

تغییرات برخی از پارامترهای فیزیکوشیمیایی و مهندسی کدو حلوائی (*C. moschata*) با روش خشک کردن فروسرخ

سید حسین حسینی قابوس^{۱*}، سید مهدی سیدین اردبیلی^۲، مهدی کاشانی نژاد^۳، غلامحسین اسدی^۴، مهران اعلمی^۳

^۱ دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^۲ دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^۳ دانشیار، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

^۴ استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

آرد کدو حلوائی به دلیل عطر و طعم مطلوب، بتاکاروتن بالا، ویتامین‌های محلول در آب و رنگ مناسب می‌تواند در انواع مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش تأثیر توان لامپ پرتو دهی در سه سطح ۲۰۴، ۲۳۸ و ۲۷۲ وات و ضخامت برش‌های کدو حلوائی (دو سطح ۰/۵ و ۰/۷ سانتی‌متر) بر تغییرات بتاکاروتن، رنگ و بافت در طی خشک کردن به روش مادون قرمز بررسی گردید. همچنین مدل‌سازی سینتیک خشک کردن و ضریب نفوذ رطوبت در طی خشک شدن کدو حلوائی نیز بررسی شد. مقدار بتاکاروتن نمونه‌های خشک شده در محدوده ۲۰/۷۷ تا ۳۱/۲۶ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم به دست آمد. رنگ نمونه‌ها با تکنیک پردازش تصویر آنالیز و میانگین شاخص‌های تصویر شامل L^* ، a^* و b^* به ترتیب برابر ۶۹/۵۴، ۱۴/۶۴ و ۶۴/۵۶ به دست آمد. مقدار سفتی ورقه‌های خشک شده در محدوده ۷/۴۸-۱۱/۵۳ نیوتن به دست آمد. افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۲۰۴ به ۲۷۲ وات زمان خشک شدن کدو حلوائی را ۳۸/۱۶ درصد کاهش داد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت کدو حلوائی بین $۰/۴۲ \times ۱۰^{-۹}$ تا $۱/۴۷ \times ۱۰^{-۹}$ مترمربع بر ثانیه بود. اثر توان حرارتی مادون قرمز بر تغییرات ضریب نفوذ مؤثر کدو حلوائی بررسی و مشخص شد که مقدار ضریب نفوذ مؤثر با افزایش توان منبع حرارتی افزایش می‌یابد. در مدل‌سازی فرآیند خشک کردن کدو حلوائی توسط مادون قرمز مدل پیچ همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر مدل‌ها داشت.

واژه‌های کلیدی: آنالیز بافت، بتاکاروتن، پردازش تصویر، کدو حلوائی، مدل پیچ.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، اهمیت ویتامین‌های گروه ب، بتاکاروتن و ویتامین ث به لحاظ ویژگی‌های آنتی‌اکسیداتیو مورد توجه و تحقیق قرار گرفته است. غذاهای حاوی کاروتن از جمله کدو حلوائی^۱ برای پیشگیری از بیماری‌های پوستی، چشم و سرطان گزارش شده است. کدو حلوائی منبع مناسبی از کاروتن، ویتامین-های محلول در آب و اسیدهای آمینه ضروری می‌باشد (۱).

کدو حلوائی یک محصول فصلی است که به دلیل ارزش تغذیه‌ای بالا جهت قرار گرفتن در رژیم غذایی انسانی توصیه می‌شود (۲). میزان تولید کدو حلوائی در ایران طبق آمار ارائه شده توسط فائو در سال ۲۰۱۳، ۹۵۱۲۵۳ تن می‌باشد که از این نظر در جایگاه پنجم دنیا قرار دارد. استان خراسان یکی از قطب‌های تولید کدو حلوائی می‌باشد و بالغ بر ۳۰ درصد این محصول در طی زنجیره تولید از بین می‌رود. طیف وسیعی از مواد چربی‌دوست چون کاروتنوئیدهای موجود در انواع کدو حلوائی می‌تواند به طور قابل توجهی به دریافت پیش ساز ویتامین A و مخصوصاً لوتئین^۲، که یک کاروتنوئید با وظایف فیزیولوژیکی خاص مانند حفظ سلامت ماکولا و شبکیه است، کمک نماید. رنگ زرد تا نارنجی گوشت کدو حلوائی از این گروه از مواد ناشی می‌شود. علاوه بر این عملکرد خوب فراورده‌های فیبری آن در ارتباط با آب و قند گلوکز، استفاده آن را به عنوان اجزای غذا توصیه می‌شود (۲). کدو حلوائی همچنین به خاطر داشتن مقدار زیاد پلی‌ساکاریدها مورد توجه است و منبع مناسبی از پکتین، مواد بیواکتیوی چون ترکیبات فنولیک و ترپنوئیدی‌ها است (۳).

کدو حلوائی تازه می‌تواند به صورت پودر فرآوری شود که مدت ماندگاری آن افزایش می‌یابد و پودر آن به خاطر طعم مطلوب، شیرینی و رنگ نارنجی به زرد قوی و عمیق، به عنوان مکمل در آردهای غله‌ای در فراورده‌های غذایی مانند کیک، کلوچه، سوپ، سس، رشته فوری، چاشنی و همچنین به عنوان عامل رنگ دهنده طبیعی در ماکارونی و مخلوط‌های آرد به کار می‌رود (۴-۶). در کنار فعالیت پیش‌سازی ویتامین A عملکرد فیزیولوژیکی خاص بسیاری از کاروتنوئیدها چون پیشگیری از سرطان، ضروری به نظر می‌رسد (۷).

