

## مطالعه سینتیک خشک کردن ذرت به روش جریان هوای گرم

فاروق شریفیان<sup>۱\*</sup> و محمد کاوه<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران  
 ۲- دانش آموخته مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران  
 \* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [f.sharifian@urmia.ac.ir](mailto:f.sharifian@urmia.ac.ir)  
 دریافت: ۹۳/۰۵/۱۸ پذیرش: ۹۴/۰۳/۰۹

### چکیده

در این تحقیق با ساخت و به کارگیری یک دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی بستر ثابت، فرآیند خشک‌کردن ذرت به صورت لایه نازک مطالعه شد. با استفاده از طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی، تأثیر تغییرات دو عامل دمای خشک‌کردن در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت جابجایی هوای گرم در چهار سطح ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر بر ثانیه بر روی پارامترهای زمان خشک‌کردن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی فعال‌سازی و میزان مصرف انرژی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر فاکتورهای دما و سرعت هوا بر روی زمان خشک شدن معنی‌دار می‌باشد. سرعت هوای ورودی بر خلاف دما اثر معکوس بر روی زمان خشک شدن داشت. افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، ۶۳ درصد زمان خشک شدن را کاهش داد و تغییر سرعت از ۱ به ۲/۵ متر بر ثانیه، ۱۹ درصد زمان خشک شدن را افزایش داد. مقادیر محاسبه شده ضریب نفوذ از مقدار  $10^{-10} \times 8$  مترمربع بر ثانیه مربوط به دمای ۴۰ درجه سلسیوس تا  $10^{-10} \times 31$  مترمربع بر ثانیه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس متغیر بود. مقدار انرژی فعال‌سازی نیز بین ۴۷/۴۹ تا ۴۷/۶۹ کیلوژول بر مول تغییر کرد. میزان مصرف انرژی با افزایش دما کاهش و با افزایش سرعت هوای ورودی افزایش پیدا کرد. به طوری که کمترین میزان مصرف انرژی برابر با ۴/۰۶ کیلووات ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت ۱ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار آن یعنی ۴۲/۰۲ کیلووات ساعت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه حاصل شد.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی فعال‌سازی، انرژی مصرفی، خشک‌کردن، ذرت، ضریب نفوذ مؤثر

### ۱- مقدمه

می‌باشد (Statistical Year Book, 2011). این محصول در رطوبت ۲۵-۲۸ درصد برپایه تر برداشت می‌شود و بهترین رطوبت نگهداری آن ۱۴-۱۳ درصد برپایه تر می‌باشد. بنابراین مهمترین عملیات پس از برداشت آن خشک کردن محصول است. نتایج تحقیقات انجام شده در مورد غلات نشان می‌دهد که مناسب‌ترین دما برای

ذرت گیاهی است از خانواده گرامینه و از جنس *zea* و گونه *zea mays* که جزو غلات پر مصرف در جهان است و از نظر تولید بعد از نیشکر مقام دوم را در دنیا دارد. در سال‌های اخیر کشت آن در کشور توسعه یافته و سطح زیر کشت آن بالغ بر ۲۸۰ هزار هکتار

(Akpınar *et al.*, 2002), (Pala, 2002)، ورقه‌های سیب زمینی (2003)، سیب (Kaya *et al.*, 2007)، توت (Aghbashlo *et al.*, 2008)، انجیر (Sharifian *et al.*, 2012) و خرما (Doymaz, 2012) اشاره کرد. علیرغم تحقیقات فراوان انجام شده در این زمینه، اطلاعات کمی در مورد مقادیر ضریب نفوذ، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی در فرآیند خشک کردن ذرت وجود دارد (Amiri Chayjan *et al.*, 2011). افزایش تولید ذرت در کشور و مصرف زیاد آن در صنایع غذایی، ضرورت مطالعه سینتیک خشک کردن ذرت و استخراج پارامترهای ترموفیزیکی محصول در فرآیند خشک کردن به منظور کنترل و بهینه‌سازی خشک‌کن‌ها و همچنین عدم وجود اطلاعات کافی در مورد مصارف انرژی در فرآیند خشک کردن ذرت، دلایلی برای انجام تحقیق حاضر هستند. به همین منظور در این تحقیق یک خشک‌کن آزمایشگاهی ساخته شد. سپس تأثیر تغییرات دو عامل دمای خشک‌کردن و سرعت جابجایی هوای گرم بر روی پارامترهای زمان خشک‌کردن، ضریب نفوذ مؤثر، انرژی فعال‌سازی و میزان مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن ذرت به منظور مصارف خوراکی و صنعتی آن (رقم سینکل کراس ۷۰۵) به صورت لایه نازک در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- تئوری تحقیق

