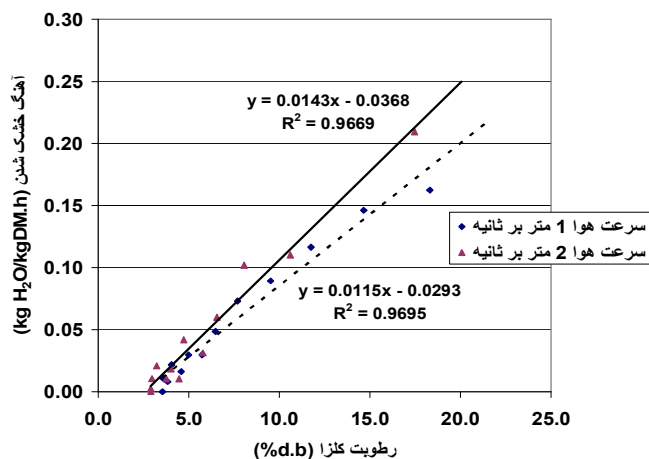
جدول ۸- اثر افزایش سرعت هوا بر درصد کاهش زمان خشک شدن کلزا

تغییرات سرعت هوا (متر بر ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)
۱→۲	
۳۲/۰	۴۰
۳۱/۳	۵۰
۲۵/۰	۶۰
۲۹/۴	میانگین

نمونه ای از تاثیر سرعت هوای گرم بر زمان و آهنگ خشک کردن کلزا در شکلهای ۴ و ۵ ملاحظه می گردد.



شکل ۴- تاثیر سرعت هوای گرم بر زمان خشک کردن کلزا در ۵۰ درجه سلسیوس



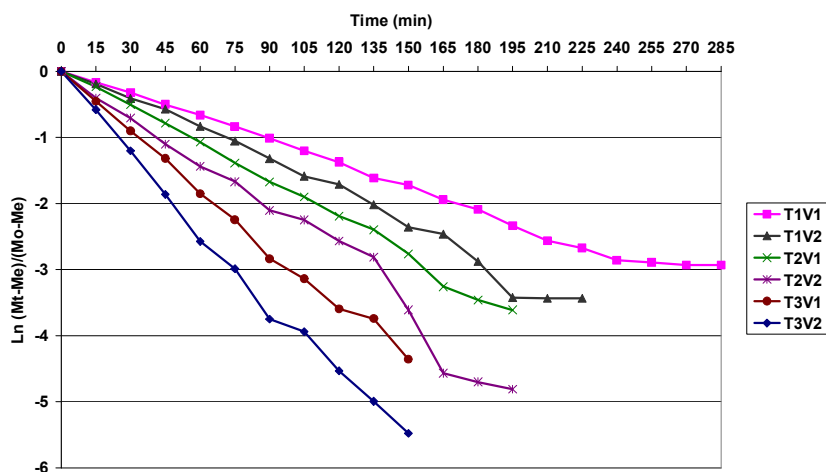
شکل ۵- تاثیر سرعت هوای گرم بر آهنگ خشک کردن کلزا در ۵۰ درجه سلسیوس

