



مدل سازی سینتیک خشک کردن لایه نازک زردآلو با استفاده از خشک کن فروسرخ

فخرالدین صالحی^۱

^۱ استادیار گروه مهندسی ماشین های صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان. F.Salehi@Basu.ac.ir

چکیده

از نظر تولید زردآلو در جهان، ایران مقام دوم را دارد و مطالعه روش های خشک کردن این میوه امری ضروری می باشد. در این پژوهش مدل سازی سینتیک خشک شدن زردآلو در یک خشک کن فروسرخ بررسی شد. تأثیر توان لامپ پرتودهی در سه سطح ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات و فاصله نمونه از لامپ در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی متر بر زمان خشک شدن و ضریب نفوذ رطوبت در طی فرآیند خشک شدن زردآلو بررسی شد. مدل های استاندارد جهت بررسی سینتیک خشک شدن بر داده های آزمایشی برازش داده شد و کیفیت برازش آن ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد تأثیر توان لامپ پرتودهی و فاصله بر فرآیند خشک شدن زردآلو معنی دار می باشد. با افزایش توان لامپ فروسرخ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات زمان خشک شدن زردآلو ۷۸/۶ درصد کاهش یافت. کاهش فاصله لامپ از سطح نمونه از ۱۰ به ۵ سانتی متر باعث کاهش ۴۳/۹ درصدی در زمان خشک کردن شد. اثر توان حرارتی فروسرخ و فاصله نمونه از لامپ بر تغییرات ضریب نفوذ مؤثر زردآلو بررسی و نشان داد که با افزایش توان منبع حرارتی و کاهش فاصله مقدار ضریب نفوذ مؤثر افزایش می یابد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت زردآلو بین $1/0 \times 10^{-9}$ تا $8/42 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه بود. در مدل سازی فرآیند خشک کردن زردآلو مدل پیچ نسبت به سایر مدل ها با بزرگ ترین مقدار ضریب تعیین (R^2) و کوچک ترین خطا، نتایج نزدیک تری به داده های آزمایش را داشت.

واژه های کلیدی: زردآلو، سینتیک، ضریب نفوذ مؤثر، مدل پیچ

Modeling of apricot thin layer drying kinetics using infrared dryer

Fakhreddin Salehi¹

¹ Assistant Professor, Department of Food Industry Machines, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ABSTRACT

The production of apricots in the world, Iran is second and studying the drying methods of this fruit is essential. In this study, drying kinetic modeling of apricot in an infrared dryer was investigated. The effect of radiation lamp power at three levels 150, 250 and 375 W and distance of lamp from sample at three levels 5, 7.5 and 10 cm, on drying time, and moisture diffusion coefficients during drying process of apricot were evaluated. Standard models were fitted to experimental data to study the drying kinetics and fitting quality of them was analyzed. The results showed that the effect of radiation lamp power and distance on the drying process of apricot is significant. With increase in infrared lamp power from 150 to 375 W drying time of apricot 78.6% reduced. Decreasing in distance of lamp from sample from 10 to 5 cm reduced 43.9% of drying time. Effect of infrared heat power and distance of sample from lamp on effective diffusivity coefficient of apricot was investigated and the results showed that the effective diffusivity coefficient was increased with increasing heat source power and decreasing of distance. Moisture effective diffusivity coefficient of apricot was between 1.00×10^{-9} to 8.42×10^{-9} m²/s. In modeling of apricot drying process, the

۱- استادیار گروه مهندسی ماشین های صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.



Page model, compared to other models, with the biggest R^2 and the smallest error, had closer results to the experimental data.

Keywords: Apricot, Effective diffusion coefficient, Kinetics, Page Model.

۱- مقدمه

ایران پس از ترکیه مهم‌ترین تولید کننده زردآلو در جهان می‌باشد. زردآلو با نام علمی *Prunus armeniaca* از خانواده رزاسه یکی از خوشمزه‌ترین میوه‌ها در مناطق معتدله می‌باشد. میوه آن تقریباً کروی و گوشتی و بعضی از انواع آن تقریباً بیضی شکل و یا نوک دراز بوده و به واسطه شباهت به دو قسمت مساوی (قرینه) تقسیم می‌شود (Hassan-Beygi, 2009). میوه تازه و برگه زردآلو ارزش تغذیه‌ای بالایی دارند و سرشار از آهن و ویتامین‌های A، B و C می‌باشد. مقادیر بالای بتاکاروتن و لیکوپن موجود در زردآلو باعث می‌شود تا از اکسیداسیون کلسترول بد جلوگیری کند (Hassan-Beygi, 2009; Salehi et al., 2015).

امروزه صنعت خشکبار در جهان بسیار بیشتر از گذشته رونق یافته و به یک تجارت ۱۴۲۰ میلیون دلاری بدل شده است. در این بین دستیابی به بازارهای مصرف و افزایش درآمد تولیدکنندگان بخش کشاورزی منوط به افزایش کمی و کیفی محصولات کشاورزی و فرآورده‌های آن‌ها است. حفظ ارزش تغذیه‌ای محصول خشک‌شده پارامتری است که به عنوان شاخص کیفیت محصول مد نظر قرار می‌گیرد و هدف و هنر متخصصین صنایع غذایی ارائه و اجرای روش‌هایی است که منجر به تولید محصول با کمترین تغییرات ناخواسته و با بهترین کیفیت از نظر ارگانولپتیکی و تغذیه‌ای شود (Rastogi, 2012).

تأثیر دمای محلول اسمزی در محدوده 25°C تا 65°C ، در مدت زمان ۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه و غلظت محلول اسمزی در محدوده ۳۰ تا ۶۰ درصد (وزنی/وزنی) بر پارامترهای کاهش وزن، کاهش آب، جذب مواد جامد و نسبت دفع آب به جذب مواد جامد در طی خشک کردن اسمزی زردآلو توسط صالحی و همکاران (۲۰۱۵) بررسی شده است. نتایج خشک کردن اسمزی نشان داد که هر سه پارامتر ذکر شده بر کاهش وزن، کاهش آب، جذب مواد جامد و نسبت دفع آب به جذب مواد جامد مؤثر هستند. با افزایش زمان فرآیند اسمزی از ۳۰ دقیقه به ۱۲۰ دقیقه، درصد کاهش وزن، درصد کاهش آب و مقدار جذب مواد جامد به ترتیب ۲۱/۷۸، ۵۰/۶۴ و ۱۵۷/۳۱ درصد افزایش یافته‌اند (Salehi et al., 2015).

خشک کردن به وسیله اشعه فرورسرخ به ویژه به شکل لایه نازک روش مناسبی است. در این روش حرارت در محصول بدون ایجاد تغییرات نامطلوب ایجاد می‌شود، در نتیجه کیفیت ساختاری محصول نهایی افزایش و هزینه‌های فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد. همچنین ضایعات محصول به حداقل می‌رسد (Rastogi, 2012). اشعه فرورسرخ سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم بر روی محصول می‌شود که نسبت به خشک-کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود سریع‌تر است و راندمان بالاتری دارد (Ratti and Mujumdar, 1995). بیشتر اشعه فرورسرخ توسط مولکول‌های سطحی جذب می‌شود. این پدیده سبب گرم شدن سریع محصول شده و سبب کاهش تنش‌های حرارتی در محصول و در نتیجه حفظ کیفیت آن می‌شود (Meeso et al., 2004).

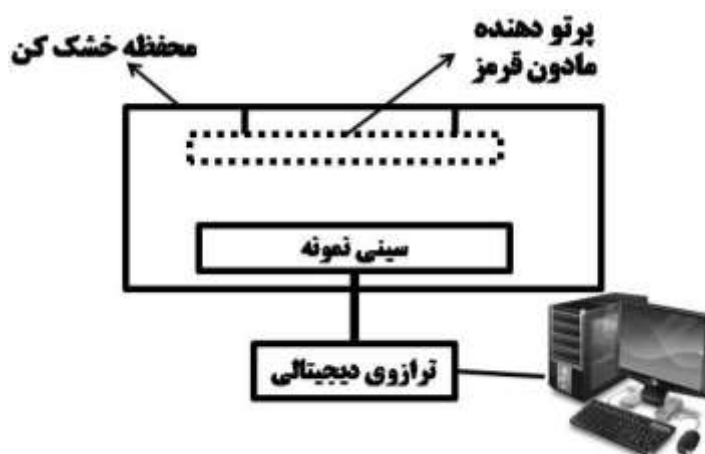
مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن برای طراحی، بهبود سیستم‌های خشک‌کن موجود و حتی کنترل فرآیند استفاده می‌شود (Doymaz, 2011). اخیراً مطالعات زیادی برای توصیف رفتار خشک شدن میوه‌ها و سبزی‌ها مختلف جهت یافتن بهترین مدل ریاضی صورت گرفته است. دیماز (۲۰۰۹) خشک کردن کیوی را مدل‌سازی نمود. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲/۴ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۱۰ تا ۲۵٪ انجام شد. در این تحقیق مدل هنرسون و پاپیس اصلاح شده و مدل ورما و همکاران نتایج بهتری نشان دادند (Doymaz, 2009). طغرل (۲۰۰۶) خشک شدن هویج را با فرورسرخ در محدوده ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس مدل‌سازی کرد و مدل میدلی را جهت توصیف رفتار خشک کردن پیشنهاد داد (Toğrul, 2006).

با توجه به بررسی منابع منتشرشده مشخص شد که تاکنون پژوهشی در خصوص مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در طی خشک کردن زردآلو در خشک‌کن فرورسرخ صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر توان لامپ پرتودهی فرورسرخ و فاصله لامپ از نمونه بر خشک کردن زردآلو و مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم آن می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خشک کردن

برای انجام آزمایش‌ها زردآلو از استان همدان تهیه گردید. برای انجام فرآیند خشک کردن ابتدا زردآلوه‌ها به قطعاتی با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر برش داده شدند. ورقه‌های زردآلو بلافاصله پس از برش جهت پرتو دهی توسط خشک‌کن فرورسرخ مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۱). جهت خشک کردن نمونه‌های برش خورده با خشک‌کن فرورسرخ از متغیرهایی شامل توان‌های لامپ فرورسرخ در سه سطح ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات و فاصله لامپ از نمونه در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ ± گرم که در خشک‌کن تعبیه شده بود، ثبت گردید.



شکل (۱) شماتیک خشک‌کن فرورسرخ.

آزمایش‌ها در سه تکرار و در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند. برای رسم نمودارها از برنامه (۲۰۰۷) Excel و برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار Minitab 16 در سطح معنی‌داری ۵٪ استفاده شد. جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن زردآلو با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (Doymaz, 2007):

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

MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t : رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه خشک (d.b)، M_e : رطوبت تعادلی نمونه‌ها (d.b) و M_0 : رطوبت اولیه نمونه‌ها (d.b) می‌باشند. با توجه به رابطه ۱، نسبت رطوبت به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طی خشک شدن وابسته است. برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_0 و M_t بسیار کوچک می‌باشد؛ بنابراین می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست (Doymaz, 2007).

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

1 Infrared Heat Lamp (NIR), Noor Lamp Company, Iran.

2 Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)



۲-۲- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

پدیده‌های انتقال معمولاً برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه‌بندی می‌شود. قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (3)$$

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و x شاخص فضایی می‌باشد. مطالعه‌ی انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم در طی دوره‌ی سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد (Wong, 2001). برای بکار بردن قانون فیک فرض می‌گردد که فرآورده غذایی تک‌بعدی است؛ رطوبت اولیه یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت عمده در برابر انتقال رطوبت است. حل معادله فیک برای یک تیغه به صورت رابطه ۴ می‌باشد:

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

در اینجا، L نصف ضخامت تیغه (برحسب متر)، n تعداد عبارات در نظر گرفته‌شده از معادله، t زمان خشک شدن (s) و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m^2s^{-1}) می‌باشند. ضریب نفوذ مؤثر از طریق محاسبه شیب معادله ۵ به دست می‌آید:

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (5)$$

ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک کردن برحسب لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت ($LnMR$) نسبت به زمان تعیین می‌گردد. هنگامی که نمودار مقدار $LnMR$ نسبت به زمان رسم گردد، شیب خط به دست آمده را در معادله ۶ قرار داده تا ضریب نفوذ مؤثر به دست آید:

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (6)$$

K_0 شیب خط می‌باشد. برای هر تیمار از ضریب نفوذهای به دست آمده میانگین گرفته و نتیجه اعلام شد. به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن زردآلو، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک کردن استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن زردآلو در جدول ۱ به نمایش درآمده است (Doymaz, 2007; Wong, 2001).

جدول (۱) مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن زردآلو.

Model	مدل	معادله	
(Wong, 2001)	Wang and Singh	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$
Jain and Pathare,) (2004)	Henderson and Pabis	هندسون و پابیس	$MR = a \exp(-kt)$
(Doymaz, 2007)	Approximation of diffusion	تقریب انتشار	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
Jain and Pathare,) (2004)	Page	پیج	$MR = \exp(-kt^n)$
(Doymaz, 2007)	Modified Page –II	پیج اصلاح شده	$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$
Jain and Pathare,) (2004)	Newton	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$
(Doymaz, 2007)	Midilli	میدیلی	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
(Doymaz, 2009)	Logarithmic	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$

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



در این مطالعه به منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها، از نرم‌افزار Curve Expert ویرایش ۱/۳۴ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

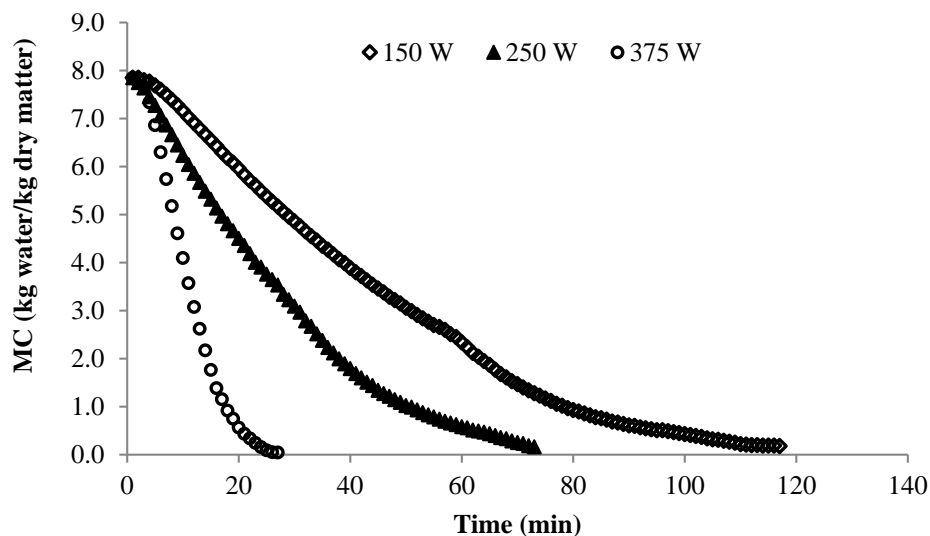
خشک کردن یکی از روش‌های نگهداری مواد غذایی محسوب می‌شود. علت توجه زیاد به این روش، افزایش ماندگاری در مقایسه با سایر روش‌ها، تولید محصول با وزن و حجم کمتر و عدم نیاز به سردخانه و کاهش هزینه‌های جابه‌جایی و بسته‌بندی می‌باشد (Salehi et al., 2015). نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر توان لامپ فرسوخ و فاصله بر زمان خشک شدن زردآلو آنالیز و در جدول ۲ به نمایش درآمده است. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود اثر فاکتورهای توان لامپ، فاصله و همچنین اثر متقابل آن‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار شده است. کاهش فاصله لامپ از سطح نمونه از ۱۰ به ۵ سانتی‌متر باعث کاهش زمان خشک کردن از ۱۰۱ دقیقه به ۴۵ دقیقه شد (توان ۲۵۰ وات). با افزایش توان لامپ فرسوخ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات زمان خشک شدن زردآلو ۷۸/۶ درصد کاهش یافت.

جدول (۲) نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرهای توان لامپ و فاصله بر زمان خشک شدن زردآلو.

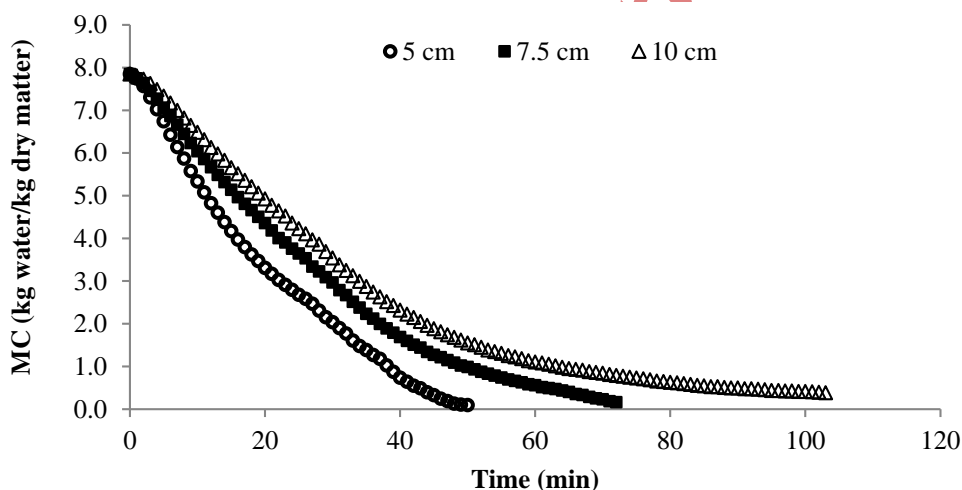
منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	P
توان	۲	۲۳۹۰۸/۳	۱۱۹۵۴/۲	۰/۰۰۰
فاصله	۲	۴۸۸۲/۳	۲۴۴۱/۲	۰/۰۰۰
توان × فاصله	۴	۱۴۰۲/۳	۳۵۰/۶	۰/۰۰۰
خطا	۹	۶۱/۵	۶/۸	
کل	۱۷	۳۰۲۵۴/۵		

اثر توان لامپ پرتودهی و فاصله بر تغییرات رطوبت در واحد زمان در شکل‌های ۲ و ۳ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ فرسوخ، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت زردآلو افزایش می‌یابد (شکل ۲). افزایش توان لامپ باعث افزایش دمای خشک‌کن می‌گردد که از طرف دیگر باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول شده و باعث گرم شدن سریع‌تر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود؛ و در نتیجه زمان خشک شدن کاهش می‌یابد (Doymaz and Pala, 2003; Gorjian, 2009). با گذشت زمان خشک شدن و به تبع آن کاهش رطوبت نمونه‌ها نرخ خشک شدن کاهش می‌یابد. با افزایش توان پرتودهی، دمای سطح نمونه‌ها افزایش یافته و در نتیجه فشار بخار در داخل نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش اختلاف فشار بین سطح و داخل نمونه‌ها نرخ خشک شدن نمونه‌ها بیشتر شده است. نتایج مشابهی برای خشک شدن برش‌های پیاز (Jain and Pathare, 2004) و تفاله سیب (Wang et al., 2007) گزارش شده است.

هبار و همکاران (۲۰۰۴) از یک خشک‌کن ترکیبی فرسوخ با هوای داغ در سه حالت ترکیبی، فرسوخ به تنهایی و هوای داغ به تنهایی برای خشک کردن سیب‌زمینی و هویج استفاده کردند. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش زمان خشک شدن و کاهش انرژی مصرفی در خشک‌کن ترکیبی نسبت به فرسوخ و هوای داغ بود (Hebbbar et al., 2004).

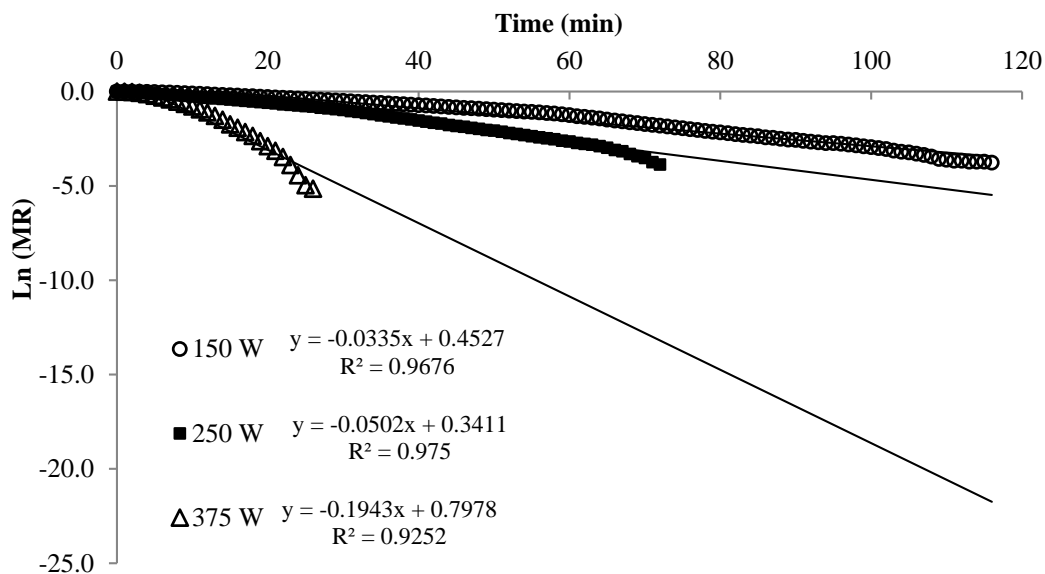


شکل (۲) اثر تغییر توان منبع حرارت دهی بر رطوبت زردآلو (در فاصله ۷/۵ سانتی متر).

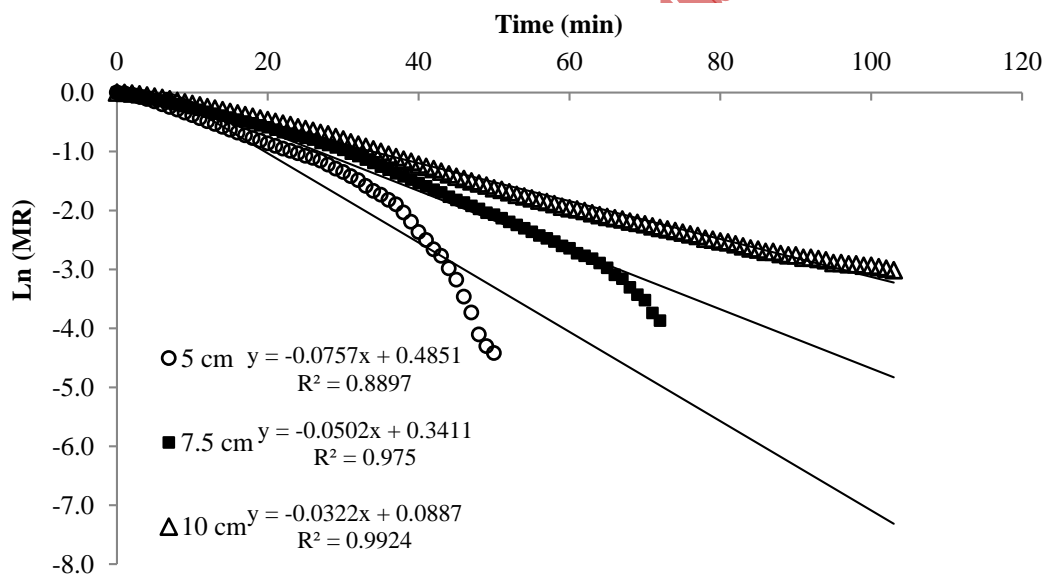


شکل (۳) اثر تغییر فاصله لامپ پرتو دهی از سطح نمونه بر رطوبت زردآلو (لامپ پرتو دهی ۲۵۰ وات).

بیشترین زمان خشک شدن مربوط به توان پرتو دهی ۱۵۰ وات و در فاصله ۱۰ سانتی متری بود (۱۴۸ دقیقه). کمترین زمان خشک شدن نیز مربوط به توان پرتو دهی ۳۷۵ وات و در فاصله ۵ سانتی متری است که مدت زمان ثبت شده برای این تیمار ۲۲ دقیقه به دست آمد. بررسی سینتیک انتقال جرم و ضرایب نفوذ رطوبت می تواند یک ابزار سودمند برای کنترل شرایط فرآیند خشک کردن و افزایش کیفیت محصول باشد. شکل ۴ روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت (LnMR) را نسبت به زمان در توان های متفاوت در فاصله ۷/۵ سانتی متر را نشان می دهد. شکل ۵ نیز روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت نسبت به زمان برای فواصل مختلف لامپ پرتو دهی ۲۵۰ وات از سطح زردآلو را نشان می دهد. شیب این خطوط جهت محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده گردید. مقادیر مختلف میزان ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول ۳ گزارش شده است. همان طور که در این جدول ملاحظه می شود با افزایش توان لامپ پرتو دهی و کاهش فاصله نمونه از لامپ ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است. با افزایش توان لامپ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از $1/38 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $1/38 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت (فاصله ۷/۵ سانتی متر). نتایج مشابهی برای خشک کردن برش های انبه $1/60 \times 10^{-9}$ تا $9/20 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه (Jaya and Das, 2003) و برش های پیاز $1/32 \times 10^{-9}$ تا $1/09 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه (Mitra et al., 2011) گزارش شد.



شکل (۴) مقادیر لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان برای لامپ‌های پرتودهی فروسرخ در فاصله ۷/۵ سانتی‌متر.



شکل (۵) مقادیر لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان برای فواصل مختلف لامپ پرتودهی ۲۵۰ وات از سطح زردآلو.



جدول (۳) مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک کردن.

r	ضریب نفوذ (m^2s^{-1})	فاصله لامپ (cm)	توان (W)
۰/۹۷۵	$۱/۷۹ \times ۱۰^{-۹}$	۵	۱۵۰
۰/۹۸۳	$۱/۳۸ \times ۱۰^{-۹}$	۷/۵	
۰/۹۹۴	$۱/۰۰ \times ۱۰^{-۹}$	۱۰	
۰/۹۴۳	$۳/۱۳ \times ۱۰^{-۹}$	۵	۲۵۰
۰/۹۸۷	$۲/۰۸ \times ۱۰^{-۹}$	۷/۵	
۰/۹۹۶	$۱/۳۳ \times ۱۰^{-۹}$	۱۰	
۰/۹۵۲	$۸/۴۲ \times ۱۰^{-۹}$	۵	۳۷۵
۰/۹۶۲	$۸/۰۸ \times ۱۰^{-۹}$	۷/۵	
۰/۹۳۴	$۴/۸۳ \times ۱۰^{-۹}$	۱۰	

مدل‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن زردآلو در جدول ۱ گزارش شده است. با توجه به خطای کمتر حاصل از برآزش داده‌های آزمایشگاهی با مدل پیچ در طی بررسی سینتیک خشک شدن زردآلو، نتایج این مدل در جدول ۴ گزارش شده است. در این جدول ضریب تعیین، خطای استاندارد و ضرایب این مدل ارائه شده است. در مدل‌سازی فرآیند خشک کردن زردآلو مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها با بزرگ‌ترین مقدار ضریب تعیین (R^2) و کوچک‌ترین خطا (SE)، نتایج نزدیک‌تری به داده‌های آزمایش را داشت. لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از سامانه فروسرخ توصیه می‌شود.

نتایج مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه‌نازک شلتوک رقم فجر نشان داد که مدل تقریب انتشار در خشک کردن لایه‌نازک شلتوک رقم فجر نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بالاتری برخوردار است ولی به دلیل دقت قابل قبول و سادگی معادله پیچ، این مدل برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن شلتوک توصیه شده است (Omid et al., 2006). در مطالعه دیگری مدل‌سازی خشک شدن لایه‌نازک برنج در دماها و سرعت‌های مختلف هوا بررسی شد. بر اساس نتایج، مدل میدیلی مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی رفتار خشک شدن لایه‌نازک برنج بود (Doymaz and Pala, 2003).

جدول (۴) ضریب تعیین، خطای استاندارد و ضرایب مدل پیچ.

SE	R^2	n	k	فاصله لامپ (cm)	توان (W)
۰/۰۱۹	۰/۹۹۸	۱/۴۸	۰/۰۰۴	۵	۱۵۰
۰/۰۱۵	۰/۹۹۸	۱/۴۵	۰/۰۰۳	۷/۵	
۰/۰۱۰	۰/۹۹۹	۱/۲۴	۰/۰۰۷	۱۰	
۰/۰۲۶	۰/۹۹۶	۱/۲۹	۰/۰۱۸	۵	۲۵۰
۰/۰۱۱	۰/۹۹۹	۱/۳۳	۰/۰۱۱	۷/۵	
۰/۰۱۵	۰/۹۹۸	۱/۲۵	۰/۰۱۱	۱۰	
۰/۰۱۳	۰/۹۹۹	۱/۵۶	۰/۰۲۹	۵	۳۷۵
۰/۰۰۶	۰/۹۹۹	۱/۸۷	۰/۰۱۰	۷/۵	
۰/۰۱۶	۰/۹۹۸	۱/۶۳	۰/۰۱۱	۱۰	



۴- نتیجه گیری

در این پژوهش سینتیک خشک کردن برش‌های زردآلو در یک خشک‌کن آزمایشگاهی فرسوخ در محدوده توان ۱۵۰ تا ۳۷۵ وات و فواصل ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. افزایش توان لامپ و کاهش فاصله آن از سطح نمونه موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت‌زمان آن گردید. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای زردآلو در محدوده $1/0 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $8/42 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به دست آمد که با افزایش توان لامپ فرسوخ و کاهش فاصله افزایش یافت. برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن زردآلو، از مدل‌های مختلفی استفاده گردید که در نهایت مدل پیچ به دلیل بالا بودن شاخص ضریب تعیین و پایین بودن خطای استاندارد، جهت بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن انتخاب گردید.

منابع

- Doymaz, I., (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering* 79(1), 243-248.
- Doymaz, I., (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of kiwifruit slices. *Journal of Food Processing and Preservation* 33(s1), 145-160.
- Doymaz, I., (2011). Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation* 35(2), 280-289.
- Doymaz, I., Pala, M., (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering* 60(2), 125-130.
- Gorjian, S., (2009). Modelling of thin layer drying kinetics of barberry fruit. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Farsi.
- Hassan-Beygi, S.R., (2009). Some physico-mechanical properties of apricot fruit, pit and kernel of ordubad variety. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- Hebbar, H.U., Vishwanathan, K., Ramesh, M., (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering* 65(4), 557-563.
- Jain, D., Pathare, P.B., (2004). Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices. *Biosystems Engineering* 89(3), 289-296.
- Jaya, S., Das, H., (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology* 21(7), 1215-1234.
- Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T., Soponronnarit, S., (2004). Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering* 65(2), 293-301.
- Mitra, J., Shrivastava, S., Rao, P.S., (2011). Vacuum dehydration kinetics of onion slices. *Food and Bioprocess Processing* 89(1), 1-9.
- Omid, M., Yadollahinia, A., Rafiee, S., (2006). A thin-layer drying model for paddy dryer, *Proc. of the International conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies, AIT, Pathumthani, Thailand, 12th*, pp. 202-211.
- Rastogi, N.K., (2012). Recent trends and developments in infrared heating in food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 52(9), 737-760.
- Ratti, C., Mujumdar, A., (1995). Infrared drying. *Handbook of Industrial Drying*, Ed. Mujumdar, A. S., Second edition, New York, NY, Marcel Dekker Inc. 1, 567-588.
- Salehi, F., Abbasi Shahkoh, Z., Godarzi, M., (2015). Apricot osmotic drying modeling using genetic algorithm - artificial neural network. *Journal of Innovation in Food Science and Technology* 7(1), 65-76.
- Toğrul, H., (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering* 77(3), 610-619.
- Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J., Hu, X., (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International* 40(1), 39-46.
- Wong, J. Y., (2001). *Theory of ground vehicles*. John Wiley & Sons.