پودر خشک کدو حلوائی به خاطر غنی بودن در 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 حلوائی) می‌تواند به صورت مکمل برای بهبود کیفیت تغذیه‌ای نان و محصولات نانوائی به کار رود (۷-۸).

بر اساس مطالعات انجام شده مقدار پروتئین پودر کدو حلوائی بین ۹ تا ۹/۶۹٪ گزارش شده است که گویای کاربرد بالقوه آرد کدو حلوائی به عنوان جایگزین برای آرد گندم و یا به عنوان آرد مخلوط کدو حلوائی- گندم می‌باشد (۹، ۸، ۴).

پونگجانا و همکاران (۱۰) اظهار نمودند که پودر کدو حلوائی برای تولید محصولات غذایی با کیفیت خوب و دسترسی ارزان و راحت به بتاکاروتن مناسب می‌باشد. در پژوهش دیگری همچنین نشان دادند که استفاده از ۲۰-۱۰٪ پودر کدو حلوائی جایگزین شده با آرد گندم در دسرهای تایلندی زرد رنگ و مقدار کاروتن آن را بهبود بخشید و به وسیله مصرف کنندگان مورد پذیرش قرار گرفت (۱۱).

دویمز (۱۲) ویژگی‌های کدو حلوائی خشک شده درون خشک کن هوای داغ در دماهای ۵۰، ۵۵ و ۶۰°C، سرعت ثابت ۱m/s و رطوبت نسبی ۲۵-۱۵٪ بررسی و گزارش نمود که مرحله ثابت خشک کردن در این فرآیند مشاهده نشده و تمام فرایند خشک کردن در مرحله نزولی خشک کردن اتفاق می‌افتد. این موضوع نشان می‌دهد که انتشار، مکانیسم فیزیکی پایای حاکم در به حرکت درآوردن رطوبت نمونه‌های کدو حلوائی است. رطوبت انتقالی از تکه‌های کدو حلوائی با استفاده از مدل انتشار فیک^۳ توصیف شد و زمان خشک کردن تکه‌های کدو حلوائی تا رسیدن به رطوبت ۱۰٪ در دماهای ۵۰، ۵۵ و ۶۰°C به ترتیب ۱۲/۵، ۶/۵ و ۴/۵ ساعت طول کشید.

خشک کردن به وسیله اشعه مادون قرمز به ویژه به شکل لایه‌نازک روش مناسبی برای تولید محصول خشک شده 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 (۱۳). در خصوص مزایای کاربرد صنعتی این روش برای خشک کردن محصولات کشاورزی

¹ Pumpkin

² Lutein

³ Fick's Diffusion Model

۲- مواد و روش‌ها**۲-۱- خشک کردن**

برای انجام آزمایش‌ها کدو حلوایی واریته *C. moschata* از استان گلستان تهیه گردید. رطوبت اولیه نمونه‌ها ۹۳ درصد بود. برای انجام فرآیند خشک کردن ابتدا کدو حلوایی‌ها توسط قالب استیل و کاتر به شکل استوانه‌هایی با قطر ۲ سانتی‌متر و در ضخامت‌های ۰/۵ و ۰/۷ سانتی‌متر برش‌خورند. برای تهیه نمونه‌ها، از قسمت گوشتی کدو حلوایی تازه با فاصله ۰/۵ سانتی‌متر از پوسته استفاده گردید. برش‌های کدو حلوایی بلافاصله پس از برش جهت پرتودهی توسط سامانه مادون‌قرمز مورد استفاده قرار گرفتند.

توان مناسب برای خشک کردن محصولات کشاورزی در محدوده ۲۰۰ تا ۳۰۰ وات و ضخامت مناسب نیز ۰/۵ تا ۱ سانتی‌متر می‌باشد (۱۸). در این پژوهش جهت خشک کردن نمونه‌های برش‌خورده با سامانه مادون‌قرمز از توان‌های متفاوت لامپ مادون‌قرمز^۱ (۲۰۴، ۲۳۸ و ۲۷۲ وات) که توسط واریابل کنترل می‌شد، در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از نمونه در دو ضخامت ۰/۵ و ۰/۷ سانتی‌متر استفاده شد. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی^۲ با دقت ۰/۰۱ ثبت گردید.

آزمایش‌ها در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی، در سطح معنی‌داری ۵٪ با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16 مورد بررسی قرار گرفتند.

۲-۲- اندازه‌گیری بتاکاروتن

۱ گرم از نمونه را در ۱۵-۱۰ میلی‌لیتر استن به کمک دسته هاون خرد و مقدار کمی کریستال سولفات سدیم بدون آب به آن اضافه نمودیم. سپس مایع رویی را به درون بشر ریخته و این فرایند را دو بار تکرار می‌شود. مایه رویی جمع‌آوری شده به یک قیف جداکننده منتقل و سپس ۱۵-۱۰ میلی‌لیتر پترولیوم اتر اضافه و به خوبی مخلوط شده و دولایه پس از پایدار شدن جدا گردید. لایه پایین دور ریخته شده و لایه رویی در یک فلاسک حجمی ۱۰۰ میلی‌لیتری جمع‌آوری و حجم آن با پترولیوم اتر به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در نهایت جذب نوری نمونه‌ها در طول موج ۴۵۲ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر و با استفاده از پترولیوم اتر

می‌توان به راندمان بالا، ایجاد گرمای یکنواخت در نمونه، سهولت کنترل فرایند، هزینه تعمیر و نگهداری پائین، صرفه‌جویی در فضا و .. اشاره نمود (۱۴).

