

سینتیک کاهش رطوبت خرمالو در طی فرآیند خشک کردن ترکیبی هوای داغ - مادون قرمز

فخرالدین صالحی^{a*}، مهدی کاشانی نژاد^b، پونه سیاه منصوری^c، الناز مرادی^c

^a استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^b استاد دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^c دانشجوی کارشناسی دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۹/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۵/۳۰

چکیده

مقدمه: بررسی سینتیک انتقال جرم و ضرایب نفوذ رطوبت می‌تواند یک ابزار سودمند برای کنترل شرایط فرآیند خشک کردن و افزایش کیفیت محصول باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش مدل‌سازی سینتیک خشک شدن خرمالو در یک خشک‌کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز بررسی شد. تأثیر دمای هوای داغ در سه سطح ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد و توان لامپ پرتودهی در سه سطح ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات بر زمان و آهنگ خشک شدن و ضریب نفوذ رطوبت در طی فرآیند خشک شدن خرمالو بررسی شد.

یافته‌ها: افزایش دمای خشک‌کن از ۵۵ به ۷۵ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش ۳۶ درصدی در زمان خشک کردن شد. با افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات زمان خشک شدن خرمالو ۶۸/۴ درصد کاهش یافت. اثر توان حرارتی مادون قرمز و دمای هوای داغ بر تغییرات ضریب نفوذ مؤثر خرمالو نشان داد که با افزایش توان منبع حرارتی مادون قرمز مقدار ضریب نفوذ مؤثر افزایش می‌یابد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت خرمالو بین $1/8 \times 10^{-9}$ تا $1/3 \times 10^{-8}$ مترمربع بر ثانیه بود.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد تأثیر دمای هوای داغ و توان لامپ پرتودهی بر فرآیند خشک شدن خرمالو معنی‌دار هست. در مدل‌سازی فرآیند خشک کردن خرمالو مدل لگاریتمی همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر مدل‌ها داشت.

واژه‌های کلیدی: خرمالو، سینتیک، ضریب نفوذ، مدل لگاریتمی

مقدمه

خرمالو^۱ با نام علمی *Diospyros kaki* دارای واریته‌های مختلفی است. مناسب‌ترین اقلیم برای کاشت این درخت آب و هوای نیمه گرمسیری است ولی با وجود این در نواحی سرد معتدل نیز می‌توان برخی ارقام خرمالو را کشت نمود. حدود ۲۰ هزارتن خرمالو در کشور تولید می‌شود (FAO, 2013). در برخی از واریته‌ها میوه کاملاً کروی و در برخی دیگر نسبتاً کشیده است. این میوه حاوی مقادیر بالایی مواد قندی، تانن و ویتامین است. رنگ آن‌ها از نارنجی و زرد روشن تا نارنجی و قرمز تیره متفاوت می‌باشد. میوه خرمالو سرشار از مواد مغذی و بتاکاروتن است، به طوری که این میوه به میوه ضد بیماری معروف است. میوه خرمالو به علت دارا بودن مواد معدنی، برای رشد و نمو بدن بسیار مفید است و آهن موجود در آن جهت خون‌سازی و پتاسیم موجود در آن اشتهاآور است (Ito, 1980; Madanloo, 1987; Miller & Crocker, 1994).

میوه سالم خرمالو به صورت تازه خوری مصرف می‌شود و یا به صورت منجمد، مربا، کمپوت، پودینگ و یا خشک‌شده عرضه می‌شود (Miller & Crocker, 1994).

Safiyari و همکاران (2013) گزارش کردند که با افزایش زمان نگهداری میوه‌های تازه خرمالو، خصوصیات فیزیکی شامل طول، عرض و ضخامت میوه به ترتیب از ۵۶/۰۱ به ۵۲/۵۷، ۵۴/۱۹ به ۵۰/۰۱ و ۳۶/۷۲ به ۳۲/۴۸ میلی‌متر تغییر می‌یابد. ضریب کرویت نیز از ۰/۸۵۹ به ۰/۸۳۸ کاهش یافت.

