

## تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرایند خشک شدن و کیفیت کلزا

حمیدرضا گازر و سعید مینایی\*

\* استادیار پژوهش موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، نشانی: کرج، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ص. پ. ۸۴۵-۳۱۵۸۵، تلفن: ۲۷۰۵۳۲۰ (۰۲۶۱)، پیام‌نگار: hgazor@yahoo.com؛ دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

تاریخ دریافت مقاله: ۸۶/۳/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۹/۳

### چکیده

در این تحقیق با به کارگیری یک دستگاه خشک کن آزمایشگاهی سه واحدی قابل اتصال به کامپیوتر، فرایند خشک شدن کلزا به صورت تک لایه و پیوسته بررسی شد و با استفاده از طرح آماری کاملاً تصادفی تأثیر تغییرات دو عامل مهم یکی دمای خشک کردن و دیگری سرعت جابه جایی هوای گرم بر پارامتر زمان و تغییر آهنگ خشک کردن، ضرایب نفوذ رطوبت، و انرژی فعال سازی محصول کلزا رقم اوپرا در دماهای ۴۰، ۵۰، و ۶۰ درجه سانتی گراد و دو سرعت جابه جایی هوای گرم ۱ و ۲ متر بر ثانیه ارزیابی شد. همچنین، با استفاده از معادله رگرسیونی خطی، مدل تخمین زمان خشک شدن کلزا در محدوده دمایی آزمایش ها نیز ارائه شد. علاوه بر شاخص های ذکر شده، پارامتر کیفی درصد اسیدیتته روغن کلزای خشک شده نیز اندازه گیری شد. نتایج به دست آمده نشان داد که تأثیر فاکتورهای دما و سرعت جابه جایی هوا بر فرایند خشک شدن محصول کلزا معنی دار است. تغییر دمای فرایند از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتی گراد، ۶۶/۴ درصد از زمان خشک شدن را کم کرد. 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  $10^{-8} \times 0.5694$  تا  $10^{-8} \times 0.8061$  مجذور متر بر ثانیه تغییر می کند. انرژی فعال سازی نیز در حدود ۲۷/۳۴ تا ۳۷/۴۹ کیلو ژول بر مول به دست آمد. از نظر کیفی تغییرات دما و سرعت هوا در محدوده های ذکر شده تأثیری معنی دار بر افزایش اسیدهای چرب آزاد روغن استحصالی کلزای خشک شده نداشت.

### واژه های کلیدی

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

### مقدمه

خشک کن، دمای هوای گرم در مسیر هوای ورودی و در نزدیکی بستر دانه، و دمای هوای گرم خارج شده از بستر دانه ها در نزدیکی محل خروج هوای خشک کن اندازه گیری و در گزارش آزمایش ثبت شوند. در صورت استفاده از سیستم های ثبت خودکار در خشک کن، این سیستم ها باید از کابل های دارای قابلیت عبور جریان های الکتریکی بالا برخوردار و در مقابل تداخل های الکتریکی مقاوم باشند.

در هر خشک کن، مقدار هوای گرم و سرعت جابه جایی آن از فاکتورهای مهم هستند که باید قبل از ورود به توده محصول اندازه گیری شوند. سیستم اندازه گیری نیز باید قابلیت تنظیم و اندازه گیری تغییرات دما را داشته باشد (Anon, 1999). برای ارزیابی خشک کن ها مواردی از قبیل میانگین دمای هوا، رطوبت نسبی محیط در پیرامون

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، فشار لازم برای استحصال روغن کمتر است. در واقع، همبستگی مناسبی میان تغییر دمای خشک کردن و مقدار فشار لازم برای خروج روغن از دانه وجود دارد (Sadowska et al., 1996). در تحقیقی دیگر، فرایند خشک کردن آفتابگردان بررسی شد. نتایج نشان داد که دماهای مناسب برای خشک کردن آفتابگردان با رطوبت اولیه ۱۲ تا ۱۶ درصد محدوده ۵۵ تا ۶۵ درجه سانتی گراد است (Sutherland & Chaly, 1982). در تحقیق دیگر نتیجه گیری شد که اگر برای خشک کردن کلزا با رطوبت اولیه ۱۱، ۱۳، و ۱۵ درصد دستگاه خشک کن دارای تهویه مناسب باشد، برای رساندن رطوبت محصول به ۶ درصد، مصرف انرژی به میزان ۳۰ تا ۶۰ درصد کاهش می یابد (Muir & Sinha, 1985). 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 آنها تعیین شود. نتایج نشان داد که دمای ۶۰ درجه سانتی گراد تاثیر معنی دار بر عدم امکان جوانه زنی محصولات ذکر شده ندارد. اما خشک کردن در دمای بالاتر از ۷۰ درجه سانتی گراد به غیر از گلرنگ باعث تغییر رنگ در روغن به دست آمده می شود (Chaly & Sutherland, 1984).

هدف از این تحقیق، ارزیابی تاثیر تغییرات دو عامل مهم دمای خشک کردن و سرعت جابه جایی هوای گرم بر سینتیک خشک شدن کلزا در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی گراد بود که قبلاً اجرا نشده است. علاوه بر آن پارامتر کیفی تغییرات اسیدهای چرب آزاد روغن

سیستم های اندازه گیری دما نباید بیشتر از ۱ متر بر ثانیه و یا ۱/۵ درصد مقدار اندازه گیری شده، خطا داشته باشد. در طول دوره آزمون، تنظیمات لحاظ شده در دستگاه خشک کن به غیر از موارد خیلی ضروری نباید تغییر کنند و در صورت استفاده از سیستم های خودکار باید دستگاه در مدت زمان معین خاموش شود (Anon, 1997).

یکی از موارد بسیار مهم در طراحی و ساخت خشک کن ها یکنواختی رسیدن هوا به توده محصول است که رابطه ای مستقیم با ضخامت محصول دارد. اندازه گیری سرعت هوای گرم وارد شده به توده محصول به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم امکان پذیر است (Mclean, 1989). کیلن<sup>۱</sup> یکی از انواع خشک کن های آزمایشگاهی برای خشک کردن مواد غذایی است که از خشک کن های ناپیوسته (وعده ای) محسوب می شود و ضخامت لایه در آن کمتر از ۰/۱ متر است. این خشک کن ها با توجه به سهولت استفاده، کاربردهای فراوانی در فرایند خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی دارند و برای خشک کردن محصولات کشاورزی در ضخامت های کم مناسب اند و مجهز به صفحه ای مشبک هستند که جریان هوای گرم از زیر به محصول در حال خشک شدن برخورد می کند (Canovas & Mercado, 1996). محدوده دمایی مجاز برای خشک کردن غلات و دانه های روغنی بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی گراد است. ضخامت مناسب لایه محصول در خشک کن های مخزنی صنعتی بین ۱ تا ۱/۵ متر است (Brooker et al., 1992). در تحقیقی، تاثیر دماهای خشک کردن بر استحصال مکانیکی روغن کلزا بررسی شد. دماهای آزمایش عبارت بودند از ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی گراد و کلزا در

1- Kiln Dryer

2- Batch Dryer

تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرایند...

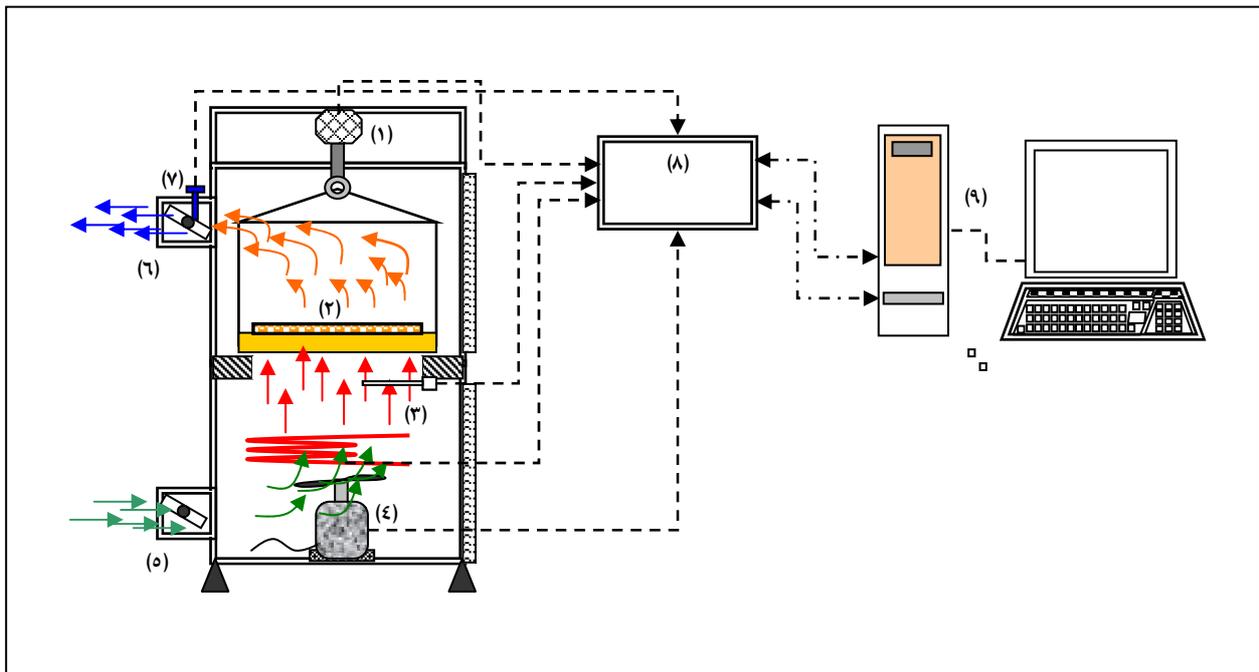
استخراجی از تیمارهای کلزای خشک‌شده هم بررسی شد. (۱)، کلزای رقم اپرا<sup>۱</sup> به صورت تک‌لایه (لایه نازک) در سه دمای ۴۰، ۵۰، و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و دو سرعت جابه‌جایی هوای گرم ۱ و ۲ متر بر ثانیه، در سه تکرار خشک شد که متغیرهای مستقل و سطوح تغییرات مربوط در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق با استفاده از یک خشک‌کن دقیق آزمایشگاهی سه واحدی و قابل اتصال به کامپیوتر (شکل

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

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



(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 کنترل‌کننده (۹) کامپیوتر

شکل ۱- طرح کلی خشک‌کن مورد استفاده در تحقیق

آزمایش‌های فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، شاخص‌هایی نظیر متوسط‌های زمان و آهنگ خشک‌شدن برای تیمارهای آزمایش تا زمان رسیدن کلزا به محدوده مجاز رطوبتی (۶ تا ۸ درصد بر پایه خشک) بررسی شد. نحوه تغییرات رطوبت محصول در واحد زمان و تغییرات آهنگ خشک‌شدن نیز برای هر تیمار به‌دست آمد (Brooker *et al.*, 1992; Canovas & Mercado, 1996; Chaly & Sutherland, 1984).

آهنگ خشک‌شدن، نسبت وزن آب خارج شده از جسم به وزن ماده خشک در واحد زمان است (Canovas & Mercado, 1996). در این تحقیق این شاخص برای کل فرایند با استفاده از رابطه ۲ به‌دست آمد (Mazza, 1984; Falade & Abbo, 2007). به منظور مقایسه آهنگ خشک‌شدن بین تیمارها، متوسط آهنگ خشک‌شدن هر تیمار تا زمان رسیدن به رطوبت‌های مجاز ذکرشده، مورد آزمون قرار گرفت.

$$DR = \frac{W_1 - W_2}{W_3 \times t} \quad (2)$$

در این رابطه:

DR = آهنگ خشک‌شدن (بر حسب کیلوگرم آب به ازای کیلوگرم ماده خشک در ساعت)؛  $W_2$  = وزن نمونه آزمایش در هر مرحله (بر حسب کیلوگرم)؛  $W_1$  = وزن نمونه آزمایش در مرحله قبلی (بر حسب کیلوگرم)؛  $W_3$  = وزن کاملاً خشک نمونه آزمایش در انتها (بر حسب کیلوگرم)؛ و  $t$  = مدت زمان سپری‌شده تا مرحله مورد نظر (بر حسب ساعت) است.

در مرحله بعدی برای هر یک از تیمارهای آزمایش، سه بعد  $a$ ،  $b$ ،  $c$  دانه‌های کلزا با استفاده کولیس ورنیه با دقت  $0.2/100$  میلی‌متر در ۵۰ تکرار اندازه‌گیری شد و با

پارامترهای اندازه‌گرفته‌شده در خشک‌کن عبارت بودند از تغییرات دمای ورودی که با دما سنج دیجیتال آتبین مدل AT400-K با دقت ۱ درجه سانتی‌گراد تنظیم و ثبت می‌گردید. تغییرات وزن با دقت ۱ گرم و دمای خروجی با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد به‌صورت خودکار توسط سیستم جمع‌آوری داده‌ها از بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای از خشک‌کن به کامپیوتر منتقل می‌شد. تغییرات سرعت هوا نیز توسط بادسنج/رطوبت‌سنج، لوترون مدل AM-4205 در زیر سطح نمونه‌ها با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. به منظور ایجاد یکنواختی در رطوبت نمونه‌های آزمایشی تیمارها ۲۴ ساعت قبل از شروع فرایند خشک‌کردن، با آب مقطر و با استفاده از رابطه ۱ عملیات مشروط‌سازی<sup>۱</sup> شدند (LoCurto *et al.*, 1997).

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

در این رابطه،

$M_i$  = مقدار رطوبت اولیه (بر حسب درصد بر پایه خشک)؛  $W_a$  = وزن آب اضافه‌شده (بر حسب گرم)؛  $M_f$  = مقدار رطوبت خواسته‌شده (بر حسب درصد بر پایه خشک)؛ و  $W_i$  = وزن اولیه نمونه (بر حسب گرم) است.

رطوبت اولیه محصول با استفاده از آون و روش وزنی تعیین شد (Anon, 1990). رطوبت اولیه کلزا در حدود ۲۰ درصد بر پایه خشک به‌دست آمد. محدوده تغییرات رطوبت نسبی هوای آزمایشگاه نیز با استفاده از بادسنج/رطوبت‌سنج لوترون مدل AM-4205 به‌هنگام اجرای آزمایش‌ها در محدوده ۳۳ تا ۴۹ درصد اندازه‌گیری شد. پس از اتمام عملیات خشک‌شدن (رسیدن به حدود رطوبت تعادلی در مراحل انتهایی فرایند)، با استفاده از

تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرایند...

استفاده از رابطه ۳، قطر میانگین دانه کلزای خشک‌شده در این رابطه،  
 برای هر سه دما به دست آمد و با شعاع میانگین دانه به شرح جدول ۲ ارائه شد (Mohsenin, 1970).  

$$d_g = (a.b.c)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

جدول ۲- شعاع میانگین دانه کلزای خشک‌شده در تیمارهای آزمایش

r (متر)	d <sub>g</sub> (متر)	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	دما (درجه سانتی‌گراد)
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	

متر بر ثانیه؛  $t =$  زمان (بر حسب ثانیه)؛ و  $r =$  شعاع کره (بر حسب متر) است.

مشابه با تحقیقات قبل و با توجه به شرایط آزمایش و محصول خشک‌شده، در معادله ۴ اگر  $n=1$  باشد (Falade & Abbo, 2007; Babalis & Belessiotis, 2001; Hebbar & Rastogi, 2004) خواهیم داشت:

به منظور تعیین ضریب نفوذ از حل معادله فیک برای اجسام کروی شکل به شرح رابطه ۴ استفاده شد (Mujumdar, 2000).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right] \quad (4)$$

در این معادله،

$MR =$  نسبت رطوبت (بدون بعد)؛  $M_t =$  رطوبت در لحظه  $t$  (بر حسب کیلوگرم به ازای کیلوگرم ماده خشک)؛  $M_e =$  رطوبت تعادلی (بر حسب کیلوگرم به ازای کیلوگرم ماده خشک)؛  $M_o =$  رطوبت اولیه (بر حسب کیلوگرم به ازای کیلوگرم ماده خشک)؛  $D_{eff} =$  ضریب نفوذ (بر حسب مجذور

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right] \quad (5)$$

از طرفین معادله ۵ لگاریتم گرفته می‌شود.

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

داده‌های  $\ln D_{eff}$  بر حسب  $\frac{1}{T}$  برابر با  $\frac{Ea}{R}$  است و انرژی فعال‌سازی به‌دست خواهد آمد که در نهایت برای هر تیمار از داده‌های به‌دست آمده میانگین‌گیری می‌شود (Falade & Abbo, 2007). به منظور به‌دست آوردن یک رابطه بین دماهای آزمایش و زمان خشک‌شدن کلزا، با استفاده از روش حداقل مربعات تاثیر دما بر زمان خشک‌شدن کلزا در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌صورت رگرسیون خطی مدل‌سازی شد. برای تعیین شاخص کیفی درصد اسیدهای چرب آزاد در روغن‌های استخراجی از کلزای خشک‌شده، از روش ساده-شده لی (استاندارد انگلستان) استفاده شد و اندیس اسیدی بر حسب اسید اولئیک در ۱۰۰ گرم ماده چرب، از رابطه ۹ محاسبه گردید (Hashemi Tonekaboni, 1985).

$$(9) \quad \text{اندیس اسیدی} = \frac{5/61 \times \text{مقدار مصرف سود } 0/1 \text{ نرمال}}{\text{وزن نمونه}}$$

### نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به زمان و متوسط آهنگ خشک‌شدن تیمارهای آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

برای هر تیمار، ضریب زاویه خط ترسیم‌شده داده‌های  $\ln \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$  بر حسب زمان (ثانیه) برابر با  $\frac{D_{eff} \pi^2 t}{r^2}$  است. برای هر تیمار از ضریب نفوذهای به‌دست آمده میانگین گرفته و نتیجه برای هر تیمار اعلام می‌شود. با توجه به تابعیت ضریب نفوذ با دما، برای تعیین انرژی فعال‌سازی هر تیمار از رابطه آرنیوس (رابطه ۷) استفاده شد (Mujumdar, 2000).

$$D_{eff} = D_o \exp \frac{-E_o}{RT} \quad (7)$$

در این رابطه،

$D_{eff}$  = ضریب نفوذ (بر حسب مجذور متر بر ثانیه)؛  
 $D_o$  = ضریب نفوذ در دمای مبنا (بر حسب مجذور متر بر ثانیه)؛  
 $E_o$  = انرژی فعال‌سازی (بر حسب کیلو ژول بر کیلوگرم در مول)؛  
 $R$  = ثابت جهانی گازها (۸/۳۱۴ ژول بر مول در کلوین)؛  
 $T$  = دما (بر حسب کلوین) است.  
 با گرفتن لگاریتم از طرفین رابطه ۷ خواهیم داشت،

$$\ln D_{eff} = \ln D_o - \frac{Ea}{R} \times \frac{1}{T} \quad (8)$$

برای هر تیمار، ضریب زاویه خط ترسیم‌شده

تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرایند...

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های فرایند خشک‌شدن کلزا

میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییر
آهنگ خشک‌شدن	زمان خشک‌شدن		
۰/۰۲۴۷**	۷۳۶۲/۵۰**	۲	دما
۰/۰۰۲۱*	۲۸۱۲/۵۰**	۱	سرعت هوا
۰/۰۰۰۳ ns	۳۳۷/۵۰ ns	۲	دما × سرعت هوا
۰/۰۰۰۴	۱۰۰/۰۰	۱۲	خطا
		۱۷	کل
۱۵/۲	۱۴/۵		CV

\*\* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، \* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ns نبود اختلاف معنی‌دار

در جدول می‌بینیم که تغییرات دما و سرعت هوا تأثیری معنی‌دار بر دو شاخص مستقل زمان و آهنگ خشک‌شدن دارد. و بین دو عامل ذکرشده اثر متقابل معنی‌دار وجود ندارد. مقایسه میانگین‌های زمان و آهنگ خشک‌شدن (جداول ۴ و ۵) نشان می‌دهد که افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش آهنگ خشک‌شدن (بیش از دو برابر) و کاهش ۶۶/۷ درصدی زمان خشک‌شدن می‌شود. با افزایش دما، قابلیت جذب رطوبت در هوا افزایش می‌یابد و تبادل رطوبت دانه با هوای پیرامون بسیار مناسب انجام می‌گیرد.

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های زمان خشک‌شدن کلزا (دقیقه)

سرعت هوا (متر بر ثانیه)	دما (درجه سانتی‌گراد)		
	۴۰	۵۰	۶۰
۱	۱۲۵	۸۰	۴۰ ۸۱/۶۷ B
۲	۸۵	۵۵	۳۰ ۵۶/۶۷ A
میانگین	۱۰۵ c	۶۷/۵ b	۳۵ a

حروف کوچک و بزرگ به ترتیب برای مقایسه میانگین‌های مربوط به تغییرات دما و سرعت هوا در نظر گرفته شده‌اند. میانگین‌های با حروف مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های آهنگ خشک‌شدن کلزا (کیلوگرم آب به ازای کیلوگرم ماده خشک در ساعت)

سرعت هوا (متر بر ثانیه)	دما (درجه سانتی‌گراد)		
	۴۰	۵۰	۶۰
۱	۰/۰۶۴	۰/۱۱۷	۰/۱۸۷
۲	۰/۰۸۸	۰/۱۳۷	۰/۲۱۱
میانگین	۰/۰۷۶ c	۰/۱۲۷ b	۰/۱۹۹ a

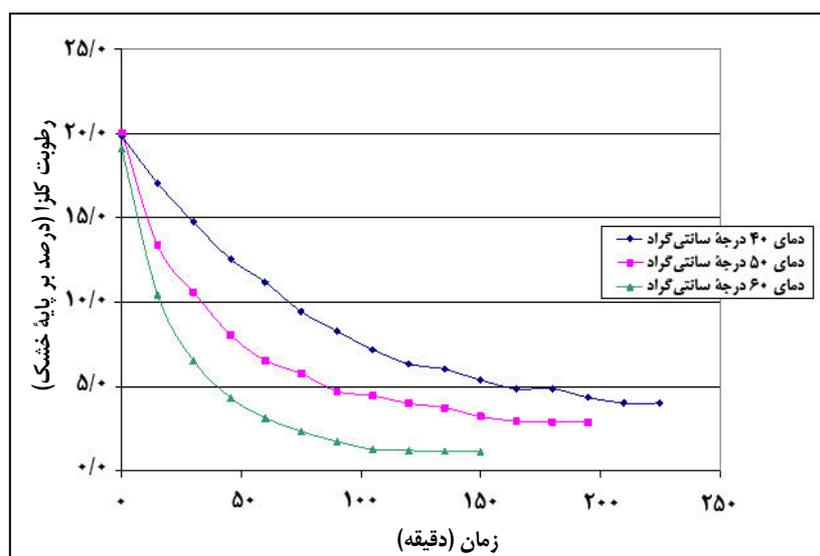
حروف کوچک و بزرگ به ترتیب برای مقایسه میانگین‌های مربوط به تغییرات دما و سرعت هوا در نظر گرفته شده‌اند. میانگین‌های مشترک از نظر آزمون دانکن برای دما در سطح احتمال ۱ درصد و برای سرعت هوا در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

در این تحقیق، افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ و از ۵۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، زمان خشک‌شدن کلزا را به ترتیب ۳۵/۶ و ۴۷/۷ درصد کوتاه‌تر کرد (جدول ۶). نتایج حاضر با تحقیقات گذشته (Hosienkhah & Familmomen, 2001; Mohammadzadeh, 2004) نیز همخوانی دارد.

جدول ۶- اثر افزایش دما بر درصد کاهش زمان خشک‌شدن کلزا

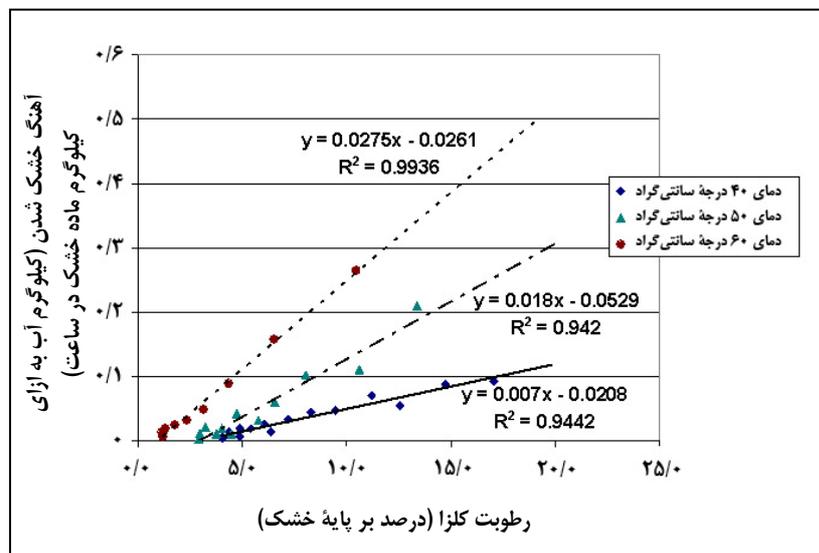
تغییرات دما (درجه سانتی‌گراد)				
سرعت هوا (متر بر ثانیه)	۴۰→۵۰	۵۰→۶۰	۴۰→۶۰	میانگین
۱	۳۶/۰	۵۰/۰	۶۸/۰	۵۱/۳
۲	۳۵/۳	۴۵/۵	۶۴/۷	۴۸/۵
میانگین	۳۵/۶	۴۷/۷	۶۶/۴	

افزایش دما موجب شده است که سرعت خروج رطوبت از کلزا افزایش یابد و منحنی‌های به‌دست آمده از تغییرات رطوبت محصول در واحد زمان و آهنگ خشک‌شدن روند کاهشی قابل توجهی داشته باشند. افزایش دما موجب شده است شیب منحنی‌های حاصل از تغییرات رطوبت و آهنگ خشک‌شدن بیشتر شود (شکل‌های ۲ و ۳). از داده‌ها نیز می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مشابه با مواد غذایی دیگر، رطوبت تعادلی کلزا با افزایش دما کم می‌شود و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به حدود ۲/۲ درصد بر پایه خشک می‌رسد در حالی که در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۴/۵ درصد بر پایه خشک است (Canovas & Mercado, 1996).



شکل ۲- تاثیر دما بر زمان خشک‌شدن کلزا با سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه به‌صورت تک‌لایه

تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرایند...



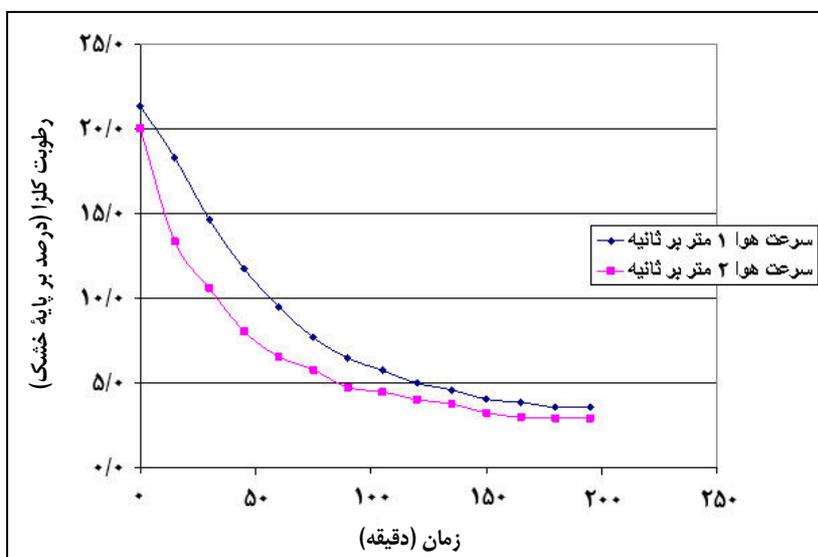
شکل ۳- تأثیر دما بر آهنگ خشک شدن کلزا با سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه به صورت تک لایه

خشک شدن نتایج تحقیق نشان داد که در محدوده دمایی ۴۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد 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 ۳۲ درصد می شود، اما با افزایش دمای خشک کن از ۵۰ به ۶۰ درجه سانتی گراد به دلیل محدود شدن عبور رطوبت از میان آن نفوذ رطوبت از لایه داخلی به سطح ماده و خروج آن از سطح دانه، تأثیر افزایش سرعت هوا کمتر می شود و در این حالت تنها ۲۵ درصد از زمان خشک شدن کاسته خواهد شد (جدول ۷). لذا می توان نتیجه گیری کرد که در فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی همیشه با افزایش دما، زیاد شدن سرعت جابه جایی هوا در خشک کن مطلوب نیست و گاهی موجب اتلاف انرژی خواهد شد. کاربرد صحیح این دو عامل در طراحی خشک کن ها و بهینه سازی فرایند خشک کردن مهم است.

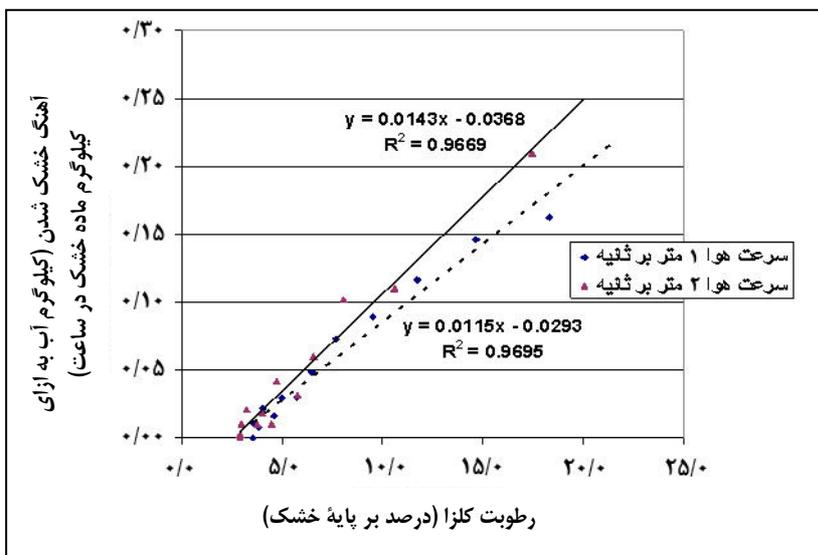
از داده ها نتیجه گیری شد که تأثیر دما در دو سرعت هوای گرم آزمایش شده بر کاهش زمان خشک شدن خارج از انتظار است و تأثیر دما بر زمان خشک شدن در سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه به طور متوسط ۵/۷۷ درصد بیشتر از سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه است (جدول ۶). دلیل این مسئله محدود بودن سرعت خروج رطوبت از محصول و نتایج به دست آمده موید آن است که تأثیر دما به عنوان یک کاتالیزور در خروج سریع تر 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 سریع تر نشد. لذا در خشک کردن این محصول نیازی به عبور هوای گرم با سرعتی بیش از ۱ متر بر ثانیه از لابه لای محصول نیست و افزایش سرعت هوا بیش از مقدار ذکر شده اتلاف انرژی است. در خصوص تأثیر سرعت هوا در دماهای آزمایش بر کاهش زمان

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

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



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



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

تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرایند...

روندی افزایشی دارد که تاثیر دما در این امر بارزتر است. در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی گراد، ضریب نفوذ رطوبت کلزا از  $2/05694 \times 10^{-8}$  تا  $5/8061 \times 10^{-8}$  مجذور متر بر ثانیه تغییر می کند. دلیل این موضوع تاثیر بارز دما و سرعت هوا در ایجاد جنبش ملکولی و مکش سطحی بیشتر و افزایش ضریب مذکور است. این نتایج نیز در دیگر محصولات کشاورزی هم مشاهده می شود مثلاً برای گندم در محدوده دمایی ۲۱ تا ۸۰ درجه سانتی گراد ضریب نفوذ رطوبت بین  $6/9 \times 10^{-12}$  تا  $2/8 \times 10^{-10}$  یا برای ذرت در محدوده دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد بین  $3/6 \times 10^{-11}$  تا  $8/3 \times 10^{-11}$  به دست آمده است (Mujumdar, 2000).

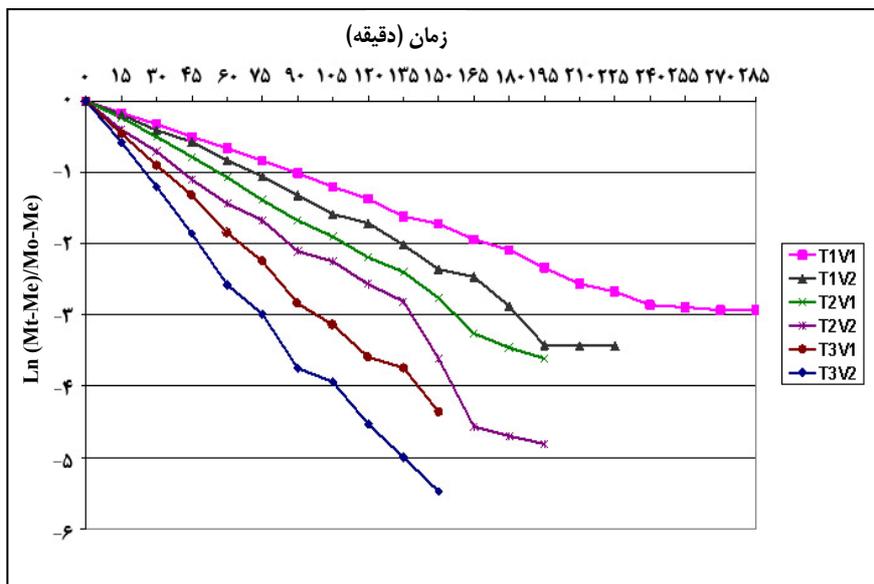
نمونه‌ای از روند تغییرات داده‌های  $\ln \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$  تیمارها بر حسب زمان (t) در شکل ۶ ارائه شده است.

نمونه‌ای از تاثیر سرعت هوای گرم بر زمان و آهنگ خشک کردن کلزا در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می شود در زمان شروع فرایند، رطوبت دانه‌ها در حدود ۲۰ تا ۲۲ درصد است و نقاط مربوط به هر دو منحنی همگرا هستند. با افزایش سرعت جابه‌جایی هوا شیب منحنی‌ها در هر دو شکل افزایش می یابد و نقاط متناظر دو منحنی نسبت به هم واگرا می شوند. در مراحل پایانی فرایند که رطوبت از لایه‌های داخلی استخراج می شود، دو منحنی به یکدیگر نزدیک می شوند و فرایند خشک شدن متوقف می شود.

تغییرات ضریب نفوذ موثر رطوبت در تیمارهای تحقیق در جدول ۸ نشان داده شده است. مشاهده می شود که افزایش دما و سرعت هوا در فرایند خشک شدن دانه‌های کلزا، بر کاهش شعاع متوسط دانه‌ها تاثیر می گذارد، علاوه بر آن ضریب نفوذ موثر رطوبت

جدول ۸- تغییرات ضریب نفوذ موثر رطوبت دانه کلزا در تیمارهای آزمایش

تغییرات دما (درجه سانتی گراد)	تغییرات سرعت هوا (متر بر ثانیه)	r (متر)	D <sub>eff</sub> (مجذور متر بر ثانیه)
۴۰	۱	۰/۰۰۱۰۱۵	$2/05694 \times 10^{-8}$
	۲	۰/۰۰۱۰۰۵	$3/0854 \times 10^{-8}$
۵۰	۱	۰/۰۰۰۹۹۰	$3/0094 \times 10^{-8}$
	۲	۰/۰۰۰۹۷۰	$3/9315 \times 10^{-8}$
۶۰	۱	۰/۰۰۰۹۶۵	$4/8890 \times 10^{-8}$
	۲	۰/۰۰۰۹۵۵	$5/8061 \times 10^{-8}$



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

۹ به دست آمد. در رابطه بالا،  $t =$  زمان خشک شدن (بر حسب دقیقه)؛  $T =$  دمای خشک کردن (بر حسب درجه سانتی‌گراد)؛  $a$  و  $b =$  ضرایب ثابت؛ و  $R^2 =$  ضریب تعیین هستند. با توجه به ضرایب تعیین به دست آمده، معادلات ارائه شده برای تخمین زمان خشک شدن کلزا در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد دقت مناسبی دارند.

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به تغییرات اسیدهای چرب آزاد روغن استخراج شده از تیمارهای آزمایش در جدول ۱۰ ارائه شده است.

در این شکل می‌بینیم که با تغییر دما و سرعت هوا شیب خطوط حاصل بیشتر می‌شود که بیانگر افزایش میزان تغییرات رطوبت در واحد زمان خواهد بود. انرژی فعال‌سازی برای تیمارهای آزمایش و در مورد سرعت هوای ۱ و ۲ متر بر ثانیه به ترتیب ۳۷/۴۹ و ۲۷/۳۴ کیلوژول بر مول به دست آمد. به منظور تخمین زمان خشک شدن کلزا از داده‌های زمان خشک شدن (جدول ۴) و معادله رگرسیون خطی  $t = a.T + b$  استفاده شد و معادلات تخمین زمان خشک شدن کلزا در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد به شرح جدول

جدول ۹- معادلات رگرسیون تخمین زمان خشک شدن کلزا

$R^2$	معادله رگرسیونی	سرعت هوا (متر بر ثانیه)
۰/۹۹۸۸	$t = -4.25 \times T + 294.17$	۱
۰/۹۹۷۳	$t = -2.75 \times T + 194.17$	۲

جدول ۱۰- نتایج تجزیه واریانس اسیدهای چرب آزاد

میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییر
۰/۰۰۱۳۴ ns	۲	دما
۰/۰۰۱۲۱ ns	۱	سرعت هوا
۰/۰۰۰۰۲ ns	۲	دما × سرعت هوا
۰/۰۰۰۰۴۱	۱۲	خطا
	۱۷	کل
۸/۶		CV

ns. نبود اختلاف معنی دار

نتایج به دست آمده نشان داد که تغییرات هر یک از دو عامل دما و سرعت هوا و اثر متقابل بین آنها بر درصد اسیدهای چرب آزاد روغن کلزا تأثیر معنی دار ندارد و آن را در محدوده (۰/۲۲۳ تا ۰/۲۴۷) (Anon, 1999 a) درصد) نگه می‌دارد (جدول ۱۱). مطابق استاندارد ملی ۴۹۳۵، بیشینه مقدار اسیدیته در روغن خام کلزا تا ۲ درصد برحسب اسید اولئیک قابل پذیرش می‌باشد (Anon, 1999 a).

جدول ۱۱- مقایسه میانگین‌های اسیدهای چرب آزاد روغن کلزا (درصد)

میانگین	دما (درجه سانتی‌گراد)			سرعت هوا (متر بر ثانیه)
	۶۰	۵۰	۴۰	
۰/۲۳۰ A	۰/۲۳۷	۰/۲۳۰	۰/۲۲۳	۱
۰/۲۴۱ A	۰/۲۴۷	۰/۲۴۷	۰/۲۳۰	۲
	۰/۲۴۲ a	۰/۲۳۸ a	۰/۲۲۳ a	میانگین

میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند.

مشابه با منابع و تحقیقات پیشین، افزایش دما موجب بالارفتن مقدار اسیدهای چرب آزاد در کلزا شده است که در این تحقیق نیز این افزایش معنی دار نیست (Gazor & Hosienkhah, 2006; Hashemi Tonekaboni, 1985). در اغلب دانه‌های روغنی، مقدار اسیدهای چرب آزاد در روغن تصفیه شده باید به کمتر از ۰/۲ درصد برحسب اسید اولئیک تقلیل پیدا کند (Anon, 1981; Anon, 1982; Anon, 1993). مقدار اسیدهای چرب آزاد در روغن خام بعضاً می‌تواند به ۲۰ درصد هم برسد (Mirmezami Ziabary & Sanei Shariatpanahi, 1996).

**نتیجه‌گیری**

با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، ضریب نفوذ رطوبت به میزان نزدیک به ۲ برابر افزایش می‌یابد. برای محدوده سرعت هوای گرم ذکر شده انرژی فعال‌سازی نیز در حدود ۲۷/۳۴ تا ۳۷/۴۹ کیلو ژول بر مول به دست آمد. از نظر کیفی تغییرات دما از ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد فاقد تاثیر معنی‌دار بر افزایش اسیدهای چرب آزاد روغن استحصالی از کلزاست و آن را در محدوده مجاز نگه می‌دارد.

نتایج این تحقیق نشان داد که تاثیر فاکتورهای دما و سرعت جابه‌جایی هوا روی خشک‌شدن کلزا یکسان نیست. تغییرات دما بر زمان خشک‌شدن کلزا از تغییرات سرعت هوا موثرتر است و تغییر دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، بیش از ۶۶ درصد زمان خشک‌شدن آن را کاهش می‌دهد. تغییر سرعت هوای گرم از ۱ به ۲ متر بر ثانیه نزدیک به ۳۰ درصد از زمان خشک‌شدن را می‌کاهد.

**قدردانی**

از همکاری و مساعدت همکاران محترم بخش تحقیقات صنایع غذایی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی به‌ویژه آقای مهندس حسین‌خواه در بررسی خواص کیفی روغن کلزا، تشکر می‌کنیم و توفیق ایشان را از خداوند خواستاریم.

**مراجع**

- Anon. 1981. Sunflower seed edible oil specification. Standard No. 1300. Iranian Standard and Industrial Research Institute. Karaj. Iran. (in Farsi)
- Anon. 1982. Sesame liquid edible oil specification. Standard No. 1752. Iranian Standard and Industrial Research Institute. Karaj. Iran. (in Farsi)
- Anon. 1990. Official method of analysis. Association of Official Analytical Chemists. No. 934.06. Arlington, VA.
- Anon. 1993. Cotton seed liquid edible oil specification. Standard No. 1723. Iranian Standard and Industrial Research Institute. Karaj. Iran. (in Farsi)
- Anon. 1997. Agricultural grain driers - determination of drying performance. Part 1: General. ISO, 11520-1. Geneve. Switzerland.
- Anon. 1999. Construction and rating of equipment for drying farm crops. ASAE Standards. S248.3 DEC 95.
- Anon. 1999a. Canola edible oil specification. Standard No. 4935. Iranian Standard and Industrial Research Institute. Karaj. Iran. (in Farsi)
- Babalís, 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. J. Food Eng. 65, 449-458.
- Brooker, D. B., Baker Arkema, F. W. and Hall, C. W. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. AVI Book Pub. N. Y.
- Canovas, V. G. and Mercado, H. V. 1996. Dehydration of Food. Chapman & Hall Pub. N. Y.

- Chaly, T. F. and Sutherland, J. W. 1984. Heat damage to grain and seeds. *J. Agric. Eng. Res.* 30(4): 337-345.
- Falade, K. O. and Abbo, E. 2007. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera L.*) fruits. *J. Food Eng.* 79, 724-730.
- Gazor, H. R. and Hosienkhah, R. 2006. Assessment of Canola drying process and produced oil characteristics using fluidized bed dryer. Final Report. No. 792. Agricultural Engineering Research Institute. Karaj. Iran. (in Farsi)
- Hashemi Tonekaboni, S. A. 1985. Experiments of Oils and Fats. University of Tehran Pub. Tehran. Iran. (in Farsi)
- Hebbar, H. U. and Rastogi, N. K. 2001. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *J. Food Eng.* 47, 1-5.
- Hosienkhah, R. and Familmomen, R. 2004. Study and determination of drying method for rapeseed. Final Report. No. 1155. Agricultural Engineering Research Institute. Karaj. Iran. (in Farsi)
- LoCurto, G. J., Zakirov, V. Bucklin, R. A. Hanes, D. M. Teixeira, A. A. Walton, O. R. Zhang, X. and Vu-Quoc, L. 1997. Soybean friction properties. Annual International Meeting, ASAE. Paper No. 97-4108.
- Mazza, G. 1984. Sorption isotherms and drying rates of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus L.*). *J. Food Sci.* 49, 384-388.
- Mclean, K. A. 1989. Drying and Storing Combinable Crops. Farming Perss. London. England.
- Mirnezami Ziabary, S. H., Sanei Shariatpanahi, M. 1996. General Experimental Analysis of Fat and Oils. Mashhad Pub. Mashhad. Iran. (in Farsi)
- Mohammadzadeh, J. 2001. Study on effects of Canola drying condition on quantity and quality of produced oil. Final Report. No. 346. Agricultural Engineering Research Institute. Karaj. Iran. (in Farsi)
- Mohsenin Nuri, N. 1970. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Sci. Pub. N. Y.
- Muir, W. E. and Sinha, R. N. 1985. Theoretical rates of flow of air at near ambient conditions required to dry rapeseed. *Can. Agric. Eng.* 28(1): 45-49.
- Mujumdar, A. S. 2000. Drying Technology in Agriculture and Food Sciences. Science Pub. Inc. Enfield (NH), USA.
- Sadowska, J., Fornal, J., Ostaszyk, A. and Szmatowic, B. 1996. Drying conditions and processability of dried rapeseed. *J. Sci. Food Agric.* 72(2): 257-262.
- Sutherland, J. W. and Chaly, T. F. 1982. Heated air drying of oil seeds. *J. Stored Products Res.* 18(2): 43-54.



## **Influence of Temperature and Air Velocity on the Canola Drying Process and its Quality**

**H. R. Gazor\* and S. Minaei**

\*Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, P. O. Box: 31585-845, Karaj, Iran.  
E-mail: hgazor@yahoo.com

The canola drying process was investigated using three laboratory scale dryers connected to a computer which continuously recorded the drying processes of each unit. A completely randomized design (CRD) with three replications was used for the statistical analysis. The effect of temperature (40°, 50°, 60°C) and air velocity (1, 2 m/s) on the drying kinetics of a monolayer were studied. The effective moisture diffusion coefficient ( $D_{\text{eff}}$ ), activation energy and percent of free fatty acids were measured for the drying process and dried canola. A drying estimation model was determined using a linear regression model for increasing temperatures. The results indicated that changes in temperature have the greatest effect on canola drying time. Increasing the temperature from 40° to 60°C caused the drying time to decrease by 66.4%. Changes in air velocity from 1 to 2 m/s reduced drying time 29.4% on average.  $D_{\text{eff}}$  increased from  $2.05694 \times 10^{-8}$  to  $5.8061 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup> and activation energy from 27.34 to 37.49 kJ/mol with a 40° to 60°C increase in temperature. Changes of temperature and air velocity did not have adverse effects on canola free fatty acids.

**Key Words:** Activation, Canola, Energy, Laboratory Dryer