اشعه مادون‌قرمز 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 (۱۵).

شارما و همکاران (۱۶) بیان نمودند در خشک کردن لایه نازک قطعات پیاز با استفاده از خشک‌کن مادون‌قرمز و هوای داغ، با تغییر توان مادون‌قرمز از ۳۰۰ به ۵۰۰ ولت، افزایش دمای هوا از ۳۵ به ۴۵ درجه سلسیوس و افزایش سرعت جریان هوا از یک به ۱/۵ متر بر ثانیه، زمان خشک شدن ۲/۵ برابر کاهش پیدا کرد.

کومار و همکاران (۱۷) دریافتند که برای قطعات پیاز، ترکیب هوای داغ - مادون‌قرمز زمان خشک کردن را کوتاه‌تر می‌کند. در تحقیق دیگری ذرت در سه سطح متفاوت رطوبت (۱۵، ۱۶ و ۲۴ درصد) برداشت و با سه سیستم هوای داغ، مادون‌قرمز و ترکیب هوای داغ و مادون‌قرمز خشک شد. زمان مورد نیاز برای خشک کردن در سیستم هوای داغ در حدود ۲۳۳، ۳۶۰ و ۲۵۵ درصد طولانی‌تر در مقایسه با سیستم ترکیبی هوای داغ و مادون‌قرمز تعیین شد.

سینیتیک خشک شدن برش‌های بادمجان در یک خشک‌کن ترکیبی هوای داغ- مادون‌قرمز توسط صالحی و همکاران (۱۸) بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش توان منبع حرارتی مادون‌قرمز مقدار ضریب نفوذ مؤثر افزایش می‌یابد و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بادمجان در محدوده $2/4 \times 10^{-9}$ تا $8/1 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه بود. همچنین مدل پیچ را به عنوان یک مدل مناسب جهت بررسی سینیتیک خشک کردن برش‌های بادمجان معرفی نموده‌اند.

تاکنون مطالعه جامعی در خصوص اثر خشک کردن توسط مادون‌قرمز بر تغییر مقدار بتاکاروتن، رنگ و بافت کدو حلوایی صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر تغییر توان لامپ پرتودهی مادون‌قرمز و ضخامت نمونه‌ها بر خصوصیات کدو حلوایی خشک‌شده به روش مادون‌قرمز و مدل‌سازی سینیتیک خشک کردن توسط مدل‌های مختلف و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آن در دامنه توان ۲۰۴ تا ۲۷۲ وات می‌باشد.

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

² Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)

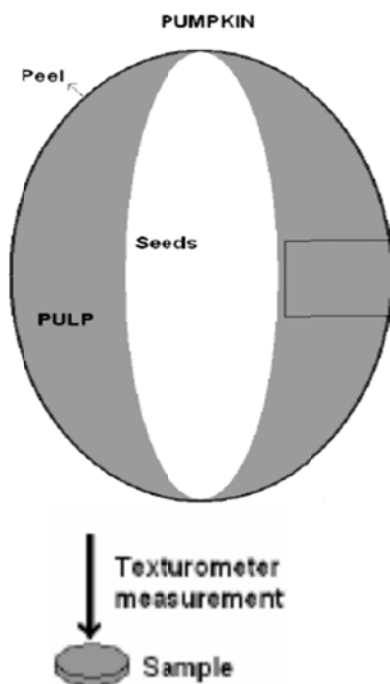
به عنوان شاهد (بلانک) ثبت و مقدار بتاکاروتن مطابق با معادله ۱ محاسبه گردید (۶).

(۱)

$$\text{B-Carotene (mg/100gr)} = \frac{\text{OD نمونه} \times 13/9 \times 10^4 \times 100}{\text{وزن نمونه} \times 560 \times 1000}$$

۳-۲- پردازش تصویر

جهت بررسی رنگ کدو حلوایی خشک شده از روش پردازش تصویر استفاده شد. در این روش از یک اسکنر اچ پی (Hp Scanjet G3110) استفاده شد. هر بار ۱۶ نمونه خشک شده از هر تیمار، اسکن شده و تصاویر به دست آمده آنالیز و میانگین نتایج گزارش گردید. ابتدا تصاویر با فرمت jpg و در فضای رنگی RGB ذخیره شدند. سپس تصاویر گرفته شده توسط نرم افزار Color Image J (version 1.42e, USA) و برنامه آن (Space Converter) از فضای رنگی RGB به *a* *b* *L* تبدیل گردیدند (۱۹).



