



استفاده از روش جمع آثار به منظور بررسی سینتیک خشک شدن بستر سیالی شلتوک

مجید خانعلی^{۱*}، زهرا خسروبیگی^۲ و شاهین رفیعی^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استادیار، دانشجوی دکتری و استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی و فناوری

دانشگاه تهران

ایمیل مکاتبه کننده: khanali@ut.ac.ir

چکیده

در این مطالعه کاربرد روش جمع آثار در مدل‌سازی فرآیند خشک‌شدن بستر سیالی ناپیوسته شلتوک در دماهای (°C) ۵۰، ۶۰، ۷۰، سرعت‌های هوای (۲/۸، ۲/۵، ۲/۳ m/s) و ضخامت لایه شلتوک (۲/۵ و ۵) مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این روش، کلیه اثرات دما، سرعت هوا و ضخامت محصول بر روی سینتیک خشک شدن تعیین گردید. این تحقیق شامل ۱۸ نمودار خشک‌شدن بود که طی ۹ مرحله استفاده از روش جمع آثار به یک نمودار ترکیبی تبدیل شدند. نمودار ترکیبی با یک تابع نمایی دو پارامتری و میانگین خطا ۰/۰۱۱۷۹ مدل‌سازی گردید که بیانگر توانایی بالای این روش در مدل‌سازی داده‌های خشک‌شدن نسبت به مدل‌های تئوری و نیمه تجربی بود.

واژه‌های کلیدی: شلتوک، روش جمع آثار، سینتیک خشک شدن.

مقدمه

شلتوک (*Oryza sativa L.*) یکی از اصلی‌ترین غلاتی است که به وسیله بشر استفاده می‌شود و از لحاظ مصرف در جهان بعد از گندم در رده دوم قرار دارد به طوری که تولید برنج در جهان از ۳۱۶ میلیون تن در سال ۱۹۷۰ به ۶۷۸ میلیون تن در سال ۲۰۰۹ رسید (FAOSTAT, 2011). رطوبت اولیه شلتوک پس از برداشت در حدود ۲۰ تا ۳۵٪ بر پایه خشک می-باشد که به منظور انبارداری و فرآوری محصول لازم است رطوبت آن به ۱۴٪ کاهش یابد (محمود و همکاران، ۱۳۸۹). خشک کردن شلتوک بعنوان مهمترین عملیات پس از برداشت آن می‌باشد که با روش‌های مختلفی انجام می‌شود. پیش-



بینی سینتیک خشک‌شدن شلتوک به کمک مدل‌های ریاضی، برای پیدا کردن شرایط بهینه فرایند خشک‌شدن و نیز طراحی مناسب خشک‌کن‌ها کاربرد دارد. در گذشته مدل‌های تجربی و تئوری زیادی برای خشک‌کردن انواع مختلف مواد غذایی و محصولات کشاورزی ارائه شده است (Corcione et al, 2005) که برخی از آنها جهت بررسی رفتار سینتیک خشک‌شدن لایه نازک محصولات کشاورزی در جدول (۱) ارائه شده است. در این مدل‌ها، نسبت رطوبت (Mr) بر حسب زمان خشک‌شدن (t) محاسبه می‌شود که نسبت رطوبت به وسیله رابطه ۱ برآورد می‌شود (Khanali et al, 2012).

$$Mr = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

که در آن Mr نسبت رطوبت (بدون بعد)، M، M_e و M_0 رطوبت محصول بر پایه خشک، به ترتیب در لحظه موردنظر، رطوبت تعادلی و رطوبت اولیه می‌باشند.

جدول ۱- مدل‌های تئوری و نیمه تجربی مورد استفاده برای مدل‌سازی فرایند خشک‌شدن لایه نازک (Khanali et al, 2012).

نام مدل	معادله
لوئیس ^۱	$Mr = \exp(-kt)$
هندرسون ^۲	$Mr = a \exp(-kt)$
لگاریتمی ^۳	$Mr = a \exp(-kt) + c$
دوجمله‌ای ^۴	$Mr = a \exp(-kt) + b \exp(gt)$
ورما ^۵	$Mr = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$
پیج ^۶	$Mr = \exp(-kt^n)$
میدیلی ^۷	$Mr = a \exp(-kt^n) + bt$

در روابط ارائه شده در جدول (۱) پارامترهای a, b, g, h, k و n مقادیر ثابت و t زمان خشک‌شدن (s) است.

تا کنون تحقیقات زیادی در زمینه خشک‌کردن، مدل‌سازی و استخراج نمودارهای سینتیک خشک‌شدن شلتوک انجام شده است. سوپونروناریت و همکاران خشک‌کردن بستر سیال ناپیوسته شلتوک را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، تأثیر عوامل کاری بر کیفیت محصول و مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر مجاز دمای هوای خشک کردن محصول به منظور دستیابی به برنج با کیفیت مطلوب برابر ۱۱۵ درجه سلسیوس تعیین شد. کاهش سرعت هوا و افزایش بخش هوای بازیافتی از هوای خروجی به منظور استفاده مجدد، باعث کاهش مصرف انرژی گردید (et al, 1996).

¹ Lewis

² Henderson

³ Logarithmic

⁴ Two-Term

⁵ Verma

⁶ Page

⁷ Midilli



(Soponronnarit). گل محمدی و همکاران بهره‌وری انرژی متناوب خشک‌کن شلتوک را مورد بررسی قرار دادند. آنها اثر پارامترهای مختلف دمای هوا و سرعت را با استفاده از خشک‌کن بستر سیال مورد مطالعه قرار دادند. در نهایت، مدلی جهت به حداقل رساندن مصرف انرژی کل برآورد کردند. با استفاده از این تحقیق آنها به این نتیجه رسیدند که کاهش سرعت باعث کاهش مصرف انرژی گردید (Golmohammadi et al, 2010). خوش تقاضا و همکاران (۱۳۸۶) مطالعه فرآیند خشک‌کردن شلتوک به روش‌های بستر ثابت و بستر سیال را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. بیشترین و کمترین راندمان حرارتی به ترتیب مربوط به دمای خشک‌کردن بستر ثابت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و خشک‌کردن بستر سیالی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس بود. عامل اصلی ترک دانه‌ها، شرایط بستر ثابت تعیین شد و همچنین آهنگ خشک‌شدن بستر سیالی نسبت به بستر ثابت بیشتر بود. رفیعی و همکاران (۱۳۸۸) شبیه‌سازی رطوبت دانه شلتوک رقم علی کاظمی در طی خشک‌شدن به روش لایه نازک را با استفاده از روش عددی اجزاء محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از مدل‌سازی دارای همخوانی بالایی با مقادیر واقعی رطوبت محصول بودند. امید و همکاران (۱۳۸۹) مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن لایه نازک شلتوک را با استفاده از هشت مدل تجربی در سطوح دمایی ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و چهار سطح سرعت هوای ۰/۲۵ تا ۱ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار دادند. مقادیر ضریب تبیین مدل‌های ارائه شده در محدوده ۰/۸۲۸ تا ۰/۹۹۹ محاسبه شد که بیانگر دقت بالای مدل‌های ارائه شده در پیش‌بینی رطوبت شلتوک نسبت به زمان می‌باشد.

در فرآیند خشک‌کردن در شرایط مختلف سرعت هوا، دمای هوا و ضخامت محصول نمودارهای مختلف بدست می‌آید که این نمودارها اغلب مشابه بوده و فقط در راستای محور افقی جابجا شده‌اند اگر بتوان این نمودارها را با یک نمودار واحد در تمام شرایط خشک‌کردن نمایش داد در این حالت بررسی و پیش‌بینی مدل ریاضی سینتیک خشک‌کردن محصول نیز ساده‌تر خواهد بود. با توجه به مشابه بودن نمودارهای خشک‌کردن محصولات کشاورزی با استفاده از روش جمع آثار^۸ می‌توان تمام نمودارها در شرایط متفاوت خشک‌کردن را به یک نمودار ترکیبی تبدیل کرد که این نمودار گویای تمام شرایط فرآیند خشک‌کردن می‌باشد. روش جمع آثار به طور وسیعی جهت بررسی رفتار خزش و آسایش تنش محصولات کشاورزی به کار می‌رود (Khazaei et al, 2004). این روش برای اولین بار توسط خزایی و همکاران جهت مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن برگ‌های آویشن در سطوح دمایی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس و سه سطح سرعت هوای ۰/۵، ۰/۸ و ۱/۲ متر بر ثانیه استفاده شد (Khazaei et al, 2008). بررسی‌های انجام شده نشان داد که تاکنون هیچ پژوهشی در خصوص مدل‌سازی فرآیند خشک‌شدن بستر سیال با روش جمع آثار انجام نشده است. هدف از تحقیق حاضر استفاده از روش جدید جمع آثار به منظور مدل‌سازی اثرات دما، سرعت هوا و ضخامت محصول در فرآیند

⁸ Superposition technique



خشک شدن بستر سیال ناپیوسته شلتوک می‌باشد. همچنین ضریب پخش رطوبتی موثر دانه‌های شلتوک، انرژی فعال‌سازی و مدل‌سازی فرآیند خشک شدن با استفاده از مدل‌های تئوری و نیمه تجربی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

مواد و روش‌ها

مبانی روش جمع آثار

جهت بررسی سینتیک خشک شدن محصولات کشاورزی نمودار تغییرات رطوبت محصول نسبت به زمان در شرایط مختلف دما و سرعت هوای خشک کردن و همچنین ضخامت محصول رسم می‌شود. نمودارهای خشک شدن مواد مختلف معمولاً مشابه بوده ولی با توجه به سرعت، دمای هوا و ضخامت محصول در امتداد محور زمان جابجا شده‌اند. مقدار جابجایی هر نمودار نسبت به یک نمودار مرجع، فاکتور انتقال^۹ نامیده می‌شود. این موضوع اجازه می‌دهد تا بتوان نمودارهای خشک شدن را با توجه به مقدار فاکتور انتقالشان به گونه‌ای به سمت نمودار مرجع منتقل نمود تا در نهایت از همپوشانی همه نمودارها یک نمودار ترکیبی حاصل گردد. این بدین معناست که فرایند خشک شدن محصولات در دماها، سرعت‌ها و ضخامت‌های مختلف را می‌توان با یک نمودار ترکیبی بیان نمود، بنابراین بیان ریاضی مدل با سهولت بیشتر و تنها با یک رابطه صورت می‌گیرد. روش انتقال نمودارهای حاصل از یک فرایند و ترکیب آن‌ها در قالب یک نمودار، روش جمع آثار نامیده می‌شود (Khazaei et al, 2008).

جهت تحلیل روش جمع آثار، دو نمودار خشک شدن در یک مقیاس نیمه لگاریتمی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل فرض بر آن است که تابع $M(t)_{TR}$ نشانگر نمودار خشک شدن ماده در دمای مرجع T_R و تابع $M(t)_T$ نشانگر نمودار خشک شدن ماده در دمای T می‌باشد. با توجه به شکل ۱ مختصات نقطه دلخواه P_i بر روی نمودار $M(t)_T$ برابر نقطه $P_{iR} = [\log(t_i), M_i]$ می‌باشد. نقطه دلخواه P_i بر روی نمودار $M(t)_T$ پس از انتقال بر روی نمودار مرجع $M(t)_{TR}$ بر روی نقطه P_{iR} با مختصات $[\log(t_{iR}), M_i]$ منطبق می‌شود (زیرنویس i بیانگر شماره نقاط در نظر گرفته شده روی نمودار بوده که از ۱ تا N تغییر می‌کند) (Khazaei et al, 2004) (Khazaei et al, 2008).

مقدار انتقال تابع $M(t)_T$ در زمان t_i نسبت به تابع مرجع $M(t)_{TR}$ در زمان t_{iR} به عنوان تابع انتقال بوده و با $\Delta(t)$ نشان داده می‌شود. مقدار فاکتور انتقال a_{iT} که ارتباط بین نمودار در دمای T و دمای مرجع T_R را در رطوبت M_i بیان می‌کند با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Khazaei et al, 2008).

$$\log(t_i) - \log(t_{iR}) = \Delta(t) = \log a_{iT} \quad (2)$$

با توجه به شکل ۱ هر نقطه بر روی نمودار $M(t)_T$ دارای یک فاکتور انتقال a_{iT} می‌باشد. فاکتور انتقال نهایی برابر میانگین مقادیر فاکتور انتقال در تمام نقاط بوده و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Khazaei et al, 2008).

⁹ Shift factor



$$\log a_T = \frac{\sum_{i=1}^N \log(a_{iT})}{N}$$

(۳)

مقادیر رطوبت بر روی نمودارهای $M(t)_T$ و $M(t)_{TR}$ به ترتیب در زمان‌های $\log(t_i)$ و $\log(t_{iR})$ با یکدیگر برابر بوده که در رابطه (۴) بیان شده است (Khazaei *etal*, 2008).

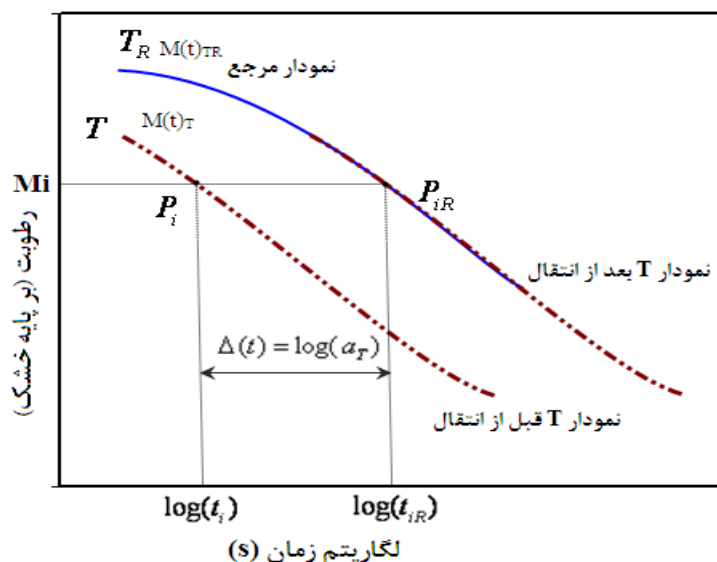
$$M(\log t_i)_T = M(\log t_i + \log a_{iT})_{TR} \quad (۴)$$

و در نهایت با استفاده از روابط (۳) و (۴) و با تغییر در مقیاس زمان می‌توان نمودار در دمای T را بر روی نمودار در دمای مرجع T_R انتقال داد (روابط ۵ و ۶) (Khazaei *etal*, 2008).

$$M(\log t)_T = M(\log t a_T)_{TR} \quad (۵)$$

$$M(t)_T = M(t a_T)_{TR} \quad (۶)$$

در این حالت مقیاس جدیدی برای زمان تعریف می‌شود که به آن زمان کاهش یافته^{۱۰} گفته می‌شود و با $t' = t \cdot a_T$ تعریف می‌شود. این بدین معنا است که زمان t در دمای T معادل زمان $t \cdot a_T$ در دمای مرجع T_R می‌باشد. مقدار فاکتور انتقال دما (a_T) بستگی به خصوصیات ماده دارد و به وسیله آزمایش مشخص می‌شود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که برای $T < T_R$ مقدار $a_T < 1$ ، $T > T_R$ ، $a_T > 1$ و $T = T_R$ ، $a_T = 1$ می‌باشد (Khazaei *etal*, 2008).



شکل ۱- اعمال روش جمع آثار بر روی محور زمان در منحنی‌های خشک شدن (Khazaei *etal*, 2008).

¹⁰ Reduced Time



ضریب پخش رطوبتی موثر و انرژی فعال‌سازی

جهت محاسبه ضریب پخش رطوبتی موثر دانه‌های شلتوک از حل معادله فیک برای اجسام کروی شکل به شرح رابطه (۷) استفاده شد (Doymaz, 2006)، (Doymaz et al, 2006) و (Sacilik, 2007).

$$Mr = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp \left[\frac{-\pi^2 D_{eff}}{r^2} t \right] \quad (۷)$$

که در آن D_{eff} ضریب پخش رطوبتی موثر (m^2/s) و r شعاع معادل کره یا دانه کروی شکل (m) می‌باشد. با لگاریتم‌گیری از دو طرف رابطه (۷)، رابطه (۸) حاصل می‌شود.

$$\ln \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{D_{eff} \pi^2 t}{r^2} \quad (۸)$$

ضریب پخش رطوبتی موثر با استفاده از ضریب زاویه خط^{۱۱} ترسیم شده داده‌های $\ln \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$ بر حسب t (s) و شعاع معادل دانه (m) به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Togrul, 2003) و (Sacilik, 2007).

$$D_{eff} = -\frac{r^2}{\pi^2} \text{slope} \quad (۹)$$

انرژی فعال‌سازی رطوبت با توجه به تابعیت ضریب پخش رطوبتی موثر با دما، از طریق رابطه آرنوس (۱۰) محاسبه شد (Sacilik, 2007) و (Mwithiga et al, 2005).

$$D_{eff} = D_0 \exp \frac{-E_a}{RT} \quad (۱۰)$$

که در آن D_0 ضریب پخش رطوبت در دمای مبنای صفر درجه سلسیوس (m^2/s)، E_a انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)، R ثابت جهانی گازها ($kJ/mol.K$ 8.314) و T دمای مطلق (K) می‌باشد.

آزمایشات خشک‌کردن

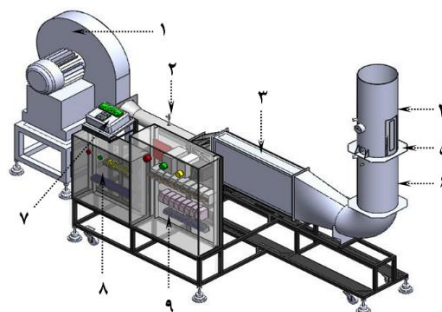
در این پژوهش از شلتوک رقم ندا برداشت شده در استان مازندران استفاده شده است. به منظور تهیه شلتوک با رطوبت مطلوب ۲۵٪ بر پایه خشک، شلتوک و آب مقطر با در نظر گرفتن مقادیر رطوبت اولیه و رطوبت مطلوب شلتوک با نسبت جرمی مشخص با یکدیگر مخلوط شدند. نمونه درون کیسه پلی‌اتیلن سر بسته به مدت ۳ روز در دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری شد. قبل از انجام آزمایش‌ها، نمونه به مدت چهار ساعت در دمای محیط قرار گرفت تا به شرایط تعادل دمایی برسد. رطوبت شلتوک بر اساس خشک‌کردن در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد (ASAE, 1984).

به منظور خشک‌کردن محصول از خشک‌کن بستر سیال ناپیوسته نشان داده شده در شکل ۲ استفاده شد. در شکل ۲ برخی اجزای خشک‌کن از قبیل ۱، مجموعه الکتروموتور-دمنده؛ ۲، لوله پیتو؛ ۳، واحد گرم‌کن؛ ۴، محفظه بستر سیال ناپیوسته؛ ۵، صفحه پخش‌کننده؛ ۶، محفظه هوا؛ ۷، صفحه کلید؛ ۸، تابلوی کنترل و ۹، تابلوی اتصال‌المنت‌ها مشخص شده است. این خشک‌کن دارای قابلیت اندازه‌گیری و ثبت دما و رطوبت هوا و همچنین کنترل و تنظیم دمای هوای ورودی به بستر

¹¹ slope



می‌باشد. محفظه خشک‌کن سیلندری شکل و از جنس فولاد ضد زنگ با قطر داخلی ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۷ متر بود. سیستم توزین مورد استفاده در این آزمایشات شامل یک ترازوی دیجیتال مدل INFINITY ESK-204HTS بود که هر ۲ دقیقه یکبار نمونه جهت بدست آوردن رطوبت آن وزن می‌شد. همچنین قبل از شروع آزمایش دستگاه خشک‌کن به مدت ۱۰ دقیقه در حالت روشن قرار گرفت تا شرایط کاری از قبیل دما و سرعت هوای خشک‌کردن به حالت پایا برسند. هر آزمایش سه بار تکرار گردید. دمای هوای خشک‌کردن برابر دمای هوای ورودی در ابتدای بستر می‌باشد. سرعت هوا یا گاز عبوری در کاربردهای سیال‌سازی به صورت سرعت ظاهری سیال‌سازی ۱۲ که حاصل تقسیم دبی حجمی هوای عبوری از بستر به سطح مقطع بستر می‌باشد، بیان می‌شود. در این مطالعه نیز منظور از سرعت هوای خشک‌کردن همان سرعت ظاهری سیال‌سازی است. بدیهی است که سطح مقطع بستر برابر سطح مقطع محفظه خشک‌کن و دایره‌ای با قطر ۰/۲۵ متر است.



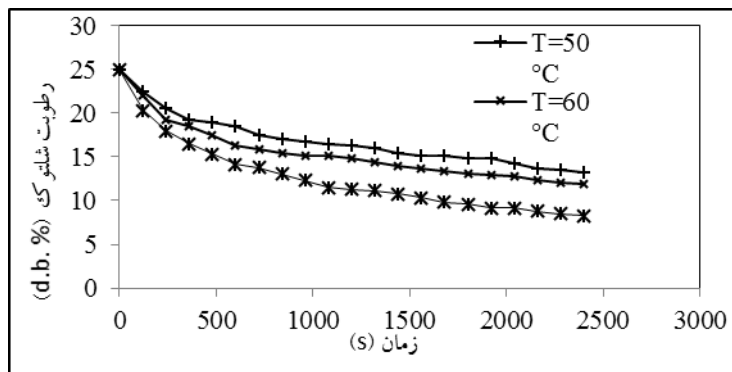
شکل ۲- طرح‌واره خشک‌کن بستر سیال ناپیوسته.

نتایج و بحث

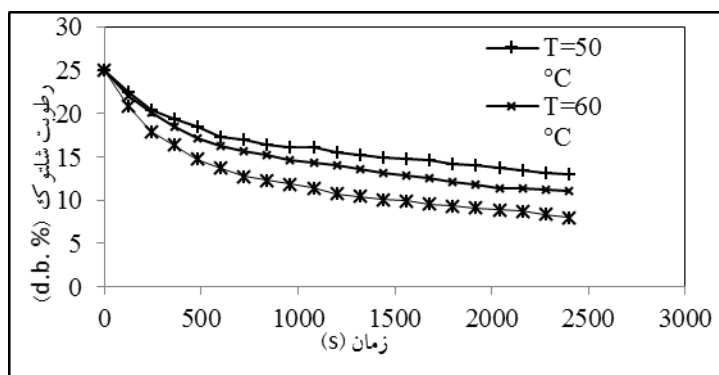
سینتیک و مدل‌سازی خشک‌شدن

در شکل ۳ به عنوان نمونه، تغییرات محتوای رطوبت شلتوک نسبت به زمان در سرعت هوای ۲/۸ ضخامت لایه شلتوک ۵ و ۲/۵ سانتی‌متری به ازای مقادیر گوناگون دمای هوای خشک‌کننده نشان داده شده است. سایر آزمایشات خشک‌کردن نیز مانند شکل ۳ یک روند نزولی دارند.

¹² Superficial fluidization velocity



(الف)



(ب)

شکل ۳- تأثیر دمای هوا بر تغییرات رطوبت در سرعت هوای ۲/۸ متر بر ثانیه (الف) ضخامت لایه شلتوک ۵ سانتی متر (ب) ضخامت لایه شلتوک ۲/۵ سانتی متر.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود (شکل ۳)، رطوبت به صورت پیوسته با زمان خشک‌شدن کاهش می‌یابد. نتایج آزمایشات نشان دادند که دمای هوا دارای تأثیر معنی‌داری ($p=0.01$) بر زمان خشک‌شدن شلتوک می‌باشد. این نتایج با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین یکسان بود (محمود و همکاران، ۱۳۸۹)، (Khanali et al, 2012) و (Golmohammadi et al, 2010).

جدول ۲- نتایج آنالیز آماری مدل میدلی و همکاران (Midilli et al, 2002).

ضخامت (cm)	دما هوا (°C)	سرعت هوا (m/s)	Model constant	R^2	MSE	$\times 10^3$	
۵	۵۰	۲/۳	$1/0.02, b=5/664 \times 10^{-5}, k=0/0.08726, n=0/6128$	۹۸۷	۰.۴۷۲	۰.۲۸	
		۲/۵	$1/0.01, b=5/101 \times 10^{-5}, k=0/0.09747, n=0/6013$	۹۹۳	۰.۳۶۵	۰.۱۶	
		۲/۸	$1/0.02, b=4/88 \times 10^{-5}, k=0/0.1069, n=0/5948$	۹۹۲	۰.۴۰۴	۰.۲۰	
	۶۰	۲/۳	۲/۳	$1/0.02, b=9/941 \times 10^{-5}, k=0/0.09929, n=0/6071$	۹۹۵	۰.۳۲۷	۰.۱۳
			۲/۵	$1/0.03, b=3/906 \times 10^{-5}, k=0/0.1496, n=0/5786$	۹۷۸	۰.۷۵۶	۰.۷۱
		۲/۸	۲/۵	$1/0.03, b=3/651 \times 10^{-5}, k=0/0.1551, n=0/5771$	۹۷۸	۰.۷۸۵	۰.۷۶
			۲/۳	$a=0/9974, b=1/674 \times 10^{-5}, k=0/0.1848,$	۹۸۷	۰.۶۴۳	۰.۴۳



			$n=0/5602$			
	۷۰	۲/۵	$a=0/9975, b=1/762 \times 10^{-6}, k=0/1926,$ $n=0/5592$	۹۸۷	۰۶۶۲	۰۴۶
		۲/۸	$a=0/9977, b=1/814 \times 10^{-6}, k=0/1979,$ $n=0/5588$	۹۸۸	۰۶۳۱	۰۴۲
۲/۵		۲/۳	$a=0/9974, b=1/763 \times 10^{-6}, k=0/1852, n=0/56$	۹۸۷	۰۶۴۳	۰۴۳
	۵۰	۲/۵	$a=1/002, b=5/158 \times 10^{-6}, k=0/09076, n=0/7232$	۹۹۳	۰۳۹۹	۰۱۷
		۲/۸	$a=1/002, b=4/454 \times 10^{-6}, k=0/1038, n=0/6036$	۹۹۳	۰۳۸۶	۰۱۶
		۲/۳	$a=0/9974, b=1/763 \times 10^{-6}, k=0/1852, n=0/56$	۹۸۷	۰۶۴۳	۰۴۳
	۶۰	۲/۵	$a=1/001, b=2/605 \times 10^{-6}, k=0/1664, n=0/5654$	۹۸۵	۰۶۶۸	۰۴۷
		۲/۸	$a=1/001, b=2/12 \times 10^{-6}, k=0/1779, n=0/5574$	۹۸۵	۰۶۶۲	۰۴۶
		۲/۳	$a=0/998, b=4/492 \times 10^{-6}, k=0/2608, n=0/5259$	۹۹۰	۰۵۸۹	۰۳۶
	۷۰	۲/۵	$a=0/9987, b=8/791 \times 10^{-6}, k=0/2361, n=0/5474$	۹۹۱	۰۵۶۴	۰۳۳
	۲/۸	$a=0/9982, b=8/228 \times 10^{-6}, k=0/2425, n=0/5459$	۹۹۲	۰۵۵۳	۰۳۲	

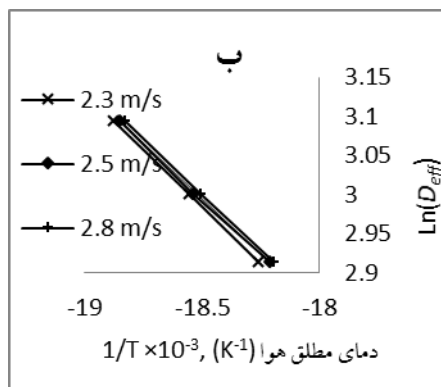
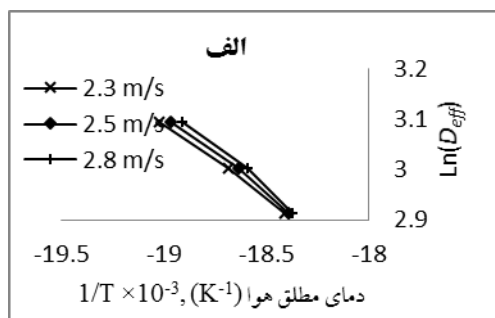
داده‌های حاصل از آزمایشات با مدل‌های ارائه شده در جدول ۱ مورد بررسی قرا گرفتند تا بهترین مدل برای توصیف سینتیک خشک شدن شلتوک انتخاب شود. با در نظر گرفتن شاخص‌های آماری، مدل میدیلی به عنوان بهترین مدل جهت توصیف فرآیند خشک شدن مشخص شد (جدول ۲). در این مدل، مقادیر ضریب تبیین در تمام آزمایشات خشک شدن بالاتر از ۰/۹۹۷۸ بوده، مقادیر χ^2 بین $1/3 \times 10^{-6}$ و $7/6 \times 10^{-6}$ و مقادیر RMSE بین ۰/۰۰۳۲۷ و ۰/۰۰۷۸۵ محاسبه شدند.

ضریب پخش رطوبتی موثر و انرژی فعال‌سازی

مقادیر ضریب پخش رطوبتی موثر شلتوک در دما، سرعت و ضخامت‌های مختلف لایه شلتوک در جدول ۳ ارائه شده است. طبق نتایج، مقادیر ضریب پخش حرارتی شلتوک از $0/548 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $1/25 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ تغییر می‌کند. با افزایش درجه حرارت از ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس در شرایط مختلف، ضریب پخش حرارتی شلتوک $1/71$ تا $1/89$ مرتبه افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده توسط محققین دیگر همخوانی دارد. خزایی و همکاران نشان دادند که ضریب پخش حرارتی برگ‌های آویشن با افزایش دما از ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس $3/26$ مرتبه افزایش می‌یابد (Khazaei et al, 2008). دویمایز و همکاران نیز نتایج مشابهی بدست آوردند (Doymaz et al, 2006) و (Doymaz, 2006). با افزایش سرعت هوا از $2/3$ تا $2/8$ متر بر ثانیه در شرایط مختلف، ضریب پخش حرارتی شلتوک $1/04$ تا $1/12$ مرتبه افزایش می‌یابد. و با افزایش ضخامت از $2/5$ تا ۵ سانتی متر ضریب پخش $0/84$ تا $0/92$ مرتبه کاهش می‌یابد.



سایر محققین نیز نتایج مشابهی ارائه دادند. خزایی و همکاران نشان دادند که ضریب پخش حرارتی برگ‌های آویشن با افزایش سرعت هوا از ۰/۵ تا ۱/۲ متر بر ثانیه ۲/۳ مرتبه افزایش می‌یابد (Khazaei et al, 2008). توقرول نشان داد که ضریب پخش حرارتی برگ زردآلو با افزایش سرعت از ۰/۵ تا ۱/۲ متر بر ثانیه ۱/۷۵ مرتبه افزایش می‌یابد (Togrul, 2003). اینازو و همکاران نشان دادند که افزایش سرعت هوا تا ۲ متر بر ثانیه تاثیر معنی داری بر روی افزایش ضریب پخش حرارتی ماکارونی ژاپنی دارد اما افزایش سرعت بیش از ۲ متر بر ثانیه دارای تاثیر کمتری بر روی آن می‌باشد (Inazu et al, 2003).



شکل ۴- کاربرد رابطه آرینوس برای تحلیل اثر دما بر ضریب پخش رطوبت در سرعت‌های مختلف: الف) ۰.۵ و ب) ضخامت ۲/۵ cm.

در شکل ۴ مقادیر $\ln(D_{eff})$ در مقابل معکوس دمای مطلق در شرایط مختلف نشان داده شده است. مقادیر انرژی فعال‌سازی برای سرعت‌های هوا و ضخامت‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. طبق نتایج مقادیر انرژی فعال‌سازی شلتوک از ۲۴/۸۳ kJ/mol تا ۲۹/۲۶ kJ/mol در ضخامت و سرعت‌های مختلف هوا تغییر می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت محصول منجر به کاهش انرژی فعال‌سازی شد. مقادیر انرژی فعال‌سازی محاسبه شده در این مطالعه در محدوده ۱۵ تا ۶۰ کیلوژول بر مول بوده که با مقدار متناظر اغلب محصولات کشاورزی و غذایی همخوانی دارد (Rizvi, 1986).



جدول ۳- مقادیر ضریب پخش رطوبتی موثر (x_{m2/s} 8-10) شلتوک در دما، سرعت و ضخامت‌های مختلف.

ضخامت محصول (cm)		°C	عت هوا (m/s)
۵	۲/۵		
۰/۵۴۸	۰/۶۳۲	۵۰	۲/۳
۰/۷۶۸	۰/۸۷۱	۶۰	
۱/۰۱	۱/۱۷	۷۰	
۰/۵۸۱	۰/۶۵۱	۵۰	۲/۵
۰/۸۰۹	۰/۸۸۹	۶۰	
۱/۰۳	۱/۲۳	۷۰	
۰/۶۱۴	۰/۶۶۶	۵۰	۲/۸
۰/۸۴۲	۰/۹۱۹	۶۰	
۱/۰۵	۱/۲۵	۷۰	

جدول ۴- انرژی فعال‌سازی (kJ/mol) شلتوک به ازای مقادیر مختلف سرعت هوا و ضخامت محصول.

سرعت هوا (m/s)			ضخامت محصول (cm)
۲/۸	۲/۵	۲/۳	
۲۹/۰۶	۲۹/۲۶	۲۸/۵	۲/۵
۲۴/۸۳	۲۶/۶۰	۲۸/۳	۵

مدل جمع آثار

در آزمایشات انجام شده جهت بررسی سینتیک خشک‌شدن شلتوک ۱۸ نمودار خشک‌شدن حاصل شد که مربوط به سه سطح دما، سه سطح سرعت هوا و دو سطح ضخامت لایه شلتوک بودند. جهت اعمال روش جمع آثار، تمام نمودارها به صورت نسبت رطوبت در برابر لگاریتم زمان رسم شدند و سپس همه آن‌ها طی ۹ مرحله استفاده از روش جمع آثار به یک منحنی ترکیبی تبدیل شدند.

در شکل (۵ الف) تغییرات نسبت رطوبت شلتوک در برابر لگاریتم زمان در دماهای مختلف هوا برای سرعت ۲/۳ متر بر ثانیه و ضخامت ۵ سانتی‌متر لایه شلتوک نشان داده شده است. با انتقال نمودارهای مربوط به دماهای ۵۰ و ۷۰ درجه سلسیوس به سمت نمودار مربوط به دمای ۶۰ درجه سلسیوس که به عنوان نمودار مرجع در نظر گرفته شده، یک نمودار ترکیبی در این سرعت هوا و ضخامت حاصل شد که در شکل (۵ ب) نشان داده شده است. نمودارهای ترکیبی مشابهی برای سرعت‌های ۲/۵ و ۲/۸ متر بر ثانیه در ضخامت ۵ سانتی‌متر بدست آمد. عملیات محاسباتی مشابهی برای

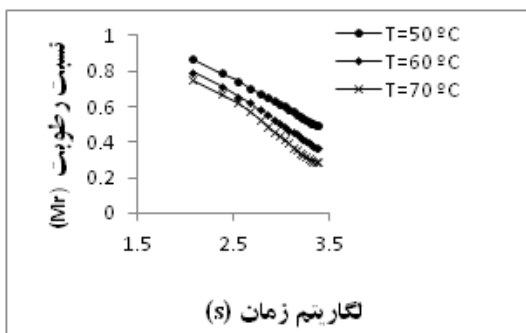


ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر لایه شلتوک تکرار شد. بر این اساس مقادیر فاکتور انتقال دما (a_T) در دماهای مختلف و در سطوح مختلف سرعت هوا بدست آمد که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج بیانگر آن است که a_T رابطه خطی افزایشی با دما دارد. خزایی و همکاران نتایج مشابهی بدست آوردند. آنها نشان دادند که مقادیر فاکتور انتقال برگ‌های آویشن با افزایش دما از ۳۰ تا ۵۰ درجه سیلسیوس در سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه از ۰/۵۸ تا ۱/۴۳، ۰/۸ متر بر ثانیه از ۰/۸ تا ۱/۶۵ و ۱/۲ متر بر ثانیه از ۰/۴۷ تا ۱/۴۹ افزایش یافت (Khazaei et al, 2008).

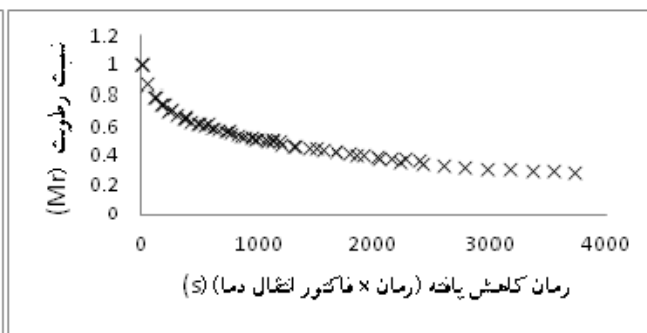
پس از تعیین سه نمودار ترکیبی برای هر سرعت و در دو ضخامت ۵ و ۲/۵ سانتی‌متری لایه شلتوک، با استفاده مجدد از روش جمع آثار برای هر ضخامت، نمودارهای ترکیبی مربوط به سرعت ۲/۳ و ۲/۸ متر بر ثانیه به نمودار مرجع مربوط به سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه منتقل شدند که در نهایت دو نمودار ترکیبی مربوط به ضخامت ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر حاصل شد. بار دیگر با استفاده از روش جمع آثار و مرجع گرفتن نمودار مربوط به ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر، نمودار مربوط به ضخامت ۵ سانتی‌متر به سمت نمودار مرجع انتقال داده شده و نمودار ترکیبی نهایی نشان داده شده در شکل ۶ حاصل شد.

جدول ۵- مقادیر فاکتور انتقال دما (a_T).

دمای هوا (°C)	ضخامت ۲/۵ cm		ضخامت ۵ cm	
	۲/۳	۲/۵	۲/۳	۲/۵
۵۰	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۴۹
۶۰	۱	۱	۱	۱
۷۰	۱/۷	۱/۷۶	۱/۷۷	۰/۴۴

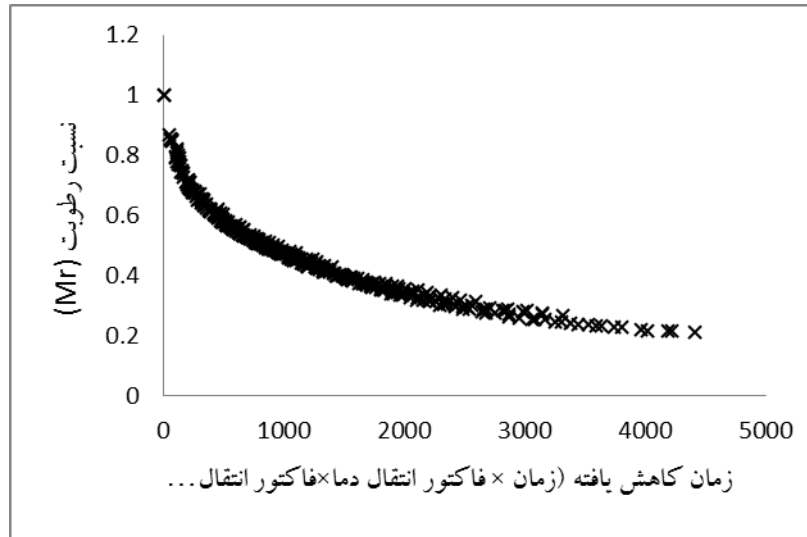


(الف)



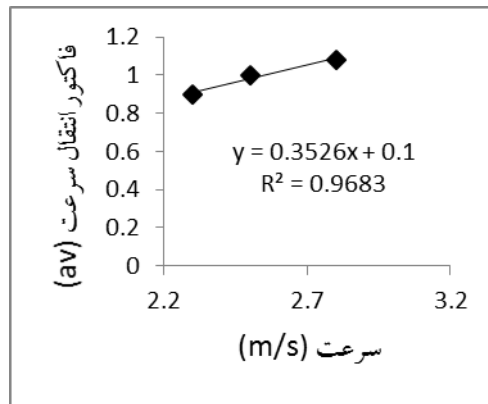
(ب)

شکل ۵- تغییرات نسبت رطوبت شلتوک در دماهای 50°C ، 60°C و 70°C ، سرعت هوای $2/3 \text{ m/s}$ و ضخامت 5 cm : الف) قبل از اعمال روش جمع آثار و ب) بعد از اعمال روش جمع آثار.

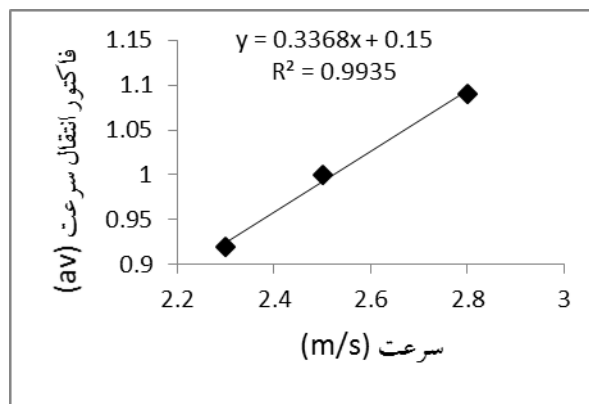


شکل ۶- نمودار ترکیبی نهایی حاصل از انتقال ۱۸ نمودار خشک شدن شلتوک.

مقادیر فاکتور انتقال سرعت a_v و فاکتور انتقال ضخامت a_H مربوط به سرعت و ضخامت‌های مختلف در هر مرحله اعمال روش جمع آثار تعیین گردید که در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که یک رابطه خطی بین سرعت هوا و فاکتور انتقال سرعت a_v و همچنین بین ضخامت محصول و فاکتور انتقال ضخامت a_H وجود دارد. خزایی و همکاران نیز یک رابطه خطی بین سرعت هوا و فاکتور انتقال سرعت (a_v) برگ‌های آویشن بدست آوردند (Khazaei et al, 2008).

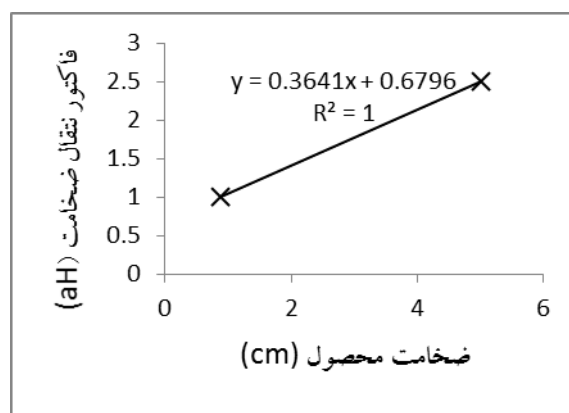


(الف)



(ب)

شکل ۷- ارتباط فاکتور انتقال سرعت a_v و سرعت هوا: الف) ضخامت ۲/۵ cm و ب) ضخامت ۰.۵ cm.



شکل ۸- ارتباط فاکتور انتقال ضخامت a_H و ضخامت محصول.



در نهایت نمودار ترکیبی نهایی شکل ۶ به کمک مدل نمایی با دو پارامتر به صورت تابعی از زمان کاهش یافته $t' = t \cdot a_T \cdot a_V \cdot a_H$ مدل‌سازی شد. نسبت رطوبت به صورت تابعی از چهار پارامتر زمان خشک‌کردن، دمای هوا، سرعت هوا و ضخامت لایه شلتوک با ضریب تبیین ۰/۹۹۴ به صورت رابطه ۱۱ ارائه شده است.

$$Mr(t, T, V, H) = Mr(t, a_T, a_V, a_H) = 0.3181 \exp(-0.004641t') + 0.6295 \exp(-0.0002936t') \quad (11)$$

نتایج نشان دادند که مقدار خطای RMSE بین داده‌های پیش‌بینی شده توسط رابطه ۱۱ و داده‌های آزمایشگاهی، معادل ۰/۱۱۷۹ بود که نشانگر دقت بالای این مدل در پیش‌بینی فرآیند خشک‌شدن شلتوک به ازای شرایط کاری مختلف می‌باشد. خزایی و همکاران نیز نتایج مشابهی به دست آوردند و نمودار ترکیبی حاصل از سینتیک خشک شدن برگ‌های آویشن را با معادله نمایی دو پارامتری با ضریب تبیین ۰/۹۹۶ بیان کردند (Khazaei et al, 2008). بر این اساس، برای تعیین نسبت رطوبت شلتوک در دماهای ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس، سرعت‌های هوای ۲/۳ تا ۲/۸ متر بر ثانیه و ضخامت ۲/۵ تا ۵ سانتی‌متر، تنها کافی است مقادیر a_T ، a_V و a_H محصول در هر دما، سرعت و ضخامت با استفاده از نتایج ارائه شده در جدول ۴ و شکل‌های ۷ و ۸ تعیین شده و مقادیر آنها در رابطه ۱۱ جایگزین گردد. به عبارتی، دیگر نیاز به انجام آزمایشات زمان‌بر جهت بررسی سینتیک خشک شدن شلتوک نیست و با استفاده از داده‌های آزمایشات قبلی می‌توان با درصد خطای بسیار اندک، سینتیک خشک‌شدن شلتوک را در سایر دماها، سرعت‌ها و ضخامت‌های لایه محصول پیش‌بینی کرد.

نتیجه‌گیری

آزمایشات خشک‌شدن شلتوک نشان دادند که دما موثرترین فاکتور در فرآیند خشک‌شدن بوده و با افزایش آن، مدت زمان خشک‌شدن محصول بطور معنی‌داری کاهش می‌یابد. بهترین مدلی که رفتار خشک‌شدن شلتوک را ارائه می‌دهد مدل میدیلی می‌باشد که در این مدل میزان R^2 در تمام فرایندهای خشک‌شدن بیشتر از ۰/۹۹۷۸ بوده، مقدار χ^2 بین 10^{-5} و 10^{-7} و RMSE بین ۰/۰۳۲۷ و ۰/۰۷۸۵ بود. مقادیر ضریب پخش حرارتی شلتوک در شرایط مختلف فرآیند خشک کردن از 10^{-8} تا 10^{-8} m²/s تا 10^{-8} تا 10^{-8} m²/s تغییر کرد. افزایش درجه حرارت نسبت به سرعت هوا و ضخامت لایه شلتوک تاثیر بیشتری بر روی ضریب پخش حرارتی شلتوک داشت. مقادیر انرژی فعال‌سازی شلتوک از ۸۳/۲۴ kJ/mol تا ۲۶/۲۹ kJ/mol در شرایط مختلف فرآیند خشک کردن تغییر کرد. بررسی‌ها همچنین نشان دادند که روش جمع آثار، روش بسیار مناسبی در مدل‌سازی خشک‌شدن شلتوک بود به نحوی که میانگین خطای RMSE میان داده‌های مدل و واقعی معادل ۰/۱۱۷۹ بود که این خود نشانه توانایی بالای روش جمع آثار در مدل‌سازی فرآیند خشک‌شدن نسبت به مدل‌های تئوری و نیمه تجربی می‌باشد. در این روش یک نمودار ترکیبی نهایی برحسب



زمان اصلاح شده به دست آمد که این نمودار تأثیر سه پارامتر دمای هوا، سرعت هوا و ضخامت لایه محصول را به صورت یکجا در بر داشت. با استفاده از این روش می‌توان سینتیک خشک‌شدن شلتوک را با دقت بالا در دماهای بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس، سرعت ۲/۳ تا ۲/۸ متر بر ثانیه و ضخامت ۲/۵ تا ۵ سانتی‌متر بدون نیاز به انجام آزمایش پیش‌بینی کرد.

مراجع

۱. خوش تقاضا، م. ه. صادقی، م. امیری چایجان، ر. ۱۳۸۶. بررسی فرآیند خشک‌کردن شلتوک در شرایط بستر ثابت و سیال. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. جلد ۱۴. شماره ۲.
۲. رفیعی، ش. توکلی هنجین، ت. خوش تقاضا، م. ه. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی عددی رطوبت دانه شلتوک (رقم علی کاظمی) در طی خشک‌کردن. مجله مهندسی بیوسیستم ایران. جلد ۴۰. شماره ۱.
۳. محمودا، یداله‌ی نیا، ع. ر. رفیعی، ش. ۱۳۸۹. استخراج مدل سینتیک خشک‌شدن شلتوک رقم فجر در خشک‌کن لایه نازک. مجله مهندسی بیوسیستم ایران. جلد ۴۱. شماره ۲.
4. ASAE. 1984. ASAE Standard S352.1, moisture measurements, Grain and seeds, Agricultural Engineer Yearbook, American Society of Agriculture Engineers, ST Joseph, MI, USA.
5. Corcione, C. E. Greco, A. Maffezzoli, A. 2005. Time-temperature and time-irradiation intensity superposition for photopolymerization of an epoxy based resin. *Polymer* . 46: 8018-8027.
6. Doymaz, I. 2006. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*. 74(3), 370-375.
7. Doymaz, I. Tugrul, N. Pala, M. 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering*. 77(3), 559-565.
8. "FAOSTAT". Rice Production. 2010 [on line]. [<http://faostat.fao.org>].
9. Golmohammadi, m. Assar, m. Rajabi-Hamaneh, M. Hashemi, S.J. 2010. Energy efficiency investigation of intermittent paddy rice dryer: Modeling and experimental study. *Food and Bioproducts Processing*.
10. Inazu, T. Iwasaki, K. Furuta, T. 2003 Effect of air velocity on fresh Japanese noodle (Udon) drying. *Lebensm. Wiss. und Tech.* 36(2), 277-280.
11. Khazaei, j. Mann, D. D. 2004. Effects of temperature and loading characteristics on mechanical and stress-relaxation behavior of sea buckthorn berries. *the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript FP 03 014.
12. Kazaei, J. Arabhosseini, A. Khosrobeygi, Z. 2008. Application of Superposition Technique for Modeling Drying Behavior of Avishan (*Zataria multiflora*) Leaves. *ASABE*. Vol. 51(4), 1383-1393.
13. Khazaei, J. Chegini, G.R. Bakhshiani, M. 2008. A novel alternative method for modeling the effects of air temperature and slice thickness on quality and drying kinetics of tomato slices: Superposition Technique. *Drying Technology*. 26(6). 759-775.



14. Khanali, M. Rafiee1, Sh. Jafari, A. Hashemabadi, S.H. Banisharif, A. 2012. Mathematical modeling of fluidized bed drying of rough rice (*Oryza sativa* L.) grain. *Journal of Agricultural Technology*. Vol. 8(3), 795-810.
15. MidilliKucuk, A. H. Yapar, Z. 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology*. 20(7). 1503-1513.
16. Mwithiga, G. Olwal, J. O. 2005. The drying kinetics of kale(*Brassica oleracea*) in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*. 71(4), 373-378.
17. Park, K. J. Vohnikova, Z. Brod, F. P. R. 2002. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering*. 51(3). 193-199.
18. Rizvi, S. S. H. 1986. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.). *Engineering properties of foods*. New York: Marcel ,1986.
19. Sacilik, K. 2007. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Food Engineering*. 79(1), 23-30.
20. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn, S. 1994. Optimum strategy for fluidized bed paddy drying. *Drying Technolgy*. 12, 1667-1686.
21. Togrul, I. T. Pehlivan, D. 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot, *Journal of Food Engineering*. 58(1), 23-32.



The use of superposition technique for drying kinetics of rough rice

Abstract

Drying curves of agricultural products at different air temperatures and air velocities are often identical in shape, but shifted along the abscissa. The shift distance for each curve measured relative to a chosen reference curve is called the shift factor. This allows the drying curves to shift horizontally along the time axis through a time multiplier (shift factor) until a smooth master curve is created. The master curves can be used to address air temperature and air velocity effects on the drying kinetics through the use of the shift factors. The purpose of the present work was to test the validity of this method, in order to model the effects of air temperature, air velocity and solids holdups on drying kinetics of rough rice grain. The drying data at air temperatures of 50, 60 and 70 °C, air velocities of 2.3, 2.5 and 2.8 m/s and solid thicknesses of 2.5 and 5 cm were used for the modeling. The results showed that the superposition technique was adequate to generate a moisture ratio master curve for rough rice. The resulting master curves represented by RMSE 0.01179 and its validity to predict the moisture ratio of rough rice grain was compared with a regression model. The master curve model performed better than the regression model in predicting the moisture ratio of rough rice as a function of air temperature, air velocity and solids holdups.

Keywords: Superposition technique, Rough rice, Drying kinetics.