

سینتیک انتقال جرم خشک کردن ترکیبی مادون قرمز - هوای داغ کدو حلوایی

سید حسین حسینی قابوس^a، سید مهدی سیدین اردبیلی^{b*}، مهدی کاشانی نژاد^c،
غلامحسین اسدی^d، مهران اعلمی^c

^a دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
^b دانشیار دانشکده علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
^c دانشیار دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^d استادیار دانشکده علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۱

۵

چکیده

مقدمه: کدو حلوایی یک منبع مناسب از کاروتن، ویتامین‌های محلول در آب و اسیدهای آمینه است. کدو حلوایی را می‌توان به آرد که دارای ماندگاری طولانی است تبدیل نمود. آرد کدو حلوایی به دلیل عطر و طعم بسیار مطلوب، شیرینی و رنگ زرد نارنجی - قرمز عمیق آن استفاده می‌شود. در این پژوهش مدل‌سازی سینتیک خشک شدن کدو حلوایی در یک خشک‌کن مادون قرمز - هوای داغ بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها: تأثیر توان لامپ پرتو دهی 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 رطوبت در طی خشک شدن کدو حلوایی در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شد.

یافته‌ها: تأثیر توان پرتو دهی و دمای هوای داغ بر فرآیند خشک شدن کدو حلوایی معنی‌دار بود. افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۲۰۴ به ۲۷۲ وات و افزایش دمای هوای داغ از ۵۵ به ۷۵ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن کدو حلوایی را به ترتیب ۱۵/۰۵ و ۳۷/۴۳ درصد کاهش دادند. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت کدو حلوایی بین $9/2 \times 10^{-10}$ تا $3/3 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه بود.

نتیجه‌گیری: توان ۲۷۲ وات، دمای ۷۵ درجه سلسیوس و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر به عنوان بهترین شرایط خشک کردن کدو به دست آمد. اثر توان حرارتی مادون قرمز و دمای هوای داغ بر تغییرات ضریب نفوذ مؤثر کدو حلوایی بررسی و مشخص شد که مقدار ضریب نفوذ مؤثر با افزایش توان منبع حرارتی و دمای هوای داغ افزایش می‌یابد. در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن کدو حلوایی مدل نیوتن همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر مدل‌ها داشت.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، ضریب نفوذ، کدو حلوایی، مادون قرمز، مدل نیوتن، هوای داغ

مقدمه

کدو حلوایی^۱ به جنس Cucurbita از خانواده Cucurbitaceae تعلق دارد که در سراسر جهان رشد می‌کند (Saeleaw & Schleining, 2011) و بر اساس بافت و شکل ساقه به چهار گونه عمده C.pepo, C.moschata, C.maxima, C.mixta می‌شوند (Rakcejeva et al., 2011). کدو حلوایی یک محصول فصلی است که به دلیل ارزش تغذیه‌ای بالا جهت قرار گرفتن در رژیم غذایی انسانی توصیه می‌شود (Guiné & Barroca, 2010). طبق آمار ارائه شده توسط فائو در سال ۲۰۱۲-۲۰۱۱، میزان تولید کدو حلوایی در ایران ۹۵۱۲۵۳ تن می‌باشد که از این نظر در جایگاه پنجم دنیا قرار دارد که در همین سال میزان تولید این محصولات در آسیا ۱۵۹۵۱۷۸۶ تن بوده که معادل ۶۵/۷۶٪ تولید جهان می‌باشد (Faostat, 2012).

مقادیر اجزاء شیمیایی و مواد معدنی گوشت کدو حلوایی تازه و پودر خشک آن در جدول ۱ گزارش شده است (Wan Nadiyah See, 2007; Rakcejeva et al., 2011; Saeleaw & Schleining, 2011). میوه کدو حلوایی همچنین یک منبع با ارزش از ویتامین‌های B₆, K، تیامین، ریوفلاوین و همچنین مواد معدنی چون پتاسیم، فسفر، منیزیم، آهن و سلنیوم می‌باشد (Rakcejeva et al., 2011; Nawirska et al., 2009).

رنگ این محصول از سبز، سفید، زرد، نارنجی یا قرمز

سینتیک انتقال جرم خشک کردن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ کدو حلوایی

بسته به نوع گونه متغیر است و به صورت رسیده و نارس به عنوان سبزی در سوپ، تهیه عصاره، ترشی و محصولات خشک شده استفاده می‌شود. گوشت آن به صورت سرخ شده، خورشتی، آب پز یا پخته مصرف می‌شود (Guiné & Barroca, 2010; El-Demery, 2011) Rakcejeva et al., 2011; Saeleaw & Schleining, 2011). برگ‌های جوان، ساقه و گل نیز به صورت پخته شده مصرف می‌گردند و علاوه بر دارا بودن مواد مغذی، دارای خواص دارویی بسیار زیادی می‌باشند. گوشت این میوه به عنوان یک ماده آرام‌بخش، نرم و خنک کننده در نظر گرفته می‌شود. همچنین کاربردهای متعددی در آشپزی به عنوان یک سبزی در جزئی از غذاهای آماده مانند کیک‌ها، سوپ‌ها، خورشت‌ها و نان‌ها دارد (Guiné & Barroca, 2010).

پودر خشک کدو حلوایی به دلیل غنی بودن از نظر ترکیبات فنلی، فلاونوئیدها، ویتامین‌ها (شامل بتاکاروتن، ویتامین A، ویتامین B₂، آلفا توکوفرول، ویتامین ث، ویتامین E)، اسیدهای آمینه، کربوهیدرات‌ها، مواد معدنی (مخصوصاً پتاسیم)، پکتین و فیبر رژیمی و همچنین مقدار انرژی پائین (حدود ۱۷ کیلوکالری در ۱۰۰ گرم گوشت کدو حلوایی) می‌تواند به صورت مکمل برای بهبود کیفیت تغذیه‌ای نان و محصولات نانوبی به کار رود (El-Demery, 2011; Tamer et al., 2010).