شکل ۱- تهیه نمونه های کدو حلوایی تازه برای آنالیز بافت

۴-۲- بافت سنجی

برای اندازه گیری بافت کدو حلوایی تازه مطابق با روش گوین و باروکا (۲) و شکل ۱ برش های استوانه ای با قطر ۲۰ میلی متر و ضخامت ۵ و ۷ میلی متر و در مسیر شعاعی از پوست به سمت مرکز کدو حلوایی گرفته شد و سپس توسط دستگاه بافت سنج^۱ (TA-XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., Surrey, UK) و نرم افزار مربوطه (Texture Expert 1.05) سفتی^۲ نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت. پروب استوانه ای با قطر ۲ میلی متر، با سرعت ۱/۰ میلی متر بر ثانیه جهت انجام آزمون نفوذ و به دست آوردن خصوصیات بافتی استفاده گردید. سرعت پروب قبل و بعد از آزمون ۲/۰ میلی متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

۵-۲- مدل سازی فرآیند خشک کردن

جهت مدل سازی فرآیند خشک شدن، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن کدو حلوایی با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید (۱۲).

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

MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t : رطوبت نمونه ها در هر لحظه بر پایه خشک (d.b)، M_e : رطوبت تعادلی نمونه ها (d.b) و M_0 : رطوبت اولیه نمونه ها (d.b) می باشد. برای زمان های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_t و M_0 بسیار کوچک می باشد. بنابراین می توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۳ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نیست (۱۲).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (3)$$

۶-۲- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

تعداد مکانیسم های انتقال رطوبت، گسترده و اغلب پیچیده است. پدیده های انتقال معمولاً برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه بندی می شود. قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار می تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند (۱۹)، (۱۲) (معادله ۴):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (4)$$

¹ Texture analyzer

² Hardness

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (۷)$$

K_0 شیب خط می‌باشد. برای هر تیمار از ضریب نفوذهای به دست آمده میانگین گرفته و نتیجه اعلام شد.

به منظور بررسی سینتیکی و پیش‌بینی روند خشک شدن کدو حلوائی، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک کردن استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن کدو حلوائی در جدول ۱ به نمایش درآمده است (۲۲، ۲۱، ۱۲). در این جدول MR نسبت رطوبت، t زمان (min) و a, b, c, g, l, k, n ، ثابت‌های مدل‌ها می‌باشند. 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

۳-۱- خشک کردن کدو حلوائی

کدو حلوائی یک منبع مناسب از کاروتن، ویتامین‌های محلول در آب و اسیدهای آمینه است. کدو حلوائی را می‌توان به آرد که دارای ماندگاری طولانی است تبدیل نمود. آرد کدو حلوائی به دلیل عطر و طعم بسیار مطلوب، شیرینی و عمیق رنگ زرد-نارنجی آن استفاده می‌شود (۱۲). نتایج خشک کردن کدو حلوائی با سامانه مادون قرمز حاکی از این بود که افزایش توان لامپ باعث افزایش

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و x شاخص فضایی می‌باشد. مطالعه انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم در طی دوره‌ی سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد (۲۰). 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 زیر می‌باشد (۱۹، ۱۲):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}) \quad (۵)$$

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 ۶ به دست می‌آید:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (۶)$$

ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک کردن برحسب $\ln MR$ نسبت به زمان تعیین می‌گردد. زمانی نمودار مقدار $\ln MR$ نسبت به زمان رسم گردد، شیب خط به دست آمده را در معادله ۷ قرار داده تا ضریب نفوذ مؤثر به دست آید (۱۹، ۱۲):

جدول ۱- مدل‌های سینتیکی مورد استفاده جهت مدل‌سازی خشک شدن کدو حلوائی.

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

¹ Approximation of diffusion

² Page

³ Modified Page –II

⁴ Fick's Diffusion

⁵ Newton

⁶ Midilli

⁷ Logarithmic

کاهش ضخامت نمونه‌ها از ۰/۷ به ۰/۵ سانتی‌متر، زمان خشک شدن کدوخلوایی را به ترتیب ۳۸/۱۶ و ۱۳/۸۹ درصد کاهش می‌دهند.

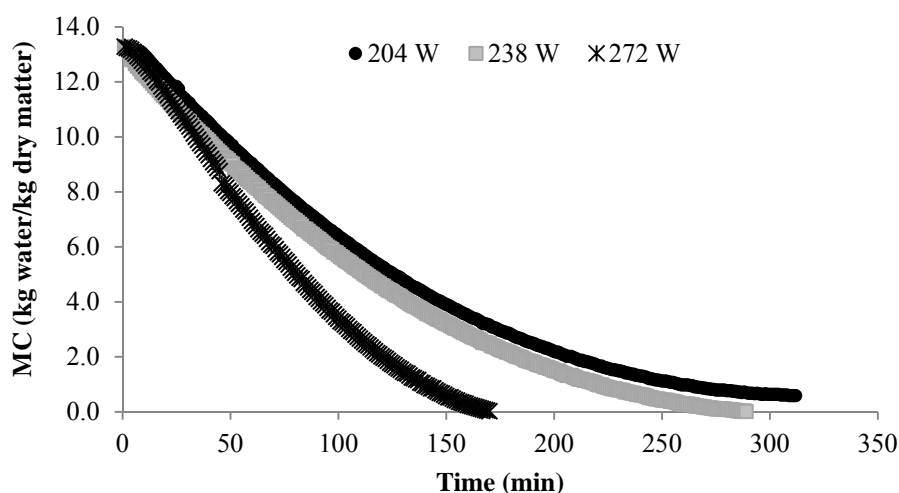
۳-۲- اثر مادون قرمز بر بتاکاروتن

از آنجایی که کدوخلوایی غنی از بتاکاروتن است و مقدار آن حتی از بتاکاروتن موجود در هویج نیز بالاتر می‌باشد (۴)، لذا قرار دادن مواد غذایی غنی از بتاکاروتن از جمله کدوخلوایی در رژیم غذایی انسان یک روش مقرون به صرفه برای رفع مشکلات سلامتی مرتبط با ویتامین A در نظر گرفته می‌شود (۱۰، ۲۵). مقادیر بتاکاروتن برش‌های خشک شده کدوخلوایی در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