خشک کردن فرآیند پیچیده‌ای است که شامل انتقال همزمان جرم، حرارت و انتقال مومنتوم است. طراحی، کنترل و بهینه‌سازی این فرآیند نیازمند مدل‌هایی کارا در پیش‌بینی فرآیند است. در هر حال طراحی خشک‌کن‌ها تا به امروز ترکیبی از علم و تجربه عملی بوده است و نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه

خشک‌کردن بین ۴۱ تا ۸۲ درجه سلسیوس است که بستگی به کاربرد خاص محصول پس از خشک کردن دارد. مثلاً زمانی که ذرت و یا گندم به عنوان بذر مورد استفاده قرار می‌گیرند، حداکثر دمای هوای مجاز برای خشک کردن آنها ۴۳ درجه سلسیوس است؛ اما در شرایطی که ذرت و گندم برای مصارف خوراکی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توان حداکثر با دمای ۶۰ درجه سلسیوس آنها را خشک نمود (Raghavan & Sosle, 2006).

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که خشک کردن محصولات کشاورزی در شرایط کنترل شده، نتایج مطلوبی از نظر کمی و کیفی برای محصولات فرآوری شده داشته است. از جمله این تحقیقات می‌توان به مقایسه روش خشک کردن سنتی و استفاده از خشک‌کن خورشیدی در کیفیت تکنولوژیکی و تغذیه‌ای دانه برنج (Mehdizadeh & Zomorodian, 2009)، بهینه‌سازی خشک‌کن‌های تجاری بلال ذرت به منظور یافتن بهترین دما برای فرآیند خشک کردن با در نظرگیری حفظ کیفیت محصول و کاهش انرژی مصرفی (Islamet *al.*, 2004) اشاره نمود. از طرفی دیگر مطالعه ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی فراورده‌های غذایی و محصولات کشاورزی همچون ضریب نفوذ، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی ویژه در طراحی یک خشک‌کن مناسب دارای اهمیت می‌باشند (Aghbashlo *et al.*, 2008). محققین زیادی مقادیر ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی را در فرآیند خشک کردن لایه نازک فراورده‌های غذایی و محصولات کشاورزی بدست آورده و گزارش کرده‌اند. از این جمله می‌توان به تحقیقات انجام گرفته بر روی سینتیک خشک کردن انگور بیدانه (Doymaz and

رطوبت تعادلی بر پایه وزن خشک و  $M_0$  میزان رطوبت اولیه بر پایه وزن خشک است. مقدار  $M_e$  در مقایسه با  $M_t$  و  $M_0$  ناچیز است و در اغلب موارد از آن صرف نظر می شود (Sharifian et al., 2012; Karaaslan & Tunçer, 2008). همچنین  $t$  زمان خشک شدن بر حسب ثانیه،  $D_e$  ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بر حسب مترمربع بر ثانیه و  $L$  نصف ضخامت نمونه بر حسب متر است. در حل این معادله فرضیات زیر اعمال شده است: ۱- رطوبت در ابتدا به صورت یکنواخت درون نمونه پخش شده است؛ ۲- رطوبت سطح نمونه با هوای محیط به تعادل می رسد و هیچ گونه مقاومت خارجی در برابر انتقال جرم سطح نمونه موجود نیست؛ ۳- ضریب نفوذ ثابت و تغییرات آن قابل چشم پوشی باشد؛ ۴- از تاثیر گرادیان های دما و فشار صرفه نظر می شود؛ ۵- مقدار چروکیدگی در نمونه خشک شده ناچیز فرض شده است.

در صورت طولانی بودن زمان خشک شدن، معادله (۲) را می توان به صورت زیر ساده نمود و تنها جمله اول سری را در نظر گرفت:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_e t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

معادله (۳) را می توان به فرم خطی ساده شده زیر نوشت:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_e t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

حال می توان ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را از روش شیب محاسبه نمود. در این روش با ترسیم مقدار لگاریتم نسبت رطوبت حاصل از داده های آزمایشگاهی در مقابل زمان، خط ثابتی با شیب  $K_0$  بدست می آید (Doymaz, 2012).

باقی است. بنابراین اندازه گیری و تعیین پارامترهای خشک کردن که در مطالعه مدل های خشک کردن مورد استفاده هستند، ضروری است. پارامترهای ترموفیزیکی مورد نیاز در تحلیل فرآیند خشک کردن گسترده می باشند. در این میان برخی از پارامترهای ترمودینامیکی و پارامترهای انتقال جرم و حرارت مانند ضریب نفوذ، انرژی فعال سازی، ضریب مؤثر هدایت حرارتی، محتوای رطوبت تعادلی، ثابت های خشک کردن و غیره از اهمیت ویژه ای برخوردارند. (Marinos & Kouris & Maroulis, 2006).

توصیف فرآیند نفوذ رطوبت در محصولات در طول فرآیند خشک شدن بسیار پیچیده است. این فرآیند ممکن است شامل نفوذ مولکولی، جریان موئین رطوبت محصول، جریان هیدرودینامیک رطوبت، نفوذ نادرین (Knudsen diffusion) و یا نفوذ سطحی رطوبت باشد. با در نظرگیری و ترکیب این پدیده ها، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را می توان به توسط قانون دوم فیک توصیف کرد که به صورت معادله (۱) ارائه شده است.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (1)$$

حل عمومی قانون دوم فیک در مختصات کارتزین برای قطعات با ضخامت مشخص توسط کرانک به صورت زیر بیان شده است (Crank, 1975).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \quad (2)$$

$$\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_e \times t}{4L^2}\right)$$

در معادله  $MR$  نسبت رطوبت (بی بعد)،  $M_t$  میزان رطوبت در هر لحظه بر پایه وزن خشک،  $M_e$  میزان

در این تحقیق برای انجام آزمایش‌ها، یک خشک‌کن آزمایشگاهی که شرایط خشک‌کردن (دمای خشک‌کن و سرعت جریان هوا) در آن قابل کنترل می‌باشد، ساخته شد. تنظیم سرعت هوای ورودی با تغییر دور الکتروموتور توسط یک تغییر دهنده فرکانس که به الکتروموتور متصل بود، انجام می‌شد. برای گرم کردن هوای ورودی از شش عدد المنت ۵۰۰ واتی استفاده شد. دستگاه مجهز به یک کنترل کننده اتوماتیک دمای هوای ورودی با دقت  $\pm 1$  درجه سلسیوس بود. برای کنترل دمای خشک‌کن، در زیر سینی ثابت محصول یک سنسور دمایی (ترموکوپل نوع K) که از طریق یک مقاومت الکتریکی با میکروکنترلر در ارتباط بود، نصب شد. فرمان فرستاده شده توسط میکروکنترلر، المنت‌ها را قطع و وصل می‌کرد و دما را در سطح تعیین شده ثابت نگه می‌داشت.

برای آماده‌سازی نمونه‌ها مقدار ۲۰ کیلوگرم ذرت در حین برداشت تهیه گردید. به منظور یکنواختی نمونه‌ها ذرت‌های چروکیده ترک خورده به صورت دستی جدا شدند. ذرت تازه برداشت شده در کیسه‌های نایلونی ریخته درب آنها نیز کاملاً بسته شد. به منظور کاهش فعالیت‌های میکروبی، نمونه‌ها تا قبل از شروع آزمایش در یخچال (دمای  $1 \pm 4$  درجه سلسیوس) نگهداری شدند. به منظور تعیین رطوبت اولیه، نمونه‌های ۱۰۰ گرمی با ۱۰ تکرار تهیه و پس از رسیدن به دمای محیط در داخل آون با دمای  $3 \pm 103$  درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شدند (ASAE Standards, 2007). مقدار رطوبت اولیه نمونه‌ها ۴۱ درصد بر پایه خشک بدست آمد. با استفاده از یک سرعت‌سنج پره‌ای (KARL KOLB 71807) با دقت

$$K_o = \frac{\pi^2 D_e}{4L^2} \quad (5)$$

در نهایت با استفاده از معادله (۵) و استفاده از رگرسیون خطی، مقدار ضریب نفوذ مؤثر را می‌توان بدست آورد.

به دلیل کم بودن رطوبت اولیه ذرت و چشم‌گیر بودن مقدار رطوبت تعادلی در برابر رطوبت اولیه در محاسبه رطوبت نسبی، رطوبت تعادلی به روش زیر محاسبه شد (Jayas & Cenkowski, 2006).

$$M_e = \frac{1}{100} \left[ \frac{\ln(1 - RH)}{-K(T + C)} \right]^{\frac{1}{N}} \quad (6)$$

در رابطه RH درصد رطوبت نسبی هوای محیط، T دمای هوای ورودی به خشک‌کن بر حسب درجه سلسیوس، K، C و N ثابت‌های معادله و برای ذرت به ترتیب  $5 \times 10^{-5}$ ،  $8/6542$ ،  $10/49$  و  $1/8436$  می‌باشند.

مقدار انرژی لازم که صرفاً برای حذف رطوبت از محصول لازم است را انرژی فعال‌سازی گویند. برای محاسبه انرژی فعال‌سازی از معادله آرنیوس استفاده می‌شود. در این معادله رابطه بین دما، ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی به صورت زیر بیان شده است (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

$$D_e = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) \quad (7)$$

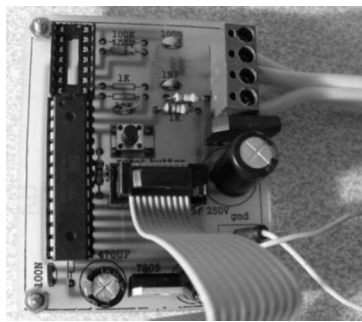
در معادله  $E_a$  انرژی فعال‌سازی بر حسب کیلوژول بر مول،  $R_g$  ثابت جهانی گازها و  $D_0$  ضریب نمایی معادله آرنیوس است که برای هر محصولی متفاوت می‌باشد و در استانداردها ارائه شده است. ضریب  $D_0$  برای ذرت برابر با  $6/144 \times 10^{-5}$  مترمربع بر ثانیه می‌باشد. همچنین T دمای خشک کردن بر حسب درجه کلون است.

