



بررسی مدل خشک کردن ورقه‌های نازک سیر در خشک‌کن لایه‌نازک نوع کلین

مسعود شعبانیان^۱، ارژنگ جوادی^۲، مرتضی الماسی^۳، فریبا بیات^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول ۲- دانشیار گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، ۳- استاد گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول

۴- مربی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان

Arimasoud@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق، رفتار خشک شدن ورقه‌های نازک سیر در خشک‌کن لایه‌نازک آزمایشگاهی مدل کلین بر اساس مدل‌های ریاضی خشک شدن مورد استفاده در منابع مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۲ میلی‌متر و سرعت هوای ۰/۸ متر بر ثانیه با سه تکرار انجام گرفت. ۱۰ مدل ریاضی خشک شدن بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد. ثابت‌ها و ضرایب مدل‌ها با هم مقایسه شدند. اثرات دمای هوای خشک‌کن به روش رگرسیون غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفت. تمام مدل‌های ریاضی خشک شدن بر اساس سه شاخص آماری مربع کای (χ^2)، ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها ($RMSE$) و ضریب تبیین (R^2)، با هم مقایسه شدند. طبق نتایج به دست آمده مدل لگاریتمی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۲ میلی‌متر با داشتن بالاترین ضریب تبیین ($R^2=0/9990$) و کمترین مقدار χ^2 و $RMSE=0/0000828$ و $\chi^2=0/00001609$ (به عنوان بهترین مدل در درجه اول و مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۲ میلی‌متر با ضریب تبیین ($R^2=0/9982$) و مقدار χ^2 و $RMSE=0/0000517$ و $\chi^2=0/0000307$) به عنوان بهترین مدل در درجه دوم و مدل دو جمله‌ای در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۲ میلی‌متر با ضریب تبیین ($R^2=0/9982$) و مقدار χ^2 و $RMSE=0/000128$ و $\chi^2=0/00049$ به عنوان بهترین مدل در درجه سوم را دارا بود.

کلیدواژه: مدل‌سازی، سیر، رگرسیون غیرخطی، لایه نازک

درصد بالایی از محتویات میوه‌ها و سبزی‌های تازه، آب است. بنابراین فعالیت متابولیکی بالایی نشان می‌دهند که پس از برداشت، نیز ادامه می‌یابد. یکی از قدیمیترین و در عین حال گسترده‌ترین فرایندها مورد استفاده جهت حفظ مواد غذایی در مقابل فساد، فرایند خشک کردن است که کاهش وزن و حجم مواد را به دنبال دارد به طوری که ریزنده‌ها قادر به رشد نباشند. (Maskan & Gogus, 1998). فرجی، ۱۳۷۱ و ملکی، ۱۳۷۴). به طور کلی خارج کردن رطوبت از مواد غذایی اساس خشک کردن است (Maskan, 2002. Sacilik, Keskin & Elicin, 2006). با مدلسازی فرایند خشک کردن برای بسیاری از محصولات کشاورزی می‌توان شرایط مناسب برای خشک کردن محصول را پیش بینی کرد. بنابراین در مطالعات انجام شده بر روی مدلسازی فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی اثر تعدادی از پارامترهای مربوط به شرایط خشک شدن مانند ضخامت بستر، دمای خشک کن، رطوبت نسبی هوا و غیره بررسی شده است. Sacilik & Elicin (2006) برای ورقه‌های نازک سیب در ضخامت‌های ۵ و ۹ میلی‌متر، دماهای ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه رگرسیون غیر خطی و مدل لگاریتمی را برازش کردند. (Doymaz, 2004) برای لایه‌های نازک هویج به ضخامت ۰/۵ سانتی متر در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۷۵ درجه سلسیوس با سرعت هوای ۰/۵ تا ۱ m/s مدل پیچ را پیشنهاد دادند. (Ertekin & Yaldiz, 2004) برای مدلسازی فرایند خشک کردن ورقه‌های نازک بادمجان در محدوده دمایی ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت‌های ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه مدل میدیلی و همکاران را پیشنهاد دادند. نازقلیچی و همکاران (۱۳۸۵) برای پیش بینی خشک کردن هویج با ضخامت ۵ میلی‌متر با دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سه سرعت ۰/۵، ۱ و ۱،۵ متر بر ثانیه از بین مدل‌های لوئیس، هندرسون و پابیس، مدل ساده شده فیک و مدل پیچ، برای پیش بینی فرآیند مدل پیچ را مناسب تشخیص دادند.

مرادی و زمردیان (۱۳۸۶) برای خشک کردن دانه‌های زیره سبز در یک خشک کن خورشیدی از نوع کابینتی مدل میدیلی را به عنوان مناسب‌ترین مدل برگزیدند. مهرآور و همکاران (۱۳۸۵) برای خشک شدن زرشک در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سه سرعت ۰/۵، ۱ و ۲ متر بر ثانیه به روش لایه نازک، شش مدل نیمه تئوری و یا تجربی را برازش کردند و مدل پیچ را به عنوان بهترین مدل ریاضی انتخاب کردند. محمدی و همکاران، (۱۳۸۵) رفتار خشک شدن ورقه‌های نازک کیوی را در خشک‌کن لایه‌نازک آزمایشگاهی و در پنج سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۶ میلی‌متر و سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار دادند. آنها با مدل میدیلی و همکاران را نسبت به مدل‌های دیگر بهتر برآورد کردند.

فرایند خشک کردن برای محصولات فصلی مانند سیر که در سال فقط چند ماه در دسترس مصرف کننده قرار می‌گیرد اهمیت زیادی دارد، چون با اعمال این فرایند علاوه بر جلوگیری از فساد، امکان استفاده از این محصول در تمام سال فراهم می‌شود (Pabis & Sankviski, 1998). ضمن این که هر ساله بخشی از سیر تولیدی بر اثر شرایط نامناسب نگهداری و نیز کمبود انبارهای مناسب به علت تنفس و جوانه زنی دچار افت وزنی و فساد شده، کیفیت مطلوب خود را از دست می‌دهد، بنابراین سیر خشک افزون بر ماندگاری بیشتر از نظر حمل و نقل و نگهداری نیز مشکلات کمتری دارد. (Madamba et al, 1996) ویژگی‌های خشک کردن ورقه‌های ۲ تا ۴ میلی‌متری سیر را در محدوده دمایی ۵۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس با رطوبت نسبی ۸ تا ۲۴ درصد و سرعت هوای ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه بررسی نمودند و با مدل نمایی پیچ

فرآیند را پیش بینی نمودند. دما و ضخامت ورقه‌های سیر بر سرعت خشک کردن موثر بود ولی رطوبت نسبی و سرعت هوا اثر معنی‌داری بر سرعت خشک کردن نشان نداد.

(Sharma&Prasad,2002) سیرچه‌های پیاز سیر را در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و با هوای گرم در سرعت‌های ۱ و ۲ متر بر ثانیه خشک کردند و گزارش دادند که سرعت هوای گرم در خشک کن اثر معنی‌داری بر روی مدت زمان خشک کردن نداشت. (Sharma at al,2003) خشک کردن سیرچه‌های پیاز سیر را به روش جابه‌جایی در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس با هوا در سرعت‌های ۱ و ۲ متر بر ثانیه بررسی نمودند. سرعت خشک شدن با افزایش دما افزایش و مدت زمان خشک کردن کاهش یافت. معادله لگاریتمی اصلاح شده پیچ به خوبی رفتار خشک کردن سیر به روش جابه‌جایی را توصیف نمود.

بیات (۱۳۸۵) ورقه‌های ۱/۵، ۲ و ۳ میلی‌متری سیر را در شرایط دمایی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس خشک کرد و ویژگی‌های کیفی سیر خشک را مورد بررسی قرار داد. با توجه به رنگ، اسید پیروویک و مدت زمان خشک کردن ورقه-ها، ضخامت ۲ میلی‌متر ورقه‌های سیر خشک شده در دماهای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس مناسب تشخیص داد. با توجه به محدودیت مطالعات انجام شده در زمینه مدلسازی فرآیند خشک کردن سیر، هدف اصلی این مطالعه، پیدا کردن مناسبترین مدل ریاضی برای خشک کردن لایه نازک سیر با توجه به دما و ضخامت به منظور پیشگویی روند فرآیند خشک کردن سیر است.

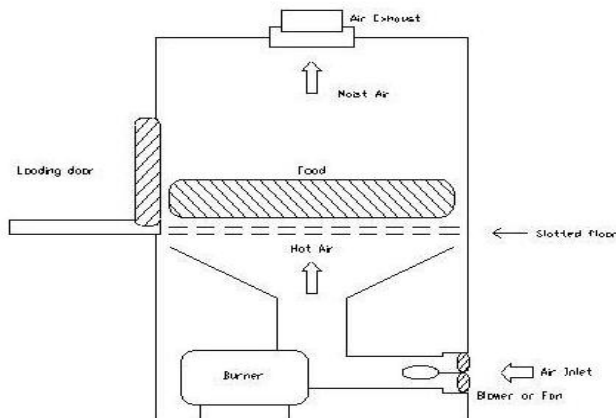
مواد و روش‌ها:

سوخ‌های سیر به منظور یکنواختی ماده آزمایشی از یک مزرعه کشت سیر در استان همدان جمع‌آوری شد. به منظور خشک شدن کامل پوسته‌های سیر، به مدت هفت روز در شرایط طبیعی و در سایه قرار داده شده سپس پوست‌گیری و به ضخامت ۲ میلی‌متر ورقه شدند. مقدار رطوبت اولیه سیر اندازه‌گیری (حسینی، ۱۳۶۹) و سپس عملیات خشک کردن درون خشک کن آزمایشگاهی نوع کلین^۱ ساخته شده در موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج (شکل ۱) در سه سطح دمایی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس با سرعت هوای ۰/۸ متر بر ثانیه با ضخامت ۲ میلی‌متر با ۳ تکرار و تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند ادامه پیدا کرد.

خشک کن مورد استفاده با ظرفیت ۲۰ کیلوگرم و تنظیم‌کننده‌های دیجیتالی دما با دقت ۱ درجه سلسیوس و سرعت جابجایی هوا به صورت جریان مستقیم در دو حالت ۵ و ۱۲ ولت، به صورت دور متغییر استفاده شده است. تغییرات دما هوای خارج شده از خشک کن توسط یک سنسور دما از نوع PT-100 در کامپیوتر ذخیره می‌شود. هوای وارد شده به دستگاه خشک کن به وسیله المنتی با توان ۱۵۰۰ وات گرم شده و پس از رسیدن به دمای مورد نظر از طریق یک مجرای استوانه‌ای به طرف توده محصول هدایت می‌شود. سرعت هوای وارده به توده محصول به کمک یک بادسنج پره‌ای مدل AM-4205 ساخت شرکت لوترون در بالای مجرای استوانه‌ای و زیر توده محصول اندازه‌گیری می‌شود.

^۱-Batch dryer

به منظور کنترل اتوماتیک و نمایش روند خشک شدن محصول در کامپیوتر به وسیله نرم افزار Lab View اطلاعات مورد نیاز شامل ثبت اطلاعات و داده های وزن و دمای هوای خارج شده از خشک کن به انضمام خاموش شدن سیستم پس از اتمام پروسه انجام می گیرد.



شکل - ۱ نمای دستگاه خشک کن کلین

مدلسازی:

برای مدلسازی ریاضی سینتیک خشک شدن ورقه های نازک سیر از نسبت رطوبت در طی خشک شدن ورقه ها استفاده می شود. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک شدن به وسیله رابطه محاسبه می شود.

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

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (2)$$

MR نسبت رطوبت، M_d رطوبت توده در لحظه جاری بر پایه خشک، M_e رطوبت تعادلی و M_0 رطوبت اولیه توده محصول، W_w وزن سیر در طی خشک شدن؛ W_d وزن سیر خشک می باشد.

برای محاسبه M_d در ابتدا با استفاده رطوبت اولیه به دست آمده از هاون از طریق فرمول

$$W = 1 - \frac{w_0(1 - W_0)}{w}$$

بر مبنای مرطوب محاسبه شد. سپس از طریق فرمول $\frac{W}{1-W}$ رطوبت بر مبنای خشک را به دست می آوریم.

برای محاسبه رطوبت تعادلی در ابتدا رطوبت بر مبنای خشک در هر لحظه از رطوبت پایانی کم شد. سپس معادله خط بر مبنای زمان به دست آمده و مساوی صفر قرار داده شد و مدت زمانی که طول کشید تا اختلاف بین دو رطوبت آزاد صفر شود مورد محاسبه قرار گرفت. سپس معادله رطوبت بر مبنای خشک در واحد زمان را محاسبه کرده و با قرار دادن مقدار زمان به دست آمده از معادله قبلی مقدار رطوبت تعادلی را به دست می آوریم و نسبت رطوبت را محاسبه می کنیم

(معادله ۱). نسبت رطوبت به دست آمده در طی آزمایش با ۱۰ مدل از مدل‌های استاندارد خشک شدن لایه نازک محصولات کشاورزی که در جدول ۱ آمده است مقایسه می‌شود.

روش تحلیل آماری داده‌ها

مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک‌شدن براساس متغیرهای مستقل زمان، دما و ضخامت ورقه‌ها به وسیله نرم‌افزار SigmaPlot استخراج شد. از سه معیار ضریب تبیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) برای سنجش بهترین مدل استفاده می‌شود که برای هر مدل هرچه مقدار R^2 بیشتر و χ^2 و RMSE کمتر باشد مدل بهتر ارزیابی می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۸۵، Guarte, 1996).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{\text{exp},i} - M_{\text{pre},i})^2}{N - n} \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_{\text{pre},i} - M_{\text{exp},i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

که $M_{\text{exp},i}$ رطوبت سیر مشاهده شده در i امین اندازه‌گیری $M_{\text{pre},i}$ رطوبت سیر پیش‌بینی شده از مدل در i امین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و n تعداد ثابت‌های به کار رفته در معادله است. برای هر یک از دماهای خشک‌کن معادلات جدول فوق استخراج شده و میانگین شاخص‌های دقت برازش در دماهای مختلف برای هر مدل به دست می‌آید و سپس با یکدیگر مقایسه شده و مدل برتر انتخاب و برای مدل برتر ضرایب و ثابت‌ها برای دماهای مختلف به دست خواهد آمد و نمودار منحنی خشک‌شدن ورقه سیر نیز رسم می‌شود. تمام پارامترها بر سرعت خشک شدن، اثر گذار هستند.

جدول ۱- مدل‌های رگرسیون خشک‌شدن توده بستر نازک مورد استفاده در مدل‌سازی

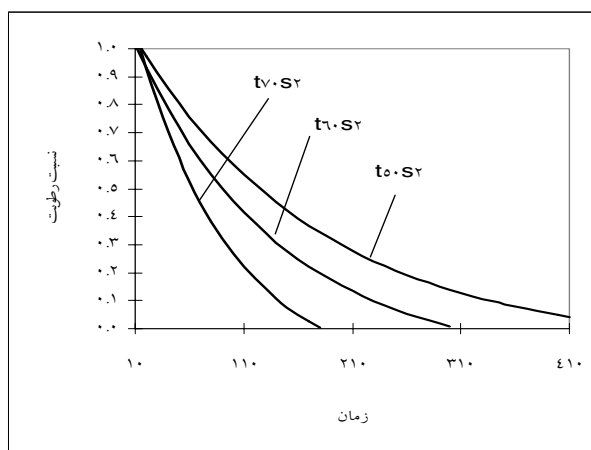
ردیف	نام مدل	مدل*	مرجع
۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	Westerman, 1973
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	Guarte, 1996
۳	هندرسون و پابیس	$MR = a \exp(-kt)$	Zhang et al, 1991
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yaldiz et al, 2001
۵	دو جمله‌ای	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Rahman et al, 1998
۶	دو جمله‌ای نمایی	$MR = a \exp(-kt) + \exp(-mt)$	Henderson, 1974
۷	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	Özdemir et al, 1999
۸	تقریب پخش	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Yaldiz et al, 2001
۹	هندرسون و «پابیس اصلاح شده»	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Karathanos, 1999
۱۰	میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Yaldiz et al, 2001

* M : رطوبت (d.b.)، t : زمان (min) و a ، b و c ، ضرایب g ، h ، k و m ، ثابت‌های مدل است.

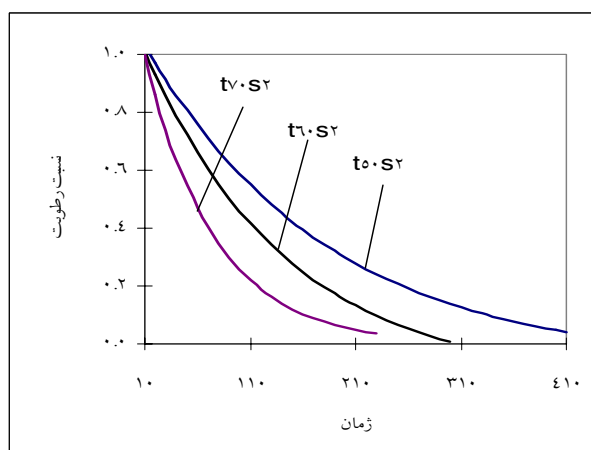
۱-سرعت خشک کردن:

منحنی های سرعت خشک کردن سیر (شکل ۳،۲ و ۴) نشان داد که مقدار رطوبت سیر به صورت تابعی نمایی با مدت زمان خشک کردن کاهش می یابد و قسمت عمده عملیات خشک کردن در مرحله نزولی فرایند خشک کردن انجام می شود این پدیده در بسیاری از مواد غذایی که خاستگاه زیستی^۲ دارند مشاهده می شود زیرا طبیعت آبدوست داشته و ملکول های آب با پیوندهای قوی به ملکول های ماده غذایی متصل هستند. نتایج مشابهی برای خشک کردن سیر به وسیله (Sharma et al, 2003) و (Madamba et al, 1996) گزارش شده است.

همانطور که از شکل های ۳،۲ و ۴ دیده می شود با افزایش دما میزان نسبت رطوبت به شدت کاهش می یابد. بیشترین سرعت کاهش رطوبت مربوط به دمای ۷۰ درجه سلسیوس و کمترین سرعت کاهش رطوبت مربوط به دمای ۵۰ درجه سلسیوس می باشد. یعنی هرچه دمای هوای خشک کننده بیشتر باشد در دقایق اول خشک شدن کاهش رطوبت سریع تر می باشد.

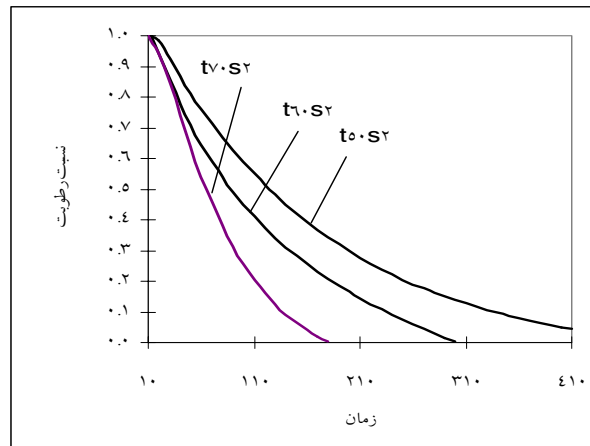


شکل ۲- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل داده های مدل لگاریتمی



شکل ۳- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل داده های مدل دو جمله ایی

²) Biologic origin



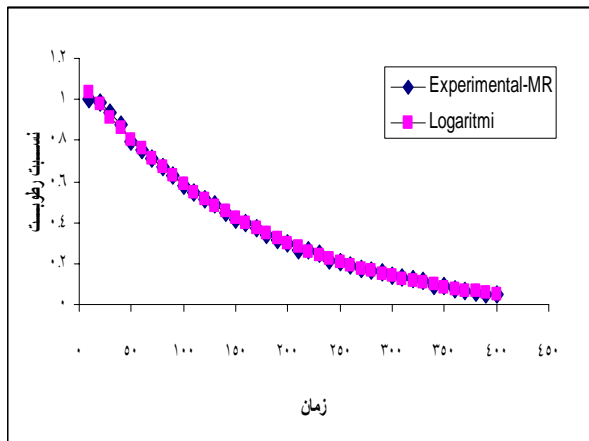
شکل ۴- تغییر رطوبت در طی خشک شدن با دماهای مختلف حاصل داده های مدل هندرسون پاییس (اصلاح شده)

۲- انتخاب مناسب ترین مدل:

رطوبت اولیه اندازه گیری شده سیر در طی آزمایش ۵۶/۶۷ درصد بر پایه ماده خشک بود. مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE بدست آمده برای سه مدل برتر (جدول ۲) نشان می دهد که با توجه به رطوبت توده در طی خشک شدن آزمایشگاهی سیر در دماهای متفاوت و مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE، مدل لگاریتمی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۲ میلیمتر با داشتن بالاترین بیشترین ضریب تبیین ($R^2=0/9990$) و کمترین مقدار χ^2 و RMSE ($\chi^2=0/0000828$ و $RMSE=0/00001609$) به عنوان بهترین مدل در درجه اول و مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۲ میلیمتر با ضریب تبیین ($R^2=0/9982$) و مقدار χ^2 و RMSE ($\chi^2=0/0000517$ و $RMSE=0/0000307$) به عنوان بهترین مدل در درجه دوم و مدل دو جمله ایی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۲ میلیمتر با ضریب تبیین ($R^2=0/9982$) و مقدار χ^2 و RMSE ($\chi^2=0/000128$ و $RMSE=0/00049$) به عنوان بهترین مدل در درجه سوم را دارا بود. این در حالی است که مادامبا و همکاران و کاسادا در مطالعه خود مدل نمایی پیچ را به عنوان بهترین پیش بینی نمودند. موهاپاترا و سرینیواسا مدل دو جمله نمایی را مناسب تر معرفی کردند. در مطالعه ساسیلیک و ایسین مدل لگاریتمی نسبت به سایر مدلها برآزش بهتری نشان داد. دویماز در تحقیق خود از مدل پیچ نتیجه بهتری گرفته بود. ارتکین و یالدیز در تحقیق خود مشاهده کردند که بهترین مدل با خطای کمتر، مدل میدیلی و همکاران می باشد. شرما و همکاران بیان کردند که معادله لگاریتمی اصلاح شده پیچ به خوبی رفتار خشک کردن سیر به روش جابه جایی را توصیف نمود.

۳- معتبر سازی مدل سینتیکی انتخاب شده (مدل لگاریتمی):

مقایسه مقادیر تجربی نسبت رطوبت با مقادیر پیش بینی شده به وسیله مدل لگاریتمی در دو شرایط خشک کردن متفاوت (دما و ضخامت) در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود انطباق خوبی بین نسبت های رطوبت تجربی و پیش بینی شده وجود دارد و می توان نتیجه گیری نمود که مدل مذکور برای پیش بینی سینتیکی خشک کردن ورقه های سیر با ضخامت ۲ میلیمتر مناسب می باشد.



شکل ۵- مقایسه مقادیر تجربی نسبت رطوبت با مقادیر پیش بینی شده به وسیله مدل لگاریتمی

به این ترتیب به وسیله این مدل می توان شدت افت یا خروج رطوبت از سطح ورقه های سیر، مقدار کل رطوبت خارج شده از سطح ورقه های سیر از زمان آغاز خشک کردن در دما و ضخامت متفاوت به عنوان تابعی از زمان خشک کردن محاسبه نمود.

بنابراین مدل ارائه شده می تواند برای بررسی و پیش بینی روند خشک شدن توده ورقه های نازک سیر مورد استفاده

قرار گیرد.

جدول ۲- مقادیر $RMSE$ ، K^2 و R^2

	50		دما (درجه سلسیوس)
		۲	ضخامت (میلیمتر)
R^2	K^2	RMSE	
0/9990002 5	0/0000517 3	0/0000160910	لگاریتمی
0/99940009	0/00008505	0/0000307611	هندرون و پاییس اصلاح شده
0/9990002 5	0/0000828 1	0/00049147 69	دو جمله ای

ثابت خشک کردن (min^{-1}) k و ضرایب a ، b ، n ، k_0 ، k_1 ، g ، c و h مدل رگرسیونی روش های برتر در جدول شماره ۳، ۴ و ۵ آورده شده است.

جدول ۳ مقادیر ثابت و ضریب مدل رگرسیونی دو جمله ایی به تفکیک دمای و ضخامت

دما (سلسیوس)	ضخامت (میلیمتر)	a	k_0 (۱/دقیقه)	b	k_1 (۱/دقیقه)
--------------	-----------------	---	-----------------	---	-----------------

0/0058	1/1011	8/12E-13	-0/0661	ضرایب		
<0/0001	<0/0001	1	0/5728	p	2	50
10/6271	9/74	2/52E-10	-0/569	t		

جدول ۴ مقادیر ثابت و ضریب مدل رگرسیونی هندرسون و پاپیس (اصلاح شده) به تفکیک دما و ضخامت

		ضخامت		دما		
		(میلیمتر)		(سلسیوس)		
h	c	g	b	k	a	ضرایب
7/9602	-0/044	9/16E-13	-0/0556	0/006	1/1041	
1	<0/0001	<0/0001	<0/0001	<0/0001	<0/0001	p
0	(-inf)	(+inf)	(-inf)	(+inf)	(+inf)	t
0/0836	-0/288	1/3914	-0/9807	1/9976	5/0979	t

جدول ۵ مقادیر ثابت و ضریب مدل رگرسیونی لگاریتمی به تفکیک دما و ضخامت

		ضخامت (میلیمتر)		دما (سلسیوس)	
c	k (۱/دقیقه)	a	ضرایب		
-0/0661	0/0058	1/1011	ضرایب		
<0/0001	<0/0001	<0/0001	p	2	50
54/1928	163/448	-8/4986	t		

با توجه به مقدار p بدست آمده تمامی ضرایب معنی دار بوده و فقط ضریب a در مدل رگرسیونی دو جمله ایی معنی دار نمی باشد.

۴- نتیجه گیری:

تجزیه آماری فاکتور دما اثر معنی داری در سطح یک درصد بر روی زمان خشک کردن و سرعت خشک کردن دارد. ولی اختلاف معنی داری بر روی مقدار رطوبت نهایی سیر خشک مشاهده نشد. ضخامت بر روی زمان و سرعت خشک کردن اثر معنی داری نداشته ولی فاکتور ضخامت اثر معنی داری در سطح یک درصد بر روی رطوبت نهایی سیر خشک دارد.

بررسی اثر متقابل دما و ضخامت نشان می دهد که دما و ضخامت بر روی زمان خشک کردن دارای اثر معنی دار بوده ولی بر روی سرعت خشک کردن و رطوبت نهایی سیر خشک اختلاف معنی داری ندارد.

نتایج نشان داد که تاثیر دما بر روی سرعت خشک کردن بیشتر از ضخامت است. بررسی نشان می دهد که برای هر یک از ضخامت های ورقه های سیر، با افزایش دما، مدت زمان خشک کردن و مقدار رطوبت نهایی کاهش پیدا می کند ولی با افزایش دما سرعت خشک کردن افزایش می یابد.

نتایج نشان داد که در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، در ضخامت ۲ و ۳ میلیمتر، مدت زمان خشک کردن دارای اختلاف معنی دار نبوده و در یک دسته قرار می گیرد ولی سرعت و رطوبت نهایی خشک دارای اختلاف معنی دار می باشد. در دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۲ و ۳ میلیمتر در مدت زمان خشک شدن، سرعت خشک شدن و رطوبت نهایی خشک شدن اختلاف معنی دار وجود دارد.

مقایسه مقادیر ضریب نفوذ آزمایشگاهی و پیش بینی شده با استفاده از مدل لگاریتمی به عنوان تابعی از دما در ضخامت‌های مختلف خشک کردن نشان داد که همبستگی مناسبی مابین مقادیر وجود دارد ($r < 0/99$).
مقایسه مقادیر تجربی نسبت رطوبت با مقادیر پیش بینی شده به وسیله مدل لگاریتمی در دو شرایط خشک کردن (دما و ضخامت) نشان داد که انطباق خوبی بین نسبت‌های رطوبت تجربی و پیش بینی شده وجود دارد.

۵- پیشنهادات:

- کاربرد مدل توصیفی انتخاب شده برای خشک کردن ورقه‌های سیر جهت کنترل و بهینه سازی و تولید محصولی با کیفیت خوب و یکنواخت.
- تکمیل مدل انتقال جرم توسعه داده شده با لحاظ کردن انتقال حرارت.

منابع:

بیات، ف. ۱۳۸۵. اثر شرایط گوناگون خشک کردن را بر ویژگی‌های کیفی سیر خشک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۲۳(۷) ۴۳-۳۱

حسینی، زیبا. ۱۳۶۹. روش‌های متداول در تجزیه‌ی مواد غذایی. انتشارات دانشگاه شیراز. چاپ دوم. ۲۱۰ صفحه.

فرجی هارمی، ر. ۱۳۷۱. اصول نگهداری مواد غذایی، انتشارات دانشگاه شیراز

محمدی، ع، رفیعی، ش، کیهانی، ع و امام جمعه، ز. ۱۳۸۵. بررسی مدل خشک کردن ورقه‌های نازک کیوی (رقم هایوارد) در خشک کن لایه نازک. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی مکانیزاسیون. دانشگاه فردوسی مشهد.

مرادی، م. زمردیان، ع. ۱۳۸۶. انتخاب مناسب ترین مدل ریاضی برای خشک کردن زیره سبز در حالت تابش غیر مستقیم در خشک کن خورشیدی فعال. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی مکانیزاسیون. دانشگاه فردوسی مشهد.

مهرآور، ح، کیانمهر، م، آغباشلو، ح، عرب حسینی، الف. ۱۳۸۵. ارزیابی مدل‌های خشک شدن لایه نازک برای توصیف سینتیک خشک کردن زرشک. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ملکی، م. دخانی، ش. ۱۳۷۴. صنایع غذایی جلد اول، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه شیراز.

نازقلیچی، ط. کیانمهر، م. آغباشلو، م، عرب حسینی، الف. ۱۳۸۵. مدل ریاضی سینتیک خشک شدن لایه نازک هویچ در طول خشک کن نواری مداوم. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون.

Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*. 61: 359–364.

Ertekin, C. and Yaldiz, O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*. 63: 349–359.

Guarte, R.C. 1996. Modelling the drying behaviour of copra and development of a natural convection dryer for production of high quality copra in the Philippines. Ph.D. dissertation, 287.

Hohenheim University , Stuttgart , Germany

- Henderson , S.M.1974. Progress in developing the thin layer drying equation. Transactions of the ASAE.17: 1167-1172
- Krathanos , V.T 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. Journal of Food Engineering. 39: 337-334.
- Madamba , P.S. , Driscoll , R.H. and Buckle , K.A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. Journal of Food Engineering. 29: 75-79.
- Maskan , M and Gogus , F. 1998. Sorption isotherms and drying characteristics of mulberry (Morus Alba). Journal of Food Engineering , v(37): 437-449.
- Maskan , M.2002. Drying , shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. J. of Food Eng. 48 ,277-282.
- Mohapatra, D., and Srinivasa Rao, P. 2005. A thin layer drying model of parboiled wheat. Journal of Food Engineering. 66:513-518.
- Ozdemir , M. , and Devres , Y.O. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. Journal of Food Engineering. 42: 225-233.
- Pabis , S. , Jayas , S. and Sankviski S. 1998. Grain Drying: Theory and Practice.
- Rahman , M. S. , Perera , C.O. and Thebaud , C. 1998. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. Food international research , v(30): 485-491
- Sacilik , K. Keskin , R and Elicin , A. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer
Sacilik , K. and Elicin , A. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. Journal of Food Engineering. 73:281-289
- Sharma , G.P. and Prasad , S. 2002.Comparison of convective and Microwave – Convective Drying of Garlic: Kinetics and energy Consumption. J. Food Science Technology. 39(6): 603-608.
- Sharma , G. P. , Prasad ,S. and Datta , A. K 2003.Drying kinetics of garlic
- Westerman , P. W. , White , G. M. and Ross , I. J. 1973. Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled corn. Transactions of the ASAE , v(16): 1136-1139.
- Yaldiz , O. , and Ertekin , C.2001. Thin layer solar drying of some vegetables. Drying Technology. 19: 583-596
- Zhang, Q. and Litchfield, J.B. 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. Drying Technology, v(9): 383-395

Abstract

Drying is one of the methods that widely used for preservation of fruits and vegetable in which water is removed to a final concentration, which assure microbial stability of the product and minimize chemical and physical changes of the material during storage. Modeling of drying kinetics is one of the ways for drying process control. Evaluation of drying kinetic as a function of drying conditions and determination of water diffusivity could help us in drying simulation for predicting the suitable drying conditions (temperature, thickness). In this research, drying behavior of garlic thin slices was investigated in experimental Kelin thin layer, based on drying mathematical models that were presented in literatures. Garlic slice samples with two thickness of 2, 3 mm were dried at three temperature levels of 50, 60 and 70 °c and the air velocity of 0.8 m/s with three repeat. The drying mathematical models were fitted to experimental data. Constants and coefficients of models were compared together and effects of dryer air temperature were evaluated with nonlinear regression method. All of the drying mathematical models were compared based on three statistical indices including: χ^2 , Root Mean Square Error (RMSE) and R^2 . Logarithmic model in 50 °c and 2 mm thickness with highest R^2 ($R^2=0.9990$) and lowest value of χ^2 and RMSE ($\chi^2 = 0.0000828$ and RMSE= 0.00001609) was found as the best model. Drying rate as removed absolute moisture content per time unit, showed that drying regardless of drying conditions occur in descending rate period and drying rate increased with drying temperature, but thickness of garlic slice samples has low effect on drying rate.

Keywords: garlic, modeling, nonlinear regression, thin layer dryer.