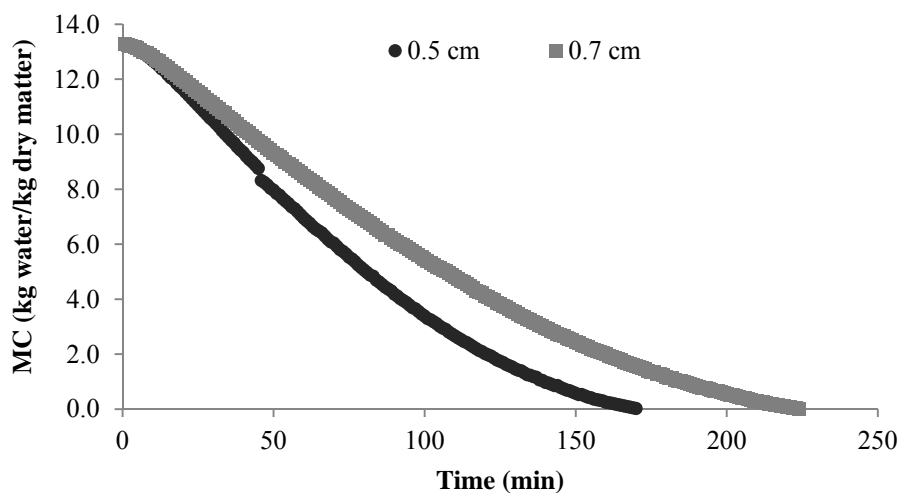
دمای خشک کن می‌گردد که از طرف دیگر باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول شده و باعث گرم شدن سریع تر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود؛ و در نتیجه زمان خشک شدن کاهش می‌یابد (۲۳، ۲۴).

اثر توان پرتودهی و ضخامت بر تغییرات مقدار رطوبت بازمان در شکل‌های ۲ و ۳ 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 منتشر شده حدود ۱۰ درصد بر پایه مرطوب می‌باشد (۸)؛ لذا زمان رسیدن رطوبت نمونه‌ها تا ۱۰ درصد رطوبت به عنوان زمان خشک شدن در نظر گرفته شد. افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۲۰۴ به ۲۷۲ وات و



شکل ۲- اثر توان لامپ پرتودهی بر تغییرات رطوبت برش‌های کدوخلوایی (ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر).



شکل ۳- اثر تغییر ضخامت نمونه‌ها بر تغییرات رطوبت برش‌های کدوخلوایی (۲۷۲ وات).

ضخامت، به دلیل کاهش سرعت خشک شدن و در نتیجه تغییرات بیشتر در حجم و تخلخل کمتر بافت، سفتی برش‌های کدو حلوائی خشک شده افزایش یافته است.

جدول ۳- نتایج پردازش تصویر برش‌های خشک شده کدو حلوائی

L	a*	b*	ضخامت (cm)	توان (W)
۴۹/۲۸±۶/۵۳	۴۵/۷۶±۶/۳۵	۵۰/۵۴±۶/۲۰	۰/۵	۲۰۴
۷۷/۵۲±۷/۶۶	۵/۵۰±۲/۹۲	۵۸/۸۲±۷/۰۶	۰/۷	
۶۸/۶۲±۶/۵۴	۱۳/۸۲±۴/۲۱	۶۹/۴۸±۵/۶۰	۰/۵	۲۳۸
۷۳/۱۱±۸/۹۰	۶/۱۴±۴/۳۱	۶۴/۱۳±۸/۱۷	۰/۷	
۷۳/۹۰±۷/۳۵	۸/۸۳±۵/۱۹	۷۱/۴۹±۶/۵۹	۰/۵	۲۷۳
۷۴/۸۱±۸/۰۴	۷/۸۰±۵/۳۷	۷۲/۹۲±۶/۹۰	۰/۷	

جدول ۴- نتایج آنالیز بافت برش‌های خشک شده کدو حلوائی

سفتی (N)	ضخامت (cm)	توان (W)
۷/۴۹±۱/۸۲	۰/۵	۲۰۴
۸/۵۷±۰/۲۱	۰/۷	
۱۱/۲۱±۰/۳۱	۰/۵	۲۳۸
۱۱/۵۳±۰/۸۴	۰/۷	
۷/۴۸±۱/۰۷	۰/۵	۲۷۳
۹/۴۱±۲/۹۴	۰/۷	

۳-۵- تعیین ضریب نفوذ مؤثر

شکل‌های ۴ و ۵ روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت برش‌های کدو حلوائی نسبت به زمان را نشان می‌دهند. شیب این خطوط جهت محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده گردید. مقادیر مختلف میزان ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول ۵ گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ پرتو دهی در فرآیند خشک شدن کدو حلوائی، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد. با افزایش توان لامپ از ۲۰۴ به ۲۷۲ وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت ۱۳۸ درصد افزایش یافت.

