

تأثیر سامانه جاذب رطوبت بر فرایند خشک شدن لایه نازک ذرت

سجاد عباسی^۱، سعید مینایی^{۲*}، محمدهادی خوش تقاضا^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس تهران

* ایمیل نویسنده مسئول: minae@modares.ac.ir

چکیده

در این پژوهش با به کارگیری سامانه جاذب رطوبت در یک دستگاه خشک‌کن بازگردشی، اثر استفاده از جاذب رطوبت بر فرآیند خشک شدن ذرت به صورت لایه نازک بررسی شد. با استفاده از طرح آماری کاملاً تصادفی، تأثیر چرخ جاذب، دمای خشک‌کردن و دبی هوای گرم بر پارامترهای زمان خشک‌کردن، ضریب نفوذ رطوبت و انرژی فعال‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه سطح دمای هوا ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، سه سطح دبی هوا ۱، ۱/۴ و ۱/۸ کیلوگرم بر دقیقه با و بدون بکارگیری سامانه جاذب رطوبت انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که تأثیر سامانه جاذب، دما و دبی هوا و اثر متقابل دما و دبی هوا بر پارامترهای فرایند خشک شدن معنی‌دار است. همچنین با استفاده از سامانه جاذب و افزایش سرعت و دمای هوا، زمان خشک‌شدن کاهش یافت. ضریب نفوذ رطوبت ذرت در سطوح مختلف آزمایش از $3/47258 \times 10^{-11}$ تا $8/18826 \times 10^{-10}$ متر مربع بر ثانیه متغیر بود. انرژی فعال‌سازی نیز در حدود $14/2931$ تا $17/6770$ کیلوژول بر مول محاسبه گردید. بکارگیری سامانه جاذب رطوبت باعث کاهش $9/75\%$ زمان خشک شدن و افزایش $7/85\%$ آهنگ خشک شدن گردید. بهره‌گیری از سامانه جاذب منجر به خروج سریعتر رطوبت از ماده گردیده و کارایی خشک‌کن بالا می‌رود و مشکل فاسد شدن مواد کشاورزی در انبار یا مزرعه که در انتظار خشک شدن هستند کاهش خواهد یافت.

کلمات کلیدی: چرخ جاذب، خشک‌کن بازگردشی، ذرت

مقدمه

خشک کردن عملی است که در آن 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. مشخصات خشک‌کن، دما و سرعت نسبی هوا، زمان خشک کردن، رطوبت اولیه و نهایی ماده و نوع آن روی کیفیت ماده تأثیرگذار است. در مورد ذرت، دمای بالا سبب افزایش شکستگی و ترک، بیرنگ شدن مغز آن، کاهش قابلیت جدا شدن نشاسته و بازیابی روغن، پروتئین و از بین رفتن قوه نامیه آن می‌گردد. از سوی دیگر کاهش دما باعث افزایش زمان خشک شدن می‌گردد که برای دانه مناسب نمی‌باشد (Chakraverty 1988a, b).