### ۳- مواد و روش‌ها

در روابط مذکور  $V$  ولتاژ عبوری از انرژی‌سنج بر حسب ولت،  $I$  مقدار جریان عبوری از انرژی‌سنج بر حسب آمپر،  $P_1$ ،  $P_2$  تا  $P_n$  مقادیر توان مصرفی دستگاه وصل شده به انرژی‌سنج در ثانیه‌های اول، دوم تا  $n$ ام بر حسب وات و  $E$  مقدار کل انرژی مصرفی بر حسب ژول می‌باشد. شکل (۱) دستگاه انرژی‌سنج مذکور را نشان می‌دهد. این نمایش‌گر چهار پارامتر ولتاژ، جریان عبوری، توان و همچنین کل انرژی مصرفی در زمان کارکرد دستگاه را نمایش می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱- دستگاه انرژی‌سنج: الف- نمایش‌گر ب- برد دستگاه

Fig. 1. Energy meter system: a. Character display, b. System board

طرح آزمایشی به وسیله آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور دما در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت جابجایی هوای گرم در چهار سطح ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر بر ثانیه در چهار

۰/۱ متر بر ثانیه، دور الکتروموتور برای دستیابی به سرعت‌های مختلف هوای ورودی کالیبره شد. ۲۰ دقیقه قبل از شروع آزمایش‌ها خشک‌کن راه‌اندازی و پارامترهای سرعت و دمای هوا روی مقدار موردنظر تنظیم می‌شدند تا خشک‌کن به شرایط پایدار برسد. سپس نمونه‌های ۲۰۰ گرمی با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۱ گرم توزین و تهیه شدند. سپس نمونه به صورت یک لایه بر روی سینی قرار داده شد. در طی فرآیند خشک‌کردن کاهش وزن در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. خشک شدن تا زمانی که رطوبت به ۱۷ درصد بر پایه خشک می‌رسید، ادامه داشت. در طول آزمایش‌ها، محدوده تغییرات دمای محیط  $25 \pm 3$  درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوا  $60 \pm 6$  درصد بود. برای بدست آوردن رطوبت نسبی دمای حباب خشک (دمای محیط آزمایشگاه) و دمای حباب تر با استفاده از یک دماسنج جیوه‌ای که یک ابر کاملاً خیس به دور دماسنج پیچیده شده بود، بدست آمدند و سپس به کمک منحنی‌های سایکرومتریک رطوبت نسبی هوای محیط محاسبه شد.

به منظور اندازه‌گیری انرژی مصرفی در طول آزمایش‌ها، یک دستگاه انرژی‌سنج ساخته شد و مورد استفاده قرار گرفت. انرژی‌سنج به برق شهری وصل می‌شد و خشک‌کن به خروجی انرژی‌سنج وصل می‌گردید. پس از اندازه‌گیری ولتاژ و جریان عبوری از انرژی‌سنج، از طریق روابط (۸) و (۹)، مقدار توان ( $P$ ) و انرژی مصرفی کل ( $E$ ) محاسبه و نمایش داده می‌شدند.

$$P = V \times I \quad (8)$$

$$E = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (9)$$

تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS انجام گردید و کلیه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح یک درصد و پنج درصد با یکدیگر مقایسه شدند.

#### ۴- نتایج و بحث

نتایج آنالیز واریانس تأثیر دما و سرعت هوا بر مدت زمان خشک شدن ذرت نشان داد که اثر فاکتورهای سرعت در سطح پنج درصد و دما در سطح یک درصد بر روی مدت زمان خشک شدن معنی‌دار است (جدول ۱). منحنی خشک شدن بستر نازک ذرت در دماها و سرعت‌های آزمایش شده، در شکل (۲) نشان داده شده است. مشاهده شد که در یک سرعت ثابت با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، رطوبت با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. در ابتدای فرآیند، کاهش رطوبت با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد ولی با گذشت زمان بتدریج سرعت کاهش رطوبت کم شده و این کاهش در دمای ۴۰ درجه سلسیوس بیشتر خود را نشان می‌دهد. افزایش دمای هوای ورودی موجب می‌شود که سرعت خروج رطوبت از محصول افزایش یافته، نرخ خشک شدن افزایش یابد و منحنی‌های تغییرات نسبت رطوبت محصول در واحد زمان دارای روند کاهشی قابل توجهی باشند که بیان‌گر آهنگ بالای تبخیر می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که هر چه دمای هوای ورودی افزایش پیدا کند، رطوبت با سرعت بیشتری از ذرت خارج شده و موجب کاهش زمان خشک شدن می‌شود. نتایج مشابهی در فرآیند خشک کردن ذرت گزارش شده است (Doymaz & Pala, 2003). از طرفی دیگر با افزایش سرعت هوای ورودی بتدریج مدت زمان خشک کردن افزایش کمی پیدا