جدول ۱- اجزاء شیمیایی و مواد معدنی گوشت کدو حلوایی تازه و پودر خشک آن

پودر کدو حلوایی	گوشت کدو حلوایی تازه	اجزاء
۱۰/۶۴٪	۸۹/۶۵٪	رطوبت
۱/۲۵٪	۰/۵۶٪	چربی
۹/۶۹٪	۱/۲۱٪	پروتئین
۶/۱۳٪	۱/۵۰٪	خاکستر
۳/۲۶٪	۱/۸۰٪	فیبر خام
۷۱/۰۳٪	۶/۹۸٪	کربوهیدرات
۲۱/۵۰ (mg/100g)	۰/۹۴۹ (mg/100g)	سدیم
۵۱۵۸/۱۱ (mg/100g)	۳۵۵/۲۲ (mg/100g)	پتاسیم
۶۱۶/۷۳ (mg/100g)	۴۶/۳۵ (mg/100g)	کلسیم
۱۴/۰۷ (mg/100g)	۰/۸۳۵ (mg/100g)	آهن
۸۱۷/۸۸ (mg/100g)	۴۴/۰۵ (mg/100g)	فسفر
-	۲-۱۰ (mg/100g)	کارتوتنوئیدها
-	۹-۱۰ (mg/100g)	ویتامین ث
-	۱/۰۳-۱/۰۶ (mg/100g)	ویتامین E

¹ Pumpkin

از طرف دیگر این فن‌آوری معایی نیز دارد که عبارتند از (Krishnamurthy *et al.*, 2008):

۱- اساساً خشک‌کن‌های سطحی هستند و در صورت عدم کنترل صحیح فرآیند باعث سوختگی سطحی می‌شوند.

۲- قبل از طراحی صنعتی این روش برای فرآوری محصولات مختلف، می‌بایست شرایط بهینه و ضخامت مناسب محصولات مختلف مشخص شود.

۳- جهت افزایش راندمان حتماً می‌بایست به صورت ترکیبی با سایر روش‌ها استفاده شوند و به‌تنهایی کارایی زیادی ندارند.

مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک و همچنین محاسبه انرژی فعال‌سازی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برخی از محصولات کشاورزی توسط محققان انجام گرفته است. Li and Morey (۱۹۸۴) با خشک کردن ذرت به صورت لایه‌نازک به این نتیجه رسیدند که دما، سرعت، رطوبت نسبی هوا و رطوبت اولیه محصول بستگی تأثیر مستقیمی بر سرعت خشک شدن دارد. Gazor and Minaee (۲۰۰۸) تأثیر تغییرات دما و سرعت بر سینتیک خشک شدن کلزا را مطالعه کردند و نشان دادند که در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن کلزا، مدل پیچ دارای برازش بهتری بوده، ولی به دلیل کمتر بودن ضرایب ثابت در مدل نیوتن و اختلاف جزئی شاخص‌های مورد ارزیابی، کاربرد مدل نیوتن را توصیه کردند.

تاکنون مطالعه جامعی در خصوص بررسی سینتیک انتقال جرم و مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در طی خشک کردن کدوخلوایی کشت‌شده در ایران با استفاده از سامانه مادون قرمز- هوای داغ انجام نشده است. لذا هدف این مطالعه بررسی اثر تغییر توان لامپ پرتودهی مادون قرمز (۲۷۲-۲۰۴ وات)، دمای هوای داغ (۷۵-۵۵ درجه سلسیوس) و ضخامت نمونه‌ها (۵ و ۷ میلی‌متر) بر خشک کردن کدوخلوایی واریته *C.moschata* به روش مادون قرمز- هوای داغ و مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم آن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

- خشک کردن

ترکیب، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و ریخت‌شناسی^۱ آرد کدوخلوایی خشک شده به وسیله هوای داغ را ارزیابی نمودند. ریخت‌شناسی گرانول‌های نشاسته با میکروسکوپ الکترونی^۲ حاکی از آن بود که گرانول‌ها به شکل چندوجهی نامنظم در اندازه‌هایی در حدود ۵-۱۵ میکرومتر می‌باشند. نتایج این پژوهش نشان داد که پتانسیل استفاده از پودر کدوخلوایی جهت غنی‌سازی محصولات مختلف غذایی وجود دارد (Saeleaw & Schleining, 2011).

خشک کردن به وسیله اشعه مادون قرمز به شکل لایه نازک روش مناسبی برای تولید محصولات خشک شده است. در این روش حرارت در محصول بدون ایجاد تغییرات نامطلوب ایجاد می‌شود، لذا کیفیت ساختاری محصول نهایی افزایش و هزینه‌های فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد (Strumillo *et al.*, 1987). در خصوص مزایای کاربرد صنعتی این روش برای خشک کردن محصولات کشاورزی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود (Jun *et al.*, 2011):

۱- راندمان بالای تبدیل انرژی الکتریکی به گرما برای IR الکتریکی و منبع جایگزین مناسب برای انرژی گرمایی.

۲- نفوذ تابش به طور مستقیم به داخل محصول بدون گرم کردن محیط اطراف آن.

۳- دمای یکنواخت در محصول در حال خشک شدن.

۴- آسان بودن برنامه‌ریزی و دست‌کاری چرخه حرارت دهی برای محصولات مختلف و سازگاری آن مطابق با تغییر شرایط.