هوای خروجی از خشک‌کن‌ها دارای دمای بالاتر از دمای محیط است در اگرچه هنوز از رطوبت اشباع نشده است. تحقیقات نشان می‌دهد که انرژی هوای خروجی از خشک‌کن‌ها بین ۷۰ تا ۱۷۴ کیلوکالری بر هر کیلوگرم آب تبخیر شده از محصول می‌باشد. به همین منظور تلاش‌هایی در جهت کاهش مصرف انرژی در خشک‌کن‌های هوای گرم صورت گرفته است. بازگرداندن بخشی از هوای خروجی از مخزن خشک‌کن به ورودی آن و استفاده از این هوا در فرایند خشک کردن (خشک‌کن‌های بازگردشی) یکی از این موارد است (Iguaz *et al.* 2002). از طرف دیگر مقدار رطوبت هوای بازگردشی بالاتر از رطوبت هوای محیط می‌باشد زیرا مقداری از رطوبت ماده را به خود جذب کرده است. در نتیجه فرایند خشک‌شدن در مدت زمان بیشتری انجام می‌گیرد (Das *et al.* 2001). اخیراً کاهش رطوبت هوا با استفاده از یک سیستم جاذب رطوبت و انتقال آن به خشک‌کن به منظور خشک کردن محصول، مورد نظر پژوهشگران در این زمینه بوده است. به دلیل مزیت‌های بسیار در استفاده از سیستم‌های جاذب رطوبت همچون هزینه پایین ساخت آن‌ها، عدم تولید گازهای مخرب و پایین بودن انرژی مورد نیاز برای احیا^۱، استفاده از آن‌ها گسترش یافته است و می‌توان آن‌ها را در خشک‌کن‌های هوای داغ به کار برد. همچنین انرژی لازم برای احیای جاذب‌های رطوبت را می‌توان از گرمای خورشید یا بقایای گیاهی تأمین کرد (Madhiyanon *et al.* 2007).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که خشک کردن در دمای پایین با بکارگیری سیلیکاژل مخصوصاً برای محصولات حساس مانند قارچ باعث کاهش سرعت واکنش‌های Millard می‌شود (Seyhan and Evranuz 2000). هودالی و همکاران یک خشک‌کن خورشیدی شامل کلکتور خورشیدی و سیستم جاذب طراحی کرده و اثر جاذب سیلیکاژل را روی خشک‌شدن زردآلو بررسی کردند. نتایج نشان داد که زمان خشک شدن از ۵۲ ساعت به ۴۴ ساعت کاهش یافته و کیفیت زردآلوی خشک نیز نسبت به زمانی که از جاذب استفاده نمی‌شد افزایش یافت. آن‌ها دریافتند زمانی که خشک کردن در دماهای کمی بالاتر از دماهای محیط انجام می‌گیرد استفاده از جاذب‌های رطوبت مفید واقع می‌شود و در نهایت باعث حفظ کیفیت محصول می‌گردد و همچنین در مراحل پایانی خشک کردن، زمانی که آهنگ خشک شدن کاهش می‌یابد بسیار با اهمیت می‌باشد (Hodali and Bougard 2001). آلدیس و همکاران (Aldis *et al.* 1980) خشک‌کن مجهز به جاذب سیلیکاژل را که با انرژی خورشیدی احیا می‌شد ساخته و با خشک کردن ذرت مورد ارزیابی قرار دادند. زمان خشک شدن با این روش کاهش یافت. نتایج پژوهشی دیگر که در فرایند خشک کردن نارگیل با افزودن سیستم جاذب در مسیر هوای بازگشتی خشک‌کن بازگردشی با جریان هوای داغ انجام شد، نشان داد که این امر باعث کاهش ۲۵٪ زمان خشک شدن و افزایش آهنگ آن می‌گردد. ولی مصرف انرژی ۸۰٪-۴۰٪ افزایش یافت و دلیل آن انرژی مورد نیاز برای احیای سیلیکاژل بود. همچنین کیفیت رنگ نارگیل خشک شده نسبت به خشک‌کن بدون سیستم جاذب بهتر بود (Madhiyanon *et al.* 2007).

¹ Regeneration

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 برای نگهداری طولانی مدت آن وجود دارد. همچنین با توجه به بررسی‌های به عمل آمده مشخص شده است که پژوهشی در مورد خشک کردن ذرت با استفاده از سیستم جاذب رطوبت در مسیر هوای بازگردشی صورت نگرفته است. بنابراین اهداف این تحقیق عبارتند از مطالعه و بررسی تاثیر سرعت و دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن و اثر سامانه جاذب رطوبت بر سینتیک خشک‌شدن لایه نازک ذرت.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق با استفاده از یک خشک‌کن آزمایشگاهی (شکل ۱)، در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس در سه دمای $(T_1) 50^\circ\text{C}$ و $(T_2) 60^\circ\text{C}$ و $(T_3) 70^\circ\text{C}$ درجه سلسیوس و سه دبی هوای گرم $1(\dot{m}_1)$ ، $1/4(\dot{m}_2)$ و $1/8(\dot{m}_3)$ کیلوگرم بر دقیقه، در سه تکرار اقدام به خشک کردن محصول ذرت به صورت لایه نازک با و بدون استفاده از سامانه چرخ جاذب رطوبت گردید.