ضریب نفوذ گزارش شده برای کدو حلوائی خشک شده در یک خشک کن هوای داغ برابر $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $9/38 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ گزارش شده است (۱۲).

با افزایش ضخامت نمونه‌ها در طی خشک کردن توسط مادون قرمز، به دلیل افزایش زمان خشک کردن، مقدار بتاکاروتن کاهش یافته است. همچنین با افزایش توان لامپ پرتو دهی نیز مقدار بتاکاروتن به دلیل آسیب دیدن در دماهای بالاتر، ۲۷/۵ درصد کاهش یافته است.

جدول ۲- مقادیر بتاکاروتن برش‌های خشک شده کدو حلوائی

توان (W)	ضخامت (cm)	بتاکاروتن (mg/100gr)
۲۰۴	۰/۵	۳۱/۲۶±۰/۱۷
	۰/۷	۲۶/۵۲±۰/۲۷
۲۳۸	۰/۵	۲۳/۷۹±۱/۰۹
	۰/۷	۲۱/۵۰±۰/۲۷
۲۷۳	۰/۵	۲۲/۶۵±۰/۶۸
	۰/۷	۲۰/۷۷±۰/۵۷

۳-۳- پردازش تصویر

مدل رنگی Lab مرکب از مولفه روشنایی (مقدار L که دامنه‌ای از صفر تا ۱۰۰ را دارد) و دو جزء رنگی (دامنه‌ای از ۱۲۰- تا ۱۲۰+) که شامل جزء a* (دارای طیف رنگی سبز تا قرمز) و جزء b* (دارای طیف رنگی آبی تا زرد) می‌باشد (۱۹). در جدول ۳ نتایج مربوط به آنالیز رنگ برش‌های خشک شده کدو حلوائی مشاهده می‌شود. شاخص‌های a* و b* مثبت می‌باشند، که به ترتیب نشان‌دهنده گرایش نمونه‌ها به سمت قرمزی و زردی است. رنگ نمونه‌ها با روش پردازش تصویر آنالیز و میانگین شاخص‌های تصویر شامل L*، a* و b* به ترتیب برابر ۶۹/۵۴، ۱۴/۶۴ و ۶۴/۵۶ به دست آمد.

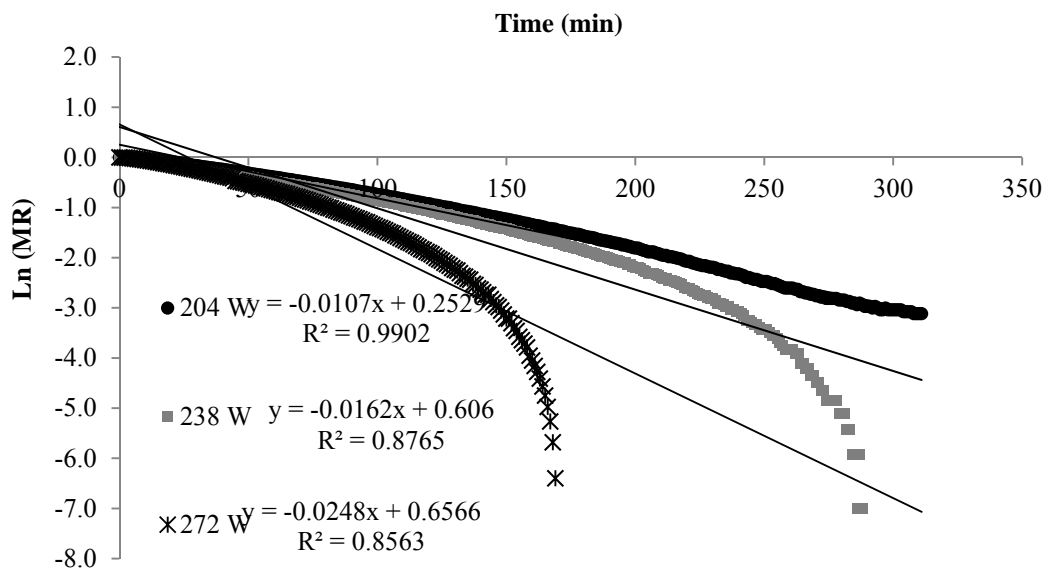
۳-۴- بافت سنجی

بافت مواد غذایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خصوصیات کیفی محصول، نقش مهمی در پذیرش کلی مصرف‌کنندگان دارد. در جدول ۴ نتایج مربوط به آنالیز بافت برش‌های خشک شده کدو حلوائی به نمایش درآمده است. مقدار سفتی برش‌های خشک شده کدو حلوائی در محدوده ۷/۴۸-۱۱/۵۳ نیوتن به دست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ضخامت اولیه نمونه‌ها، سفتی نمونه‌های خشک شده نیز افزایش می‌یابد. با افزایش