۵- سهولت در کنترل فرایند و تراز کردن پروفایل‌های رطوبت در محصول و از بین رفتن کمتر محصول.

۶- ارزان بودن منابع IR در مقایسه با منابع دی‌الکتریک و ماکروویو و داشتن طول عمر طولانی و هزینه تعمیر و نگهداری پائین و هزینه فن‌آوری کم.

۷- صرفه‌جویی در فضا، محیط کاری تمیز و امکان سازگاری آسان با خشک‌کن‌های معمولی نصب شده قبلی.

۸- کاهش نیاز به جریان هوا در سراسر محصول.

¹ Morphological

² Scanning Electron Microscopy

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 اندازه گیری رطوبت تعادلی نیست (Doymaz, 2007).

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

- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

تعداد مکانیسم‌های انتقال رطوبت، گسترده 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 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. جهت استفاده از قانون فیک، فرض می‌گردد که فرآورده غذایی تک‌بعدی و با رطوبت اولیه یکنواختی است (Wong, 2001). 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:

برای انجام آزمایش‌ها کدو حلوایی واریته *C.moschata* تهیه گردید. برای انجام فرآیند خشک کردن ابتدا کدو حلوایی‌ها به شکل استوانه‌هایی با قطر ۲ سانتی‌متر و در ضخامت‌های ۰/۵ و ۰/۷ سانتی‌متر برش خورند. برش‌های کدو حلوایی بلافاصله پس از برش جهت پرتودهی توسط سامانه مادون قرمز (شکل ۱) مورد استفاده قرار گرفتند. جهت خشک کردن نمونه‌های برش خورده با سامانه مادون قرمز از متغیرهایی شامل توان‌های متفاوت لامپ مادون قرمز^۱ (۲۰۴، ۲۳۸ و ۲۷۲ وات)، در دماهای هوای داغ ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سلسیوس و در دو ضخامت ۰/۵ و ۰/۷ سانتی‌متر استفاده شد. سرعت جریان هوا برابر ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. فاصله نمونه‌ها از منبع پرتودهی نیز ثابت و برابر ۱۵ سانتی‌متر بود. جهت آنالیز سینتیک انتقال جرم، هر مرحله چهار نمونه انتخاب و تغییرات وزن در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی^۲ با دقت ۰/۰۱ ثبت می‌گردید. آزمایش‌ها در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی، در سطح معنی‌داری ۵٪ با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16 مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۱- خشک‌کن مادون قرمز- هوای داغ مورد استفاده در این تحقیق

جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن کدو حلوایی با استفاده از معادله زیر 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

¹ Infrared Heat Lamp (NIR), Philips, Germany.

² Digital Balance, LutronGM-300p (Taiwan)

یافته‌ها

- خشک کردن کدوخلوایی

اثر توان پرتودهی، دمای هوای داغ و ضخامت بر تغییرات مقدار رطوبت بازمان در شکل‌های ۲ تا ۴ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ مادون قرمز، زمان خشک شدن کدوخلوایی کاهش می‌یابد و نمونه‌ها با سرعت بیشتری رطوبت خود را از دست می‌دهند (شکل ۲).

درصد رطوبت پودر کدوخلوایی بر اساس منابع منتشرشده حدود ۱۰ درصد بر پایه مرطوب می‌باشد (El-Demery, 2011)؛ لذا زمان رسیدن رطوبت نمونه‌ها تا ۱۰ درصد رطوبت به‌عنوان زمان خشک شدن در نظر گرفته شد. افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۲۰۴ به ۲۷۲ وات و افزایش دمای هوای داغ از ۵۵ به ۷۵ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن کدوخلوایی را به ترتیب ۱۵/۰۵ و ۳۷/۴۳ درصد کاهش می‌دهند.

همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود با افزایش دمای هوای داغ نیز زمان خشک شدن کاهش می‌یابد و نمونه‌هایی که در دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار گرفته‌اند، سریع‌تر رطوبت خود را از دست می‌دهند. در سایر توان‌ها نیز رفتار مشابهی مشاهده گردید.

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

ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک کردن برحسب $LnMR$ نسبت به زمان تعیین می‌گردد. زمانی نمودار مقدار $LnMR$ نسبت به زمان رسم گردد، شیب خط به‌دست‌آمده 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 به‌دست‌آمده میانگین گرفته و نتیجه اعلام شد. به‌منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن کدوخلوایی، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک کردن استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن کدوخلوایی در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