شکل ۱- خشک‌کن مورد استفاده در آزمایش‌ها

ابتدا آزمایش‌ها بدون استفاده از چرخ جاذب رطوبت انجام شد. هوا پس از ورود به مخزن خشک‌کن و عبور از بین محصول، رطوبت آن را کاهش داده و سپس 60% آن دوبار به ورودی خشک‌کن بازگردانده می‌شود و بقیه این هوا از سیستم خارج می‌گردد. به این ترتیب 40% از هوای خشک‌کن از محیط گرفته می‌شود. اما در حالتی که چرخ جاذب رطوبت به خشک‌کن افزوده می‌شود، درصدی از هوا که به ورودی خشک‌کن بازگردانده می‌شود (60%)، قبل از ترکیب با هوای محیط وارد بخش عامل چرخ جاذب رطوبت می‌شود.

در ابتدای آزمایش برای تعیین رطوبت اولیه محصول از رطوبت‌سنج غلات PM-600 ساخت شرکت Kett ژاپن استفاده گردید که رطوبت اولیه محصول 26% بر پایه‌تر بدست آمد. در حین انجام آزمایش اندازه‌گیری تغییرات دمای ورودی به وسیله IC

حرارتی LM 35 ساخت چین با دقت $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ، سرعت هوای ورودی به محفظه خشک کن با هواسنج توربینی (Anemometer, Lutron-YK,80AM Taiwan) با دقت $\pm 0.1 \text{ m s}^{-1}$ 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. 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 بدست 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 مقایسه با 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 دانه های ذرت با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد (Özbek and Dadali 2007).

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

در این رابطه، (M_{t+dt}) مقدار رطوبت در زمان $t+dt$ ، (d.b)، M_t میزان رطوبت در زمان t و (d.b) t زمان خشک شدن (min) می‌باشد.

قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار در اشکال کروی توسط کراک (Crank 1979) می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند. معادله انتقال رطوبت در رابطه ۴ آمده است.

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

در اینجا، MR نسبت رطوبت (بی بعد)، M_t میزان رطوبت در هر لحظه (d.d.b)، M_e میزان رطوبت تعادلی (d.d.b) و M_0 میزان رطوبت اولیه (d.d.b)، n تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک شدن (s)، D_{eff} ضریب نفوذ موثر $(\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$ ، r (m) شعاع کره می‌باشد. معادله بالا در مدت زمان‌های طولانی خشک شدن به صورت رابطه ۵ خلاصه می‌شود:

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

از طرفین معادله (5) لگاریتم گرفته می شود.

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

با رسم لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در طول آزمایش نسبت به زمان، خطی با شیب k_1 بدست می آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t در رابطه (6)، ضریب نفوذ موثر را می توان از رابطه (7) محاسبه کرد.

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

برای هر تیمار از ضریب نفوذهای بدست آمده میانگین گرفته و نتیجه اعلام می گردد. با توجه به تابعیت ضریب نفوذ با دما، برای تعیین انرژی فعال سازی هر تیمار از رابطه آرنیوس (5) استفاده شد (Akpınar et al. 2003, Babalis and Belessiotis 2004).

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

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

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به تاثیر دما و دبی هوا و سامانه جاذب رطوبت بر زمان و آهنگ خشک شدن ذرت در جدول ۱ آمده است. نتایج تجزیه واریانس زمان خشک شدن نشان می دهد که اثر دبی، دما، چرخ جاذب و همچنین اثر متقابل دما و دبی هوا در سطح ۱٪ معنادار شده است. در حالیکه اثر متقابل دما و چرخ جاذب، دبی و چرخ جاذب و همچنین اثر متقابل سه گانه دما و دبی و چرخ جاذب معنی دار نشده است. همچنین نتایج تجزیه واریانس اثر دما و دبی هوا و همچنین چرخ جاذب رطوبت بر آهنگ خشک شدن نشان می دهد که تنها اثر دما و دبی هوا بر آهنگ خشک شدن اثر معنادار داشته و عوامل دیگر از جمله چرخ جاذب بر آهنگ خشک شدن اثر معناداری نداشتند.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس تاثیر دما و دبی هوا و بکارگیری چرخ جاذب رطوبت بر زمان و آهنگ خشک شدن ذرت

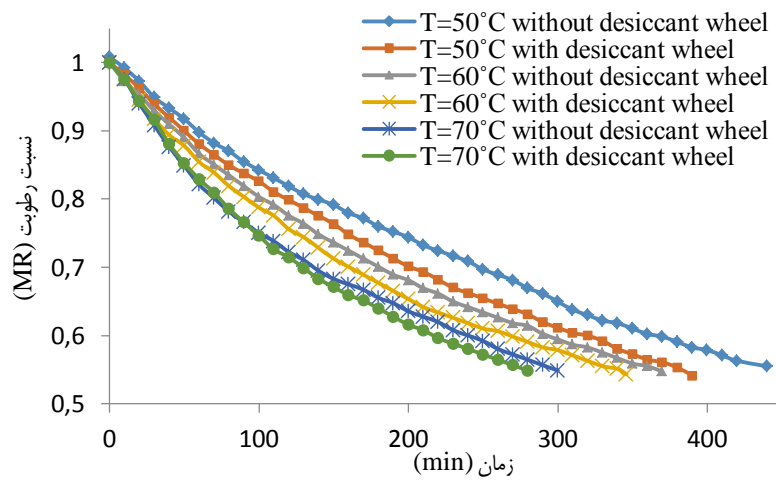
منابع تغییرات (SOV)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)
		زمان خشک شدن
		نرخ خشک شدن

$۸/۲۷۱ \times ۱۰^{-۵} **$	$۷۴۵۷۴/۱۳۰ **$	۲	دما
$۹/۸۰۴ \times ۱۰^{-۵} **$	$۹۲۵۹۰/۰۳۷ **$	۲	دبی
$۱/۲۰۲ \times ۱۰^{-۵} n.s$	$۶۶۳۶۰/۱۶۷ **$	۱	چرخ جاذب
$۷/۱۸۴ \times ۱۰^{-۷} n.s$	$۵۳۴/۰۷۴ **$	۴	دما×دبی
$۳/۰۳۱ \times ۱۰^{-۸} n.s$	$۲۸/۳۸۹ n.s$	۲	دما×چرخ جاذب
$۱/۶۸۹ \times ۱۰^{-۷} n.s$	$۶۹/۵۰۰ n.s$	۲	دبی×چرخ جاذب
$۱/۰۵۸ \times ۱۰^{-۷} n.s$	$۴۹/۵۵۶ n.s$	۴	دما×دبی×چرخ جاذب
$۳/۵۹۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۷۴/۴۸۱$	۳۶	خطا
		۵۳	کل

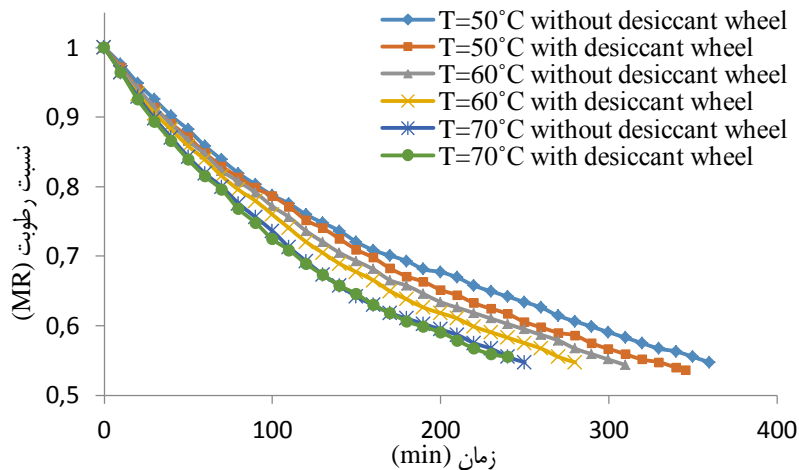
** وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪

n.s عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪

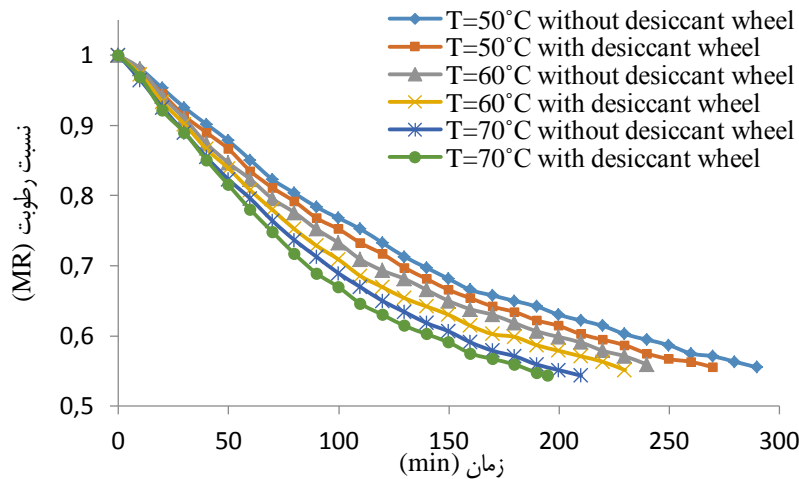
در اشکال ۲ تا ۴ منحنی خشک شدن ذرت در دماها و دبی‌های مختلف با و بدون سیستم جاذب رطوبت نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با بکارگیری این سامانه در مسیر هوای بازگشتی خشک‌کن، زمان خشک‌شدن در تمام تیمارها کاهش یافته است.



شکل ۲- مقایسه منحنی‌های خشک شدن ذرت با و بدون استفاده از جاذب رطوبت در دبی ۱ کیلوگرم بر دقیقه



شکل ۳- مقایسه منحنی‌های خشک شدن ذرت با و بدون استفاده از جاذب رطوبت در دبی ۱/۴ کیلوگرم بر دقیقه

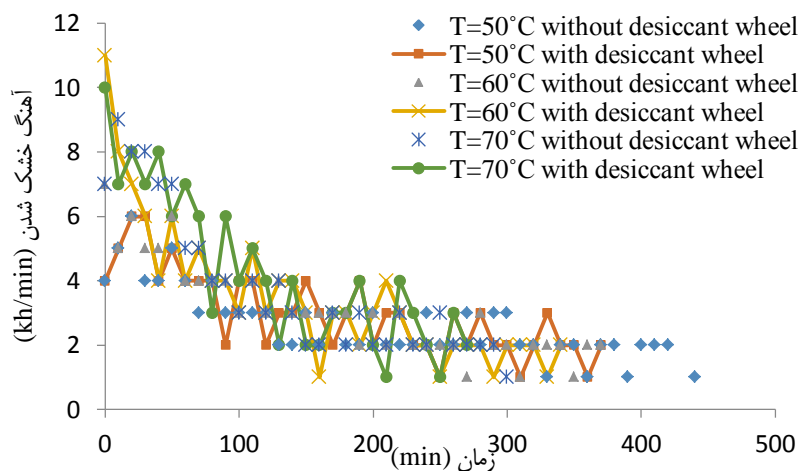


شکل ۴- مقایسه منحنی‌های خشک شدن ذرت با و بدون استفاده از جاذب رطوبت در دبی ۱/۸ کیلوگرم بر دقیقه

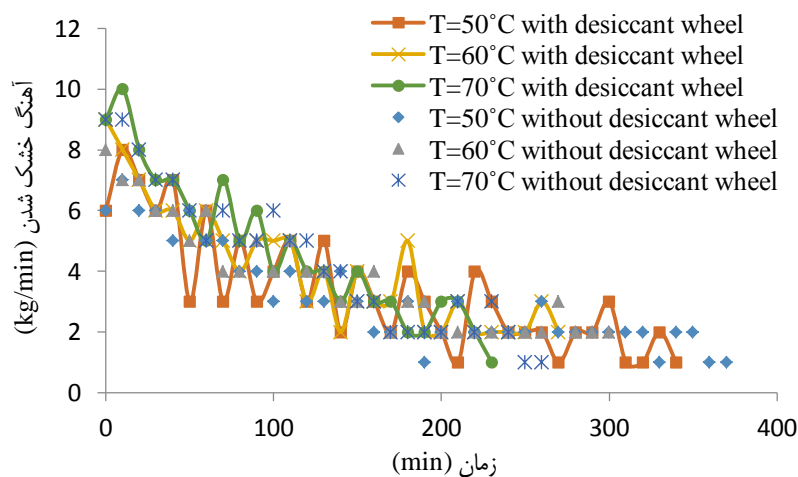
رطوبت هوا بعد از عبور از میان دانه‌های ذرت، به دلیل جذب رطوبت موجود در آن‌ها افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش فشار بخار هوا می‌شود. با بازگرداندن این هوا به ورودی خشک‌کن به منظور استفاده مجدد در این فرایند، رطوبت‌گیری از محصول به کندی انجام می‌گیرد و در نهایت منجر به افزایش زمان خشک‌شدن و کاهش آهنگ آن می‌شود (Iguaz et al. 2002). استفاده از سیلیکاژل در مسیر این هوا قبل از بازگشت آن به ورودی خشک‌کن موجب می‌شود که رطوبت آن جذب ماده جاذب گردد. در نتیجه فشار بخار آن کاهش و ظرفیت هوا برای جذب رطوبت از محصول داخل مخزن افزایش می‌یابد. به همین دلیل فرایند خشک کردن در مدت زمان کمتر و با سرعت بیشتری انجام می‌گردد (Seyhan and Evranuz 2000). بیشترین کاهش در مدت زمان خشک شدن در دو حالت با و بدون بکارگیری چرخ جاذب به ترتیب در دبی ۱kg/min و دمای ۵۰ °C (۷۳ دقیقه) و کمترین آن در دبی ۱/۸kg/min و دمای ۷۰ °C (۲۰ دقیقه) مشاهده شد.



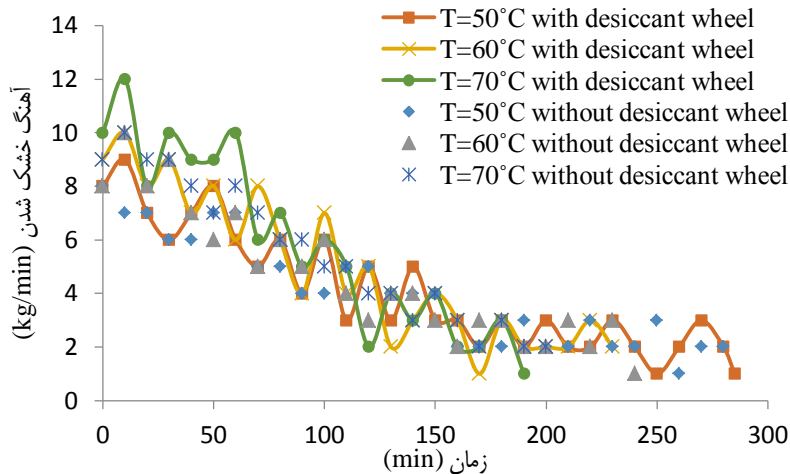
در اشکال ۵ تا ۷ آهنگ خشک شدن ذرت در دماها و دبی‌های مختلف با و بدون سیستم جاذب رطوبت مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در اثر استفاده از جاذب رطوبت در مسیر هوای بازگردشی آهنگ خروج رطوبت از دانه‌های ذرت افزایش داشته است. جذب رطوبت هوای بازگردشی سبب کاهش رطوبت آن گشته، بطوریکه ترکیب آن با هوای محیط موجب تشکیل هوایی با میزان رطوبت کمتر می‌گردد. در نتیجه فشار بخار هوا نسبت به زمانی که جاذب رطوبت در مسیر هوای بازگشتی قرار نگرفته، کاهش می‌یابد و همین امر، ظرفیت هوا در خارج کردن آب از محصول را افزایش می‌دهد و آهنگ خشک شدن بیشتر می‌گردد. با استفاده از چرخ جاذب رطوبت، سرعت انتقال رطوبت از قسمت درونی محصول افزایش یافته و محصول با شدت بیشتری رطوبت خود را از دست می‌دهد.



شکل ۵- مقایسه آهنگ خشک شدن ذرت با و بدون استفاده از جاذب رطوبت در دبی هوای ۱ کیلوگرم بر دقیقه



شکل ۶- مقایسه آهنگ خشک شدن ذرت با و بدون استفاده از جاذب رطوبت در دبی هوای ۱/۴ کیلوگرم بر دقیقه



شکل ۷- مقایسه آهنگ خشک شدن ذرت با و بدون استفاده از جاذب رطوبت در دبی هوای ۱/۸ کیلوگرم بر دقیقه

مقادیر مختلف میزان ضریب پخش مؤثر برای تیمارهای تحقیق با و بدون استفاده از سامانه جاذب رطوبت در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک‌کن با و بدون سامانه جاذب

با چرج جاذب			بدون چرج جاذب			دبی هوا	دما
رگرسیون	ضریب نفوذ	شعاع	رگرسیون	ضریب نفوذ	شعاع	Air flow rate	Temperature
R^2	$D_{eff} (m^2 s^{-1})$	$r (m)$	R^2	$D_{eff} (m^2 s^{-1})$	$r (m)$	$(kg min^{-1})$	$(^{\circ}C)$
0.9944	3.98151×10^{-11}		0.9951	3.47258×10^{-11}		1	
0.9860	4.54671×10^{-11}	3.9364×10^{-3}	0.9876	4.0842×10^{-11}	3.9142×10^{-3}	1.4	50
0.9777	5.56878×10^{-11}		0.9783	5.38041×10^{-11}		1.8	
0.9842	4.09105×10^{-11}		0.9884	3.76276×10^{-11}		1	
0.9871	5.05603×10^{-11}	3.7759×10^{-3}	0.9848	4.61601×10^{-11}	3.8006×10^{-3}	1.4	60
0.9689	6.12509×10^{-11}		0.9771	6.01076×10^{-11}		1.8	
0.9768	5.50785×10^{-11}		0.9739	4.68751×10^{-11}		1	
0.9823	6.25331×10^{-11}	3.9082×10^{-3}	0.9773	5.81×10^{-11}	3.8354×10^{-3}	1.4	70
0.9718	8.18826×10^{-11}		0.9794	7.34352×10^{-11}		1.8	

همانگونه ملاحظه می‌گردد با افزایش دما و دبی هوا در فرایند خشک شدن دانه‌های ذرت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یک روند افزایشی دارد. دلیل وقوع این مسئله تاثیر بارز دما و دبی هوا در ایجاد جنبش ملکولی و مکش سطحی بیشتر و افزایش ضریب مذکور می‌باشد که تاثیر دما در این امر بارزتر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقادیر ضریب نفوذ مؤثر با بکارگیری سیستم



جاذب رطوبت در خشک کن افزایش یافته است. دلیل این امر کاهش زمان خشک کردن به واسطه استفاده از چرخ جاذب رطوبت و به عبارت دیگر افزایش شیب منحنی فرایند خشک شدن می باشد که باعث افزایش این ضریب می شود. در محدوده دمایی ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت ذرت بدون چرخ جاذب رطوبت از $3/47258 \times 10^{-11}$ تا $7/34352 \times 10^{-11}$ مجذور متر بر ثانیه تغییر می کند در حالیکه مقدار آن با چرخ جاذب رطوبت در محدوده $3/98151 \times 10^{-11}$ تا $8/18826 \times 10^{-11}$ قرار دارد. 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 $8/3 \times 10^{-11}$ (Mujumdar 2000) و در محدوده دمای ۵۵ تا ۷۵ درجه سلسیوس $1/768 \times 10^{-11}$ تا $9/488 \times 10^{-11}$ بدست آمد (Doymaz and Pala 2003).

مقادیر انرژی فعال سازی (Ea) در خشک کردن دانه های ذرت در جدول ۳ آورده شده است. مقدار انرژی فعال سازی به دست آمده در خشک کردن ذرت، بدون بکارگیری جاذب رطوبت از ۱۳/۷۶۱ تا ۱۶/۱۹۲۹ و با بکارگیری آن ۱۴/۶۳۸۲ تا ۱۷/۶۷۷۰ کیلوژول بر مول متغیر بود. مقادیر انرژی فعال سازی گزارش شده توسط سایر پژوهشگران نیز با مقادیر بدست آمده در این تحقیق شباهت دارد. مقدار انرژی فعال سازی در خشک کردن ذرت ۲۹/۵۶ تا ۳۰/۵۶ کیلوژول بر مول بدست آمده است (Doymaz and Pala 2003).

جدول ۳ - مقادیر انرژی فعال سازی و ضریب همبستگی در دو حالت با و بدون استفاده از چرخ جاذب

R ²	m=1.8kg/min	R ²	m=1.4kg/min	R ²	m=1kg/min	
۰/۹۲۳۸	۱۳/۷۶۱	۰/۹۶۳۶	۱۶/۱۹۲۹	۰/۹۶۷۳	۱۴/۲۹۳۱	بدون استفاده از چرخ جاذب
۰/۹۰۱۸	۱۴/۸۷۴۳	۰/۹۵۷۵	۱۴/۶۳۸۲	۰/۹۱۱۸	۱۷/۶۷۷۰	با استفاده از چرخ جاذب

نتیجه گیری کلی

اثر استفاده از چرخ جاذب رطوبت در مسیر بازگردشی خشک کن بازگردشی هوای داغ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می دهد که در اثر استفاده از چرخ جاذب رطوبت زمان خشک شدن ۹/۷۵٪ کاهش و آهنگ خشک شدن ۷/۸۵٪ کاهش یافت. همچنین مشخص شد که چرخ جاذب رطوبت در سطوح پایین تر دما و دبی هوا مؤثرتر است و این ناشی از ویژگی جذبی مواد جاذب رطوبت است. بیشترین کاهش در مدت زمان فرایند برای دبی ۱kg/min و دمای ۵۰ °C (۱۵/۹٪) و کمترین آن مربوط به دبی ۱/۸kg/min و دمای ۷۰ °C (۸/۹٪) می باشد. همچنین بیشترین افزایش آهنگ خشک شدن در دبی ۱kg/min و دمای ۵۰ °C (۱۳/۶٪) و کمترین آن مربوط به دبی ۱/۸kg/min و دمای ۷۰ °C (۶/۹٪) می باشد. ضریب نفوذ مؤثر با بکارگیری سیستم جاذب رطوبت در خشک کن افزایش یافت. ضریب نفوذ رطوبت ذرت بدون چرخ جاذب رطوبت از $3/47258 \times 10^{-11}$

$3/47258 \times 10^{-11}$ تا $7/34352 \times 10^{-11}$ مجذور متر بر ثانیه تغییر می‌کند در حالیکه مقدار آن با چرخ جاذب رطوبت در محدوده $8/18826 \times 10^{-11}$ تا $3/98151 \times 10^{-11}$ بدست آمد.

منابع

- Akpinar E, Midilli A, Bicer Y. 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management* 44:1689-1705.
- Aldis DF, Burroughs R, Hughes JW. 1980. Evaluation of solar regeneration of silica gel and its use in grain drying. *Transactions of the ASAE* 23:1557-1563.
- Babalis SJ, Belessiotis VG. 2004. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering* 65:449-458.
- Chakraverty A. 1988a. Post harvest technology of cereals, pulses and oilseeds. Oxford 1988 & IBH Pub. Co.
- b. Post Harvest Technology of Cereals: Pulses and Oilseeds. Oxford & IBH Publishing Company.
- Crank J. 1979. *The Mathematics Diffusion*. Oxford Science Pub.
- Das S, Das T, Srinivasa Rao P, Jain RK. 2001. Development of an air recirculating tray dryer for high moisture biological materials. *Journal of Food Engineering* 50:223-227.
- Doymaz İ, Pala M. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering* 60:125-130.
- Hodali R, Bougard J. 2001. Integration of a desiccant unit in crops solar drying installation: optimization by numerical simulation. *Energy Conversion and Management* 42:1543-1558.
- Iguaz A, López A, Vírveda P. 2002. Influence of air recycling on the performance of a continuous rotary dryer for vegetable wholesale by-products. *Journal of Food Engineering* 54:289-297.
- Madhiyanon T, Adirekrut S, Sathitruangsak P, Soponronnarit S. 2007. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 46:282-290.



Mujumdar AS. 2000. Drying Technology in Agriculture and Food Sciences .Science publisher.

Özbek B, Dadali G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. Journal of Food Engineering 83:541-549.

Seyhan FG, Evranuz Ö. 2000. Low temperature mushroom (*A. bisporus*) drying with desiccant dehumidifiers. Drying Technology 18:433-445.