

## بررسی سینتیک خشک شدن و انرژی مصرفی لایه نازک ذرت

سجاد عباسی<sup>۱</sup> - سعید مینایی<sup>۲\*</sup> - محمد هادی خوش تقاضا<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۸/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۲/۳/۹

### چکیده

در این تحقیق خشک شدن ذرت در یک خشک کن هوای داغ در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سه دبی جابه‌جایی هوای گرم ۱، ۱/۴، ۱/۸ کیلوگرم بر دقیقه به صورت لایه نازک و پیوسته بررسی شد. آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی صورت گرفت. تأثیر دما و دبی جابه‌جایی هوا بر پارامتر زمان و آهنگ خشک شدن، ضرایب نفوذ رطوبت و انرژی فعال‌سازی بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که تأثیر فاکتورهای دما و سرعت جابه‌جایی هوا بر فرآیند خشک شدن محصول ذرت معنی‌دار می‌باشد. در تیمارهای تحقیق به طور متوسط افزایش دما از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس ۳۱/۷٪ و تغییر دبی از ۱ به ۱/۸ کیلوگرم بر دقیقه ۲۷٪ زمان خشک شدن ذرت را کاهش داد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی ذرت به ترتیب بین  $10^{-11} \times 3/47258$  تا  $10^{-11} \times 7/34352$  مترمربع بر ثانیه و  $13/761$  تا  $16/193$  کیلوژول بر مول به دست آمد. در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن ذرت مدل لگاریتمی هم‌خوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر مدل‌ها داشت. کمترین میزان انرژی مخصوص مصرفی مورد نیاز (۳/۶۱ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم) در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و دبی ۱ کیلوگرم بر دقیقه، در حالی که شرایط متناظر برای بیش‌ترین مقدار آن (۵/۳۴ کیلووات‌ساعت بر کیلوگرم) در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و دبی ۱/۸ کیلوگرم بر دقیقه بود.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، لایه نازک، مدل‌سازی، مصرف انرژی

### مقدمه

صرف خشک کردن در صنعت و کشاورزی می‌گردد (Milind et al., 2005). همچنین این فرآیند در مورد غلات به طور متوسط حدود ۶۰ درصد کل انرژی تولیدی را به خود اختصاص می‌دهد. این میزان مصرف انرژی در مقایسه با متوسط مصرف انرژی در مراحل خاکورزی (۱۶ درصد)، کاشت و داشت (۱۲ درصد)، برداشت (۶ درصد) و حمل و نقل (۶ درصد) قابل توجه است (Brooker et al., 1992). در زمینه خشک کردن لایه نازک محصولات کشاورزی، مدل‌سازی، استخراج منحنی سینتیک خشک شدن، محاسبه انرژی فعال‌سازی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آن‌ها تحقیقات فراوانی صورت گرفته است. در پژوهشی مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک شلتوک رقم فجر انجام شد. نتایج نشان داد که مدل تقریب پخش در خشک کردن لایه نازک شلتوک رقم فجر نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بالاتری برخوردار است ولی به دلیل دقت قابل قبول و سادگی معادله، مدل پیچ برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن توصیه شد (Omid et al., 2010). گازر و مینایی (Gazor and Minaee, 2008) تأثیر تغییرات دما و سرعت را بر سینتیک خشک شدن کلزا مطالعه کردند و نشان دادند که در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن کلزا، مدل پیچ دارای برآزش بهتری بود، ولی به دلیل کمتر بودن ضرایب ثابت در مدل نیوتن و

ذرت از ضروری‌ترین دانه غلات تولیدی در دنیا بعد از گندم و برنج بوده و غذای اساسی برای بسیاری از مردم در آمریکای لاتین، آمریکای شمالی، آسیا و آفریقا می‌باشد. سالانه تقریباً ۱۵٪ کل پروتئین (۴۲ میلیون تن) (Li and Vassal, 2004) و همچنین نزدیک به ۸۵٪ نشاسته دنیا از این محصول به دست می‌آید (Eckhoff, 2004). خشک کردن مهم‌ترین روش نگهداری مواد کشاورزی بوده و یک عملیات حساس و با اهمیت در چرخه برداشت، نگهداری و حمل و نقل آن‌هاست. در این فرآیند با استفاده از انرژی گرمایی، آب موجود در ماده تبخیر می‌گردد و یک ماده جامد، مایع و نیمه جامد به یک ماده جامد با میزان رطوبت کمتر تبدیل می‌شود و همراه با فرآیندهای پیچیده انتقال جرم و حرارت می‌باشد که اغلب باعث واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی و تغییرات در فاز ماده می‌گردد (Mujumdar, 1997). حدود ۱۲٪ انرژی مصرفی در دنیا

۲، ۱ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیاران گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.  
\* - نویسنده مسئول: (Email: minaei@modares.ac.ir)

مهم دما و دبی جابه‌جایی هوای گرم بر روی سینتیک خشک شدن ذرت و میزان انرژی مصرفی بود علاوه بر آن مدل سازی فرآیند خشک شدن ذرت نیز بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق با استفاده از یک خشک‌کن آزمایشگاهی و قابل اتصال به کامپیوتر (شکل ۱)، در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس در سه دمای (T<sub>1</sub>)، ۵۰، (T<sub>2</sub>)، ۶۰ و (T<sub>3</sub>)، ۷۰ درجه سلسیوس و سه دبی هوای گرم (m<sub>1</sub>)، ۱، (m<sub>2</sub>)، ۱/۴ و (m<sub>3</sub>)، ۱/۸ کیلوگرم بر دقیقه، در سه تکرار اقدام به خشک کردن ۱۰ کیلوگرم محصول ذرت از رقم سینگل کراس ۷۰۴ به صورت لایه نازک گردید.

به منظور جلوگیری از وارد آمدن صدمات به بافت محصولات کشاورزی حداکثر دما جهت خشک کردن آن‌ها ۸۰°C توصیه شده است لذا حداکثر سطح دمایی انتخاب شده در این تحقیق ۷۰°C بود. اکثر محققان از سرعت‌های کمتر از ۲ m s<sup>-1</sup> در خشک‌کن‌های هوای داغ استفاده کرده‌اند (Gorjian, 2009). همچنین محدودیت دمنده دستگاه خشک‌کن در غلبه بر افت فشار ناشی از نمونه ذرت موجود در مخزن ملاک انتخاب سطوح دبی قرار گرفت. با محاسبات مختلف سه سطح سرعت ۰/۳، ۰/۴۵ و ۰/۶ m s<sup>-1</sup> برای هوای خشک‌کن مناسب بود. با توجه به اینکه سطح مقطع بستر ذرت ۰/۱۶ m<sup>2</sup> می‌باشد این سه سطح سرعت متناظر با سه سطح دبی ۱، ۱/۴ و ۱/۸ kg min<sup>-1</sup> می‌باشد.

در ابتدای آزمایش برای تعیین رطوبت اولیه‌ی محصول از رطوبت‌سنج غلات PM-600 ساخت ژاپن استفاده گردید که رطوبت اولیه‌ی محصول ۲۶٪ بر پایه‌تر به دست آمد.

در حین انجام آزمایش اندازه‌گیری تغییرات دمای ورودی به وسیله IC حرارتی LM 35 ساخت چین با دقت ۰/۵°C، سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن با هواسنج توربینی (Anemometer, Lutron-YK,80AM Taiwan) با دقت ۰/۱± m s<sup>-1</sup> و اندازه‌گیری و نمایش وزن محصول داخل مخزن به صورت آنلاین با سنسور بار Zemic L6D ۲۰ کیلوگرمی با دقت ۱ گرم و نمایشگر TIKA TD1000 انجام شد. برای اندازه‌گیری وزن محصول در مدت زمان آزمایش از یک سیستم الکلنگی استفاده شد که مخزن خشک‌کن در یک طرف آن و وزنه‌های تعادل در طرف دیگر آن قرار داشت. در ابتدای فرآیند وزنه‌ها و مخزن حاوی نمونه در تعادل بودند. با شروع فرآیند و خروج رطوبت از محصول، بازوی الکلنگی از تعادل خارج می‌شود و زبانه نصب شده به مخزن به سنسور بار نیرو وارد می‌کند. با کالیبره کردن این نیرو، جرم محصول در هر لحظه قابل اندازه‌گیری

اختلاف جزئی شاخص‌های مورد ارزیابی کاربرد مدل نیوتن را توصیه کردند. لی و موری (۱۹۸۴) با خشک کردن ذرت به صورت لایه نازک به این نتیجه رسیدند که این فرآیند به دما، سرعت و رطوبت نسبی هوا و رطوبت اولیه محصول بستگی دارد. در پژوهش دیگری با خشک کردن لایه نازکی از ذرت، اثر افزایش اتیل‌اولئات روی آهنگ خشک شدن آن مطالعه شد. نتایج نشان از آهنگ بیشتر خشک شدن و کیفیت بهتر محصول نهایی در اثر افزایش اتیل‌اولئات بود. همچنین مدل پیچ قادر به پیشگویی فرآیند خشک شدن بود (Doymaz and Pala, 2003). مطالعه‌ای بر روی مدل‌سازی لایه نازک برنج در دما و سرعت‌های مختلف هوا انجام شد. بر اساس نتایج، مدل میدیلی مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی رفتار خشک‌شدن لایه نازک برنج می‌باشد. در پژوهشی دیگر ثابت نرخ خشک شدن، ضرایب انتقال جرم و حرارت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی فعال‌سازی و انرژی مخصوص مصرفی لایه نازک شلتوک در خشک‌کن هوای گرم در محدوده دمایی ۵۰ تا ۱۵۰°C، سرعت هوای ۰/۵ تا ۲ m s<sup>-1</sup> متر بر ثانیه و عمق محصول ۵ تا ۲۰ cm به دست آمد. نتایج نشان داد که ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دما افزایش می‌یابد و همچنین انرژی مخصوص مصرفی بین ۸/۵ تا ۱۰/۷ MJ kg<sup>-1</sup> به دست آمد (Rao et al., 2007).

با توجه به کشت گسترده و روزافزون ذرت در ایران و اهمیت آن در تأمین نیاز انسان و حیوان، نیاز به تحقیقات به منظور بهبود روش خشک کردن جهت نگاه‌داری طولانی مدت آن وجود دارد. همچنین با توجه به بررسی‌های به عمل آمده مشخص شده است که پژوهش‌های کمی در مورد سینتیک خشک کردن ذرت به صورت لایه نازک و اثر شرایط خشک کردن روی میزان انرژی مصرفی صورت گرفته است. هدف از انجام این تحقیق ارزیابی تأثیر تغییرات دو عامل



شکل ۱ - خشک‌کن مورد استفاده در تحقیق

Fig.1. Dryer used in the study  
a- Computer, b- Wattmeter, c- Load sensor indicator, d- Sensor, e- Dryer chamber, f- Counterweight

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

از طرفین رابطه (۵) لگاریتم گرفته می‌شود.

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

با رسم لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در طول آزمایش نسبت به زمان، خطی با شیب  $k_1$  به دست می‌آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب  $t$  در رابطه (۶)، ضریب نفوذ مؤثر را می‌توان از رابطه (۷) محاسبه کرد.

$$k_1 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (7)$$

برای هر تیمار از ضریب نفوذهای به دست آمده میانگین گرفته و نتیجه اعلام می‌گردد. با توجه به تابعیت ضریب نفوذ با دما، برای تعیین انرژی فعال سازی هر تیمار از رابطه آرنیوس (۸) استفاده شد (Babalıs and Belessiotis, 2004; Akpinar *et al.*, 2003).

$$D_{eff} = D_0 \exp \left( -\frac{E_a}{R_g T_{abs}} \right) \quad (8)$$

در این رابطه:  $D_{eff}$  ضریب نفوذ ( $m^2 s^{-1}$ ),  $D_0$ : ضریب نفوذ در دمای مبدا ( $m^2 s^{-1}$ ),  $E_a$  انرژی فعال سازی ( $kJ mol^{-1}$ ),  $R$  ثابت جهانی گازها ( $8.314 kJ mol^{-1} K^{-1}$ ),  $T_{abs}$  دما (K) می‌باشد.

به منظور به دست آوردن یک رابطه کلی بین نسبت رطوبت و مدت زمان سپری شده از فرآیند خشک شدن ذرت در دما و دبی‌های مختلف هوای خشک‌کن، با استفاده از روش حداقل مربعات به صورت رگرسیون چندگانه مدل سازی انجام شد.

#### انرژی مصرفی

با قرائت عدد روی کنتور در ابتدا و انتهای هر آزمایش و کم کردن این دو عدد از یکدیگر، میزان انرژی مخصوص مجموعه دستگاه برای خشک کردن ۱ کیلوگرم ذرت به دست می‌آید.

خواهد بود. پس از رسیدن ذرت به محدوده مجاز رطوبتی (۱۳ تا ۱۴ درصد بر پایه تر) عملیات خشک کردن خاتمه یافته و با استفاده از آزمایشات فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، شاخص‌هایی نظیر متوسط زمان و آهنگ خشک شدن برای تیمارهای آزمایش و همچنین نحوه تغییرات رطوبت محصول و تغییرات آهنگ خشک شدن نیز برای هر تیمار به دست آمد. نسبت رطوبت با توجه به رابطه (۱) به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طی خشک شدن وابسته است (Doymaz, 2007).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

که در آن؛ MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$ : رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه خشک (d.b),  $M_e$ : رطوبت تعادلی نمونه‌ها (d.b),  $M_0$ : رطوبت اولیه نمونه‌ها (d.b) می‌باشد. برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر  $M_e$  در مقادیر  $M_0$  بسیار کوچک هستند. بنابراین می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه (۲) ساده کرد (Doymaz, 2007).

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

در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست.

آهنگ تبخیر در دانه‌های ذرت با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (Ozbek and Dadali, 2007).

$$drying\ rate = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3)$$

در این رابطه،  $M_{t+dt}$  مقدار رطوبت در زمان  $t+dt$ ,  $M_t$ , (d.b) میزان رطوبت در زمان  $t$  (d.b) و  $t$  زمان خشک شدن (min) می‌باشد. قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار در اشکال کروی توسط کرک (Crank, 1975) می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند.

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

در اینجا، MR نسبت رطوبت (بی بعد)،  $n$  تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله،  $t$  زمان خشک شدن (s),  $D_{eff}$  ضریب نفوذ مؤثر ( $m^2 s^{-1}$ ),  $r$  شعاع کره (m) می‌باشد. رابطه (۴) در مدت زمان‌های طولانی خشک شدن به صورت رابطه (۵) خلاصه می‌شود:

جدول ۱- مدل‌های مورد استفاده برای مدلسازی خشک شدن ذرت

Table1- Mathematical models applied to the drying curves of corn

مدل Model	معادله Equation	منبع Reference
پیچ Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Simal <i>et al.</i> , 2005)
نیوتن Newton	$MR = \exp(-kt)$	(Ayensu, 1997)
میدیلی Midili	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Menges and Ertekin, 2005)
لگاریتمی Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Dandamrongrak <i>et al.</i> , 2002)
دوجمله‌ای Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(Diamente and Munro, 1991)

MR: نسبت رطوبت، t: زمان (s) و n، k، b و c و a ثابت‌های مدل‌ها می‌باشند.

MR: Moisture content, t: time (s) and n, k, b, c and a are coefficients of models

در اثر افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ و ۶۰ به ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۷/۷٪ و ۱۶/۹٪ زمان خشک شدن کاهش و ۱۹/۷٪ و ۱۹/۹٪ آهنگ آن افزایش یافت. افزایش دما از یک طرف باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول شده و از طرف دیگر باعث گرم شدن سریع‌تر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود و در نهایت باعث کاهش زمان خشک شدن می‌گردد.

## نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر دما و سرعت بر زمان خشک شدن ذرت مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که جدول ۲ نشان می‌دهد اثر فاکتورهای دبی و دما در سطح ۱٪ معنی‌دار شده است در حالی که اثر متقابل دما و دبی بر روی مدت زمان خشک شدن معنی‌دار نشده است. مقایسه میانگین زمان خشک شدن (جدول ۳) نشان می‌دهد که

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس متغیرها برای پارامتر زمان و آهنگ خشک شدن

Table2- Results of analysis of variance for drying time and drying rate

میانگین مربعات Mean squares		درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Source of variation
آهنگ خشک شدن Drying rate	زمان خشک شدن Drying time		
$4.167 \times 10^{-5}^{**}$	$36220.778^{**}$	2	دما Temperature
$5.439 \times 10^{-5}^{**}$	$25327^{**}$	2	دبی Flow rate
$2.903 \times 10^{-7}^{ns}$	$25327^{n.s}$	4	دما×دبی Temperature×Flow rate
$3.595 \times 10^{-6}$	93.481	19	خطا Error
		27	کل Total

\*\* Significant at P<0.01  
ns Not significant

\*\* وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪  
ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های زمان خشک شدن ذرت (دقیقه)

Table3- Comparison of corn drying time averages (min)

میانگین average	دما (سلسیوس) Temperature (°C)			دبی هوا (کیلوگرم بر دقیقه) Air flow rate (kg min <sup>-1</sup> )
	70	60	50	
389.67 <sup>C</sup>	320	391	458	1
326.33 <sup>B</sup>	277	313	389	1.4
284.33 <sup>A</sup>	221	281	351	1.8
	272.67 <sup>a</sup>	328.33 <sup>b</sup>	399.33 <sup>c</sup>	میانگین Average

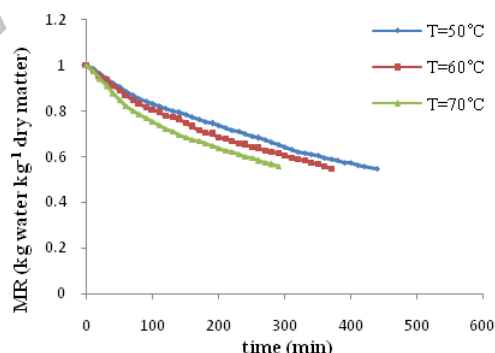
افزایش دما موجب شیب بیشتر منحنی‌های به‌دست آمده در مورد تغییرات رطوبت و آهنگ خشک شدن گشته و بیان‌گر سرعت بالاتر فرآیند می‌باشد (شکل های ۲، ۳ و ۴). همان‌طور که مشاهده می‌گردد بیش‌ترین زمان خشک شدن مربوط به دبی ۱ kg min<sup>-1</sup> و دمای ۵۰ °C می‌باشد که برای انجام فرآیند در این تیمار ۴۴۸ دقیقه زمان صرف شد. همچنین کم‌ترین زمان خشک شدن مربوط به دبی ۱/۸ kg min<sup>-1</sup> و دمای ۷۰ °C می‌باشد که مدت زمان ثبت شده برای این تیمار ۲۱۶ دقیقه بود.

افزایش دبی از ۱ به ۱/۴ و ۱/۸ نیز به‌ترتیب باعث کاهش ۱۶/۲٪ و ۱۲/۸٪ زمان خشک شدن و افزایش ۱۶/۴٪ و ۲۳/۷٪ آهنگ آن ذرت گردید. با افزایش دبی هوا به‌دلیل افزایش حجم هوای عبوری از روی محصول، ظرفیت هوا برای جذب رطوبت آن بیشتر شده آهنگ خشک شدن افزایش یابد و منحنی‌های به‌دست آمده از تغییرات نسبت رطوبت محصول در واحد زمان دارای روندهای کاهشی قابل توجهی باشند نتایج حاضر با تحقیقات انجام شده قبلی (Doymaz and Pala, 2003; Panchariya *et al.*, 2002).

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های آهنگ خشک شدن ذرت (کیلوگرم بر دقیقه)

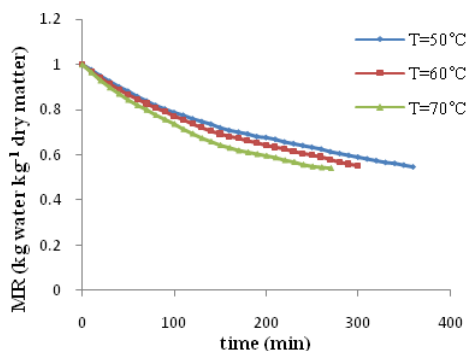
Table4- Comparison of corn drying rate averages (kg min<sup>-1</sup>)

میانگین average	دما (سلسیوس) Temperature (°C)			دبی هوا (کیلوگرم بر دقیقه) Air flow rate (kg min <sup>-1</sup> )
	70	60	50	
0.00312 <sup>C</sup>	0.00383	0.00311	0.00264	1
0.00367 <sup>B</sup>	0.00446	0.00374	0.00308	1.4
0.00469 <sup>A</sup>	0.00552	0.00479	0.004	1.8
	0.00451 <sup>a</sup>	0.00376 <sup>b</sup>	0.00614 <sup>c</sup>	میانگین average

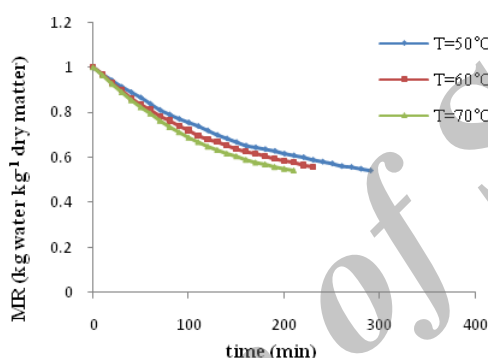


شکل ۲- تغییرات نسبت رطوبت با زمان در دبی ۱ کیلوگرم بر دقیقه

Fig.2. Variation of moisture ratio with drying time at 1 kg min<sup>-1</sup> air flow rate



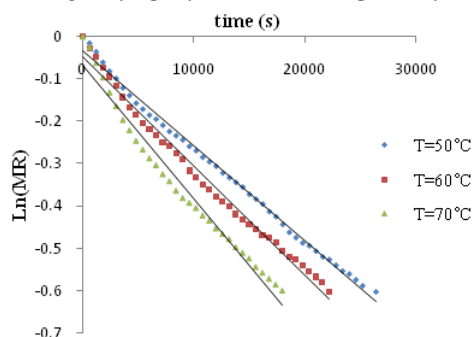
شکل ۳- تغییرات نسبت رطوبت با زمان در دبی ۱/۴ کیلوگرم بر دقیقه  
**Fig.3.** Variation of moisture ratio with drying time at 1.4 kg min<sup>-1</sup> air flow rate



شکل ۴- تغییرات نسبت رطوبت با زمان در دبی ۱/۸ کیلوگرم بر دقیقه  
**Fig.4.** Variation of moisture ratio with drying time at 1.8 kg min<sup>-1</sup> air flow rate

محاسبات نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی بین ضریب نفوذ مؤثر با دما و سرعت هوای عبوری از محفظه خشک‌کن وجود دارد. با توجه به شکل ۵ در محفظه خشک‌کن، میزان ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دمای هوا افزایش می‌یابد. پایین‌ترین دما و دبی هوای خروجی سبب کمترین ضریب نفوذ شده و بیشترین مقدار ضریب نفوذ در بالاترین دما و دبی هوا اتفاق افتاد.

شکل ۵ روند تغییرات  $\ln(MR)$  را نسبت به زمان در دماهای تحقیق برای دبی  $1 \text{ kg min}^{-1}$  نشان می‌دهد. با افزایش دما و سرعت هوای عبوری از محفظه خشک‌کن، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش می‌یابد. افزایش دما و سرعت هوا در محفظه خشک‌کن باعث انتقال جرم و گرمای بالاتری شده و موجب کاهش شدیدتر رطوبت می‌گردد.



شکل ۵- مقادیر  $\ln(MR)$  در مقابل زمان برای دبی هوای ۱ کیلوگرم بر دقیقه  
**Fig.5.**  $\ln(MR)$  values versus time for 1 kg min<sup>-1</sup> air flow rate

جدول ۵- مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک‌کن

Table 5- Values of effective diffusivity for different dryer conditions

رگرسیون R <sup>2</sup>	ضریب نفوذ (متر مربع بر ثانیه) D <sub>eff</sub> (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	شعاع (متر) r (m)	دبی هوا (کیلوگرم بر دقیقه) Air flow rate (kg min <sup>-1</sup> )	دما (سلسیوس) Temperature (°C)
0.9951	3.47258×10 <sup>-11</sup>		1	
0.9876	4.0842×10 <sup>-11</sup>	3.9142×10 <sup>-3</sup>	1.4	50
0.9783	5.38041×10 <sup>-11</sup>		1.8	
0.9884	3.76276×10 <sup>-11</sup>		1	
0.9848	4.61601×10 <sup>-11</sup>	3.8006×10 <sup>-3</sup>	1.4	60
0.9771	6.01076×10 <sup>-11</sup>		1.8	
0.9739	4.68751×10 <sup>-11</sup>		1	
0.9773	5.81×10 <sup>-11</sup>	3.8354×10 <sup>-3</sup>	1.4	70
0.9794	7.34352×10 <sup>-11</sup>		1.8	

و مدل دوجمله‌ای به دلیل بالاتر بودن شاخص R<sup>2</sup> و کمتر بودن میزان RMSE با دقت بیشتری نسبت به مدل نیوتن، فرآیند خشک‌شدن دانه‌های ذرت را پیش‌بینی کردند. نتایج با مطالعات مشابه قبلی نیز مطابقت می‌کند (Mohapatra and Rao, 2005). در بین چهار مدل پیچ، میدلی، لگاریتمی و دوجمله‌ای، مدل پیچ و مدل لگاریتمی به دلیل اینکه دارای ضرایب کمتری‌اند و همچنین از دقت خوبی در پیش‌بینی نسبت رطوبت ذرت برخوردارند توصیه می‌شود. میدلی و کیوکاک مدل لگاریتمی را برای پیش‌بینی میزان رطوبت ذرت و پسته در حین فرآیند خشک شدن مناسب می‌دانند (Midili and Kucuk, 2003).

به عنوان نمونه جدول ۷ ضرایب دو مدل پیچ و لگاریتمی را در فرآیند خشک شدن ذرت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضرایب مدل‌ها رابطه مشخصی با دما دارند و روند تغییرات آن‌ها با دبی قابل پیش‌بینی نیست. با بررسی این مدل‌ها، مدل لگاریتمی دارای شاخص‌های آماری بهتری نسبت به مدل پیچ بود و ضرایب آن رفتار قابل مشخص‌تری نسبت به تغییرات دما داشت. بنابراین، این مدل جهت پیش‌بینی روند تغییرات نسبت رطوبت بر اساس دما و دبی هوا در زمان معین انتخاب شد.

در نهایت ثابت‌های مدل لگاریتمی در مقابل دما (T) و دبی هوا (D) با رگرسیون چندگانه به دست آمد که در جدول ۸ آمده است. در روابط موجود در جدول ۸، دما بر حسب درجه سلسیوس و دبی هوا بر حسب کیلوگرم بر دقیقه آمده است.

با قرار دادن ضرایب و ثابت‌ها به صورت تابعی از دما و دبی هوای خشک‌کن، مدل نهایی نسبت تغییرات رطوبت در خشک شدن ذرت به صورت رابطه (۹) به دست آمد.

$$MR = (0.2643 + 0.000235T + 0.8461 \frac{D}{m} + 0.000117T^2 + 0.3066 \frac{D^2}{m^2} - 0.02132T \frac{D}{m}) \exp [ -(-0.00231 + 7.691T - 5.722 \times 10^{-5} \frac{D}{m} - 1.645 \times 10^{-8} T^2 + 8.731 \times 10^{-5} \frac{D^2}{m^2} - 2.149 \times 10^{-6} T \frac{D}{m}) ] + -0.859 + 99.544/T + 1.429 \frac{D}{m} - 1739.5/T^2 - 0.328 \frac{D^2}{m^2} - 60.22/(T \times \frac{D}{m}) \quad (9)$$

مقادیر مختلف میزان ضریب پخش مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول ۵ آمده است.

همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود با افزایش دما و دبی هوا در فرآیند خشک شدن دانه‌های ذرت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یک روند افزایشی دارد که تأثیر دما در این امر بارزتر است. در محدوده دمایی ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت ذرت از  $1.0 \times 10^{-11}$  تا  $7/34352 \times 10^{-11}$  مجذور متر بر ثانیه تغییر می‌کند. دلیل وقوع این مسئله تأثیر بارز دما و دبی هوا در ایجاد جنبش ملکولی و مکش سطحی بیشتر و افزایش ضریب مذکور می‌باشد. نتایج حاصل با تحقیقات انجام گرفته هم‌خوانی دارد. در تحقیقات انجام گرفته برای ذرت در محدوده دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت بین  $3/6 \times 10^{-11}$  تا  $11 \times 10^{-11}$  (Mujumdar, 2000) و در محدوده دمایی ۵۵ تا ۷۵ درجه سلسیوس  $1/768 \times 10^{-11}$  تا  $9/488 \times 10^{-11}$  به دست آمد (Doymaz, 2003) and. میزان انرژی فعال‌سازی برای ذرت نیز در سه دبی ۱، ۴ و  $1/8 \text{ kg min}^{-1}$  به ترتیب برابر با ۱۴/۲۹۳، ۱۶/۱۹۳ و  $13/76 \text{ kJ mol}^{-1}$  به دست آمد که با تحقیقات کورا و همکاران هم‌خوانی دارد (Correa et al., 2011).

#### مدل‌سازی سینتیک خشک شدن

مدل‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن در جدول ۱ آمده است. از نرم‌افزار spss 16.0 جهت مدل‌سازی سینتیک خشک شدن ذرت استفاده شد. ضریب رگرسیون و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها در مدل‌های مورد استفاده در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌ها نشان داد که تقریباً همه مدل‌ها مناسبند، اما مدل میدلی، مدل پیچ، مدل لگاریتمی



**جدول ۶-** تحلیل رگرسیونی (ضریب رگرسیون و ریشه متوسط مربع خطا) پنج مدل به کار گرفته در تحقیق  
**Table6-** Regression analysis ( $R^2$  and RMSE) of the five drying models used in the study

تیمار	شاخص آماری	نیوتن	پیچ	میدلی	لگاریتمی	دوجمله‌ای
Treatment	Statistical index	Newton	Page	Midilli	Logarithmic	Two term
$T_1 m_1$	$R^2$	0.983	0.999	0.999	0.997	0.999
	RMSE	4.983	3.492	2.491	2.852	2.472
	$R^2$	0.961	0.998	0.999	0.998	0.999
$T_1 m_2$	RMSE	4.498	3.183	2.227	2.584	2.238
	$R^2$	0.964	0.995	0.999	0.999	0.999
	RMSE	3.978	2.814	2.028	2.298	1.994
$T_1 m_3$	$R^2$	0.968	0.999	0.999	0.999	0.999
	RMSE	4.453	3.214	2.261	2.624	2.273
	$R^2$	0.965	0.998	0.999	0.999	0.999
$T_2 m_1$	RMSE	4.132	2.923	2.044	2.387	2.067
	$R^2$	0.962	0.995	0.999	0.999	0.998
	RMSE	3.646	2.579	1.851	2.106	1.824
$T_2 m_2$	$R^2$	0.937	0.995	0.998	0.997	0.999
	RMSE	4.039	2.859	2.046	2.334	2.014
	$R^2$	0.963	0.995	0.999	0.999	0.999
$T_2 m_3$	RMSE	3.758	2.659	1.846	2.171	1.883
	$R^2$	0.973	0.994	0.999	0.999	0.999
	RMSE	3.414	2.415	1.684	1.972	1.718

**جدول ۷-** ضرایب مدل رگرسیونی پیچ و لگاریتمی در شرایط مختلف خشک کن  
**Table7-** Coefficients of Page and logarithmic models for different dryer conditions

تیمار	k	n	a	k	c
Treatment					
$T_1 m_1$	$1.235 \times 10^{-4}$	0.835	0.663	$4.086 \times 10^{-5}$	0.323
$T_1 m_2$	$2.834 \times 10^{-4}$	0.767	0.542	$4.577 \times 10^{-5}$	0.451
$T_1 m_3$	$2.983 \times 10^{-4}$	0.785	0.556	$9.904 \times 10^{-5}$	0.447
$T_2 m_1$	$2.327 \times 10^{-4}$	0.785	0.567	$6.46 \times 10^{-5}$	0.424
$T_2 m_2$	$2.957 \times 10^{-4}$	0.778	0.558	$8.467 \times 10^{-5}$	0.436
$T_2 m_3$	$3.758 \times 10^{-4}$	0.774	0.544	$1.226 \times 10^{-4}$	0.459
$T_3 m_1$	$5.215 \times 10^{-4}$	0.721	0.508	$1.071 \times 10^{-4}$	0.448
$T_3 m_2$	$3.497 \times 10^{-4}$	0.778	0.559	$1.102 \times 10^{-4}$	0.442
$T_3 m_3$	$2.974 \times 10^{-4}$	0.814	0.580	$1.309 \times 10^{-4}$	0.428

**جدول ۸-** رابطه ضرایب مدل لگاریتمی با دما و دبی هوا

**Table8-** Relation of the logarithmic model coefficients with temperature and flow rate

رگرسیون $R^2$	رابطه Relation	ضرایب Coefficients
0.995	$0.2643 + 0.000235T + 0.8461/m - 0.000117T^2 + 0.3066/m^2 - 0.02132T/m$	a
0.996	$-0.00231 + 7.691T - 5.722 \times 10^{-5} m - 1.645 \times 10^{-8} T^2 + 8.731 \times 10^{-5} m^2 - 2.149 \times 10^{-6} T \times m$	k
0.992	$-0.859 + 99.544/T + 1.429/m - 1739.5/T^2 - 0.328/m^2 - 60.22/(T \times m)$	c

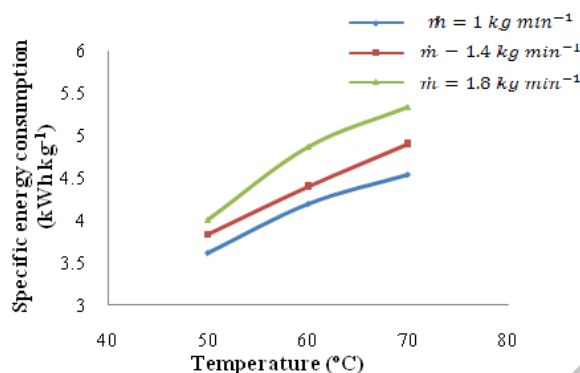
افزایش دما و سرعت هوای ورودی، میزان انرژی که صرف خشک کردن ذرت می‌شود را افزایش می‌دهد. افزایش دمای هوا و سرعت هوای ورودی، آنتالپی هوای ورودی را افزایش داده، افزایش آنتالپی میزان انتقال جرم و حرارت را افزایش می‌دهد. در نتیجه مصرف انرژی افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با

#### انرژی مصرفی

دستگاه خشک‌کن مورد استفاده دارای کنتوری جهت اندازه‌گیری میزان مصرف انرژی بود که به هیتر و دمنده آن متصل بود. با قرائت عدد کنتور در ابتدا و انتهای فرایند خشک شدن، میزان برق مصرفی دستگاه به دست می‌آید. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است.



افزایش دما و دبی هوای خشک‌کن، انرژی مصرفی روندی صعودی دارد که با مطالعات قبلی هم‌خوانی دارد (Celma et al., 2012).



شکل ۶- انرژی مخصوص مصرفی در تیمارهای تحقیق

Fig.6. Specific energy consumption at treatments of study

میزان انرژی فعال‌سازی در محدوده ۱۳/۷۶۱ تا ۱۶/۱۹۳ کیلوژول بر مول و ضریب نفوذ رطوبت ذرت بین  $3/47258 \times 10^{-11}$  و  $7/34352 \times 10^{-11}$  مترمربع بر ثانیه به دست آمد که افزایش دمای هوای خشک‌کن از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس نقش مهمی در افزایش بیش از دو برابری آن داشت. برای مدل‌سازی فرآیند خشک شدن لایه نازک ذرت، از مدل لگاریتمی به دلیل بالا بودن شاخص  $R^2$ ، پایین بودن RMSE و همچنین سادگی رابطه آن نسبت به سایر مدل‌ها استفاده شد.

کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار انرژی مخصوص مصرفی به ترتیب مربوط به تیمار  $T_2 \dot{m}_3$  برابر با  $3/61 \text{ kWh kg}^{-1}$  و  $T_3 \dot{m}_3$  به میزان  $5/34 \text{ kWh kg}^{-1}$  می‌باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

اثر افزایش دما و دبی بر روی خشک شدن لایه نازک ذرت و انرژی مصرفی آن مورد بررسی قرار گرفت. افزایش دما و دبی موجب کاهش مدت زمان خشک شدن و افزایش انرژی مصرفی آن گردید.

### منابع

1. Akpınar, E. K., A. Midilli, and Y. Bicer. 2003-b. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management* 44: 1689-1705.
2. Ayensu, A. 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy* 59: 121-126.
3. Babalis, S. J., and V. G. Belessiotis. 2004. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying. *Food Engineering* 65: 449-458.
4. Brooker, D. B., F. W. Baker-Arkema, and C. W. Hal. 1992. *Drying and storage of grain and oilseeds*. Van Nostrand Reinhold. New York.
5. Celma, A. R., F. Cuadros, and F. López-Rodríguez. 2012. Convective drying characteristics of sludge from treatment plants in tomato processing industries. *Food and Bioproducts Processing* 90: 224-234.
6. Correa, P. C., F. M. Botelho, G. H. H. Oliveira, A. L. D. Goneli, O. Resende, and S. C. Campos. 2011. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. *Acta scientiarum. Agronomy* 33.
7. Crank, J. 1975. *Mathematics of diffusion*. Oxford university press. London.
8. Dandamrongrak, R., G. Youngand, and R. Mason. 2002. Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Food Engineering* 95: 139-146.
9. Diamente, L. M., and P. A. Munro. 1993. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 51: 271-276.
10. Doymaz, I. 2007. Air drying characteristics of tomatoes. *Food Engineering*. 78: 1291-1297.

11. Doymaz, I., and M. Pala. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *Food Engineering* 60: 125-130.
12. Eckhoff, S. R. 2004. Wet milling. In: Wrigley, C., Walker, C.E. (Eds.), *Encyclopedia of Grain Science*. Elsevier Ltd: 30-46.
13. Gazor, H. R., and S. Minaee, 2008. Influence of temperature and air velocity on canola drying kinetic. 5<sup>th</sup> National conference on agricultural machinery engineering and mechanization. Mshhad, Iran. (In Farsi).
14. Gorjian, S. 2009. Modelling of thin layer drying kinetics of barberry fruit. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Farsi).
15. Li, H., and R. V. Morey. 1984. Thin-layer drying of yellow dent corn. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 27: 581-585.
16. Li, J. S., and S. K. Vassal. 2004. Quality protein maize. In: Wrigley, C., Corke, H., Walker, C.E. (Eds.), *Encyclopedia of grain science*. Oxford, Elsevier: 212-216.
17. Menges, H. O., and C. Ertekin. 2005. Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. *Food Engineering* 77: 119-125.
18. Midili, A., and H. Kucuk. 2003. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management* 44: 1111-1122.
19. Milind, V., S. V. Rane., R. Kota., and R. Roshini. 2005. Energy efficient liquid desiccant-based dryer. *Applied Thermal Engineering* 25: 769-781.
20. Mohapatra, D., and P. S. Rao. 2005. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Food Engineering* 66: 513-518.
21. Mujumdar, A. S. 1997. Industrial drying of foods. in: G.J.B. Christopher (Ed.), *Drying fundamentals*. Blakie academic and professional publications.
22. Mujumdar, A. S. 2000. *Drying technology in agriculture and food sciences*. Science publisher, Inc. Enfield (NH), USA.
23. Omid, M., A. R. Yadollahinia, S. Rafiee. 2010. Development of a kinetic model for thin layer drying of Paddy, Fajr variety. *Biosystem Engineering of Iran* 41: 153-160. (In Farsi).
24. Ozbek, B., and G. Dadali. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Food Engineering* 83: 541-549.
25. Panchariya, P. C., D. Popovic, and A. L. Sharma. 2002. Thin-layer modeling of black tea drying process. *Food Engineering* 52: 349-357.
26. Rao, P. S., S. Bal, and T. K. Goswami. 2007. Modelling and optimization of drying variables in thin layer drying of parboiled paddy. *Food Engineering*, 78 (2): 480-487.
27. Simal, S., A. Femenia, M. C. Garau, and C. Rossello. 2005. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of Kiwi Fruit. *Food Engineering* 66: 323-328.