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

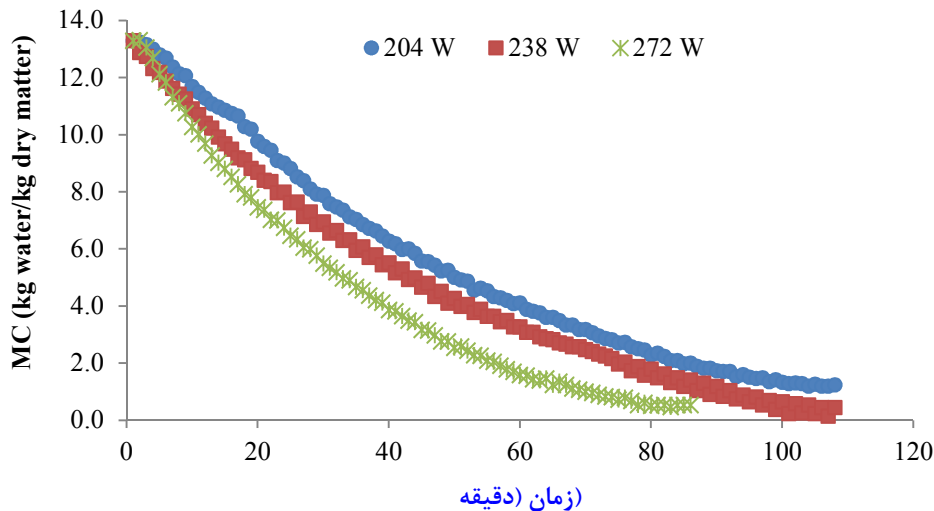
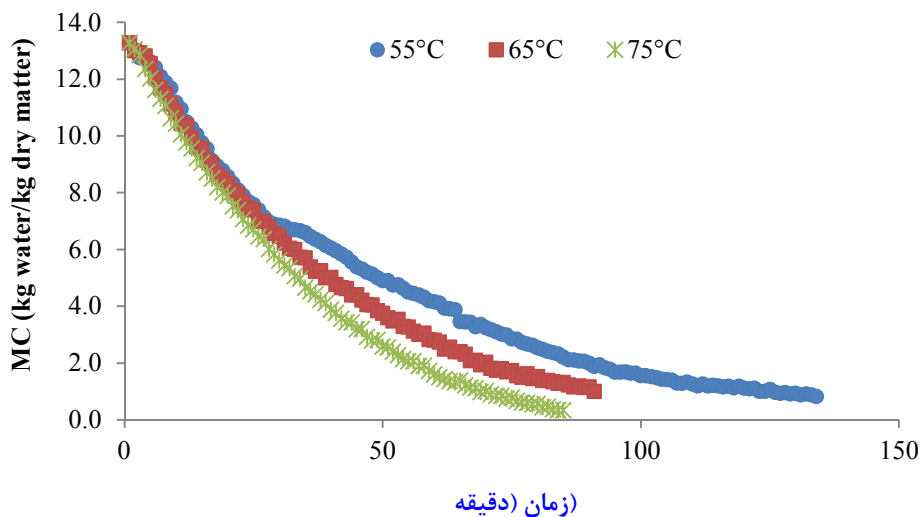
جدول ۲- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن کدوخلوایی.

منبع	معادله	مدل
(Diamante & Munro, 1991)	$MR = a \exp(-c(t/t^2))$	انتشار فیک ^۱
(Yaldiz et al., 2001)	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	تقریب انتشار ^۲
(Simal et al., 2005)	$MR = \exp(-kt^n)$	پیچ ^۳
(Diamante & Munro, 1991)	$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$	پیچ اصلاح‌شده ^۴
(Ayensu, 1997)	$MR = \exp(-kt)$	نیوتن ^۵
(Menges and Ertekin, 2005)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	میدیلی ^۶
(Dandamrongrak et al., 2002)	$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی ^۷
(Verma et al., 1985)	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	ورما ^۸
(Diamante and Munro, 1991)	$MR = a \exp(-k_0 t^n) + b \exp(-k_1 t)$	دوجمله‌ای ^۹

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

¹ Fick's Diffusion ² Approximation of Diffusion ³ Page ⁴ Modified Page -II ⁵ Newton
⁶ Midilli ⁷ Logarithmic ⁸ Verma ⁹ Two Term

سینتیک انتقال جرم خشک کردن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ کدو حلوایی

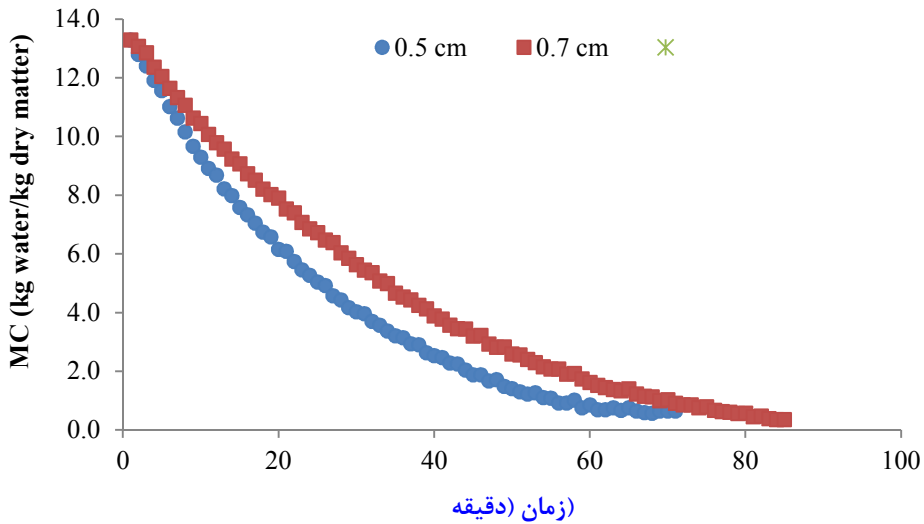
شکل ۲- اثر توان لامپ پرتو دهی بر تغییرات رطوبت (55°C و ضخامت 0.5 سانتی متر).شکل ۳- اثر دمای هوای داغ بر تغییرات رطوبت (272 وات و ضخامت 0.7 سانتی متر).

زمان به ترتیب در توان‌های 204 ، 238 و 272 وات، در دماهای 55 ، 65 و 75 درجه سلسیوس و در ضخامت‌های 0.5 و 0.7 برش‌های کدو حلوایی نشان می‌دهند. 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 پرتو دهی و دمای هوای داغ در فرآیند خشک شدن کدو حلوایی، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یک‌روند افزایشی دارد. با افزایش توان لامپ از 204 به 272 وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از $9/2 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $1/6 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش می‌یابد (55°C و ضخامت 0.5 سانتی متر).