خشک کردن محصولات کشاورزی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری و محافظت آن‌ها به حساب می‌آید. با کاهش میزان آب موجود در محصولات، فعالیت میکروبی در آن‌ها کاهش می‌یابد. به علاوه، کاهش رطوبت محصولات باعث کاهش مقدار وزن و حجم آن‌ها شده و بازده جابه‌جایی و انبارداری محصولات را افزایش می‌دهد. در بعضی مواقع خشک کردن بعضی تولیدات کشاورزی برای آسان تر شدن مصرف آن توسط مصرف‌کننده است (Singh & Heldman, 1993).

ویژگی‌های کیفی برگه خرمالو خشک‌شده در آون در محدوده دمایی ۶۵-۵۵ درجه سانتی‌گراد توسط Hazbavi

و Minaei در سال ۲۰۱۰ بررسی شده است. بر اساس نتایج ارزیابی حسی، برگه خرمالو خشک‌شده در سطح رطوبت ۱۰ درصد جهت تولید و نگهداری بلندمدت این محصول توصیه شده است. با کاهش رطوبت محصول، طعم گسی آن کمتر شده و محصول خشک‌شده شیرین‌تر به نظر می‌آید (Hazbavi & Minaei, 2010).

خشک کردن به وسیله اشعه مادون قرمز 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 در مقایسه با سایر روش‌های خشک کردن بالاتر بوده و هزینه‌های فرآیند کاهش می‌یابد (Jun et al., 2011; Strumillo & Kudra, 1987). اشعه مادون قرمز سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم بر روی محصول می‌شود که نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود سریع‌تر است و راندمان بالاتری دارد و کیفیت محصولات خشک‌شده به این روش در مقایسه با روش هوای داغ بالاتر می‌باشد (Afzal et al., 1999; Nimmol & Devahastin, 2011; Ratti & Mujumdar, 1995).

پهلوانزاده و همکاران (۱۳۹۲) جهت کاهش زمان خشک کردن محصولات کشاورزی خشک‌کن جابه‌جایی و تشعشعی را ادغام نمودند. نتایج نشان داد که با ادغام این دو روش تا ۵۸٪ زمان خشک شدن میوه کاهش یافت.

صالحی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی سینتیک انتقال جرم در طی خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز برش‌های بادمجان پرداختند. تأثیر دمای هوای داغ در سه سطح ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و توان لامپ پرتودهی در سه سطح ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات، بر زمان خشک شدن و ضریب نفوذ رطوبت در طی خشک شدن برش‌های بادمجان بررسی شد. نتایج نشان داد تأثیر دمای هوای داغ و توان لامپ پرتودهی بر فرآیند خشک شدن برش‌های بادمجان معنی‌دار ($P < 0.05$) می‌باشد.

تأثیر توان لامپ پرتودهی در سه سطح ۲۰۴، ۲۳۸ و ۲۷۲ وات، دمای هوای داغ در سه سطح ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سلسیوس و ضخامت نمونه‌ها در دو سطح ۰/۵ و ۰/۷ سانتی‌متر بر زمان، سینتیک خشک شدن و ضریب نفوذ

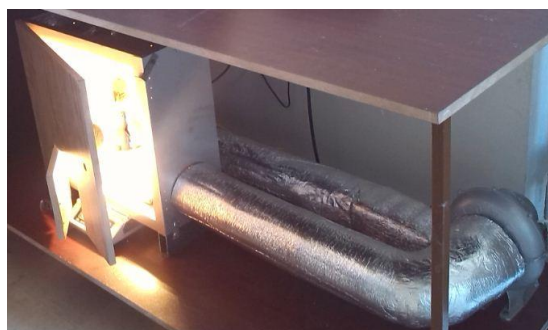
^۱ Persimmon

صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر دمای فرآیند و توان لامپ پرتودهی مادون قرمز بر خشک کردن خرما و مدل سازی سینتیک انتقال جرم آن می باشد.

مواد و روش ها

- خشک کردن

برای انجام آزمایش ها خرما لوی رقم ژاپنی (*Diospyros kaki*) از بازار گرگان تهیه گردید. برای انجام فرآیند خشک کردن ابتدا خرما لوها به قطعاتی با ابعاد ۲×۲ سانتی متر و ضخامت ۱ سانتی متر برش داده شدند. ورقه های خرما لوی با فاصله پس از برش جهت پرتودهی توسط سامانه هوای داغ- مادون قرمز (شکل ۱) مورد استفاده قرار گرفتند. در این خشک کن امکان تغییر سرعت جریان هوا، دمای هوا، فاصله و توان لامپ وجود دارد. سرعت جریان هوا ۲ متر بر ثانیه و فاصله نمونه ها از لامپ ۵ سانتی متر در نظر گرفته شد.



شکل ۱- سامانه هوای داغ - مادون قرمز جهت خشک کردن خرما لوی

جهت خشک کردن نمونه های برش خورده با سامانه هوای داغ- مادون قرمز از متغیرهایی شامل دمای هوای داغ در سه سطح ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سانتی گراد و توان های لامپ مادون قرمز^۱ در سه سطح ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات استفاده شد. تغییرات وزن نمونه ها در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی^۲ با دقت ۰/۰۱ ± گرم که درون خشک کن قرار داشت، ثبت گردید.

آزمایش ها در سه تکرار و در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. برای رسم نمودارها از برنامه Excel (۲۰۰۷) و برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار Minitab 16 در سطح معنی داری ۰/۰۵٪

رطوبت در طی خشک شدن کدو حلوايي در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط حسینی قابوس و همکاران (۱۳۹۴) بررسی شد. توان ۲۷۲ وات، دمای ۷۵ درجه سلسیوس و ضخامت ۰/۵ سانتی متر به عنوان بهترین شرایط خشک کردن کدو گزارش شده است. اثر توان حرارتی مادون قرمز و دمای هوای داغ بر تغییرات ضریب نفوذ مؤثر کدو حلوايي بررسی و مشخص شد که مقدار ضریب نفوذ مؤثر با افزایش توان منبع حرارتی و دمای هوای داغ افزایش می یابد. در مدل سازی فرآیند خشک شدن نیز مدل نیوتن خطای کمتری در مقایسه با سایر مدل ها داشته است. مدل سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک و همچنین محاسبه انرژی فعال سازی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برخی از محصولات کشاورزی توسط محققان انجام گرفته است. Li and Morey (1984) با خشک کردن ذرت به صورت لایه نازک به این نتیجه رسیدند که دما، سرعت جابه جایی و رطوبت نسبی هوا و رطوبت اولیه محصول تأثیر مستقیمی بر سرعت خشک شدن دارد. نتایج مدل سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک شلتوک رقم فجر نشان داد که مدل تقریب انتشار در خشک کردن لایه نازک شلتوک رقم فجر نسبت به سایر مدل ها از دقت بالاتری برخوردار است ولی به دلیل دقت قابل قبول و سادگی معادله پیچ، این مدل برای مدل سازی سینتیک خشک شدن شلتوک توصیه شده است (Omid et al., 2010). Gazor and Minaee (2008) تأثیر تغییرات دما و سرعت جابه جایی هوا بر سینتیک خشک شدن کلزا را مطالعه کردند و نشان دادند که در مدل سازی فرآیند خشک شدن کلزا، مدل پیچ دارای برآزش بهتری بوده، ولی به دلیل کمتر بودن ضرایب ثابت در مدل نیوتن و اختلاف جزئی شاخص های مورد ارزیابی، کاربرد مدل نیوتن را توصیه کردند. در مطالعه دیگری مدل سازی خشک شدن لایه نازک برنج در دماها و سرعت های مختلف هوا بررسی شد. بر اساس نتایج، مدل میدیلی مناسب ترین مدل برای پیش بینی رفتار خشک شدن لایه نازک برنج بود (Doymaz & Pala, 2003).

با توجه به بررسی منابع منتشر شده مشخص شد که تاکنون پژوهشی در خصوص مدل سازی سینتیک انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در طی خشک کردن خرما لوی در خشک کن ترکیبی هوای داغ - مادون قرمز

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

² Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)

استفاده شد.

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:

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

در اینجا، L نصف ضخامت تیغه (برحسب متر)، n تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک شدن (s) و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر ($m^2 s^{-1}$) 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 $LnMR$ 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 خرمالو، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک کردن استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل سازی فرآیند خشک کردن خرمالو در جدول ۱ به نمایش درآمده است (Wong, 2001; Doymaz, 2007).

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

یافته‌ها

نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر دمای هوای داغ و توان لامپ مادون قرمز بر زمان خشک شدن خرمالو آنالیز و در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

در طی خشک کردن خرمالو، مدت زمان رسیدن رطوبت نمونه‌ها به رطوبت ۱۰ درصد (بر پایه مرطوب) یادداشت و به عنوان زمان خشک شدن استفاده گردید (Hazbavi & Minaei, 2010). جهت مدل سازی فرآیند خشک شدن، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن خرمالو 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_t و M_0 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).

۴۲

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

- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

مکانیسم‌های انتقال رطوبت، متعدد و اغلب پیچیده است. 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 بر مبنای خشک، t زمان و x شاخص فضایی می‌باشد. مطالعه انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم در طی دوره سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد (Wong, 2001). برای

مادون قرمز، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت خرمالو افزایش می‌یابد (شکل ۲).

اثر فاکتورهای مورد بررسی در پژوهش بر تغییرات رطوبت در واحد زمان در شکل‌های ۲ و ۳ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ

جدول ۱- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن خرمالو

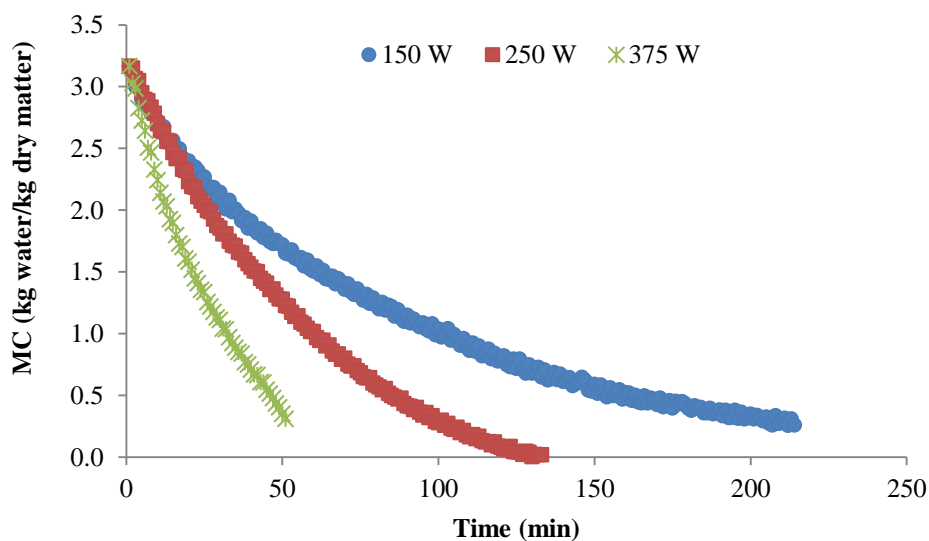
مدل	معادله
انتشار فیک ^۱	$MR = a \exp(-c(t/t^2))$
تقریب انتشار ^۲	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
پیچ ^۳	$MR = \exp(-kt^n)$
پیچ اصلاح شده ^۴	$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$
نیوتن ^۵	$MR = \exp(-kt)$
میدیلی ^۶	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
لگاریتمی ^۷	$MR = a \exp(-kt) + c$

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

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرهای دمای هوای داغ و توان لامپ بر زمان خشک شدن خرمالو

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	P
توان	۲	۱۸۹۹۵/۱	۱۲۹۵/۱۲	۰/۰۰۰
دما	۲	۴۲۰۰/۴	۲۸۶/۳۹	۰/۰۰۰
توان × دما	۴	۳۱۱۰/۲	۱۰۶/۰۳	۰/۰۰۰
خطا	۹	۶۶/۰		
کل	۱۷	۲۶۳۷۱/۸		

۴۲



شکل ۲- اثر تغییر توان منبع حرارت دهی بر رطوبت خرمالو (۵۵ درجه سانتی‌گراد)

¹ Fick's Diffusion

² Approximation of Diffusion

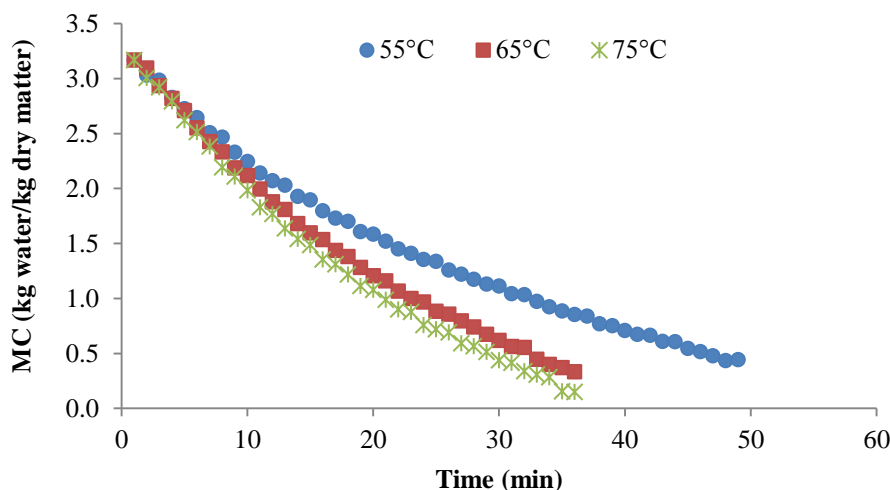
³ Page

⁴ Modified Page -II

⁵ Newton

⁶ Midilli

⁷ Logarithmic



شکل ۳- اثر تغییر دمای هوای داغ بر رطوبت خرمالو (لامپ پرتودهی ۳۷۵ وات)

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., 2001).

همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود اثر فاکتورهای دمای هوای داغ و توان لامپ و همچنین اثر متقابل آن‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار شده است. افزایش دمای خشک‌کن از ۵۵ به ۷۵ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش زمان خشک کردن از ۴۷ دقیقه به ۳۰ دقیقه شد. همچنین با افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات زمان خشک شدن خرمالو ۶۸/۴ درصد کاهش یافت. 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 (Hebbar, (Gorjian, 2009; Doymaz & Pala, 2003) و همکاران (۲۰۰۴) از یک خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز با هوای داغ در سه حالت ترکیبی، مادون قرمز 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 مادون قرمز و هوای داغ بود (Hebbar et al., 2004).

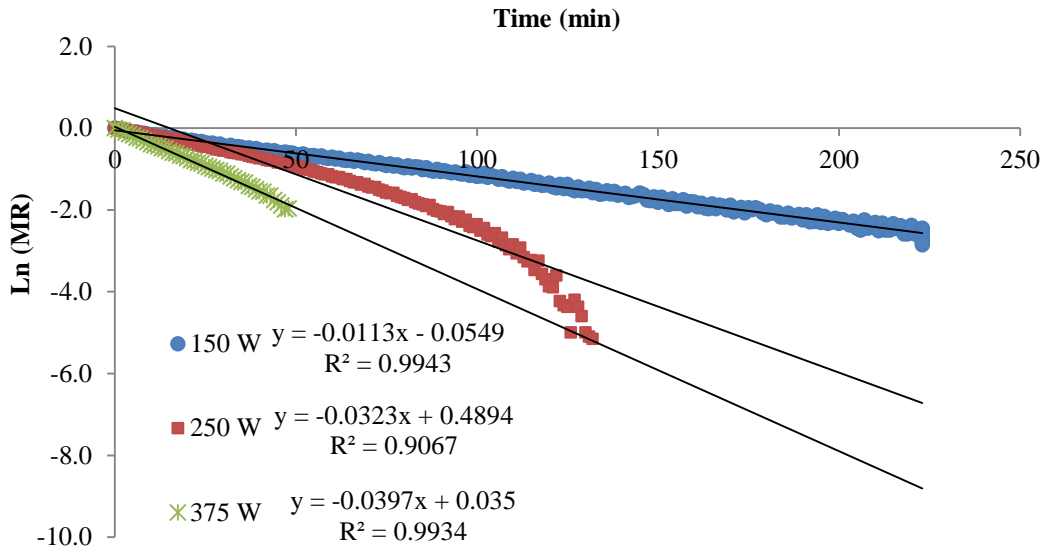
بیشترین زمان خشک شدن مربوط به دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد و توان ۱۵۰ وات بود (۱۶۳ دقیقه). کمترین زمان خشک شدن نیز مربوط به دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد و توان ۳۷۵ وات است که مدت زمان ثبت شده برای این تیمار ۳۰ دقیقه به دست آمد.

شکل ۴ روند تغییرات $\ln(MR)$ را نسبت به زمان در توان‌های متفاوت در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. 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. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ پرتودهی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد. با افزایش توان لامپ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از $3/5 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $1/3 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش می‌یابد (دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد).

مدل‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن در جدول ۱ گزارش شده است. با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل لگاریتمی در طی بررسی سینتیک خشک شدن خرمالو، نتایج این مدل در جدول ۴ گزارش شده است. در این جدول ضریب تبیین، خطای استاندارد و ضرایب این مدل ارائه شده است.

بحث

خشک کردن یکی از روش‌های نگهداری مواد غذایی



شکل ۴- مقادیر Ln(MR) در مقابل زمان برای لامپ‌های پرتودهی مادون قرمز در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد

جدول ۳- مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک کردن

r	ضریب نفوذ (m^2s^{-1})	دمای هوای داغ ($^{\circ}C$)	توان (W)
۰/۹۹۷	$۱/۸ \times ۱۰^{-۹}$	۵۵	
۰/۹۸۴	$۴/۲ \times ۱۰^{-۹}$	۶۵	۱۵۰
۰/۹۹۵	$۳/۵ \times ۱۰^{-۹}$	۷۵	
۰/۹۳۹	$۵/۵ \times ۱۰^{-۹}$	۵۵	
۰/۹۹۷	$۳/۸ \times ۱۰^{-۹}$	۶۵	۲۵۰
۰/۹۹۶	$۵/۰ \times ۱۰^{-۹}$	۷۵	
۰/۹۹۶	$۶/۵ \times ۱۰^{-۹}$	۵۵	
۰/۹۹۳	$۹/۸ \times ۱۰^{-۹}$	۶۵	۳۷۵
۰/۹۷۵	$۱/۳ \times ۱۰^{-۸}$	۷۵	

جدول ۴- ضریب تبیین، خطای استاندارد و ضرایب مدل لگاریتمی

SE	r	c	k	a	دمای هوای داغ ($^{\circ}C$)	توان (W)
۰/۰۱۲	۰/۹۹۸	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	۰/۹۳۵	۵۵	
۰/۰۰۷	۰/۹۹۹	-۰/۱۰۶	۰/۰۱۶	۱/۱۰۶	۶۵	۱۵۰
۰/۰۱۱	۰/۹۹۹	-۰/۱۰۰	۰/۰۲۲	۱/۰۰۲	۷۵	
۰/۰۰۶	۰/۹۹۹	-۰/۱۶۶	۰/۰۱۵	۱/۱۷۱	۵۵	
۰/۰۱۴	۰/۹۹۸	-۰/۰۲۷	۰/۰۲۰	۱/۰۶۲	۶۵	۲۵۰
۰/۰۱۲	۰/۹۹۹	-۰/۰۳۴	۰/۰۲۶	۱/۰۱۹	۷۵	
۰/۰۰۹	۰/۹۹۹	-۰/۰۷۵	۰/۰۳۲	۱/۰۶۴	۵۵	
۰/۰۰۷	۰/۹۹۹	-۰/۲۲۱	۰/۰۳۷	۱/۲۳۷	۶۵	۳۷۵
۰/۰۰۸	۰/۹۹۹	-۰/۲۴۷	۰/۰۴۰	۱/۲۵۸	۷۵	

کردند. آزمایش‌ها در دو دمای ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس انجام گردید. سه مدل ریاضی سینتیک نیوتنی، پیچ و هندرسون بر داده‌های تجربی برازش داده شدند. نتایج نشان داد که مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها، مراحل خشک شدن برش سیب‌زمینی را بهتر ارزیابی می‌کند. همچنین در مطالعه‌ای استفاده از مدل لگاریتمی را برای پیش‌بینی نسبت رطوبت ذرت در طی خشک کردن با هوای داغ را توصیه نموده‌اند (Abbasi et al., 2014).

نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های کاهش هزینه جابه‌جایی و افزایش انبارمانی میوه‌ها و محصولات کشاورزی خشک کردن آن‌ها می‌باشد. در این پژوهش خشک کردن خرمالو در یک خشک‌کن ترکیبی هوای داغ - مادون قرمز بررسی شد. تأثیر تغییر دمای هوای داغ و توان لامپ مادون قرمز بر سینتیک خشک شدن خرمالو بررسی و ضرایب مربوطه گزارش شد. افزایش دمای خشک‌کن و توان لامپ موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت‌زمان آن گردید. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای خرمالو در محدوده $1/8 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $1/3 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به دست آمد که با افزایش دمای هوا و توان لامپ مادون قرمز افزایش می‌یافت. برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن خرمالو، از مدل‌های مختلفی استفاده گردید که در نهایت مدل لگاریتمی به دلیل بالا بودن شاخص ضریب تبیین و پایین بودن خطای استاندارد، جهت بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن انتخاب گردید.

منابع

- پهلوانزاده، ح.، حدیدی، س. و قاسمی، م. (۱۳۹۳). ادغام خشک‌کن جابجایی و تشعشعی جهت کاهش زمان خشک شدن. مجله علوم غذایی و تغذیه، سال دهم، شماره ۳، ۵۰-۳۹.
- حسینی قابوس، س. ح.، سیدین اردبیلی، س. م.، کاشانی نژاد، م.، اسدی، غ. و اعلمی، م. (۱۳۹۴). سینتیک انتقال جرم خشک کردن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ کدوخلوایی. مجله علوم غذایی و تغذیه، دوره ۱۳، ۱۶-۵.
- صالحی، ف.، کاشانی نژاد، م. و اسدی امیرآبادی، ع. ر. (۱۳۹۴). بررسی سینتیک انتقال جرم در طی خشک کردن

میزان ضریب نفوذ مؤثر برای خشک کردن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در محدوده دمایی ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس برابر $3/4 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $7/3 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ گزارش شده است (Abbasi et al., 2014). همچنین در مطالعه دیگری، ضریب نفوذ مؤثر برای ذرت در محدوده دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت بین $3/6 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $8/3 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ گزارش شده است (Mujumdar, 2000).

در خشک کردن ترکیبی با مادون قرمز- هوای داغ، انتقال حرارت ناشی از جریان همزمان هوای داغ و پرتو مادون قرمز است. در حالی که سطح ماده غذایی توسط پرتو مادون قرمز حرارت می‌بیند، هوای داغ از مجاور نمونه عبور نموده و باعث افزایش راندمان می‌شود. توان یا شدت پرتو مادون قرمز، در خشک کردن ترکیبی مادون قرمز و هوای داغ، از طریق تأثیر بر زمان خشک کردن، روی منحنی خشک کردن تأثیر می‌گذارد و شدت خشک کردن را تغییر می‌دهد (Motevali et al., 2005; Sharma et al., 2005). افزایش شدت پرتو مادون قرمز باعث افزایش شدت خشک کردن می‌شود؛ بنابراین زمان خشک کردن را کوتاه می‌کند. با این حال، از آن جایی که شدت پرتو بالاتر دمای محصول را افزایش می‌دهد، می‌تواند اثر منفی روی کیفیت محصول داشته باشد. Zbicinski و همکاران (1992) ترکیب مادون قرمز- هوای داغ را برای خشک کردن مواد حساس به حرارت پیشنهاد دادند. استفاده از روش ترکیبی حرارت‌دهی مادون قرمز- هوای داغ برای مواد متخلخل ضخیم، محصولی با کیفیت سطحی خوب تولید می‌کند (Dostie et al., 1989).

نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل لگاریتمی نشان داد که این مدل جهت بررسی سینتیک خشک کردن خرمالو در یک خشک‌کن ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز مناسب بوده و ضریب تبیین (r) بالا و خطای استاندارد (SE) پایینی را در هنگام برازش کردن داده‌های تجربی از خود نشان داد. لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از سامانه هوای داغ-مادون قرمز توصیه می‌شود.

Yaghobi و همکاران (2012) سینتیک افت رطوبت و مدل‌سازی ریاضی خشک کردن سیب‌زمینی در یک خشک‌کن هوای داغ را با استفاده از آنالیز رگرسیون بررسی

G. (Eds.). Infrared heating for food and agricultural processing. New York. CRC press.

Li, H. & Morey, R. V. (1984). Thin-layer drying of yellow dent corn. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 27, 581-585.

Madanloo, S. (1987). Persimmon growing in Iran. Mazandaran seed and plant center publication, Iran. (In Farsi).

Miller, E. P. & Crocker, T. E. (1994). Oriental persimmons in Florida. SP 101 Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 1-16.

Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H. & Amirnejat, H. (2011). Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. Energy, 36(11), 6433-6441.

Mujumdar, A. S. (2000). Drying technology in agriculture and food sciences. Science publisher, Inc. Enfield (NH), USA.

Nimmol, C. & Devahastin, S. (2011). Vacuum infrared drying. In, Pan, Z. Atungulu, G. G. (Eds.), Infrared heating for food and agricultural processing. New York. CRC press.

Omid, M., Yadollahinia, A. R. & Rafiee, S. (2010). Development of a kinetic model for thin layer drying of Paddy, Fajr variety. Biosystem Engineering of Iran, 41, 153-160. (In Farsi).

Ratti, C. & Mujumdar, A. S. (1995). Infrared drying. in, mujumdar, A. S. (Ed.), handbook of industrial drying, Vol. 1, Marcel Dekker Inc., New York., pp. 567-588.

Safiyari, H., Zomorodian, A., Rahmanian, H. & Salmanzade, F. (2013). Trend of Changes in Physical Properties of Persimmon Fruit in Ambient Condition Storage, Iranian Food Science and Technology Research Journal, 8(4), 417-426.

Salehi, F., Abbasi Shahkoh, Z. & Godarzi, M. (2014). Apricot Osmotic Drying Modeling Using Genetic Algorithm - Artificial Neural Network. Journal of Innovative Food Science Technology.

Sharma, G. P., Verma, R. C. & Pathare, P. B. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. Journal of Food Engineering, 71, 282-286.

Singh, P., Heldman, D. R. 1993. Introduction to Food Engineering. Second edition. Academic press, Inc. San Diego, CA.

Strumillo, C. & Kudra, T. (1987). Drying, Principles, Applications and Design. Gordon and Breach Science Publisher, USA.

ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز برش‌های بادمجان. مجله علوم و فناوری‌های نوین غذایی، سال دوم، شماره ۷، ۶۲-۵۵.

Abbasi, S., Minaei, S. & Khoshtaghaza, M. H. (2014). Investigation of kinetics and energy consumption thin layer drying of corn. Journal of Agricultural Machinery. 4(1), 98-107.

Afzal M. T., Abe, T. & Hilida, Y. (1999). Energy and quality Aspect during Combined FIR Convection Drying of Barely. Journal of Food Engineering, 42, 177-188.

Dostie, M., Seguin, J. N., Maure, D., Ton-That, Q. A. & Chatingy, R. (1989). Preliminary measurement on the drying of thick porous materials by combinations of intermittent infrared and continuous convection heating. In Drying'89, Eds. S.A. Mujumdar and M.A. Roques. New York: Hemisphere Press.

Doymaz, I. (2007). Air drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering, 78, 1291-1297.

Doymaz, I. & Pala, M. (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. Journal of Food Engineering, 60, 125-130.

FAO. (2013). Statistical Database. Available: <http://www.fao.org/>.

Gazor, H. R. & Minaee, S. (2008). Influence of temperature and air velocity on canola drying kinetic. 5th National conference on agricultural machinery engineering and mechanization. Mshhad, Iran.

Gorjian, S. (2009). Modelling of thin layer drying kinetics of barberry fruit. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Hazbavi, E. & Minaei, S. (2010). Making and investigation quality properties of dried persimmon slice. Journal of Food Science Technology, 7(4): 65-72.

Hebbar, H. U., Vishwanathan, K. H. & Ramesh. M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. Journal of Food Engineering, 65, 557-563.

Ito, S. (1980). Persimmon. In: Nagy, S. and P. E. Shaw (Eds.), Tropical and Subtropical Fruits. PP: 442. AVI Pub. Co Westport, CT.

Jun, S., Krishnamurthy, K., Irudayaraj, J. & Demirci, A. (2011). Fundamentals and theory of infrared radiation. In, Pan, Z. Atungulu, G.

Wong, J. Y. (2001). Theory of Ground vehicles.(3rd ed). John Wiley and Sons, Inc. www.FAOSTAT.org

Yaghobi, M., Tavakolipour, H., Elhami Rad, A. H., Ziyaolhagh, H. R., Mokhtarian, M., Askari, B. & Armin, M. (2012). Investigation of moisture loss kinetic and

mathematical modeling of potato using regression analysis. Innovation In Food Science And Technology, 4 (2), 79-84.

Zbicinski, I., Jakobsen, A. & Driscoll, J. L. (1992). Application of infra-red radiation for drying of particulate material. Drying, 92, 704-711.