می‌کند و این افزایش در سطح یک درصد معنی‌دار نبوده است. این امر احتمالاً به دلیل کانالیزه شدن هوا و تماس غیر مؤثر دانه‌ها با هوای گرم می‌باشد. از طرفی دیگر هوا از پوسته محصول نفوذ نمی‌کند و صرفاً باعث انتقال رطوبت از سطح محصول می‌گردد و کاهش مقاومت در مقابل انتقال جرم از سطح محصول را فراهم می‌آورد. لذا زمانی که سرعت ورودی هوا کم باشد به آرامی به محصول برخورد می‌نماید و سطح بیشتری از دانه ذرت را احاطه کرده و در نتیجه تمامی سطح دانه گرم شده و رطوبت سریع‌تر از مرکز به سطح هدایت و خارج می‌شود. این در حالی است که نتیجه عکسی در مطالعه سینتیک خشک کردن سیب گزارش شده است (Kaya et al., 2007). زیرا این محققین نمونه‌ها را در ضخامت‌های کوچک برش داده بودند و ضریب نفوذ افزایش یافته و افزایش سرعت هوا، رطوبت بیشتری را از سطح محصول خارج می‌نماید.

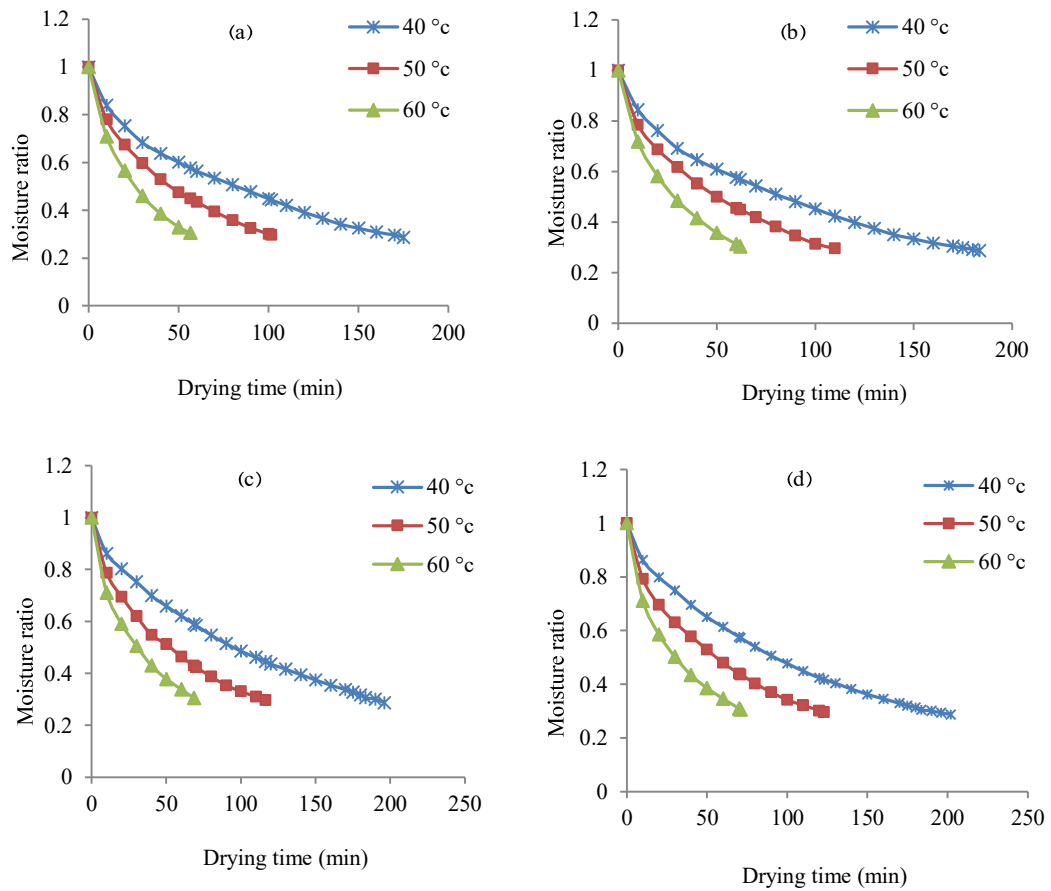
میانگین زمان خشک شدن در دماهای مختلف هوای ورودی در شکل (۳) نشان داده شده است. با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن محصول ۶۳ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که به طور متوسط افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ و از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۴۰ و ۳۹ درصد زمان خشک شدن را کوتاه‌تر نموده است.

جدول ۱- نتایج آنالیز واریانس زمان خشک شدن

Table 1. Analysis of variation for drying time

مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات
F value	Mean of square	Degree of freedom	Source of variation
5009.5**	63119.8	2	دما Temperature
84.2*	1061.3	3	سرعت Velocity
4.3 <sup>ns</sup>	54.0	6	دما × سرعت Temperature × Velocity
	12.6	36	خطا Error
	-	47	کل Total

\*\*وجود اختلاف معنی دار در سطح ۱٪، \*وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵٪، <sup>ns</sup>عدم وجود اختلاف معنی دار



شکل ۲- منحنی‌های خشک شدن ذرت به ترتیب در سرعت‌های الف) ۱، ب) ۱/۵، ج) ۲ و د) ۲/۵ متر بر ثانیه در دماهای مختلف

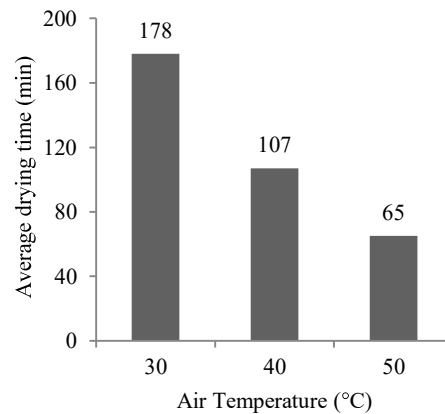
Fig. 2. Moisture ratio changes as a function of drying time at different air temperatures and air velocities of a. 1, b. 1.5, c. 2 and d. 2.5 ms<sup>-1</sup>

و رطوبت از مرکز به طرف هسته حرکت کند و نهایتاً به شکل بخار از سطح دانه خارج شود. بنابراین افزایش ضریب نفوذ در اثر افزایش دما به علت افزایش فشار بخار در اطراف هسته ذرت می‌باشد.

انرژی فعال‌سازی به کمک معادله آرنیوس با استفاده از روش شیب محاسبه شد. مقادیر لگاریتم ضرایب نفوذ رطوبت بدست آمده در سرعت‌های مختلف در مقابل معکوس درجه حرارت ترسیم گردید و سپس با استفاده از شیب این خطوط مقدار انرژی فعال‌سازی بدست آمد که در جدول (۳) گزارش شده است. مقادیر بدست آمده برای انرژی فعال‌سازی، از کمینه مقدار ۴۷/۴۹ کیلوژول بر مول در سرعت ۱ متر بر ثانیه تا بیشینه مقدار ۴۷/۶۹ کیلوژول بر مول در سرعت هوای ۲/۵ متر بر ثانیه متغیر می‌باشند. یعنی با افزایش سرعت هوا مقدار انرژی فعال‌سازی بیشتر می‌شود. نتایج مشابهی برای ذرت گزارش شده است (Tolaba & Suarez, 1998). این رفتار می‌تواند به خاطر تأثیرات آیرودینامیکی با توجه به الگوی جریان خاص تشکیل شده در اطراف محصول خشک شده باشد. به کمک آنالیز رگرسیونی، بهترین معادله رگرسیونی انرژی فعال‌سازی به صورت تابعی از سرعت هوای ورودی بدست آمد که در معادله (۱۰) گزارش شده است.

$$E_a = -0.131 V + 47.85, \quad R^2 = 0.86 \quad (10)$$

که در رابطه  $V$  سرعت هوا و  $E_a$  انرژی فعال‌سازی می‌باشد.



شکل ۳- اثر دمای هوای ورودی بر میانگین زمان خشک‌شدن

Fig. 3. Influence of air temperature on average of drying time

مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محصول به کمک قانون دوم فیک محاسبه شد و در جدول (۲) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که این ضریب در بازه دمایی تحقیق در فاصله  $8 \times 10^{-10}$  تا  $31 \times 10^{-10}$  مترمربع بر ثانیه تغییر می‌کند. مقدار ضریب نفوذ رطوبت ۸۲ درصد از محصولات غذایی و کشاورزی در بازه  $1 \times 10^{-11}$  تا  $1 \times 10^{-8}$  مترمربع بر ثانیه است (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006). مقادیر محاسبه شده ضریب نفوذ در تحقیق حاضر نیز در بازه مذکور است. از جدول (۲) می‌توان ملاحظه کرد که در تمامی سطوح سرعت هوا، مقدار ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دمای هوای ورودی افزایش می‌یابد. این در حالی است که در یک دمای ثابت هوای ورودی، میزان ضریب نفوذ با افزایش سرعت هوای ورودی کاهش می‌یابد. اکثریت رطوبت ذرت در هسته مرکزی محصول متمرکز می‌باشد؛ با افزایش دمای هوای ورودی، حرارت به تدریج به هسته مرکزی نفوذ کرده و باعث می‌شود که فشار بخار جزئی رطوبت هسته محصول افزایش یابد



جدول ۲- مقادیر ضریب نفوذ مؤثر ( $De$ ) ذرت در شرایط مختلف خشک کردن و ضرایب تبیین ( $R^2$ ) مربوطه

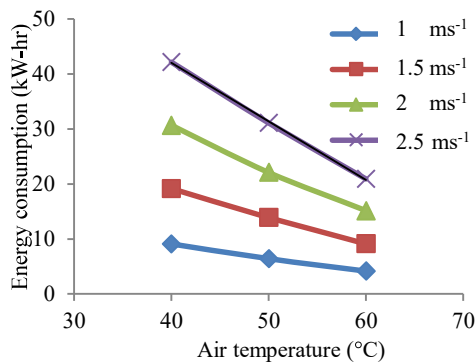
Table 2. The Effective moisture diffusivity ( $De$ ) of corn and related coefficient of determination ( $R^2$ ).

دمای هوا (درجه سلسیوس)	40	50	60			
Air temperature (°C)						
(سرعت هوا (متر بر ثانیه))	( $De$ )	( $R^2$ )	( $De$ )	( $R^2$ )	( $De$ )	( $R^2$ )
Air velocity ( $ms^{-1}$ )						
1	$10.2 \times 10^{-10}$	0.93	$17.2 \times 10^{-10}$	0.932	$31 \times 10^{-10}$	0.953
1.5	$9.8 \times 10^{-10}$	0.94	$16.5 \times 10^{-10}$	0.941	$26.2 \times 10^{-10}$	0.955
2	$8.7 \times 10^{-10}$	0.963	$14.7 \times 10^{-10}$	0.921	$26.1 \times 10^{-10}$	0.942
2.5	$8 \times 10^{-10}$	0.961	$13.5 \times 10^{-10}$	0.952	$24.5 \times 10^{-10}$	0.927

جدول ۳- مقادیر انرژی فعال سازی در سرعت های مختلف هوای ورودی

Table 3. Activation energy under different levels of air velocities

سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	1	1.5	2	2.5
Air velocity ( $ms^{-1}$ )				
انرژی فعال سازی (کیلوژول بر مول)	47.69	47.66	47.62	47.49
Activation energy ( $kJmol^{-1}$ )				
ضریب تبیین	0.981	0.972	0.978	0.964
Coefficient of determination ( $R^2$ )				



شکل ۴- انرژی کل مورد نیاز برای خشک کردن ذرت در

سرعت های مختلف هوای ورودی

Fig. 4. Total energy consumed in drying of corn under different levels of air velocities

کل انرژی مصرفی در فرآیند خشک کردن محصول اندازه گیری شد. مقادیر انرژی مصرفی در تیمارهای مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش سرعت هوای ورودی میزان مصرف انرژی افزایش می یابد. این در حالی است که با افزایش دمای هوای ورودی، میزان انرژی مصرفی کاهش پیدا می کند. وابستگی میزان مصرف انرژی با دمای هوا در سرعت های بالاتر بیشتر است. یعنی با افزایش سرعت هوای ورودی شیب منحنی ها بیشتر می شود. به عنوان مثال با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس در سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه، مقدار انرژی مصرفی از ۴۲/۰۲ به ۲۰/۸۱ کیلووات ساعت کاهش می یابد؛ در حالی که با همان تغییر دمایی (افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس) در سرعت ۱ متر بر ثانیه، مصرف انرژی از ۹/۱۸ به ۴/۰۶ کیلووات ساعت تقلیل پیدا می کند.

## ۵- نتیجه‌گیری کلی

احشام باید مورد مطالعه قرار گیرند. همچنین پیشنهاد می‌شود سرعت هوای کمتر از ۱ متر بر ثانیه نیز به منظور بررسی میزان مصارف انرژی در تحقیقات آتی مورد مطالعه قرار گیرد. مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت محصول در شرایط تحقیق  $31 \times 10^{-10}$  -  $8 \times 10^{-10}$  مترمربع بر ثانیه بدست آمد. همچنین مقدار انرژی فعال‌سازی نیز در فاصله  $47/49$  تا  $47/69$  کیلوژول بر مول تغییر کرد. مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده ضریب نفوذ، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی در طراحی و توسعه سیستم‌های خشک کردن محصول استراتژیک ذرت می‌توانند مفید و مورد استفاده باشند.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش دمای هوای ورودی و همچنین کاهش سرعت هوا به طور معنی‌داری سبب کاهش زمان خشک کردن می‌گردند. کمترین زمان خشک کردن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه بدست آمد. از طرفی دیگر کمترین میزان انرژی مصرفی نیز در همان تیمار حاصل گردید. لذا پیشنهاد می‌شود ذرت (رقم سینکل کراس ۷۰۵) برای مصارف صنعتی و خوراکی با حداکثر دمای مجاز ۶۰ درجه سلسیوس خشک شود. دماهای بالاتر علیرغم امکان کاهش زمان خشک شدن و انرژی مصرفی، در مصرف ذرت برای تغذیه

## ۶- فهرست منابع

1. Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H. and Samimiakhijahani H., 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of beriberi fruit (*Berberidaceae*). **Energ. Convers. Manage.** 49: 2865-2871.
2. Akpınar, E., Midilli, A. and Bicer, Y., 2003. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. **Energ. Convers. Manage.** 44: 1689-1705.
3. Amiri Chayjan, R., Amiri Parian, J. and Esna-Ashari, M. 2011. Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of high moisture corn in a fixed and fluidized bed convective dryer. **Span. J. Agric. Res.** 9(1): 28-40.
4. ASAE Standards. 2007. Moisture measurement-unground grain and seeds. ASAE S352.2 FEB03. PP 582-583.
5. Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press.
6. Doymaz, I. and Pala. M. 2002. The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes. **J. Food Eng.** 52: 413-417.
7. Doymaz, I. and Pala. M. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. **J. Food Eng.** 60:125-130.
8. Doymaz, I. 2012. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki L.*). **Energ. Convers. Manage.** 56: 199-205.

9. Islam, M., Marks, B. and Bakker-Arkema, F. 2004. Optimization of commercial ear-corn dryers. **Agr. Eng. Int: CIGR Journal**. Manuscript FP 04 007. Vol. VI.
10. Karaaslan, S.N., and Tunçer, İ.K. 2008. Development of a drying model for combined microwave-fan-assisted convection drying of spinach. **Biosyst. Eng.** 100: 44-52.
11. Marinos-Kouris, D. and Maroulis, Z.B. 2006. Transport properties in the drying of solids. *In*: A.S. Mujumdar (ed.). Handbook of Industrial Drying. 3rd edn. CRC press, USA. Pp. 82-114.
12. Raghavan, V.G.S., and Sosle, V. 2006. Grain drying. *In*: A.S. Mujumdar (ed.). Handbook of Industrial Drying. 3rd edn. CRC press, USA. Pp. 563-573.
13. Mehdizadeh, Z., and Zomorodian, A. 2009. A study of the effect of solar drying system on rice quality. **J. Agr. Sci. Tech-IRAN** 11: 527-534.
14. Jayas, D.S., and Cenkowski, S. 2006. Grain property values and their measurement. *In*: A.S. Mujumdar (ed.). Handbook of Industrial Drying. 3rd edn. CRC press, USA. Pp. 575-600.
15. Kaya, A., Aydın, O. and Demirtaş, C. 2007. Drying kinetics of red delicious apple. **Biosyst. Eng.** 96 (4): 517-524.
16. Sharifian, F., Modarres Motlagh, A. and Nikbakht, A.M. 2012. Pulsed microwave drying kinetics of fig fruit (*Ficus carica L.*). **AJCS** 6(10): 1441-1447.
17. Statistical Year Book. 2011. Farm and orchard products. Vol. 1. Ministry of Jihad Agriculture, Islamic Republic of Iran (In Farsi).
18. Tolaba, M.P., and Suarez, C. 1988. Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusional model. **LWT-Food Sci. Technol.** 21 (2): 83-86.

## Convective Air Drying Kinetics of Corn

F. Sharifian<sup>1\*</sup> And M. Kave<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Islamic Republic of Iran.*

<sup>2</sup>*Graduate student of Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Islamic Republic of Iran.*

\*Corresponding Author Email: [f.sharifian@urmia.ac.ir](mailto:f.sharifian@urmia.ac.ir)

Received: August 09, 2014 Accepted: May 30, 2015

### Abstract

In this research, thin layer drying kinetics of corn was studied in laboratory scale convective dryer. The effects of air temperature at 3 levels (40, 50 and 60 °C) and air velocity at 4 levels (1, 1.5, 2 and 2.5 ms<sup>-1</sup>) on drying time, effective moisture diffusivity, activation energy and energy consumption of corn were studied. The acquired data were analyzed on the basis of completely randomized factorial design with two factors. The results indicated that drying time of products decrease 63% with the air temperature from 40 to 60 °C but increases 19% with air velocity from 1 to 2.5 ms<sup>-1</sup>. Calculated values of moisture diffusivity varied from 8E-10 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> at 40 °C air temperature to 31E-10 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> at 60 °C air temperature. Furthermore, the activation energy of corn was obtained to be in the range of 47.49 - 47.69 kJmol<sup>-1</sup>. Additionally, increasing the air temperature and decreasing the air velocity led to a decrease in energy consumption of drying. i.e. the lowest value of energy consumption (4.06 kW hr) was measured at 60 °C air temperature and 1 ms<sup>-1</sup> of air velocity while maximum amount of energy consumption (42.02 kW hr) was obtained at 40 °C air temperature and 2.5 ms<sup>-1</sup> of air velocity.

**Keywords:** Activation energy, Energy consumption, Drying, Corn, Effective moisture diffusivity