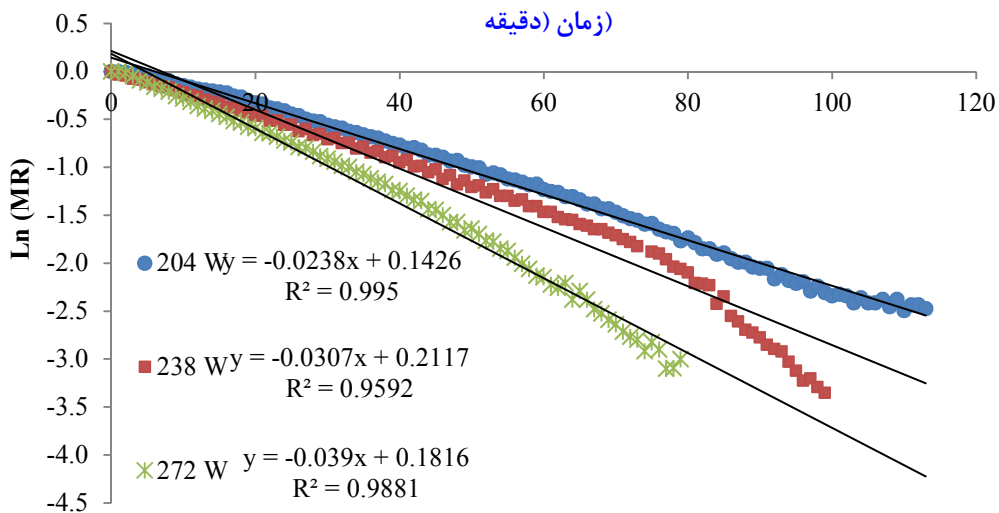
با افزایش ضخامت نمونه‌ها از 0.5 به 0.7 سانتی‌متر نیز زمان خشک کردن $35/87$ درصد افزایش یافت (شکل ۴). کمترین زمان خشک شدن مربوط به نمونه با ضخامت 0.5 سانتی‌متر که در دمای 75 درجه سلسیوس و توان 272 وات قرار گرفته بود، مربوط می‌شد، که برابر با 48 دقیقه به دست آمد. بیشترین زمان خشک شدن نیز مربوط به نمونه با ضخامت 0.7 سانتی‌متر که در دمای 55 درجه سلسیوس و توان 204 وات قرار گرفته بود، مربوط می‌شد، که برابر با 125 دقیقه به دست آمد.

- تعیین ضریب نفوذ مؤثر

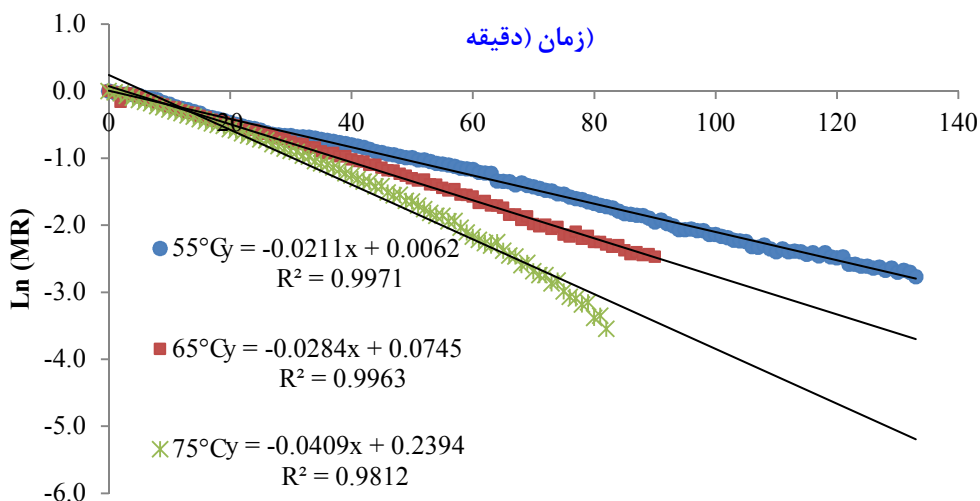
شکل‌های ۵ تا ۷ روند تغییرات $\ln(MR)$ را نسبت به



شکل ۴- اثر تغییر ضخامت نمونه‌ها بر تغییرات رطوبت (۲۷۲ وات و ۷۵°C).

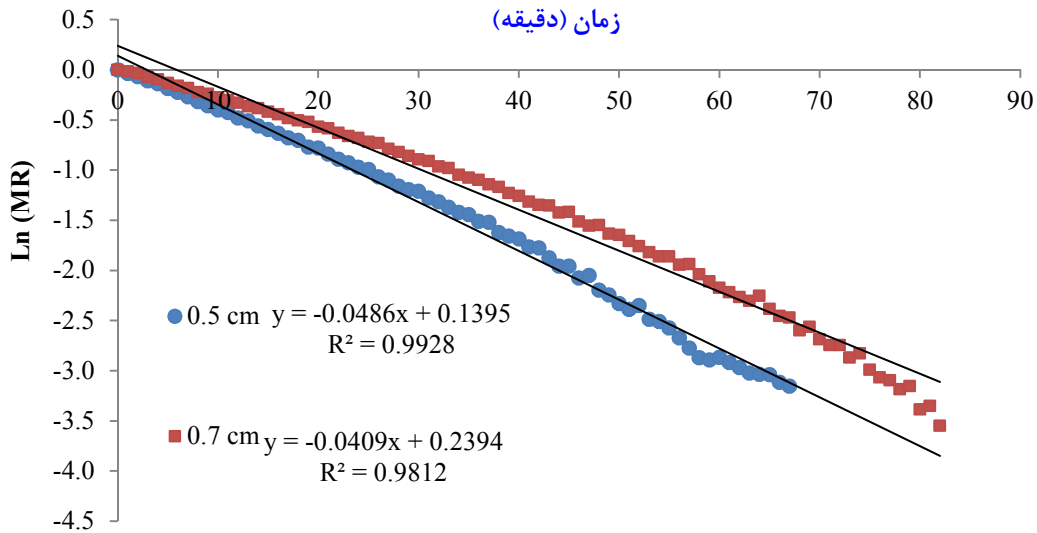


شکل ۵- مقادیر Ln (MR) در مقابل زمان برای توان‌های متفاوت (۵۵°C و ضخامت ۵/۰ سانتی‌متر)



شکل ۶- مقادیر Ln (MR) در مقابل زمان برای دماهای متفاوت (۲۷۲ وات و ضخامت ۷/۰ سانتی‌متر)

سینتیک انتقال جرم خشک کردن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ کدو حلوایی



شکل ۷- مقادیر Ln (MR) در مقابل زمان برای ضخامت‌های متفاوت (۲۷۲ وات و ۷۵°C)

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

R	ضریب نفوذ (m^2s^{-1})	ضخامت (cm)	دمای هوای داغ ($^{\circ}C$)	توان (W)
۰/۹۹۱	$۹/۲ \times ۱۰^{-۱۰}$	۰/۵	۵۵	
۰/۹۹۸	$۱/۶ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۷		
۰/۹۹۴	$۱/۲ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۵	۶۵	۲۰۴
۰/۹۸۳	$۲/۶ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۷		
۰/۹۸۸	$۲/۲ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۵	۷۵	
۰/۹۹۷	$۲/۷ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۷		
۰/۹۸۵	$۱/۲ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۵	۵۵	
۰/۹۹۷	$۱/۴ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۷		
۰/۹۹۳	$۱/۵ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۵	۶۵	۲۳۸
۰/۹۹۷	$۱/۷ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۷		
۰/۹۷۰	$۲/۱ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۵	۷۵	
۰/۹۷۶	$۲/۶ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۷		
۰/۹۹۳	$۱/۶ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۵	۵۵	
۰/۹۹۸	$۱/۷ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۷		
۰/۹۹۵	$۱/۷ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۵	۶۵	۲۷۲
۰/۹۹۸	$۲/۳ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۷		
۰/۹۹۶	$۲/۰ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۵	۷۵	
۰/۹۸۹	$۳/۳ \times ۱۰^{-۹}$	۰/۷		

کتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل نیوتنی در مقایسه با سایر مدل‌ها (جدول ۴)، این مدل جهت بررسی سینتیک خشک شدن کدو حلوایی انتخاب و نتایج

- مدل‌سازی سینتیک خشک شدن
مدل‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن در جدول ۲ گزارش شده است. با توجه به خطای

آن در جدول ۵ گزارش شده است. در این جدول ضریب تبیین، خطای استاندارد و ضریب این مدل ارائه شده است. برخی از مدل‌ها مانند لگاریتمی و میدلی نیز با داده‌ها سازگاری نداشته و برازش نشدند.

جدول ۴- ضریب تبیین و خطای استاندارد به دست آمده از مدل‌های سینتیکی مختلف (توان ۲۰۴ وات، دمای ۷۵ درجه سلسیوس و ضخامت ۷/۰ سانتی‌متر)

مدل	R	SE
انتشار فیک	۰/۹۶۴	۰/۰۶۴
تقریب انتشار	۰/۹۵۶	۰/۰۷۵
پیچ	۰/۹۷۶	۰/۰۵۳
پیچ اصلاح شده	۰/۹۷۰	۰/۰۵۹
نیوتن	۰/۹۸۸	۰/۰۴۳
میدلی	-	-
لگاریتمی	-	-
ورما	۰/۹۴۷	۰/۰۹۵
دوجمله‌ای	۰/۹۴۹	۰/۰۹۱

جدول ۵- ضریب تبیین، خطای استاندارد و ضرایب مدل نیوتن

توان (W)	دمای هوای داغ (°C)	ضخامت (cm)	k	R	SE
۲۰۴	۵۵	۰/۵	۰/۰۲۱	۰/۹۹۴	۰/۰۲۹
		۰/۷	۰/۰۲۰	۰/۹۹۷	۰/۰۱۶
	۶۵	۰/۵	۰/۰۳۱	۰/۹۹۸	۰/۰۱۳
		۰/۷	۰/۰۲۴	۰/۹۹۵	۰/۰۲۶
	۷۵	۰/۵	۰/۰۴۱	۰/۹۹۴	۰/۰۳۰
		۰/۷	۰/۰۲۵	۰/۹۸۸	۰/۰۴۳
۲۳۸	۵۵	۰/۵	۰/۰۲۵	۰/۹۹۴	۰/۰۲۸
		۰/۷	۰/۰۱۹	۰/۹۹۶	۰/۰۲۲
	۶۵	۰/۵	۰/۰۳۰	۰/۹۹۶	۰/۰۲۲
		۰/۷	۰/۰۲۲	۰/۹۹۷	۰/۰۱۵
	۷۵	۰/۵	۰/۰۳۴	۰/۹۸۷	۰/۰۴۵
		۰/۷	۰/۰۲۳	۰/۹۸۸	۰/۰۴۴
۲۷۳	۵۵	۰/۵	۰/۰۳۲	۰/۹۹۵	۰/۰۲۶
		۰/۷	۰/۰۲۰	۰/۹۹۸	۰/۰۱۵
	۶۵	۰/۵	۰/۰۳۵	۰/۹۹۸	۰/۰۱۵
		۰/۷	۰/۰۲۶	۰/۹۹۷	۰/۰۱۹
	۷۵	۰/۵	۰/۰۴۲	۰/۹۹۸	۰/۰۱۶
		۰/۷	۰/۰۳۱	۰/۹۹۴	۰/۰۳۱

بحث

نتایج خشک کردن کدوخلوایی با سامانه مادون قرمز - هوای داغ حاکی از این بود که افزایش توان لامپ باعث افزایش دمای خشک کن می‌گردد که از طرف دیگر باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل اختلاف دما بین هوا و محصول شده و باعث گرم شدن سریع تر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود در نتیجه زمان خشک شدن کاهش می‌یابد (Gorjian, 2009; Doymaz & Pala, 2003). لذا توصیه می‌شود در خشک کردن مواد غذایی مختلف، جهت افزایش سرعت فرآیند، از توان‌های بالاتر استفاده شود. البته باید در نظر گرفت که با افزایش بیش از حد توان، دمای محصول هم افزایش می‌یابد که باعث افت ارزش تغذیه‌ای می‌شود. توان ۲۷۲ وات، دمای ۷۵ درجه سلسیوس و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر به عنوان بهترین شرایط خشک کردن کدو به دست آمد.

اشعه مادون قرمز 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 سریع تر است و راندمان بالاتری دارد و کیفیت محصولات خشک شده به این روش در مقایسه با روش هوای داغ بالاتر می‌باشد (Afzal et al., 1999; Ratti et al., 2011; Nimmol & Devahastin, 1995).

در خشک کردن قطعات ۱۲ نوع کدوخلوایی با استفاده از خشک کن‌های هوای داغ، خشک کن انجمادی و ماکروویو تحت خلأ مشخص گردید که استفاده از روش ماکروویو تحت خلأ تقریباً ۱۰ برابر زمان خشک کردن را در مقایسه با هوای داغ کوتاه می‌نماید. در جریان هوای داغ قطعات گونه C. pepo نسبت به گونه C. maxima سریع تر آب‌گیری گردیدند و در خشک کردن ماکروویو تحت خلأ قطعات C. maxima با سرعت سریع‌تری خشک شدند و تمامی روش‌های خشک کردن نسبت به روش هوای داغ مؤثرتر بودند (Nawirska et al., 2009).

Doymaz (2007) ویژگی‌های خشک کردن در هوای داغ لایه‌های نازک کدوخلوایی را در مقیاس آزمایشگاهی در ۳ دمای ۵۰، ۵۵ و ۶۰°C در یک سرعت ثابت ۱ m/s و

رطوبت نسبی ۲۵-۱۵٪ بررسی نمود و نتایج نشان داد که هیچ مرحله خشک کردن ثابت در خشک کردن تکه‌های کدوخلوایی وجود ندارد و تمام فرایند خشک کردن به نظر می‌رسد که در مرحله نزولی خشک کردن اتفاق می‌افتد و این نشان می‌دهد که انتشار، مکانیسم فیزیکی پایای حاکم در به حرکت درآوردن رطوبت نمونه‌ها است و رطوبت انتقالی از تکه‌های کدوخلوایی با استفاده از مدل انتشار فیک^۱ توصیف شد و زمان خشک کردن تکه‌های کدوخلوایی تا رسیدن به رطوبت ۱۰٪ در دماهای ۵۰، ۵۵ و ۶۰°C به ترتیب ۱۲/۵، ۶/۵ و ۴/۵ ساعت طول کشید (Doymaz, 2007).

Arevalo-pinedo and Murr (2007) خشک کردن تحت خلأ ۵ و ۱۵ کیلو پاسکال هویج و کدوخلوایی با مقایسه تأثیر انجماد و بلانچینگ به‌عنوان پیش‌تیمار روی سینتیک خشک کردن در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C انجام دادند. منحنی‌های حاصله از آزمون خشک کردن بر اساس مدل انتشار فیک برای یک قطعه بدون اندازه تنظیم شد نتایج حاکی از آن بود که پیش تیمارهای قبل از خشک کردن روی انتقال رطوبت در این محصولات مؤثر است و مقدار ضریب انتشار به دست آمده برای نمونه‌های کدوخلوایی بزرگ‌تر از نمونه‌های هویج بود (Arevalo-pinedo and Murr, 2007).

Hebbar و همکاران (۲۰۰۴) از یک خشک کن ترکیبی مادون قرمز با هوای داغ در سه حالت ترکیبی، مادون قرمز به‌تنهایی و هوای داغ به‌تنهایی برای خشک کردن سیب‌زمینی و هویج استفاده کردند. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش زمان خشک شدن و کاهش انرژی مصرفی در خشک کن ترکیبی نسبت به مادون قرمز و هوای داغ بود. ضرایب نفوذ مؤثر محاسبه شده برای کدوخلوایی با استفاده از سامانه هوای داغ - مادون قرمز بالا می‌باشد (جدول ۳)، که نشان از کارایی این سیستم در افزایش سرعت انتقال رطوبت به سطح محصول و افزایش سرعت خشک کردن دارد.

ضریب نفوذ گزارش شده برای کدوخلوایی خشک شده در یک خشک کن هوای داغ برابر $9/38 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $3/88 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ گزارش شده است (Doymaz, 2007).

¹ Fick's Diffusion Model

افزایش توان لامپ و دمای هوای داغ موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت زمان آن گردید. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای کدوخلوایی در محدوده $9/2 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $3/3 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به دست آمد که با افزایش توان لامپ مادون قرمز و دمای هوای داغ به طور محسوسی افزایش می یافت. برای مدل سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک کدوخلوایی، از مدل های مختلفی استفاده گردید که در نهایت مدل نیوتن به دلیل بالا بودن شاخص ضریب تبیین و پایین بودن خطای استاندارد و همچنین سادگی رابطه آن نسبت به سایر مدل ها، جهت بررسی سینتیک و پیش بینی روند خشک شدن کدوخلوایی انتخاب گردید.

منابع

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. (In Farsi).

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.

Are'valo-Pinedo, A. & Xidieh Murr, F. E. (2007). Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. *Journal of Food Engineering*. 80, 152-156.

Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*. 59, 121-126.

Dandamrongrak, R., Youngand, G. & Mason, R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*. 95, 139-146.

Diamante, L. M. & Munro, P. A., (1991). Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*. 26(1), 99-109.

Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*. 79, 243-248.

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

El-Demery, M. E. (2011). Evaluation of physico-chemical properties of toast breads

میزان ضریب نفوذ مؤثر برای خشک کردن ذرت در یک خشک کن 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 *et al.*, 2000).

نتایج حاصل از برازش داده های آزمایشگاهی با مدل نیوتن نشان داد که این مدل جهت بررسی سینتیک خشک کردن کدوخلوایی در یک خشک کن هوای داغ - مادون قرمز مناسب بوده و ضریب تبیین (R) بالا و خطای استاندارد (SE) پایینی را در هنگام برازش کردن داده های تجربی از خود نشان داد. لذا استفاده از این مدل جهت بررسی فرآیند خشک کردن کدوخلوایی با سامانه مادون قرمز و پیش بینی سینتیک انتقال جرم آن توصیه می شود.

Yaghobi و همکاران (2012) سینتیک افت رطوبت و مدل سازی ریاضی خشک کردن سیب زمینی در یک خشک کن هوای داغ را با استفاده از آنالیز رگرسیون بررسی کردند. آزمایش ها در دو دمای ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس انجام گردید. سه مدل ریاضی سینتیک نیوتنی، پیچ و هندرسون بر داده های تجربی برازش داده شدند. نتایج نشان داد که مدل پیچ نسبت به سایر مدل ها، مراحل خشک شدن برش سیب زمینی را بهتر ارزیابی می کند. همچنین در مطالعه ای استفاده از مدل لگاریتمی را برای پیش بینی نسبت رطوبت ذرت در طی خشک کردن با هوای داغ را توصیه نموده اند (Abbasi *et al.*, 2014).

نتیجه گیری

مدل سازی روابط بین متغیرهای مختلف طی فرآیند خشک کردن محصولات غذایی و بررسی سینتیک انتقال جرم و ضرایب نفوذ رطوبت می تواند به عنوان یک ابزار سودمند برای کنترل بهینه شرایط فرآیند و افزایش کیفیت محصول خشک شده نهایی باشد. در این پژوهش روش خشک کردن مادون قرمز - هوای داغ جهت تولید پودر کدوخلوایی بررسی شد. تأثیر تغییر توان لامپ مادون قرمز، دمای هوای داغ و ضخامت ورقه ها بر سینتیک خشک شدن کدوخلوایی بررسی و ضرایب مربوطه گزارش شد.

fortified with pumpkin (Cucurbita moschata) flour. The 6th Arab and 3rd International Annual Scientific Conference. Faculty of Specific Education Mansoura University – Egypt. 2146-2160.

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. (In Farsi).

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

Guiné R. P. F. & Barroca, M. J. (2010). Effect of drying on the textural attributes of bell pepper and pumpkin. 17th International Drying Symposium (IDS) Magdeburg, Germany, 3-6 October .

FAO. (2012). Statistical Database. Available: <http://www.fao.org/>.

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.

Jun, S., Krishnamurthy, K., Irudayaraj, J. & Demirci, A. (2011). Fundamentals and theory of infrared radiation. In: Pan, Z. Atungulu, G. G. (Eds.). Infrared heating for food and agricultural processing. New York.

Krishnamurthy, K., Kaur Khurana, H., Jun, S., Irudayaraj, J. & Demirci, A. (2008). Infrared Heating in Food Processing: An Overview. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 7, 2-13.

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

Menges, H. O. & Ertekin, C. (2005). Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. Journal of Food Engineering. 77, 119-125.

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

Nawirska, A. (2009). Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. Journal of Food Engineering. 94, 14-20.

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.

Rakcejeva, T., Galoburda, R., Cude, L. & Strautniece, E. (2011). Use of dried pumpkins in wheat bread production. Procedia Food Science. 1, 441 – 447.

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.

Saeleaw, M. & Schleining, G. (2011). Composition, Physicochemical and Morphological Characterization of Pumpkin Flour. 11th International Congress on Engineering and Food “Food Process Engineering in a Changing World”, Athens, April 10-13.

Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C. & Rossello, C. (2005). Use of exponential, Page’s and diffusional models to simulate the drying kinetics of Kiwi Fruit. Journal of Food Engineering. 66, 323-328.

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

Tamer, C. E., İncedayi, b., Parseker Yonel, S., Yonak, S. & Utku Copur, O. (2010). Evaluation of several Quality Criteria of Low Calorie Pumpkin Dessert. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj. 38, 76-80.

Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B. & Wratten. F. T. (1985). Effect of drying air parameters on rice drying models. Trans ASAE 28, 296-301.

Wan Nadiah See, E. F. (2007). Physico-Chemical and Sensory Evaluation of Breads Supplemented with Pumpkin Flour. ASEAN Food Journal. 14 (2), 123-130.

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. (In Farsi).

Yaldiz, O., Ertekin, C. & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. Energy. 26(5), 457-465.