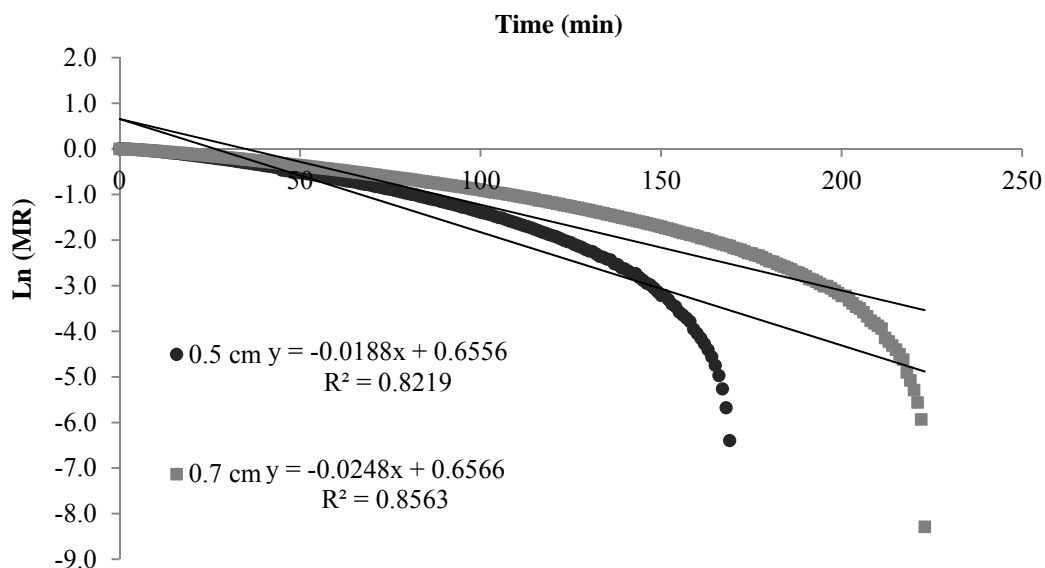
به دست آمده برای نمونه های کدو حلوائی بزرگ تر از نمونه های هویج بود.

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 (۲۷). 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 (۲۴).

آروالو-پینلو و مور (۲۶) خشک کردن تحت خلأ ۵ و ۱۵ کیلو پاسکال هویج و کدو حلوائی با مقایسه تأثیر انجماد و بلانچینگ به-عنوان پیش تیمار روی سینتیک خشک کردن در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C انجام دادند. منحنی های 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



شکل ۴- مقادیر لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان برای توان های متفاوت (ضخامت ۰/۵ سانتی متر).



شکل ۵- مقادیر لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان برای ضخامت های متفاوت (۲۷۲ وات).

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.

۴- نتیجه‌گیری

کدو حلوائی یک منبع مناسب از بتاکاروتن، ویتامین‌های محلول در آب و اسیدهای آمینه است. کدو حلوائی را می‌توان به آرد که دارای ماندگاری طولانی است تبدیل نمود. آرد کدو حلوائی به دلیل عطر و طعم بسیار مطلوب، شیرینی و رنگ زرد نارنجی-قرمز عمیق آن استفاده می‌شود. در این پژوهش روش خشک کردن مادون‌قرمز جهت تولید پودر کدو حلوائی بررسی شد. مقدار بتاکاروتن نمونه‌های خشک‌شده در محدوده ۲۰/۷۷ تا ۳۱/۲۶ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم به دست آمد. رنگ نمونه‌ها با روش پردازش تصویر آنالیز شد. شاخص‌های a^* و b^* مثبت بود، که به ترتیب نشان‌دهنده گرایش نمونه‌ها به سمت قرمزی و زردی است. مقدار سفتی ورقه‌های خشک‌شده توسط دستگاه بافت آنالیز و در محدوده ۷/۴۸-۱۱/۵۳ نیوتن به دست آمد. افزایش توان لامپ موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت‌زمان آن گردید. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای کدو حلوائی در محدوده $۰/۴۲ \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $۱/۴۷ \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به دست آمد که با افزایش توان لامپ مادون‌قرمز افزایش می‌یافت. برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه‌نازک کدو حلوائی، از مدل‌های مختلفی استفاده گردید که در نهایت مدل پیچ به دلیل بالا بودن شاخص ضریب همبستگی و پایین بودن خطای استاندارد جهت بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن کدو حلوائی انتخاب گردید.

۵- منابع

- 1- Ravi U., Menon I. and Anupama M. 2010. Formulation and quality assessment of instant dhokla mix with incorporation of pumpkin flour. Journal of scientific & industrial Research. 69: 956- 960.
- 2- Guiné R.P.F. and 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 .
- 3- Noor Aziah, A.A. et al. 2011. Evaluation of resistant starch in crackers incorporated with unpeeled and peeled pumpkin flour. American Journal of food technology, 6(12): 1054-1060.

جدول ۵- مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک کردن کدو حلوائی.

توان (W)	ضخامت (cm)	ضریب نفوذ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	R
۲۰۴	۰/۵	$۰/۴۲ \times 10^{-9}$	۰/۹۹
	۰/۷	$۰/۹۸ \times 10^{-9}$	۰/۹۳
۲۳۸	۰/۵	$۰/۶۷ \times 10^{-9}$	۰/۹۴
	۰/۷	$۱/۱۴ \times 10^{-9}$	۰/۹۱
۲۷۳	۰/۵	$۱/۰۰ \times 10^{-9}$	۰/۹۳
	۰/۷	$۱/۴۷ \times 10^{-9}$	۰/۹۱

جدول ۶- ضریب همبستگی، خطای استاندارد و ضرایب مدل پیچ.