همانگونه که در هر دو شکل ملاحظه می شود در زمان شروع فرایند رطوبت دانه ها در حدود ۲۰ تا ۲۲ درصد بوده و نقاط مربوط به هر دو منحنی همگرا می باشند. با افزایش سرعت جابجایی هوا شیب منحنی ها در هر دو شکل افزایش می یابد و نقاط متناظر دو منحنی نسبت به هم وا گرا می شوند. در مراحل پایانی فرایند که رطوبت از لایه های داخلی استخراج می شود، دو منحنی به یکدیگر نزدیک شده و فرایند خشک شدن متوقف می شود. تغییرات ضریب نفوذ موثر رطوبت در تیمارهای تحقیق در جدول ۹ نشان داده شده است. همانگونه که در این جدول ملاحظه می گردد با افزایش دما و سرعت هوا در فرایند خشک شدن دانه های کلزا، علاوه بر تاثیر بر روی کاهش شعاع متوسط دانه ها، ضریب نفوذ موثر رطوبت یک روند افزایشی دارد که تاثیر دما در این امر بارزتر است. در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت کلزا از $۲/۰۵۶۹۴ \times ۱۰^{-۸}$ تا $۵/۸۰۶۱ \times ۱۰^{-۱۰}$ مجذور متر بر ثانیه تغییر می کند. دلیل وقوع این مسئله تاثیر بارز دما و سرعت هوا در ایجاد جنبش ملکولی و مکش سطحی بیشتر و افزایش ضریب مذکور می باشد. مشابه با نتایج بدست آمده در سایر تحقیقات انجام شده در مورد دیگر محصولات کشاورزی هم ملاحظه می گردد مثلاً برای گندم در محدوده دمایی ۲۱ تا $۸۰^{\circ}C$ ضریب نفوذ رطوبت بین $۶/۹ \times ۱۰^{-۱۰}$ تا $۲/۸ \times ۱۰^{-۱۰}$ بدست آمد یا برای ذرت در محدوده دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت بین $۳/۶ \times ۱۰^{-۱۱}$ تا $۸/۳ \times ۱۰^{-۱۱}$ بدست آمد [۱۹].

جدول ۹- تغییرات ضریب نفوذ موثر رطوبت دانه کلزا در تیمارهای آزمایش

D _{eff} (مجذور متر بر ثانیه)	r (متر)	تغییرات سرعت هوا (متر بر ثانیه)	تغییرات دما (درجه سلسیوس)
$۲/۰۵۶۹۴ \times ۱۰^{-۸}$	$۰/۰۰۱۰۱۵$	۱	۴۰
$۳/۰۸۵۴ \times ۱۰^{-۸}$	$۰/۰۰۱۰۰۵$	۲	
$۳/۰۰۹۴ \times ۱۰^{-۸}$	$۰/۰۰۰۹۹۰$	۱	۵۰
$۳/۹۳۱۵ \times ۱۰^{-۸}$	$۰/۰۰۰۹۷۰$	۲	
$۴/۸۸۹۰ \times ۱۰^{-۸}$	$۰/۰۰۰۹۶۵$	۱	۶۰
$۵/۸۰۶۱ \times ۱۰^{-۸}$	$۰/۰۰۰۹۵۵$	۲	

نمونه ای از روند تغییرات داده های $\ln \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$ تیمارها بر حسب زمان (t) در شکل ۶ ملاحظه می شود.



شکل ۶- تغییرات داده های $\ln \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$ تیمارها بر حسب زمان (دقیقه)

همانگونه که در شکل ملاحظه می شود با تغییر دما و سرعت هوا شیب خطوط حاصله بیشتر می شود که بیانگر افزایش نرخ تغییرات رطوبت در واحد زمان خواهد بود. انرژی فعال سازی برای تیمارهای آزمایش برای سرعتهای هوای ۱ و ۲ متر بر پانیه به ترتیب ۳۷/۴۹ و ۲۷/۳۴ کیلو ژول بر مول بدست آمد.

مدل سازی سینتیک خشک شدن کلزا

ضریب رگرسیون مدل های مورد استفاده در خشک کردن کلزا به صورت جدولهای ۱۰ و ۱۱ ارائه گردیده است. همانگونه که در هر دو جدول ملاحظه می شود ضریب تعیین بدست آمده برای هر دو مدل بکار رفته در شرایط مختلف تحقیق، بیانگر توافق خوب داده ها آزمایشگاهی با مدل های بکار رفته می باشد.

جدول ۱۰- مقادیر ثابت و ضریب مدل رگرسیونی نیوتن به تفکیک دما و سرعت هوای خشک کن

R	k	سرعت هوا (m/s)	دما (°C)
۰/۹۹۸۶	۰/۰۱۱۹۳۱	۱	۴۰
۰/۹۹۶۶	۰/۰۱۴۶۱۶	۲	۴۰
۰/۹۹۷۲	۰/۰۱۷۱۱۴	۱	۵۰
۰/۹۹۶۸	۰/۰۲۶۲۷۳	۲	۵۰
۰/۹۹۹۷	۰/۰۳۲۵۶۸	۱	۶۰
۰/۹۹۹۷	۰/۰۴۶۵۰۶	۲	۶۰

جدول ۱۱- مقادیر ثابت و ضریب مدل رگرسیونی پیچ به تفکیک دما و سرعت هوای خشک کن

r	N	k	سرعت هوا (m/s)	دما (°C)
۰/۹۹۹۷	۱/۰۹۳۳۱۲	۰/۰۰۷۷۶۶	۱	۴۰
۰/۹۹۹۲	۱/۱۴۸۵۴۷	۰/۰۰۷۵۷۱	۲	۴۰
۰/۹۹۹۵	۱/۱۴۰۴۲۲	۰/۰۰۹۴۴۰	۱	۵۰
۰/۹۹۹۰	۰/۸۶۴۱۱۳	۰/۰۴۴۶۶۳	۲	۵۰
۰/۹۹۹۸	۰/۹۷۰۷۶۰	۰/۰۳۶۲۷۴	۱	۶۰
۰/۹۹۹۷	۱/۰۰۲۸۸۹	۰/۰۴۶۰۵۶	۲	۶۰

ملاحظه می شود که در محدوده دمایی و سرعت جابجایی هوا در خشک کن، برای خشک کردن کلزا بصورت لایه نازک هر دو مدل بکار رفته دارای برازش مناسبی با داده ها می باشند. با استفاده از رگرسیون چند گانه ، برای ارزیابی کلی مدل های بکار رفته در شرایط آزمایش به نتایج جدول ۱۲ مراجعه می شود:

جدول ۱۲- ارزیابی مدل های رگرسیونی خشک شدن توده بستر نازک کلزا

ضرایب و شاخص های مورد بررسی					مدل
RSME	χ^2	r	n	k	
۰/۱۹۸۶۰	۰/۰۰۰۴۱۶	۰/۹۹۷۳	-	۰/۰۲۰۴۱۳	نیوتن (N)
۰/۰۱۱۴۸۲	۰/۰۰۰۱۳۹	۰/۹۹۹۱	۰/۸۴۵۴۹۰	۰/۰۳۸۷۶۹	پیچ (P)

با توجه به نتایج بدست آمده از جدول ۱۲ مدل پیچ بهتر از مدل نیوتن نسبت رطوبت را براساس متغیرهای دمای خشک کن ، سرعت هوا و زمان خشک شدن پیش بینی می کند. ارجحیت کاربرد مدل پیچ در تحقیقات گذشته نیز ملاحظه گردیده است [۱] ، [۴].

البته با توجه به اختلاف بسیار ناچیز دو مدل بکار رفته برای تخمین فرایند خشک شدن کلزا و با توجه به کم بودن تعداد ضریب ثابت در معادله نیوتن ، کاربرد این مدل در تخمین فرایند خشک شدن کلزا قابل توصیه می باشد.

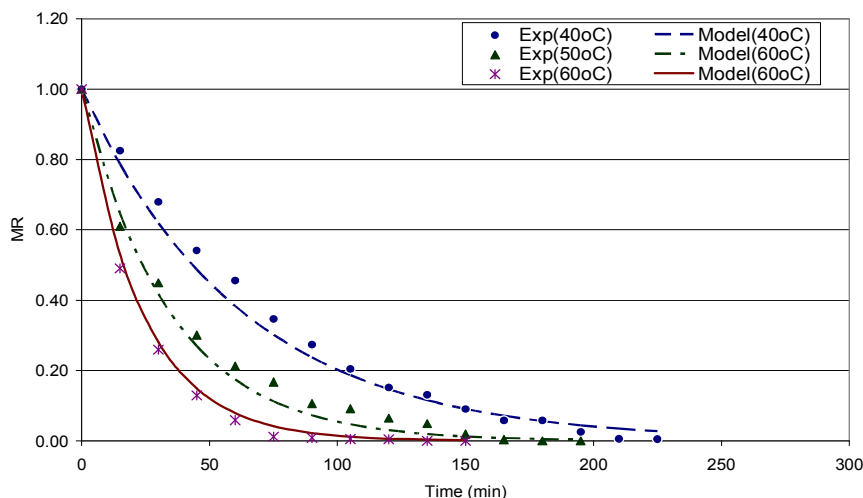
براساس تجزیه و تحلیل مدل رگرسیونی، ثابت k بصورت تابعی از دما و سرعت هوا در خشک کن بصورت معادله (۸) ارائه می شود:

$$K = 0.001313 \times T + 0.008597 \times V - 0.053735 \quad (8)$$

لذا با قرار دادن ضرایب و ثابتها به صورت تابعی از دمای و سرعت هوای خشک کن، مدل نهایی نسبت تغییرات رطوبت در خشک شدن کلزا براساس مدل نیوتن به شرح معادله (۹) بدست می آید:

$$MR = \exp\left(-\left(0.001313 \cdot T + 0.008597 \cdot V - 0.053735\right) \cdot t\right) \quad (9)$$

مدل ارائه شده را می‌توان برای تخمین نسبت تغییرات رطوبت توده در هر زمان در طی خشک کردن با دقت تخمین مناسب استفاده نمود. سازگاری مدل با داده‌های آزمایشگاهی و رابطه بین ضریب K ، دمای خشک کن و سرعت هوا براساس شاخصهای ارزیابی $R^2=0/9638$ ، $RMSE=0/03199$ و $\chi^2=0/0002$ ، مورد قبول است. بعنوان نمونه مقایسه روند تغییرات نسبت رطوبت نمونه‌های آزمایشی و مدل بدست آمده در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷- مقایسه داده‌های روند خشک شدن کلزا و مدل نیوتن در دماهای آزمایش و سرعت هوای ۲ m/s

همانگونه که در شکل ملاحظه می‌گردد، داده‌های آزمایش با مدل بکار گرفته شده دارای توافق خوبی می‌باشند

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که تاثیر فاکتورهای دما و سرعت جابجایی هوا بر روی خشک شدن کلزا یکسان نمی‌باشد. تغییرات دما بر زمان خشک شدن، کلزا از تغییرات سرعت هوا موثرتر بوده و تغییر دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، بیش از ۶۶ درصد زمان خشک شدن آن را کم نمود. تغییر سرعت هوای گرم از ۱ به ۲ متر بر ثانیه موجب نزدیک به ۳۰ درصد کاهش در زمان خشک شدن گردید. با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت به میزان نزدیک به ۲ برابر افزایش می‌یابد. برای محدوده سرعت هوای گرم ذکر شده انرژی فعال سازی نیز در حدود ۲۷/۳۴ تا ۳۷/۴۹ کیلو ژول بر مول بدست آمد. در مدل سازی فرایند خشک شدن کلزا مدل پیچ دارای برازش بهتری بود ولی بدلیل کم بودن ضرایب ثابت در مدل نیوتن و اختلاف جزئی در شاخصهای مورد ارزیابی کاربرد مدل نیوتن دارای ارجحیت می‌باشد.

منابع:

۱. رفیعی، ش. و م. کاشانی نژاد (۱۳۸۵) سینتیک خشک کردن سویا رقم ویلامز. CD مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس مهندسی ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون. تبریز.
۲. حسین خواه، ر. و ر. فامیل مومن (۱۳۸۳) بررسی و تعیین مناسبترین روش خشک کردن بذر و دانه کلزا. گزارش نه‌می شماره ۸۳/۱۱۵۵. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی.

۳. محمد زاده، ج. (۱۳۸۰) بررسی شرایط خشک کردن دانه کلزا و اثرات آن بر کمیت و کیفیت روغن استحصالی. گزارش نهایی شماره ۸۰/۳۴۶. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی.
4. Akpinar, E. K. and Y. Bicer (2006) Mathematical Modeling and Experimental Study on Thin Layer Drying of Strawberry. International Journal of Food Engineering, Vol. 2 [2006], Iss. 1, Art 5.
 5. Anon., (1999) Construction and rating of equipment for drying farm crops. ASAE standards, S248.3 DEC 95, 529-537.
 6. AOAC. (1990). Official method of analysis. Association of Official Analytical Chemists (No. 934.06). Arlington, VA
 7. Babalis, S. J. and V. G. Belessiotis (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.
 8. Brooker D. B. ;F. W. Baker Arkema and C.W. Hall (1992) Drying and Storage of Grains and Oilseeds. AVI Book publisher, New York , U.S.A
 9. Canovas, V.G. and H. V. Mercado , (1996) Dehydration of Food. Chapman & Hall publishers. New York, U.S.A
 10. Chaly T. F. and J.W. Sutherland (1984) Heat damage to grain and seeds. Journal of Agricultural Engineering Research, 30(4): 337-345.
 11. Falade, K. O., E. Abbo, (2007) Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera L.*) fruits. Journal of Food Engineering, 79, 724-730.
 12. Guarte, R.C. 1996. Modelling the drying behaviour 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. Hebbbar, H. U. and, N. K. Rastogi (2001). Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. Journal of Food Engineering, 47, 1-5.
 14. LoCurto, G.J., V. Zakirov, R.A. Bucklin, D.M. Hanes, A.A. Teixeira, O.R. Walton, X. Zhang, and L. Vu-Quoc, (1997) Soybean friction properties. Annual International Meeting, ASAE., Paper No. 97-4108.
 15. Mazza, G. (1984) Sorption isotherms and drying rates of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus L.*). Journal of Food Science, 49 : 384-388.
 16. Midilli, A., Kucuk, H. (2003). Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. Energy Conversion and Management, 44: 1111-1122.
 17. Mohsenin Nuri N. (1970) Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Pub. New York, USA.
 18. Muir W.E. and R.N. Sinha (1985) Theoretical rates of flow of air at near ambient conditions required to dry rapeseed. Canadian Agricultural Engineering., 28(1): 45-49.
 19. Mujumdar, Arun S. (2000) Drying Technology in Agriculture and Food Sciences. Science publisher, Inc. Enfield (NH), USA.
 20. Ozdemir, M., Devres, Y. O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. Journal of Food Engineering, 42: 225-233.
 21. Sadowska J. ; J Fornal ; A. Ostaszyk and B. Szmatowicz (1996) Drying conditions and processability of dried rapeseed. Journal of the Science of Food and Agriculture. 72(2): 257-262.
 22. Sutherland J.W. and T.F. Chaly (1982) Heated air drying of oil seeds. Journal of Stored Products Research, 18(2): 43-54.



23. Yaldiz, O., Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19: 583-596.

Influence of temperature and air velocity on canola drying kinetic

H.R. Gazor¹ S. Minaee²

Abstract

Canola drying process was investigated by using three units Lab. scale dryer. Dryers connected to the PC computer and drying process of each unit recorded continuously. Completely Randomized Design (CRD) was used for statistical analysis with three replications. Effect of temperatures 40 , 50 , 60C° and air velocities 1, 2 m/s were used for study of drying kinetics and models in monolayer. Besides effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) , activation energy were measured and studied for drying process respectively.

Results of experiments indicated that, changes of temperature have the most effect on canola drying time. Increasing of temperature from 40 to 60C° , causes to drying time decreasing 66.4 percent. Changes of air velocity from 1 to 2 m/s reduced drying time 29.4 percent averagely. D_{eff} and activation energy changed from 2.05694×10^{-8} to 5.8061×10^{-8} m²/s and 27.34 to 37.49 kJ/mol respectively. Page's model has better agreement with experiment than Newton model. Newton model has less parameter than Page, so it is recommended to use for modeling of canola drying process.

Key word: Activation energy, Canola, Drying, Laboratory Dryer

¹. Assistant Prof. of Agricultural Engineering Research Institute (AERI) . POB: 31595-845 Karadj , Iran.
E-mail: hgazor@yahoo.com

2- Associate. Prof. of Agricultural Machinery Department. Tarbiat modarres University. Tehran .Iran.