

بررسی خصوصیات کیوی خشک شده با سامانه مادون قرمز و مدل سازی فرآیند

عماد آیدانی^a، محمدحسین حداد خداپرست^{b*}، مهدی کاشانی نژاد^c

^a دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

^b استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

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

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۸/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۵/۲

۵۲

چکیده

مقدمه: مدل سازی روابط متغیرهای فرآیند خشک کردن محصولات غذایی و بررسی سینتیک انتقال جرم و ضرایب نفوذ رطوبت می تواند به عنوان یک ابزار سودمند برای کنترل بهینه فرآیند و بهبود کیفیت محصول خشک شده نهایی باشد. میوه کیوی دارای طعم و آرومای مطلوب بوده و دارای ارزش تغذیه ای بالایی می باشد.

مواد و روش ها: در این پژوهش تأثیر توان لامپ پرتوهی در سه سطح ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات در فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی متری از سطح محصول بر سینتیک انتقال جرم، ضریب نفوذ رطوبت، دانسیته، تغییر رنگ، بافت و آگیری مجدد میوه کیوی بررسی گردید.

یافته ها: نتایج نشان داد تغییر توان لامپ و فاصله از سطح محصول تأثیر معنی داری بر سینتیک افت رطوبت و زمان خشک کردن دارند. افزایش توان لامپ مادون قرمز باعث افزایش ۶۱/۰۱ درصدی در افت وزن نمونه ها شد. با افزایش توان لامپ از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از $6/25 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $13/8 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش می یابد. رنگ نمونه ها با تکنیک پردازش تصویر آنالیز و میانگین تغییرات رنگ (ΔE) محاسبه شده برای توان های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب برابر با ۱۴/۰۲، ۱۹/۰۹ و ۲۱/۶۶ بدست آمد. متوسط چگالی و آگیری مجدد نمونه های خشک به ترتیب برابر 743 kg/m^3 و $229/18$ درصد بدست آمد.

نتیجه گیری: اثر توان مادون قرمز بر ضریب نفوذ مؤثر کیوی بررسی و مشخص شد که مقدار ضریب نفوذ مؤثر با افزایش توان منبع حرارتی افزایش یافت. مقدار سفتی برش های خشک شده کیوی درون خشک کن مادون قرمز در محدوده ۱۱/۰۸-۹/۵۵ نیوتن به دست آمد. در مدل سازی فرآیند خشک کردن کیوی با مادون قرمز، مدل پیچ همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر مدل ها داشت.

واژه های کلیدی: پردازش تصویر، خشک کردن، ضریب نفوذ مؤثر، کیوی، مادون قرمز، مدل پیچ

مقدمه

براساس گزارش سالانه سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) در سال ۲۰۱۳ حدود یک میلیون و ۴۰۰ هزار تن کیوی در جهان تولید می‌شود که ایتالیا با تولید سالانه ۵۰۰ هزار تن اولین تولیدکننده و پس از آن نیوزیلند و شیلی به ترتیب دومین و سومین تولیدکننده این میوه بوده و ایران نیز با تولید سالانه ۲۲۱ هزار تن چهارمین تولیدکننده کیوی در جهان به شمار می‌رود. براساس تحقیقات به عمل آمده در سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد، کیوی (*Actinidia deliciosa*) پس از موز، مرکبات و سیب، چهارمین میوه مورد علاقه مردم دنیا است (Zakipour-Molkabadi et al., 2011).

مصرف کیوی به دلیل میزان بالای ویتامین‌ها بویژه اسید اسکوربیک و مواد معدنی باعث کاهش کلسترول، و کاهش احتمال به بیماری‌های تنفسی و سکنه قلبی می‌شود. هر ۱۰۰ گرم کیوی حاوی حدود ۷۸ گرم آب، ۱۴/۶۶ گرم کربوهیدرات، ۱/۱۴ گرم پروتئین، ۱۰۰ میلی‌گرم اسید آسکوربیک، ۴۰/۳ میلی‌گرم ویتامین K، ۳۱۲ میلی‌گرم پتاسیم، ۳۴ میلی‌گرم فسفر و ۱۷ میلی‌گرم منیزم است (Duttaroy & Jørgensen, 2004) استفاده عمده کیوی در ایران به صورت تازه خوری است در حالیکه امروزه از کیوی در دنیا استفاده‌های صنعتی متعددی به عمل می‌آید که از آن جمله می‌توان به استفاده از آن در تهیه کمپوت، لواشک، نوشیدنی و تهیه کیوی منجمد و یا خشک شده اشاره نمود. علاوه بر آن از کیوی ترکیبات متعددی مانند پروتئاز، موسیلاژ و یا عطری نیز استخراج می‌شود (Allaeddini & Emam-Djomeh, 2005).

علیرغم تولید مازاد بر مصرف این میوه و همچنین داشتن رتبه چهارم در تولید آن در جهان، ایران از نظر حجم صادرات بعد از کشورهای ایتالیا، نیوزیلند، شیلی، بلژیک، یونان، هلند و فرانسه در رده هشتم جهان قرار دارد که علت پایین بودن میزان صادرات کیوی را می‌توان به کمبود صنایع فرآوری و بسته‌بندی مناسب نسبت داد. خشک کردن از معمول‌ترین روش‌های فرآوری جهت افزایش ماندگاری محصولات کشاورزی می‌باشد. با استفاده از روش مناسب جهت کاهش رطوبت محصول، می‌توان خطر آلودگی، هزینه نگهداری و حمل‌ونقل را کاهش داده و مدت نگهداری را طولانی‌تر کرد (Salehi et al., 2014;).

بررسی خصوصیات کیوی خشک شده با سامانه مادون قرمز و مدل‌سازی فرآیند

(Hosseini Ghaboos et al., 2015). تاکنون مطالعات مختلفی در رابطه با خشک کردن کیوی با استفاده از خشک‌کن با جریان هوای داغ (مانند خشک‌کن کابینتی)، خشک‌کن‌های تحت خلأ و مایکروویو صورت گرفته است. در پژوهشی اثر سه روش مختلف خشک کردن، یعنی خشک کردن با هوای داغ، خشک کردن تحت خلأ و خشک کردن انجمادی پس از آبیگری اسمزی بر روی میوه کیوی بررسی شد. نتایج نشان داد که سرعت خشک کردن با روش انجمادی کمتر از روش‌های دیگر می‌باشد. در صورتی که ارزیابی حسی، بهتر بودن روش خشک کردن انجمادی پس از آبیگری اسمزی را نشان داد. در خشک کردن انجمادی و تحت خلأ نسبت به روش هوای داغ، ویتامین C بیشتر حفظ شده و نیز تغییر رنگ، میزان قند آزاد و اسیدهای آلی کمتر می‌باشد (Youn & Choi, 1998).

در تحقیقی آبیگری اسمزی به عنوان یک پیش فرایند برای تولید برگه های کیوی (ارقام هایوارد و ابوت) بکار گرفته شد. بدین منظور، اثرات عوامل موثر بر فرایند مانند غلظت محلول اسمزی (ساکارز ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد)، حضور ماده بافری و دما (۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) مورد مطالعه قرار گرفت. سپس آزمایش‌های کمی و کیفی بر روی برگه‌های تولید شده انجام شد. نتایج نشان دادند که بکارگیری پیش فرایند اسمزی می‌تواند ویژگی‌های ظاهری و ارگانولپتیکی محصول را بهبود بخشد. بهترین نتایج با بکارگیری محلول اسمزی حاوی ۴۰٪ ساکارز و ۶٪ محلول بافری به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به دست آمد (Allaeddini & Emam-Djomeh, 2005).

خشک کردن به‌وسیله اشعه مادون قرمز به‌ویژه 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، نسبت به سایر روش‌های خشک کردن افزایش و هزینه‌های فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد (Strumillo & Kudra, 1987). در خصوص مزایای کاربرد صنعتی این روش برای خشک کردن محصولات کشاورزی می‌توان به راندمان بالا، ایجاد گرمای یکنواخت در نمونه، سهولت کنترل فرایند، هزینه تعمیر و نگهداری پایین، صرفه‌جویی

در فضا اشاره نمود (Jun et al., 2011).

پرتو مادون قرمز را می توان به صورت ترکیبی با سایر روش های خشک کردن استفاده نمود که باعث افزایش راندمان خشک کردن و کاهش فضای مورد نیاز می گردد (Ratti & Mujumdar, 1995). Sharma و همکاران (۲۰۰۵) بیان نمودند در خشک کردن لایه نازک قطعات پیاز با استفاده از خشک کن مادون قرمز و هوای داغ، با تغییر توان مادون قرمز 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.

Das و همکاران (۲۰۰۴) یک خشک کن مادون قرمز مجهز به سیستم لرزشی را طراحی نمودند و با استفاده از آن خشک شدن دانه برنج قهوه ای را در شدت تشعشع ۴۲۹۰-۳۱۰۰ وات بر مترمربع و عمق بستر ۱۶-۱۲ میلی متر آزمایش نمودند و دریافته اند که در شرایط یادشده، عمق بستر دانه اثر معنی داری بر سرعت خشک کردن هر سه رقم مورد استفاده در این مطالعه ندارد.

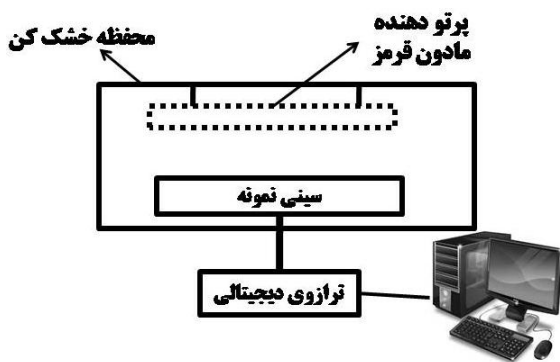
Salehi و همکاران (2015) در پژوهشی از خشک کن مادون قرمز جهت خشک کردن قارچ دکمه ای استفاده نمودند. در این تحقیق اثر توان لامپ مادون قرمز (۱۵۰، ۲۵۰، ۳۷۵ وات)، فاصله نمونه از لامپ (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ سانتی متر)، ضخامت نمونه ها (۰/۵ و ۱ سانتی متر)، در مدت زمان زمان ۱۲۰ دقیقه بر سرعت خشک کردن قارچ دکمه ای بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش توان از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات، سرعت خشک شدن ۱۰۴/۹ درصد افزایش می یابد. همچنین با کاهش ضخامت نمونه از ۱ به ۰/۵ سانتی متر، سرعت خشک شدن، ۱۵/۸ درصد افزایش یافت.

تاکنون مطالعه جامعی در خصوص اثر خشک کردن با مادون قرمز بر سینتیک انتقال جرم، ضریب نفوذ رطوبت، دانسیته، آبیگری مجدد، رنگ و بافت کیوی صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر تغییر توان لامپ پرتو دهی مادون قرمز و فاصله آن از سطح نمونه بر خصوصیات کیوی خشک شده به روش مادون قرمز و مدل سازی سینتیک انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آن می باشد.

مواد و روش ها

- خشک کردن

در این پژوهش کیوی رقم هایوارد با میانگین قطر ۳/۵ سانتی متر و ارتفاع ۵ سانتی متر، و سفتی ۶/۵ نیوتن، به صورت یکنواخت و با درجه رسیدگی یکسان از شهرستان گرگان تهیه شد. با یک کاتر تیز، کیوی ها به طور عمودی به ورقه های در ضخامت ۵ میلی متر برش خوردند (شکل ۱). در ابتدای آزمایش برای تعیین رطوبت اولیه محصول از آن با دمای ۱۰۴ درجه سلسیوس و به مدت ۴ ساعت استفاده گردید که میانگین رطوبت اولیه کیوی ۵۲۵ درصد بر پایه خشک به دست آمد (Youn and Choi, 1998). برش های کیوی بلافاصله پس از برش دهی جهت پرتو دهی و خشک کردن توسط سامانه مادون قرمز (شکل ۱)، مورد استفاده قرار گرفتند. جهت خشک کردن نمونه های برش خورده با سامانه مادون قرمز، از یک اتاقک مادون قرمز به ابعاد ۴۰×۴۰×۱۰ از توان های متفاوت لامپ مادون قرمز^۱ (۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات) و در فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی متری از سطح نمونه استفاده شد. تغییرات وزن نمونه ها در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی^۲ با قابلیت اتصال به کامپیوتر و دقت ۰/۰۱± گرم ثبت گردید. نمونه ها تا رطوبت ۱۰ درصد بر پایه مرطوب خشک شدند. طرح آماری کاملاً تصادفی در قالب آزمایشات فاکتوریل با استفاده از نرم افزار Minitab 16 انجام شد.



شکل ۱- شماتیک خشک کن مادون قرمز

- مدل سازی فرآیند

جهت مدل سازی فرآیند خشک شدن، ابتدا پارامتر

¹ Infrared Heat Lamp (NIR), Philips, Germany

² Digital Balance, LutronGM-300p (Taiwan)

K_0 شیب خط می باشد (Salehi et al., 2014).

نسبت رطوبت^۱ در طی خشک شدن کیوی با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید (Doymaz, 2007):

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

- مدل سازی سینتیک انتقال جرم
به منظور بررسی سینتیک و پیش بینی روند خشک شدن

کیوی، از مدل ها و معادله های مختلف خشک کردن استفاده گردید. معادله های مورد استفاده برای مدل سازی فرآیند خشک کردن کیوی در جدول ۱ به نمایش درآمده است (Wong, 2001; Salehi et al., 2014). جهت مدل کردن داده های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت های مدل ها، از نرم افزار Curve Expert ویرایش ۱/۳۴ استفاده شد. ضریب تبیین و خطای استاندارد به عنوان پارامترهای آماری جهت مقایسه مدل ها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند.

MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t : رطوبت نمونه ها در هر لحظه بر پایه خشک (d.b)، M_e : رطوبت تعادلی^۲ نمونه ها (d.b) و M_0 : رطوبت اولیه نمونه ها (d.b) می باشند. با توجه به رابطه ۱، نسبت رطوبت به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه ها در هر لحظه در طی فرآیند خشک شدن وابسته است. برای زمان های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_0 و M_t بسیار کوچک می باشد. بنابراین می توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۲ ساده نمود (Doymaz, 2007).

- اندازه گیری دانسیته (چگالی)

دانسیته نمونه ها با استفاده از روش حجمی جابه جایی دانه های کلزا اندازه گیری شد (Sahin & Sumnu, 2006).

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

- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت^۳

ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده های تجربی خشک کردن برحسب $LnMR$ نسبت به زمان تعیین می گردد. زمانی نمودار مقدار $LnMR$ نسبت به زمان رسم گردد، شیب خط به دست آمده را در معادله ۳ قرار داده تا ضریب نفوذ مؤثر به دست آید:

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (3)$$

- پردازش تصویر^{۱۱}

جهت بررسی رنگ کیوی خشک شده از روش پردازش تصویر استفاده شد. در این روش از یک اسکنر اچ پی (Hp Scanjet G3110, China) (شکل ۲) استفاده شد. هر بار ۵ نمونه خشک شده از هر تیمار، اسکن شده و تصاویر به دست آمده آنالیز و میانگین نتایج گزارش گردید. ابتدا

جدول ۱- مدل های سینتیکی مورد استفاده جهت مدل سازی خشک شدن کیوی.

منبع	مدل	معادله
Henderson, 1974	تقریب انتشار ^۴	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
Kumar et al., 2006; Doymaz, 2007	پیچ ^۵	$MR = \exp(-kt^n)$
Jittanit, 2007; Doymaz, 2007	پیچ اصلاح شده ^۶	$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$
Yaldiz and Ertekin 2001; Azoubel et al., 2004	انتشار فیک ^۷	$MR = a \exp(-c(t/t^2))$
Ayensu, 1997	نیوتن ^۸	$MR = \exp(-kt)$
Midilli et al., 2002	میدیلی ^۹	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Dandamrongrak et al., 2002; Doymaz, 2007	لگاریتمی ^{۱۰}	$MR = a \exp(-kt) + c$

MR: نسبت رطوبت، t زمان (min) و a, b, k, n و c ثابت های مدل ها می باشند.

¹ Moisture Ratio ² The Equilibrium Moisture Content ³ Effective Moisture Diffusion Coefficient
⁴ Approximation of Diffusion ⁵ Page ⁶ Modified Page -II ⁷ Fick's Diffusion ⁸ Newton
⁹ Midilli ¹⁰ Logarithmic ¹¹ Image Processing



شکل ۳- دستگاه بافت سنج

- آبیگری مجدد^۳

جهت بررسی مقدار آبیگری مجدد توسط کیوی‌های خشک‌شده، ابتدا، نمونه کیوی خشک توزین و درون آب با دمای ۵۰ درجه سلسیوس غوطه‌ور شدند. نسبت وزنی کیوی به آب برابر ۱ به ۲۵ در نظر گرفته شد. سپس، بعد از گذشت زمان ۳۰ دقیقه از آب خارج‌شده و وزن کشتی با استفاده از ترازوی سارتوریس با دقت یک هزارم گرم^۴ (± 0.001) ساخت سوئیس (مدل TE313s) انجام شد. تمام تیمارها در سه تکرار انجام و میانگین آن‌ها گزارش شد. نسبت آبیگری مجدد توسط معادله ۵ محاسبه شد (Reis et al., 2012).

$$RR = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (5)$$

در این معادله M وزن نمونه بعد از آبیگری مجدد و M_0 وزن نمونه خشک می‌باشد.

- تجزیه و تحلیل آماری

تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته با استفاده از طرح کاملاً تصادفی و آزمایش فاکتوریل و تجزیه واریانس توسط نرم‌افزارهای آماری Minitab 16 و ۹/۱ SAS انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد صورت گرفت.

یافته‌ها

- خشک‌کردن کیوی با سامانه مادون قرمز

تصاویر با فرمت jpg و در فضای رنگی RGB ذخیره شدند. سپس تصاویر گرفته‌شده توسط نرم‌افزار Image J برنامه آن (Color-Space-Converter) از فضای رنگی RGB به $L^* a^* b^*$ تبدیل گردیدند (Salehi & Kashaninejad, 2014).

مقادیر تغییر رنگ (ΔE) در مقایسه با نمونه تازه، با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد (Salehi & Kashaninejad, 2014).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (4)$$



شکل ۲- دستگاه اسکنر مورد استفاده در این پژوهش

- بافت سنجی

بافت مواد غذایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خصوصیات کیفی محصول، نقش مهمی در پذیرش کلی مصرف‌کنندگان دارد. برای اندازه‌گیری سفتی^۱ بافت کیوی خشک شده از دستگاه بافت سنج^۲ (TA-XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., Surrey, UK) و نرم‌افزار مربوطه (Texture Expert 1.05) استفاده شد (شکل ۳). پروب استوانه‌ای با قطر ۲ میلی‌متر، با سرعت ۱/۰ میلی‌متر بر ثانیه جهت انجام آزمون نفوذ و به دست آوردن خصوصیات بافتی استفاده گردید. سرعت پروب قبل و بعد از آزمون ۲/۰ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. نمونه‌های خشک شده در زیر دستگاه قرار گرفته و پروب با شرایط مشخص شده به درون آنها نفوذ می‌نمود.

¹ Hardness

² Texture Analyzer

³ Rehydration

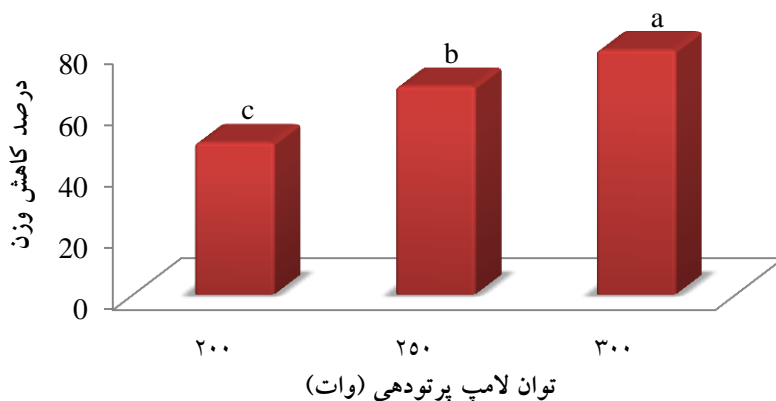
⁴ Sartorius TE313S.

در نمودار ۳ اثر مدت زمان خشک کردن ورقه‌های کیوی توسط سامانه مادون قرمز بر درصد کاهش وزن نمونه‌ها به نمایش در آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش توان پرتودهی، شیب نمودارها افزایش یافته که حاکی از کاهش زمان خشک شدن می‌باشد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر توان لامپ و فاصله بر زمان خشک شدن کیوی آنالیز و در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

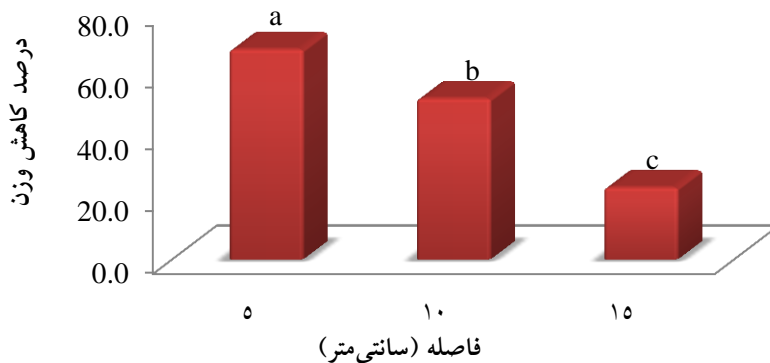
اثر توان پرتودهی و فاصله بر تغییرات مقدار رطوبت در طی زمان خشک کردن در نمودارهای ۴ و ۵ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ مادون قرمز، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت نمونه‌های کیوی افزایش می‌یابد (نمودار ۴). با کاهش فاصله لامپ از نمونه از ۱۵ به ۵ سانتی‌متر، باعث کاهش ۶۳/۰۴٪ زمان خشک شدن ورقه‌های کیوی گردید و آهنگ خشک شدن افزایش می‌یابد.

در طی خشک کردن کیوی، مدت زمان رسیدن وزن نمونه‌ها به محدوده رطوبت ۱۰ درصد (بر پایه مرطوب) یادداشت و به‌عنوان زمان خشک شدن استفاده گردید. نتایج نشان داد که تغییر توان لامپ اثر معنی‌داری ($P < 0.05$) بر خروج آب از برش‌های کیوی دارد و با افزایش توان لامپ، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار ۱ ملاحظه می‌شود، در یک فاصله ثابت از نمونه‌ها و در مدت زمان ۸۸ دقیقه، با افزایش توان لامپ از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات، مقدار کاهش وزن از ۴۹/۴ درصد به ۷۹/۵ درصد افزایش یافت.

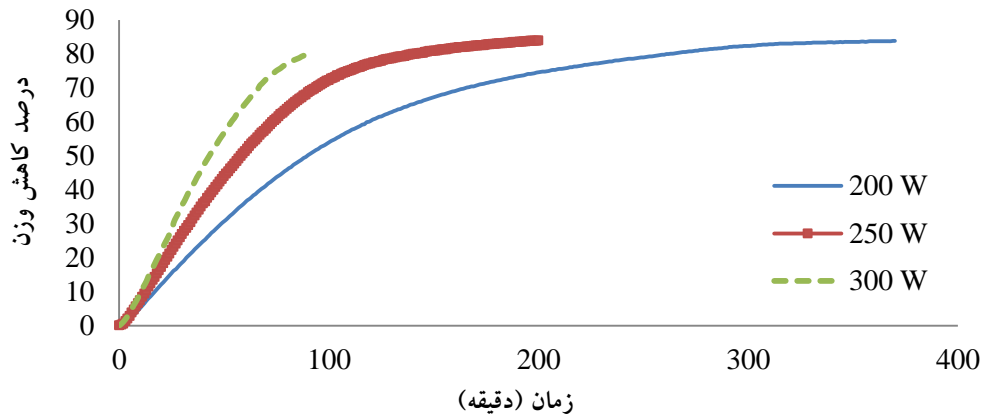
در نمودار ۲ اثر فاصله لامپ مادون قرمز از ورقه‌های کیوی بر درصد کاهش وزن نمونه‌ها به نمایش در آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله نمونه‌ها از منبع مادون قرمز، درصد کاهش رطوبت نمونه‌های کیوی کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله لامپ ۲۵۰ وات از ۵ به ۱۵ سانتی‌متر، درصد کاهش وزن از ۶۷/۷۴ به ۲۳/۱۸ درصد برای نمونه کیوی کاهش یافت.



نمودار ۱- اثر توان لامپ مادون قرمز بر درصد کاهش وزن کیوی (۸۸ دقیقه اعمال اشعه و ۵ سانتی‌متر فاصله)



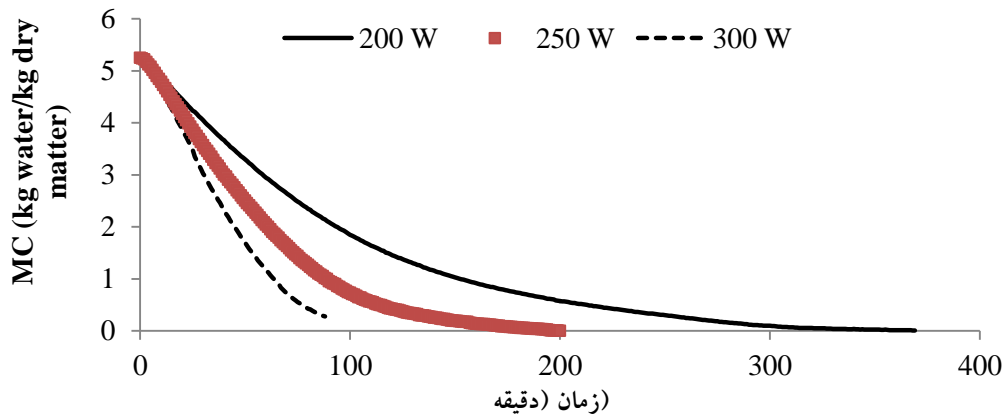
نمودار ۲- اثر فاصله لامپ مادون قرمز از ورقه‌های کیوی بر درصد کاهش وزن (۸۸ دقیقه اعمال اشعه و ۲۵۰ وات)



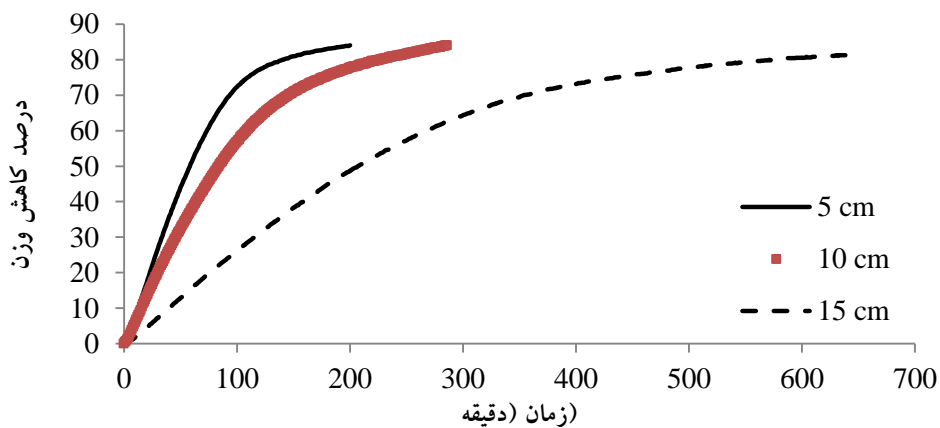
نمودار ۳- اثر مدت زمان خشک کردن ورقه‌های کیوی توسط سامانه مادون قرمز بر درصد کاهش وزن (۵ سانتی‌متر فاصله)

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس متغیرها برای پارامتر زمان خشک شدن

P	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات
۰/۰۰۰	۳۸۵۱۱	۷۷۰۲۲	۲	توان
۰/۰۰۰	۸۱۰۷۷	۱۶۲۱۵۵	۲	فاصله
۰/۰۷۴	۳۲۴۴	۱۲۹۷۵	۴	توان × فاصله
	۱۰۵۱	۹۴۶۰	۹	خطا
		۲۶۱۶۱۱	۱۷	کل



نمودار ۴- تغییرات مقدار رطوبت با زمان و توان لامپ در فاصله ۵ سانتی‌متر



نمودار ۵- تغییرات مقدار رطوبت با زمان و فاصله لامپ پرتودهی از نمونه (۲۵۰ وات)

- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

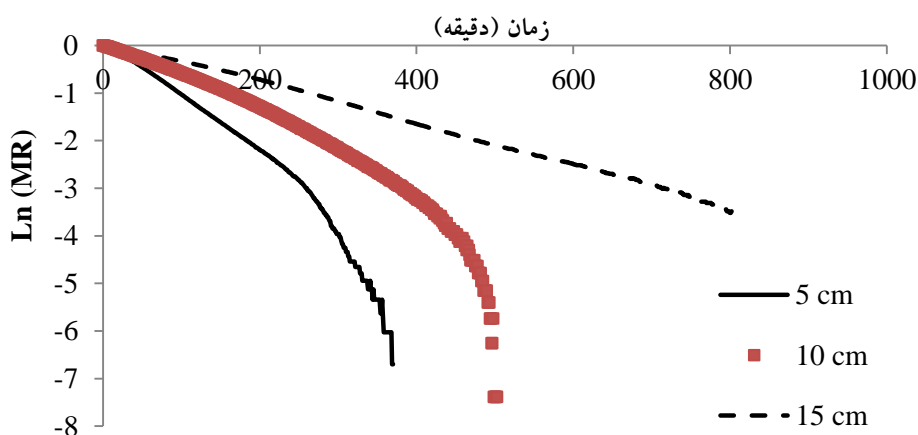
نمودار ۶ روند تغییرات $\ln(MR)$ را نسبت به زمان در فواصل مختلف نمونه از منبع پرتودهی را نشان می‌دهد. شیب این خطوط جهت محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده گردید. مقادیر مختلف میزان ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول ۳ گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ و کاهش فاصله لامپ پرتودهی در فرآیند خشک شدن کیوی، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یک‌روند افزایشی دارد. با افزایش فاصله نمونه از لامپ ۲۵۰ وات از ۵ به ۱۵ سانتی‌متر، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای کیوی از m^2s^{-1} به $1/13 \times 10^{-9}$ m^2s^{-1} کاهش یافت.

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 پیچ در طی بررسی سینتیک خشک شدن کیوی، نتایج این مدل در جدول ۴ گزارش شده است. در این جدول ضریب تبیین، خطای استاندارد و ضرایب این مدل ارائه شده است.

- چگالی

در نمودار ۷ نتایج مربوط به چگالی برش‌های خشک‌شده کیوی درون خشک‌کن مادون قرمز به نمایش درآمده است. مقدار چگالی کیوی خشک‌شده درون خشک‌کن مادون قرمز در محدوده kg/m^3 -۸۲۹ -۶۸۸ به دست آمد.

- مدل سازی سینتیک خشک شدن



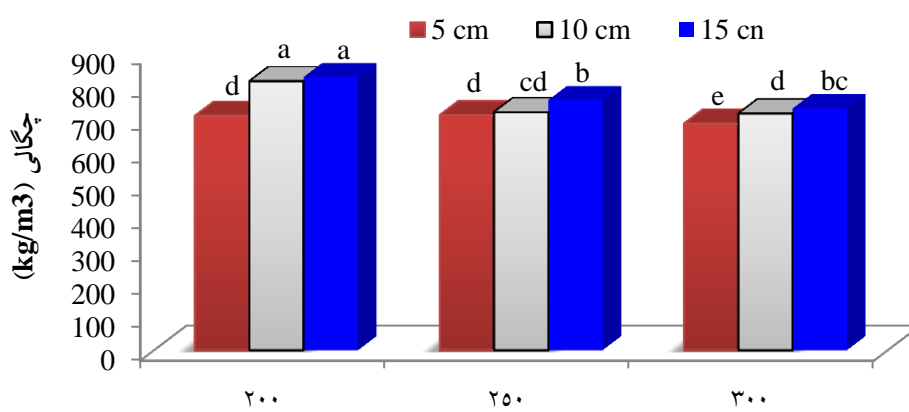
نمودار ۶- مقادیر لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان برای لامپ پرتودهی مادون قرمز ۲۰۰ وات

جدول ۳- مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک کردن کیوی با مادون قرمز

R^2	ضریب نفوذ (m^2s^{-1})	فاصله (cm)	توان (W)
۰/۹۷۶	$6/25 \times 10^{-10}$	۵	۲۰۰
۰/۹۵۸	$3/75 \times 10^{-10}$	۱۰	
۰/۹۹۹	$1/67 \times 10^{-10}$	۱۵	
۰/۹۶۹	$11/3 \times 10^{-10}$	۵	۲۵۰
۰/۹۶۱	$6/67 \times 10^{-10}$	۱۰	
۰/۹۹۸	$2/08 \times 10^{-10}$	۱۵	
۰/۹۸۲	$13/8 \times 10^{-10}$	۵	۳۰۰
۰/۹۵۹	$6/25 \times 10^{-10}$	۱۰	
۰/۹۸۷	$5/0 \times 10^{-10}$	۱۵	

جدول ۴- ضریب تبیین (R^2)، خطای استاندارد (SE) و ضرایب مدل پیچ (k,n)

SE	R^2	k	n	فاصله (cm)	توان (W)
۰/۰۰۶	۰/۹۹۹	۰/۰۰۴۹	۱/۱۵۴	۵	
۰/۰۱۰	۰/۹۹۹	۰/۰۰۲۴	۱/۱۸۴	۱۰	۲۰۰
۰/۰۰۷	۰/۹۹۸	۰/۰۰۳۲	۱/۲۸۵	۱۵	
۰/۰۰۴	۰/۹۹۹	۰/۰۰۳۸	۱/۳۵۲	۵	
۰/۰۰۵	۰/۹۹۹	۰/۰۰۴۲	۱/۲۱۰	۱۰	۲۵۰
۰/۰۰۴	۰/۹۹۹	۰/۰۰۱۴	۱/۲۱۲	۱۵	
۰/۰۰۹	۰/۹۹۹	۰/۰۰۳۴	۱/۴۸۸	۵	
۰/۰۰۵	۰/۹۹۹	۰/۰۰۷۰	۱/۱۱۳	۱۰	۳۰۰
۰/۰۰۶	۰/۹۹۹	۰/۰۰۲۷	۱/۲۰۶	۱۵	



توان لامپ پرتو دهی (وات)

نمودار ۷- مقایسه چگالی ورقه‌های کیوی خشک‌شده با مادون قرمز

- سفتی بافت

در نمودار ۸ نتایج مربوط به آنالیز بافت برش‌های خشک‌شده کیوی درون خشک‌کن مادون قرمز به نمایش درآمده است. مقدار سفتی برش‌های خشک‌شده کیوی درون خشک‌کن مادون قرمز در محدوده ۹/۵۵-۱۱/۰۸ نیوتن به دست آمد.

- آبیگری مجدد

در نمودار ۹ نتایج مربوط به آبیگری مجدد برش‌های خشک‌شده کیوی درون خشک‌کن مادون قرمز به نمایش درآمده است. مقدار آبیگری برش‌های خشک‌شده کیوی درون خشک‌کن مادون قرمز در محدوده ۲۰۴/۸۶-۲۵۴/۹۷ درصد به دست آمد.

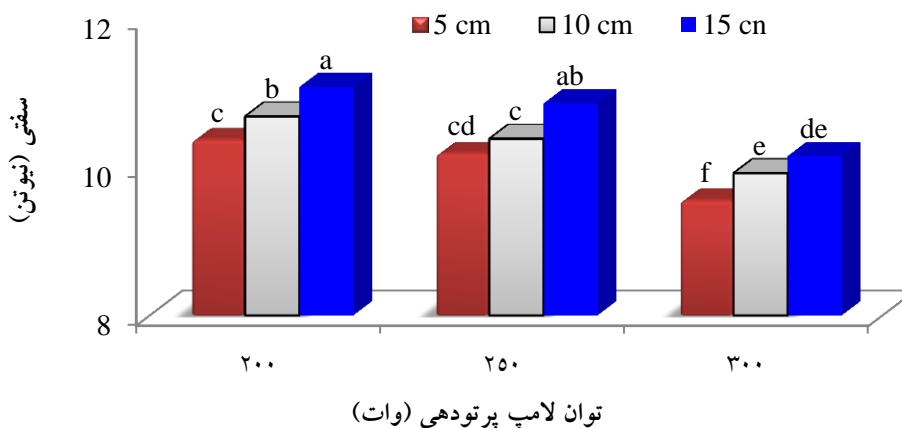
- تغییر رنگ

مدل رنگی Lab مرکب از جزء 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 (Salehi & Kashaninejad, 2014). در جدول ۵ خصوصیات رنگی مربوط به نمونه‌های خشک‌شده در خشک‌کن مادون قرمز گزارش شده است. با افزایش توان پرتو دهی مادون قرمز از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات، نمونه‌ها تیره‌تر شده و شاخص L^* کاهش یافته است. همچنین تغییرات رنگ نمونه‌ها (ΔE) با افزایش توان از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات افزایش یافت.

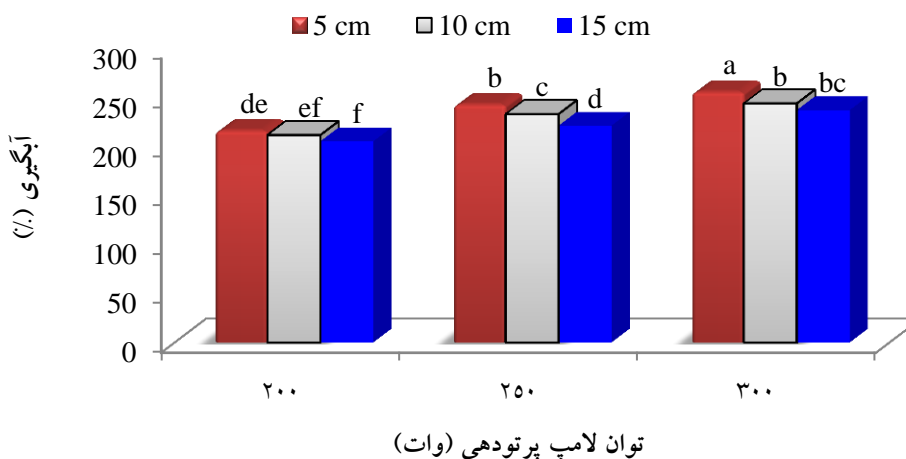
بررسی خصوصیات کیوی خشک شده با سامانه مادون قرمز و مدل سازی فرآیند

جدول ۵- بررسی تغییرات رنگ ورقه‌های کیوی در خشک کن مادون قرمز

ΔE	L*	b*	a*	فاصله (cm)	توان (W)
۱۵/۵۰ ^e	۴۳/۲۷±۹/۳۶	۲۹/۴۰±۱۴/۲۶	۲/۳۳±۳/۳۸	۵	
۱۴/۲۷ ^e	۴۵/۹۹±۹/۲۸	۳۵/۸۵±۱۲/۸۴	۲/۴۷±۴/۱۴	۱۰	۲۰۰
۱۲/۲۷ ^f	۴۷/۶۷±۸/۹۴	۳۴/۶۹±۱۳/۸۱	۱/۱۰±۴/۰۲	۱۵	
۲۰/۲۴ ^b	۳۹/۶۶±۶/۶۳	۳۲/۷۳±۱۳/۹۸	۶/۱۷±۵/۳۸	۵	
۱۹/۱۷ ^c	۴۱/۴۷±۶/۴۳	۳۰/۰۵±۱۲/۵۷	۵/۷۶±۴/۳۲	۱۰	۲۵۰
۱۷/۸۶ ^d	۴۱/۶۶±۸/۱۹	۳۱/۹۳±۱۳/۳۳	۴/۵۸±۵/۱۵	۱۵	
۲۴/۵۶ ^a	۳۴/۷۸±۴/۸۶	۲۸/۴۵±۱۱/۶۸	۷/۲۶±۴/۶۹	۵	
۲۰/۹۶ ^b	۳۹/۰۳±۵/۳۰	۳۱/۵۵±۱۴/۰۲	۶/۵۵±۶/۴۴	۱۰	۳۰۰
۱۹/۴۶ ^{bc}	۳۹/۵۶±۴/۵۹	۳۳/۵۲±۱۴/۲۱	۵/۱۵±۶/۲۰	۱۵	



نمودار ۸- مقایسه سفتی ورقه‌های کیوی خشک شده با مادون قرمز



نمودار ۹- مقایسه درصد آبرگیری مجدد کیوی خشک شده درون خشک کن مادون قرمز

2002). نتایج حاکی از معنی دار بودن ($P < 0.05$) اثر

تغییر فاصله لامپ از نمونه‌ها، بر مقدار کاهش وزن برش‌های کیوی دارد و با کاهش فاصله لامپ، زمان خشک

بحث

راندمان خشک کردن با مادون قرمز با افزایش فاصله منبع از محصول کاهش پیدا می‌کند (Mongpraneet et

شدن کاهش می‌یابد.

Mongpraneet و همکاران (۲۰۰۲) از خشک‌کن مادون‌قرمز دور تحت خلأ جهت خشک کردن پیاز استفاده کردند. شدت پرتودهی در دامنه ۲/۴-۰/۱ وات بر سانتی‌متر مربع به کار گرفته شد که با تنظیم توان ورودی منبع مادون‌قرمز دور در دامنه ۴۰ تا ۱۰۰ وات به دست آمد. فشار مطلق اتاقک در طول آزمایش ۲/۵ کیلوپاسکال تنظیم شد. نتایج آزمایش نشان داد که سرعت کاهش رطوبت نمونه با افزایش توان ورودی به منبع مادون‌قرمز دور کاهش پیدا کرد. انتظار می‌رود با توان ورودی بالاتر شدت پرتودهی بالاتری به دست آید. راندمان با افزایش فاصله منبع از محصول کاهش پیدا نمود و فاصله ۱۰ سانتی‌متری میان حرارت‌دهنده و ماده آزمایشی بالاترین راندمان را دارا بود.

با افزایش ضخامت ماده غذایی، انتقال امواج مایون قرمز کاهش یافته و قابلیت جذب امواج افزایش می‌یابد. لذا محصولات با ضخامت پایین جهت خشک کردن با پرتو مادون‌قرمز توصیه شده است (Hebbar et al., 2004). همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود اثر فاکتورهای توان و فاصله بر زمان خشک شدن معنی‌دار بوده درحالی‌که اثر متقابل توان × فاصله معنی‌دار نشده است. افزایش توان لامپ باعث افزایش دمای خشک‌کن می‌گردد که از یک طرف باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول می‌شود. مقایسه زمان خشک شدن ورقه‌های کیوی نشان داد که در اثر افزایش توان لامپ مادون‌قرمز از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات زمان خشک شدن از ۱۹۵ دقیقه به ۷۱ دقیقه کاهش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش توان لامپ باعث گرم شدن سریع‌تر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود؛ لذا باعث کاهش زمان خشک کردن می‌گردد (Doymaz & Pala, 2003).

محمدی کریمیان (۱۳۹۳) تاثیر سامانه مادون قرمز تحت خلأ بر فرآیند خشک شدن و کیفیت خمیر خرمای مضافتی را بررسی نمود. نتایج نشان داد که دما، میزان خلأ و ضخامت خمیر تاثیر معنی‌دار بر سینتیک خشک کردن و کیفیت خمیرخما دارند.

بیشترین زمان خشک شدن مربوط به توان ۲۰۰ وات و فاصله ۱۵ سانتی‌متری لامپ بود که برای انجام فرآیند در این تیمار ۴۶۲ دقیقه زمان صرف شد. همچنین کمترین زمان خشک شدن مربوط به توان ۳۰۰ وات و فاصله ۵

سانتی‌متری لامپ است که مدت‌زمان ثبت‌شده برای این تیمار ۷۱ دقیقه بود.

با افزایش توان لامپ از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $6/25 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش می‌یابد (در فاصله ۵ سانتی‌متری از لامپ). Amiri Chayjan و همکاران (2014) از یک خشک‌کن مادون‌قرمز با توان‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ وات جهت خشک کردن پسته استفاده کردند. نتایج حاکی از افزایش نفوذپذیری رطوبت با افزایش توان مادون‌قرمز می‌باشد. همچنین توان مادون‌قرمز اثر معنی‌داری بر زمان خشک شدن پسته دارد و با افزایش توان، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد.

تأثیر توان پرتودهی مادون قرمز و دمای هوای داغ بر فرآیند خشک شدن کدوخلوایی بررسی شده است (Hosseini Ghaboos et al., 2015). افزایش توان لامپ 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 دادند. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت کدوخلوایی بین $9/2 \times 10^{-10}$ تا $3/3 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه گزارش شده است.

نتایج حاصل از برآزش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های جدول ۱ نشان داد که مدل پیچ مناسب بوده و ضریب تبیین (R^2) بالا و خطای استاندارد (SE) پایینی را در هنگام برآزش کردن داده‌های تجربی از خود نشان داد. لذا استفاده مدل پیچ برای بررسی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از سامانه مادون‌قرمز توصیه می‌شود.

Yaghoobi و همکاران (۲۰۱۲) سینتیک افت رطوبت و مدل‌سازی ریاضی خشک کردن سیب‌زمینی در یک خشک‌کن هوای داغ را با استفاده از ارزیابی رگرسیون بررسی کردند. آزمایش‌ها در دو دمای ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس انجام گردید. سه مدل ریاضی سینتیکی نیوتنی، پیچ و هندرسون بر داده‌های تجربی برآزش داده شدند. نتایج نشان داد که مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها، مراحل خشک شدن برش سیب‌زمینی را بهتر ارزیابی می‌کند. Ceylan و همکاران (۲۰۰۷) نیز با استفاده از مدل‌های نیوتن، پیچ، هندرسون و پابسن، لگاریتمی، وانگ و سینگ، و مدل اصلاح‌شده پیچ سینتیک خشک کردن کیوی،

آواکادو و موز را طی خشک کردن توسط جریان هوای داغ بررسی نمودند و گزارش کردند که بهترین مدل برای پیشگویی سینتیک خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از هوای داغ، مدل پیچ می باشد.

با کاهش توان لامپ مادون قرمز و افزایش فاصله نمونه ها از لامپ، به دلیل افزایش زمان خشک کردن و کاهش تخلخل نمونه ها، چگالی نمونه ها افزایش یافته است. مقدار چگالی مشاهده شده برای کیوی های خشک شده در توان های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب برابر 713 kg/m^3 ، 731 kg/m^3 و 785 kg/m^3 ، مقدار چگالی مشاهده شده برای قارچ های خشک شده در توان های ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات به ترتیب برابر 702 kg/m^3 ، 636 kg/m^3 و 615 kg/m^3 گزارش شده است (صالحی، ۱۳۹۴).

روشن ترین نمونه مربوط به توان ۲۰۰ وات و فاصله ۱۵ سانتی متری بود و توان های ۲۵۰ و ۳۰۰ وات در رده های بعدی قرار دارند. با کاهش فاصله ورقه های کیوی از منبع پرتو دهی نیز تیرگی نمونه های خشک شده افزایش یافته و نمونه های خشک شده در فاصله ۵ سانتی متری بیشترین تغییرات رنگی را داشته و تیره تر بودند. میانگین تغییرات رنگ (ΔE) محاسبه شده برای توان های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب برابر با ۱۴/۰۲، ۱۹/۰۹ و ۲۱/۶۶ بدست آمد. Hebbar و همکاران (۲۰۰۴) گزارش نمودند که با خشک کردن سیب زمینی و هویج توسط مادون قرمز - هوای داغ شاخص های رنگی در آن بهبود یافت. Afzal و همکاران (۱۹۹۹)، گزارش نمودند که در شدت های بالای حرارت دهی (افزایش توان پرتو دهی)، مقدار تغییر رنگ سطحی افزایش می یابد. در این پژوهش نیز مشاهده گردید که با افزایش توان پرتو دهی، نمونه ها تیره تر می شوند.

توان لامپ پرتو دهی و ضخامت برش های کدو حلوايي بر تغییرات بتاکاروتن، رنگ و بافت در طی خشک کردن به روش مادون قرمز بررسی شده است. رنگ نمونه ها با تکنیک پردازش تصویر آنالیز و میانگین شاخص های تصویر شامل L^* ، a^* و b^* به ترتیب برابر $69/54$ ، $14/64$ و $64/56$ و مقدار سفتی ورقه های خشک شده نیز در محدوده $7/48-11/53$ نیوتن گزارش شده است. افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۲۰۴ به ۲۷۲ وات زمان خشک شدن کدو حلوايي را $38/16$ درصد کاهش و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت کدو حلوايي بین $0/42 \times 10^{-9}$ تا $1/47 \times 10^{-9}$ مترمربع

بر ثانیه گزارش شده است (Hosseini Ghaboos *et al.*, 2016).

با کاهش توان لامپ مادون قرمز و افزایش فاصله نمونه ها از لامپ، به دلیل افزایش زمان خشک کردن و کاهش تخلخل نمونه ها، نمونه ها سفت تر شده است. مقدار سفتی بافت مشاهده شده برای کیوی های خشک شده در توان های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب برابر $10/71$ ، $9/47$ و $9/87$ نیوتن بدست آمد.

مقدار سفتی برش های خشک شده قارچ دکمه ای درون خشک کن مادون قرمز در محدوده $12/08-8/55$ نیوتن گزارش شده است. همان طور که ملاحظه می شود، مقدار سفتی بافت مشاهده شده برای قارچ های خشک شده در توان های ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات به نیز ترتیب برابر $10/97$ ، $9/73$ و $9/22$ نیوتن گزارش شده است (صالحی، ۱۳۹۴).

با افزایش توان لامپ مادون قرمز و کاهش فاصله نمونه ها از لامپ، به دلیل کاهش زمان خشک کردن و افزایش تخلخل نمونه ها، آبگیری نمونه ها افزایش یافته است. مقدار آبگیری مجدد مشاهده شده برای کیوی های خشک شده در توان های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب برابر $210/56$ ، $231/90$ و $245/07$ درصد بدست آمد. این نتایج همراستا با نتایج صالحی (۱۳۹۴) می باشد. مقدار آبگیری برش های خشک شده قارچ دکمه ای درون خشک کن مادون قرمز توسط صالحی (۱۳۹۴) در محدوده $184/93-244/89$ درصد گزارش شده است. همچنین مقدار آبگیری مجدد مشاهده شده برای قارچ های خشک شده در توان های ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات به ترتیب برابر $194/57$ ، $208/19$ و $238/71$ درصد گزارش شده است.

نتیجه گیری

اشعه مادون قرمز سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم بر روی محصول می شود که نسبت به خشک کن های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می رود سریع تر است و راندمان بالاتری دارد و کیفیت محصولات خشک شده به این روش در مقایسه با روش هوای داغ بالاتر می باشد. نتایج نشان داد تأثیر توان و فاصله لامپ پرتو دهی بر فرآیند خشک شدن کیوی معنی دار می باشد. با افزایش فاصله لامپ از سطح نمونه ها، درصد کاهش برای نمونه کیوی کاهش یافت. نتایج مدل سازی سینتیک

خرمای مضافتی. رساله دکتری دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

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.

Allaeddini, B. & Emam-Djomeh, Z. (2005). Formulation and quality improvement of dried kiwifruit slices using an osmotic pretreatment. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 36 (6), 1421-1427 (In Persian).

Amiri Chayjan, R., Bahrabad, S. M. T. & Rahimi Sardari, F. (2014). Modeling Infrared-Covective Drying of Pistachio Nuts under Fixed and Fluidized Bed Conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(3), 1224-1233.

Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4), 121-126.

Azoubel, P. M. & Murr, F. E. X. (2004). Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 291-295.

Ceylan, I., Aktaş, M. & Doğan, H. (2007). Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits. *Applied Thermal Engineering*, 27(11), 1931-1936.

Dandamrongrak, R., Young, G. & Mason, R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*, 55(2), 139-146.

Das, I., Das, S. & Satish. K. (2004). Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried. *Journal of Food Engineering*, 62, 9-14

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.

Duttaroy, A. K. & Jørgensen, A. (2004). Effects of kiwi fruit consumption on platelet aggregation and plasma lipids in healthy human volunteers. *Platelets*, 15(5), 287-292.

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

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.

خشک کردن کیوی توسط ۸ مدل سینتیکی حاکی از مناسب بودن مدل پیچ برای بررسی افت رطوبت در خشک‌کن مادون قرمز بود. با افزایش توان پرتودهی مادون قرمز، نمونه‌ها تیره‌تر شده و شاخص L^* کاهش یافته است. همچنین تغییرات رنگ نمونه‌ها (ΔE) با افزایش توان افزایش یافت. میانگین چگالی و آبگیری مجدد نمونه‌های خشک شده به ترتیب برابر 743 kg/m^3 و $229/18$ درصد بدست آمد. توان ۲۵۰ وات و فاصله ۱۰ سانتی‌متر به دلیل زمان کوتاه، جذب آب بالا و رنگ مناسب، به عنوان شرایط بهینه خشک کردن کیوی با سامانه مادون قرمز انتخاب شد.

منابع

امام جمعه، ز. و علاالدینی، ب. (۱۳۸۴). بهبود شاخص‌های کیفی کیوی خشک شده و فرمولاسیون آن با استفاده از پیش فرایند اسمز. *مجله علوم کشاورزی ایران*، جلد ۳۶، شماره ۶، صفحات ۱۴۲۷-۱۴۲۱.

حسینی قابوس، س. ح. و سیدین اردبیلی، س. م. و کاشانی نژاد، م. و اسدی، غلامحسن. و اعلمی، مهران. (۱۳۹۵). سنتیک انتقال جرم خشک کردن ترکیبی مادون قرمز - هوای داغ کدو حلوايي. *کجله علوم غذایی و تغذیه*، سال ۱۳، شماره ۴، صفحات ۱۶-۵.

زکی پور ملک آبادی، ا.، حمیدی اصفهانی، ز. و عباسی، س. (۱۳۸۹). فرمولاسیون لواشک از ضایعات میوه کیوی. *نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران*، جلد ۶، شماره ۴، صفحات ۲۷۰-۲۶۳.

صالحی، ف. (۱۳۹۴). بررسی انتقال حرارت و جرم طی خشک کردن قارچ دکمه‌ای توسط سامانه‌های مجهز به مادون قرمز به روش دینامیک سیالات محاسباتی. رساله دکتری دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

صالحی، ف. و کاشانی نژاد، م. و اسدی امیرآبادی، علیرضا. (۱۳۹۴). بررسی سینتیکی انتقال جرم در طی خشک کردن ترکیبی هوای داغ - مادون قرمز برش‌های بادمجان. *فصلنامه فناوری های نوین غذایی*، سال ۲، شماره ۷، صفحات ۶۰-۵۳.

محمدی کریمانه، ن. (۱۳۹۳). بررسی تاثیر سامانه مادون قرمز تحت خلأ بر فرایند خشک شدن و کیفیت خمیر

- Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17(6), 1167-1168.
- Jittanit, W. (2007). Modelling of seed drying using a two-stage drying concept. PhD Thesis, School of Chemical Sciences and Engineering, The University of New South Wales.
- 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.
- Kumar, D. P., Hebbar, H. U. & Ramesh, M. N. (2006). Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices. *LWT-Food Science and Technology*, 39(6), 700-705.
- Midilli, A., Kucuk, H. & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying technology*, 20(7), 1503-1513.
- Mongpraneet, S., Abe, T. & Tsurusaki, T. (2002). Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. *Journal of Food Engineering*, 55, 147-156.
- 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.
- Reis, F. R., Lenzi, M. K., de Muñiz, G. I. B., Nisgoski, S. & Masson, M. L. (2012). Vacuum drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and the effect of process conditions on fractal dimension and rehydration capacity. *Drying Technology*. 30(1), 13-19.
- Sahin, S. & Sumnu, S. G. (2006). *Physical properties of foods*. Springer Science & Business Media.
- 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.
- Salehi, F., Kashaninejad, M., Sadeghi Mahoonak, A. & Ziaifar A. M. (2015). Button mushroom drying process by infrared system. *Modern Food Science and Technology journal*, (In Press).
- 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.
- Strumillo, C. & Kudra. T. (1987). *Drying, Principles, Applications and Design*. Gordon and Breach Science Publisher, USA.
- 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. and 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.
- Yaldyz, O. & Ertekyn, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19(3-4), 583-597.
- Youn, K. S. & Choi, Y. H. (1998). The Quality characteristics of Dried kiwifruit using Different Drying Methods. *Food Engineering progress*. 2(1), 49-54.