توان (W)	ضخامت (cm)	k	n	R	SE
۲۰۴	۰/۵	۰/۰۰۲	۱/۲۷۵	۰/۹۹۹	۰/۰۰۵
	۰/۷	۰/۰۰۲	۱/۲۸۸	۰/۹۹۷	۰/۰۲۱
۲۳۸	۰/۵	۰/۰۰۳	۱/۲۵۶	۰/۹۹۷	۰/۰۱۹
	۰/۷	۰/۰۰۱	۱/۳۶۹	۰/۹۹۸	۰/۰۱۷
۲۷۳	۰/۵	۰/۰۰۱	۱/۵۲۶	۰/۹۹۸	۰/۰۱۶
	۰/۷	۰/۰۰۱	۱/۴۸۳	۰/۹۹۸	۰/۰۱۹

۳-۶- مدل‌سازی سینتیک خشک شدن

با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌های سینتیک (جدول ۱) در طی بررسی سینتیک خشک شدن کدو حلوائی، نتایج این مدل در جدول ۶ گزارش شده است. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل پیچ (جدول ۶) نشان داد که این مدل جهت بررسی سینتیک خشک کردن کدو حلوائی در یک خشک‌کن مادون‌قرمز مناسب بوده و ضریب همبستگی (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 مادون‌قرمز توصیه می‌شود.

یعقوبی و همکاران (۲۸) سینتیک افت رطوبت و مدل‌سازی ریاضی خشک کردن سیب‌زمینی در یک خشک‌کن هوای داغ را با استفاده از آنالیز رگرسیون بررسی کردند. آزمایش‌ها در دو دمای ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس انجام گردید. سه مدل ریاضی

- layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 71: 282–286.
- 17- Kumar, D.G.P., Hebbar, H.U., Sukumar, D. & Ramesh, M.N. 2005. Infrared and hot-air drying of onions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 29: 132–150.
 - 18- Salehi, F., Kashaninejad, M. and Asadi Amirabadi, A. 2014. Investigation of Mass Transfer Kinetics during Combined Hot Air-Infrared Drying of Eggplant Slices. *Modern Food Science and Technology journal*, 7: 55-62 (In Persian).
 - 19- Salehi, F. & Kashaninejad, M. 2014. Effect of different drying methods on rheological and textural properties of Balangu seed gum. *Drying Technology*, 32(6): 720-727.
 - 20- Wong, J. Y. 2001. *Theory of Ground vehicles*. (3rd ed). John Wiley and Sons, Inc. www.FAOSTAT.org
 - 21- Yaldiz, O., Ertekin, C. & Uzun. H. I. 2001. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5): 457-465.
 - 22- 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.
 - 23- Gorjian, S., 2009. Modelling of thin layer drying kinetics of barberry fruit. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Farsi).
 - 24- Doymaz, I., & Pala. M., 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60: 125-130.
 - 25- Wan Nadiah See, E.F. 2007. Physico-Chemical and Sensory Evaluation of Breads Supplemented with Pumpkin Flour. *ASEAN Food Journal*, 14 (2): 123-130.
 - 26- 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.
 - 27- 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).
 - 28- 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).
 - 4- See E.F., Wan Nadiah W.A., Noor Aziah A.A. 2007. Physico-chemical and sensory evaluation of breads supplemented with pumpkin flour. *ASEAN Food Journal*, 14(2):123–30.
 - 5- 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.
 - 6- Bhat M.A. and Bhat A. 2013. Study on Physico-Chemical Characteristics of Pumpkin Blended Cake. *Journal of Food Processing and Technology*, 4: 262-265.
 - 7- 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.
 - 8- El-Demery M.E. 2011. Evaluation of physico-chemical properties of toast breads fortified with pumpkin (*Cucurbita moschata*) flour. The 6th Arab and 3rd International Annual Scientific Conference. Faculty of Specific Education Mansoura University – Egypt. 2146-2160.
 - 9- Ptitchkina N.M., Novokreschonova L.V., Piskunova G.V. & Morris ER. 1998. Large enhancement in loaf volume and organoleptic acceptability of wheat bread by small additions of pumpkin powder: possible role of acetylated pectin in stabilizing gas-cell structure. *Food Hydrocolloids*, 12: 333–7.
 - 10- Pongjanta, J., Naulbunrang, A., Kawngdang, S., Manon, T. and Thepjaikat, T. 2006. Utilization of pumpkin powder in bakery products. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 28: 71-79.
 - 11- Pongjanta, J., Phomphang, U., Manon, T., Isarangporn, R. and Thaiou, T. 2004. The utilization of pumpkin powder in Thai Sweetmeal. *Food Journal*, 34: 80-89.
 - 12- Doymaz I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79: 243–248.
 - 13- Strumillo, C. & Kudra. T. 1987. *Drying, Principles, Applications and Design*. Gordon and Breach Science Publisher, USA.
 - 14- 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.
 - 15- 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.
 - 16- Sharma, G. P., Verma, R. C. & Pathare, P. B. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin