

## بررسی تاثیر سامانه مادون قرمز - هوای داغ بر فرآیند خشک شدن و کیفیت کیوی

عماد آیدانی<sup>۱</sup>، محمد حسین حداد خدا پرست<sup>۲\*</sup>، مهدی کاشانی نژاد<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.  
 ۲- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.  
 ۳- استاد، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.  
 (تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۳)

### چکیده

میوه کیوی دارای طعم و آرومای مطلوب بوده و به علت میزان بالای اسید آسکوربیک، میوه‌ای با ارزش تغذیه‌ای بالا محسوب می‌شود. در این پژوهش تاثیر توان لامپ پرتوهی در سه سطح ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات و دمای هوای داغ در سه سطح ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس بر سینتیک انتقال جرم، ضریب نفوذ رطوبت، دانسیته، رنگ، بافت و آبیگری مجدد کیوی بررسی گردید. نتایج نشان داد که تغییر توان لامپ و دمای هوای داغ تاثیر معنی‌داری بر سینتیک افت رطوبت و زمان خشک کردن دارند ( $P < 0/05$ ). افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات زمان خشک شدن کیوی را ۲۸/۵۹ درصد کاهش داد. اثر توان حرارتی مادون قرمز بر ضریب نفوذ مؤثر کیوی بررسی و مشخص شد که مقدار ضریب نفوذ مؤثر با افزایش توان منبع حرارتی افزایش می‌یابد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت کیوی در محدوده  $10^{-11}$  تا  $10^{-13}$  مترمربع بر ثانیه بود. رنگ نمونه‌ها با تکنیک پردازش تصویر آنالیز و میانگین شاخص‌های  $L^*$ ،  $a^*$ ،  $b^*$  و  $\Delta E$  به ترتیب برابر ۴۷/۰۹، ۲/۱۱، ۳۴/۷۵ و ۱۳/۴۱ به دست آمد. میانگین چگالی و سفتی برای نمونه‌های خشک شده در سامانه مادون قرمز- هوای داغ به ترتیب برابر  $73 \text{ kg/m}^3$  و ۷/۴۹ نیوتن به دست آمد. در مدل سازی فرآیند خشک کردن کیوی، مدل پیچ همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر مدل‌ها داشت.

**کلید واژگان:** آنالیز بافت، آبیگری مجدد، پردازش تصویر، کیوی، مدل پیچ.

## ۱- مقدمه

مبدأ اصلی گیاه کیوی (*Actinidia deliciosa*) جنگلهای مناطق معتدل اطراف رودخانه یانگ تسه در جنوب چین است و در سال ۱۳۴۷ این گیاه وارد ایران شده است. براساس تحقیقات به عمل آمده در سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد، کیوی پس از موز، مرکبات و سیب، چهارمین میوه مورد علاقه مردم دنیا است و با توجه به غنی بودن این میوه از املاح و ویتامین ها، احتمالاً در آینده نزدیک، بیشتر مورد علاقه مصرف کنندگان قرار خواهد گرفت [۱].

استفاده عمده این محصول در کشور ایران به صورت تازه خوری است در حالیکه امروزه از کیوی در دنیا استفاده های صنعتی متعددی به عمل می آید که از آن جمله می توان به کنسرو کردن کیوی، پالپ کردن کیوی، کیوی منجمد، لواشک کیوی، نوشیدنی های حاصل از کیوی، مواد استخراج شده از کیوی (مانند پروتئازو موسیلاژ و آرومای کیوی) و برگه های خشک شده کیوی اشاره نمود [۲].

خشک کردن از معمول ترین روش های فرآوری جهت افزایش مدت زمان ماندگاری محصولات کشاورزی می باشد. با استفاده از روش مناسب جهت کاهش رطوبت محصول، می توان خطر آلودگی، هزینه نگهداری و حمل و نقل را کاهش داده و مدت نگهداری را طولانی تر کرد [۳-۵]. تاکنون مطالعات مختلفی در رابطه با خشک کردن کیوی با استفاده از خشک کن با جریان هوای داغ، خشک کن های کابینتی، خشک کن های تحت خلأ و میکروویو صورت گرفته است. در پژوهشی اثر سه روش مختلف خشک کردن، یعنی خشک کردن با هوای داغ، خشک کردن خلایی و خشک کردن انجمادی پس از آبگیری اسمزی بر روی میوه کیوی بررسی شد. نتایج نشان داد که سرعت خشک کردن با روش انجمادی کمتر از روشهای دیگر می باشد. در صورتی که ارزیابی حسی، بهتر بودن روش خشک کردن انجمادی پس از آبگیری اسمزی را نشان داد. در خشک کردن انجمادی و خلایی نسبت به روش هوای داغ، ویتامین C بیشتر حفظ شده و نیز تغییر رنگ، میزان قند آزاد و اسیدهای ارگانیکی کمتر می باشد [۶].

در تحقیقی خشک کردن اسمزی به عنوان یک پیش فرایند برای تولید برگه های کیوی (ارقام هایوارد و ابوت) بکار گرفته شد. بدین منظور، آثار 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 برگه های تولید شده انجام شد. نتایج نشان دادند که بکارگیری پیش فرایند اسمزی می تواند ویژگیهای ظاهری و ارگانولپتیکی محصول را بهبود بخشد. بهترین نتایج با بکارگیری محلول حاوی ۴۰٪ ساکارز و ۶٪ محلول بافری به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به دست آمد [۲].

تحقیق دیگری نشان داد که خشک کردن به وسیله اشعه مادون قرمز به ویژه به شکل لایه نازک روش مناسبی برای تولید محصول خشک شده است. در این روش حرارت در محصول بدون ایجاد تغییرات نامطلوب ایجاد می شود، در نتیجه کیفیت ساختاری محصول نهایی افزایش و هزینه های فرآیند خشک شدن کاهش می یابد [۷]. در خصوص مزایای کاربرد صنعتی این روش برای خشک کردن محصولات کشاورزی می توان به راندمان بالا، ایجاد گرمای یکنواخت در نمونه، سهولت کنترل فرایند، هزینه تعمیر و نگهداری پائین، صرفه جویی در فضا و .. اشاره نمود [۸].

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 [۹].

استفاده از پرتو دهی با مادون قرمز در خشک کن های متعددی مورد استفاده قرار می گیرد که باعث افزایش راندمان خشک کردن و کاهش فضا می شود [۱۰]. شارما و همکاران [۱۱] 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.

کومار و همکاران [۱۲] دریافته اند که برای قطعات پیاز، ترکیب هوای داغ - مادون قرمز زمان خشک کردن را کوتاه تر می کند. در تحقیق دیگری ذرت در سه سطح متفاوت رطوبت (۱۵، ۱۶ و ۲۴ درصد) برداشت و با سه سیستم هوای داغ، مادون قرمز و ترکیب هوای داغ و مادون قرمز خشک شد. زمان مورد نیاز برای خشک کردن در سیستم هوای داغ در حدود ۲۳۳، ۳۶۰ و

## ۲-۲- مدل سازی فرآیند

جهت مدل سازی فرآیند خشک شدن، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت<sup>۳</sup> در طی خشک شدن کیوی با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید [۱۲]:

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

MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$ : رطوبت نمونه ها در هر لحظه بر پایه خشک (d.b)،  $M_e$ : رطوبت تعادلی<sup>۴</sup> 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 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 و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نیست [۱۲].

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

## ۲-۳- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت<sup>۵</sup>

تعداد مکانیسم های انتقال رطوبت، گسترده و اغلب پیچیده است. پدیده های انتقال معمولاً برحسب نفوذ فشاری<sup>۶</sup>، نفوذ اجباری<sup>۷</sup> و نفوذ معمولی<sup>۸</sup> (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه بندی می شود. قانون دوم فیک<sup>۹</sup> برای شرایط ناپایدار می تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند (معادله ۳):

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

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و X شاخص فضایی می باشد. مطالعه ای انتشار قانون دوم فیک

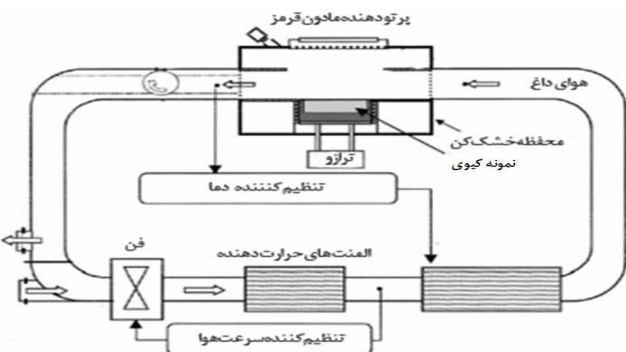
۲۵۵ درصد طولانی تر در مقایسه با سیستم ترکیبی هوای داغ و مادون قرمز تعیین شد.

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

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- خشک کردن

برای انجام آزمایش ها کیوی واریته هایوارد تهیه گردید. برای انجام فرآیند خشک کردن ابتدا کیوی ها در ضخامت ۰/۰ سانتی متر برش خورند. برش های کیوی بلافاصله پس از برش جهت پرتو دهی و خشک کردن توسط سامانه مادون قرمز- هوای داغ (شکل ۱)، طراحی و ساخته شده در ایران، مورد استفاده قرار گرفتند. جهت خشک کردن نمونه های برش خورده با سامانه مادون قرمز- هوای داغ از توان های متفاوت لامپ مادون قرمز<sup>۱</sup> (۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات) و در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس استفاده شد. تغییرات وزن نمونه ها در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی<sup>۲</sup> با دقت ۰/۰۱ ثبت گردید. آزمایش ها در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی، در سطح معنی داری ۰/۰۵ با استفاده از نرم افزار Minitab 16 مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۱ شماتیک خشک کن مادون قرمز- هوای داغ مورد استفاده در

این تحقیق.

3. Moisture Ratio
4. The equilibrium moisture content
5. Effective Moisture Diffusion Coefficient
6. Pressure Influence
7. Forced Influence
8. Typical Influence
9. Fick's Law

1. Infrared Heat Lamp (NIR), Philips, Germany.
2. Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)

جدول ۱ مدل‌های سینتیکی مورد استفاده جهت مدل‌سازی خشک شدن کیوی.

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

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

## ۲-۴- اندازه‌گیری دانسیته (چگالی)

دانسیته نمونه‌ها با استفاده از روش حجمی جابه‌جایی دانه‌های گلزا اندازه‌گیری شد [۳].

## ۲-۵- پردازش تصویر<sup>۸</sup>

جهت بررسی رنگ کیوی خشک‌شده از روش پردازش تصویر استفاده شد. در این روش از یک اسکنر اچ پی ( Hp Scanjet G3110) استفاده شد. هر بار ۵ نمونه خشک‌شده 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 نرم‌افزار Image J و برنامه آن (Color -Space -Converter) از فضای رنگی RGB به \*L\* \*a\* \*b\* تبدیل گردیدند [۱۴].

## ۲-۶- بافت سنجی

بافت مواد غذایی به عنوان یکی از مهم‌ترین خصوصیات کیفی محصول، نقش مهمی در پذیرش کلی مصرف‌کنندگان دارد. برای اندازه‌گیری سفتی<sup>۹</sup> بافت کیوی خشک شده از دستگاه بافت سنج<sup>۱۰</sup> ( TA-XT Plus, Stable Micro Systems )

بر نفوذ جرم در طی دوره‌ی سرعت نزولی خشک‌کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد [۱۳]. 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:

(۴)

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

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

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

ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک‌کردن برحسب LnMR نسبت به زمان تعیین می‌گردد. زمانی نمودار مقدار LnMR نسبت به زمان رسم گردد، شیب خط به دست آمده را در معادله ۶ قرار داده تا ضریب نفوذ مؤثر به دست آید:

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

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

به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن کیوی، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک‌کردن استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن کیوی در جدول ۱ به نمایش درآمده است [۵]. به منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک‌کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها، از نرم‌افزار Curve Expert ویرایش ۱/۳۴ استفاده شد.

1. Approximation of diffusion
2. Page
3. Modified Page -II
4. Fick's Diffusion
5. Newton
6. Midilli
7. Logarithmic
8. Image Processing
9. Hardness
10. Texture analyzer

## ۲-۸- آنالیز آماری

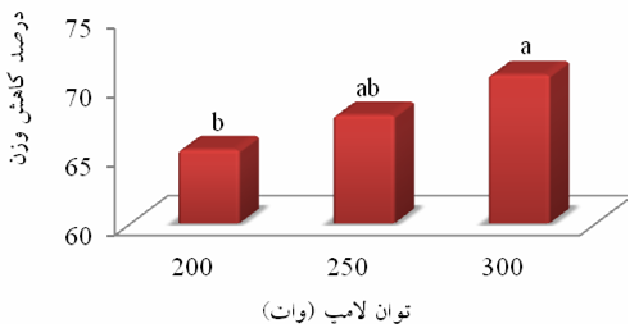
تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته با استفاده از طرح فاکتوریل و تجزیه واریانس توسط نرم‌افزارهای آماری Minitab 16 و SAS 9/1 انجام شد. مقایسه میانگین در سطح ۵ درصد انجام شد و سپس با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن گروه‌بندی و مقایسه نتایج صورت گرفت.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- خشک کردن کیوی

جهت بررسی اثر توان لامپ مادون قرمز بر سرعت خشک شدن ورقه‌های کیوی، از سه توان لامپ مادون قرمز ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات استفاده گردید. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، در مدت زمان ۱۱۳ دقیقه، با افزایش توان لامپ از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات، مقدار کاهش وزن ۸/۳۳ درصد افزایش می‌یابد (۷۰ درجه سلسیوس).

در شکل ۳ اثر دمای هوای داغ بر درصد کاهش وزن ورقه‌های کیوی به نمایش در آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش دمای هوای داغ، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت نمونه‌های کیوی افزایش می‌یابد. با افزایش دمای هوای داغ از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، مقدار کاهش وزن از ۷۳/۷۰ به ۸۱/۷۸ درصد افزایش یافت (۱۴۸ دقیقه و ۲۰۰ وات).



شکل ۲ اثر توان لامپ مادون قرمز بر کاهش وزن کیوی (۵۰ درجه سلسیوس و ۱۱۳ دقیقه).

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

(Ltd., Surrey, UK) و نرم‌افزار مربوطه (Texture Expert 1.05) استفاده شد. 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.

### ۲-۷- باز جذب آب<sup>۱</sup>

جهت بررسی مقدار باز جذب آب 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 آساخت سوئیس (مدل TE313s) انجام شد. تمام تیمارها در سه تکرار انجام و میانگین آن‌ها گزارش شد. نسبت باز جذب آب توسط معادله ۷ محاسبه شد [۱۵].

$$RR = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (۷)$$

در این معادله  $M$  وزن نمونه بعد از باز جذب آب و  $M_0$  وزن نمونه خشک می‌باشد.

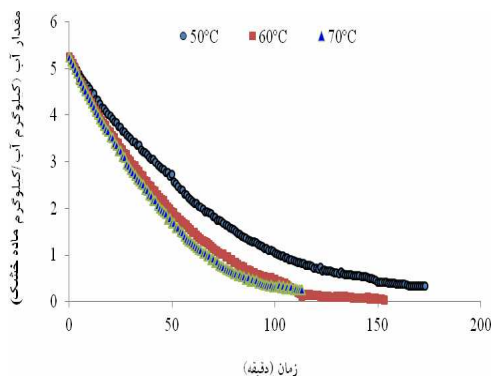
نفوذ مؤثر رطوبت به دمای هوای خشک‌کن، رقم و ترکیب ماده غذایی بستگی دارد. میزان حرارت جذب‌شده شاخص مؤثر دیگری است که بر روی نفوذ مؤثر با حرکت رطوبت درون ماده غذایی متناسب می‌باشد. با توجه به تابعیت ضریب نفوذ با دما، برای تعیین انرژی فعال‌سازی هر تیمار از رابطه آرنیوس (رابطه ۸) استفاده شد [۱۲]:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T_{abs}}\right) \quad (۸)$$

در اینجا،  $D_{eff}$  ضریب نفوذ مؤثر ( $m^2 s^{-1}$ )،  $D_0$  ضریب نفوذ در دمای مبنا ( $ms^{-1}$ )،  $E_a$  انرژی فعال‌سازی ( $kJ mol^{-1}$ )،  $R$  ثابت جهانی گازها ( $۸/۳۱۴ J mol^{-1} K^{-1}$ )،  $T_{abs}$  دما (K) می‌باشد.

1. Water Absorption  
2. Sartorius TE313S.

به منظور جلوگیری از وارد آمدن صدمات به بافت محصولات کشاورزی حداکثر دما جهت خشک کردن آنها  $80^{\circ}\text{C}$  توصیه شده است [۱۶]. لذا حداکثر سطح دمایی انتخاب شده در این تحقیق  $70^{\circ}\text{C}$  بود. افزایش دما موجب شیب بیشتر منحنی‌های به دست آمده در مورد تغییرات رطوبت و آهنگ خشک شدن گردیده و نشان دهنده سرعت بالاتر فرآیند می باشد (شکل ۵). در اثر افزایش دما از  $50$  به  $60$  و  $60$  به  $70$  درجه سلسیوس به ترتیب  $14/61\%$  و  $25/32\%$  زمان خشک شدن کاهش یافت. با افزایش دما و سرعت هوای عبوری از محفظه خشک کن، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش می یابد. افزایش دما و سرعت هوا در محفظه خشک کن باعث انتقال جرم و گرمای بالاتری شده و موجب کاهش شدیدتر رطوبت می گردد [۱۷].



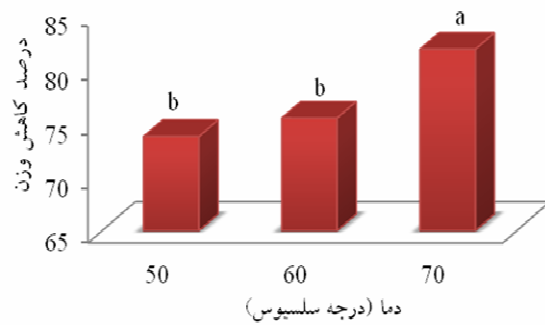
شکل ۵ تغییرات مقدار رطوبت با زمان و دمای هوای داغ ( $300$  وات).

بیشترین زمان خشک شدن مربوط به توان  $200$  وات و دمای  $50$  درجه سلسیوس بود که برای انجام فرآیند در این تیمار  $161$  دقیقه زمان صرف شد. همچنین کمترین زمان خشک شدن مربوط به توان  $300$  وات و دمای  $70$  درجه سلسیوس است که مدت زمان ثبت شده برای این تیمار  $77$  دقیقه بود.

هبار و همکاران [۱۸] از یک خشک کن ترکیبی مادون قرمز با هوای داغ در سه حالت ترکیبی، مادون قرمز به تنهایی و هوای داغ به تنهایی برای خشک کردن سیب زمینی 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 به تنهایی بود.

### ۳-۲- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

مقادیر مختلف میزان ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول ۳ گزارش شده است. با افزایش توان لامپ و دمای



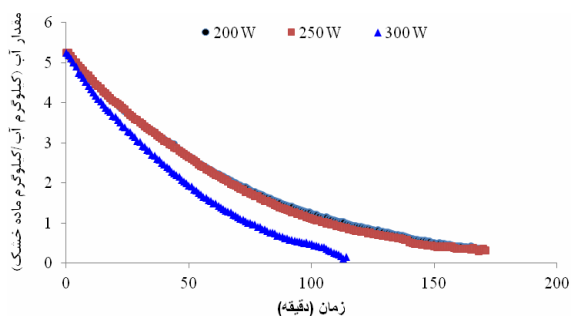
شکل ۳ اثر دمای هوای داغ بر کاهش وزن ورقه های کیوی ( $148$  دقیقه و  $200$  وات).

اثر فاکتورهای توان و دما در سطح  $5\%$  معنی دار شده است در حالی که اثر متقابل توان  $\times$  دما بر مدت زمان خشک شدن معنی دار نشده است.

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

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	P
توان	۲	۲۳۷۱	۲۱۸۵	۰/۰۰۰
دما	۲	۷۵۹۳	۳۷۹۶	۰/۰۰۰
توان $\times$ دما	۴	۹۰۲	۲۲۵	۰/۲۸۸
خطا	۹	۱۳۷۶	۱۵۲	
کل	۱۷	۱۴۲۴۴		

اثر فاکتورهای مورد بررسی در پژوهش بر تغییرات مقدار رطوبت با زمان در شکل های ۴ و ۵ به نمایش درآمده است. با افزایش توان لامپ مادون قرمز، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت نمونه های کیوی افزایش یافت. مقایسه زمان خشک شدن ورقه های کیوی نشان می دهد که در اثر افزایش توان لامپ مادون قرمز از  $200$  به  $300$  وات زمان خشک شدن  $28/59\%$  کاهش می یابد.



شکل ۴ تغییرات مقدار رطوبت با زمان و توان لامپ در دمای  $60$  درجه سلسیوس.

### ۳-۳- محاسبه انرژی فعال‌سازی

انرژی فعال‌سازی و ضریب نفوذ رطوبت برای مواد غذایی به ترتیب در محدوده  $110-127 \text{ kJ/mol}$  و  $10^{-9}-10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  می‌باشد [۲۱]. میزان انرژی فعال‌سازی برای خشک‌کردن کیوی در توان‌های مختلف در جدول ۴ به نمایش درآمده است. میزان انرژی فعال‌سازی برای کیوی در سه توان ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب برابر  $21/44$ ،  $23/59$  و  $26/17 \text{ kJ mol}^{-1}$  به دست آمد.

جدول ۴ مقادیر انرژی فعال‌سازی در شرایط مختلف

خشک‌کردن با استفاده از خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز- هوای داغ.

R	انرژی فعال‌سازی	توان (W)
۰/۹۸۹	۲۱/۴۴	۲۰۰
۰/۹۸۷	۲۳/۵۹	۲۵۰
۰/۹۹۱	۲۶/۱۷	۳۰۰

درزمینه خشک‌کردن لایه‌نازک محصولات کشاورزی، مدل‌سازی، استخراج منحنی سینتیک خشک شدن، محاسبه انرژی فعال‌سازی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آن‌ها تحقیقات فراوانی صورت گرفته است. میزان انرژی فعال‌سازی برای خشک‌کردن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در سه دبی ۱، ۱/۴ و  $1/8 \text{ kg min}^{-1}$  به ترتیب برابر  $14/29$ ،  $16/19$  و  $13/76 \text{ mol}^{-1}$  گزارش شده است [۱۷]. مقدار انرژی فعال‌سازی و ضریب نفوذ رطوبت برای خشک کردن انجیر در هوای داغ به ترتیب برابر  $30/8-48/47 \text{ kJ/mol}$  و  $10^{-9}-10^{-13} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  است [۲۱]. با افزایش شدت تابش مادون‌قرمز ( $26/5$ ،  $35/3$  و  $44/2$  کیلووات بر مترمربع) انتشار رطوبت مؤثر پیاز افزایش و انرژی فعال‌سازی آن در دامنه  $10/63-5/06$  کیلوژول تغییر نمود [۲۲].

### ۳-۴- مدل‌سازی سینتیک خشک شدن

با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل پیچ در طی بررسی سینتیک خشک شدن کیوی، تنها نتایج این مدل در جدول ۵ گزارش شده است. در این جدول ضریب تبیین، خطای استاندارد و ضرایب این مدل ارائه شده است. لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک‌کردن محصولات کشاورزی با استفاده از سامانه مادون‌قرمز- هوای داغ توصیه می‌شود.

هوا در فرآیند خشک شدن کیوی، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یک‌روند افزایشی دارد. 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  $10^{-10}/10$  افزایش می‌یابد (۷۰ درجه سلسیوس).

همچنین در محدوده دمایی ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت برای کیوی از  $6/67 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  تا  $10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  تغییر می‌کند (۳۰۰ وات). دلیل وقوع این مسئله تأثیر بارز دمای هوا در ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر و افزایش ضریب نفوذ می‌باشد [۱۹]. همچنین افزایش دما و سرعت هوای ورودی، آنتالپی هوای ورودی را افزایش داده و افزایش آنتالپی میزان انتقال جرم و حرارت را افزایش می‌دهد که باعث افزایش ضریب نفوذ مؤثر می‌شود [۱۷].

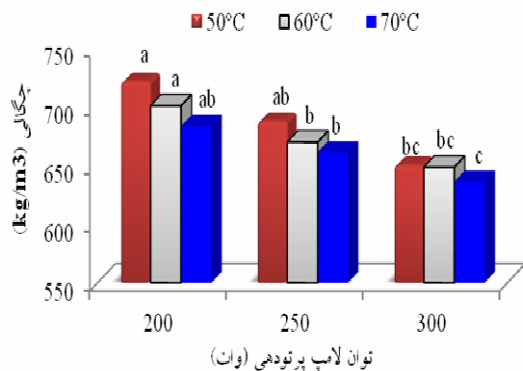
جدول ۳ مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک‌کردن.

R	ضریب نفوذ ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	توان (W)
۰/۹۹۶	$6/25 \times 10^{-10}$	۵۰	۲۰۰
۰/۹۹۷	$6/25 \times 10^{-10}$	۶۰	
۰/۹۹۰	$10/00 \times 10^{-10}$	۷۰	
۰/۹۹۷	$6/67 \times 10^{-10}$	۵۰	۲۵۰
۰/۹۹۸	$7/08 \times 10^{-10}$	۶۰	
۰/۹۹۴	$7/92 \times 10^{-10}$	۷۰	
۰/۹۹۸	$6/67 \times 10^{-10}$	۵۰	۳۰۰
۰/۹۸۴	$13/3 \times 10^{-10}$	۶۰	
۰/۹۹۵	$11/7 \times 10^{-10}$	۷۰	

میزان ضریب نفوذ مؤثر برای خشک‌کردن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در محدوده دمایی ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس برابر  $3/4 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  تا  $7/3 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  گزارش شده است [۱۷]. همچنین در مطالعه دیگری، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای ذرت در محدوده دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس در محدوده  $3/6 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  تا  $10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  گزارش شده است [۲۰].

تأثیر توان پرتو دهی مادون قرمز و دمای هوای داغ بر فرآیند خشک شدن کدو حلواپی بررسی شده است [۴]. افزایش توان لامپ از ۲۰۴ به ۲۷۲ وات و افزایش دمای هوای داغ از ۵۵ به ۷۵ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن کدو حلواپی را به ترتیب  $15/05$  و  $37/43$  درصد کاهش دادند. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت کدو حلواپی بین  $9/2 \times 10^{-10}$  تا  $3/3 \times 10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه گزارش شده است.

کیوی های خشک شده در خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ در توان های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب برابر  $۰.۷۰۲ \text{ kg/m}^3$ ،  $۰.۶۷۳ \text{ kg/m}^3$  و  $۰.۶۴۵ \text{ kg/m}^3$  بدست آمد.



شکل ۶ مقایسه چگالی ورقه های کیوی خشک شده با مادون قرمز- هوای داغ.

### ۳-۶- پردازش تصویر

مدل رنگی Lab مرکب از جزء روشنایی (مقدار L که دامنه ای از صفر تا ۱۰۰ را دارد) و دو جزء رنگی (دامنه ای از ۱۲۰- تا ۱۲۰+) که شامل جزء  $a^*$  (دارای طیف رنگی سبز تا قرمز) و جزء  $b^*$  (دارای طیف رنگی آبی تا زرد) می باشد [۱۴]. پردازش تصویر ورقه های کیوی خشک شده در خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ در جدول ۶ گزارش شده است. همان طور که ملاحظه می شود کمترین تغییرات رنگی مربوط به نمونه خشک شده با توان ۲۰۰ وات و دمای ۵۰ درجه سلسیوس می باشد. با افزایش دمای هوای داغ نمونه ها تیره تر شده و شاخص  $\Delta E$  افزایش یافته است. میانگین تغییرات رنگ ( $\Delta E$ ) محاسبه شده برای کیوی های خشک شدن درون خشک کن مادون قرمز- هوای داغ با توان های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات، به ترتیب برابر با ۱۲/۶۹، ۱۳/۹۷ و ۱۶/۶۸ بدست آمد.

جدول ۶ بررسی تغییرات رنگ ورقه های کیوی در خشک کن مادون قرمز- هوای داغ.

$\Delta E$	$L^*$	$b^*$	$a^*$	دما (°C)	توان (W)
۱۰/۵۶	۵۴/۲۹±۷/۲۱	۳۶/۵۸±۱۲/۳۵	-۱/۲۲±۳/۳۳	۵۰	
۱۲/۰۲	۴۹/۹۷±۹/۵۴	۳۸/۰۸±۱۳/۴۲	۰/۲۷±۴/۱۵	۶۰	۲۰۰
۱۵/۵۰	۴۹/۶۳±۵/۳۳	۴۲/۰۵±۱۱/۴۸	۱/۹۵±۴/۰۳	۷۰	
۱۲/۴۹	۴۸/۹۷±۷/۲۴	۳۴/۶۱±۱۴/۱۵	۱/۶۲±۳/۸۸	۵۰	
۱۳/۴۱	۴۷/۰۹±۷/۵۱	۳۴/۷۵±۱۲/۸۹	۲/۱۱±۳/۸۴	۶۰	۲۵۰
۱۶/۰۰	۴۵/۶۵±۷/۶۰	۳۹/۱۹±۱۳/۶۷	۳/۱۷±۴/۱۹	۷۰	
۱۶/۰۳	۴۰/۹۷±۷/۹۲	۳۴/۱۳±۱۴/۱۳	۱/۸۶±۴/۳۲	۵۰	
۱۶/۷۸	۴۰/۶۹±۵/۴۱	۳۳/۳۶±۱۳/۷۶	۲/۶۴±۵/۰۴	۶۰	۳۰۰
۱۷/۲۲	۳۹/۸۵±۴/۷۷	۳۳/۰۲±۱۳/۰۵	۲/۵۳±۴/۴۱	۷۰	

سینتیک خشک شدن برش های بادمجان در یک خشک کن ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز توسط صالحی و همکاران [۵] بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش توان منبع حرارتی مادون قرمز مقدار ضریب نفوذ مؤثر افزایش می یابد و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بادمجان در محدوده  $۲/۴ \times 10^{-9}$  تا  $۸/۱ \times 10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه بود. همچنین مدل پیچ را به عنوان یک مدل مناسب جهت بررسی سینتیک خشک کردن برش های بادمجان معرفی نموده اند.

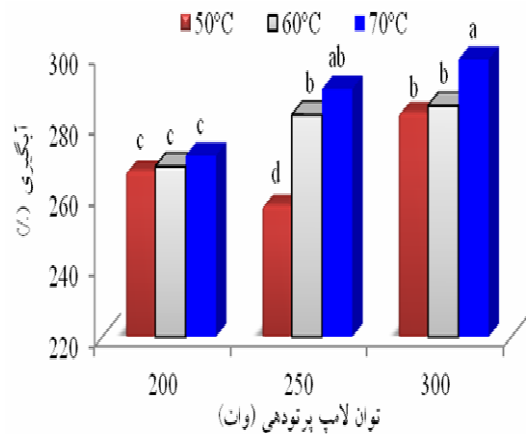
جدول ۵ ضریب تبیین (R)، خطای استاندارد (SE) و ضرایب مدل پیچ (k,n) استفاده شده در این تحقیق

توان	دما	n	k	R	SE
۲۰۰	۵۰	۱/۱۰۰	۰/۰۰۸۶	۰/۹۹۹	۰/۰۰۸
	۶۰	۱/۰۹۸	۰/۰۰۹۱	۰/۹۹۹	۰/۰۰۵
	۷۰	۱/۲۴۵	۰/۰۰۶۴	۰/۹۹۷	۰/۰۱۸
۲۵۰	۵۰	۱/۱۴۵	۰/۰۰۷۲	۰/۹۹۹	۰/۰۱۰
	۶۰	۱/۱۲۰	۰/۰۰۸۸	۰/۹۹۹	۰/۰۰۶
	۷۰	۱/۲۰۵	۰/۰۰۷۴	۰/۹۹۹	۰/۰۱۰
۳۰۰	۵۰	۱/۱۱۷	۰/۰۰۹۱	۰/۹۹۹	۰/۰۰۹
	۶۰	۱/۲۰۵	۰/۰۰۹۳	۰/۹۹۸	۰/۰۱۶
	۷۰	۱/۲۱۱	۰/۰۱۰۱	۰/۹۹۹	۰/۰۱۱

### ۳-۵- چگالی

در شکل ۶ نتایج مربوط به چگالی برش های خشک شده کیوی درون خشک کن مادون قرمز- هوای داغ به نمایش درآمده است. با افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات و دمای هوای داغ از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، چگالی برش های کیوی خشک شده به ترتیب ۸/۱۳ و ۳/۸۰ درصد کاهش یافته است. مقدار چگالی بافت مشاهده شده برای





شکل ۸ مقایسه درصد آبگیری مجدد کیوی خشک شده درون خشک کن مادون قرمز- هوای داغ

#### ۴- نتیجه گیری

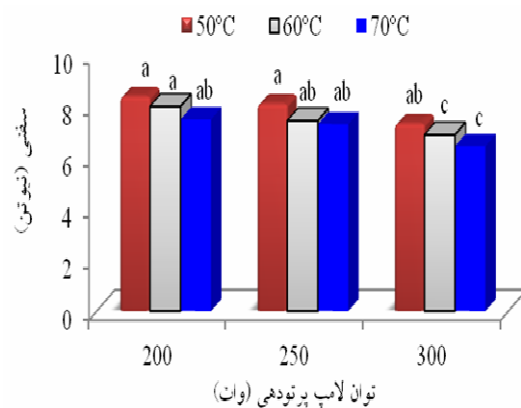
در این پژوهش تأثیر توان لامپ پرتو دهی و دمای هوای داغ بر سینتیک انتقال جرم، ضریب نفوذ رطوبت، دانسیته، رنگ، بافت و آبگیری مجدد کیوی بررسی گردید. کمترین تغییرات رنگی مربوط به نمونه خشک شده با توان ۲۰۰ وات و دمای ۵۰ درجه سلسیوس بود. با افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات و دمای هوای داغ از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، سفتی ورقه های کیوی خشک شده به ترتیب ۱۵/۶۰ و ۱۲/۰۹ درصد کاهش یافت. مقدار آبگیری مشاهده شده برای کیوی های خشک شده در خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ در توان های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب برابر ۲۶۸/۹۳، ۲۷۶/۸۵ و ۲۸۹/۲۴ درصد بدست آمد. توان ۲۵۰ وات و دمای ۶۰ درجه سلسیوس به دلیل زمان کوتاه، جذب آب بالا و رنگ، به عنوان شرایط بهینه انتخاب شد.

#### ۵- منابع

- [1] Zakipour-Molkabadi, E., Hamidi-Esfahani, Z. and Abbasi, S. 2011. Formulation of leather from kiwi fruit losses, Iranian Food Science and Technology Research Journal, 6(4): 263-270 (In Persian).
- [2] 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).

#### ۳-۷- بافت سنجی

در شکل ۷ نتایج مربوط به آنالیز بافت برش های خشک شده کیوی درون خشک کن مادون قرمز- هوای داغ به نمایش درآمده است. با افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات و دمای هوای داغ از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، سفتی ورقه های کیوی خشک شده به ترتیب ۱۵/۶۰ و ۱۲/۰۹ درصد کاهش یافته است. مقدار سفتی بافت مشاهده شده برای کیوی های خشک شده در خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ در توان های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب برابر ۷/۹۶، ۷/۶۱ و ۶/۸۹ نیوتن بدست آمد.



شکل ۷ مقایسه سفتی ورقه های کیوی خشک شده با مادون قرمز- هوای داغ

#### ۳-۸- آبگیری مجدد

در شکل ۸ نتایج مربوط به آبگیری برش های خشک شده کیوی درون خشک کن مادون قرمز- هوای داغ به نمایش درآمده است. با افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات و دمای هوای داغ از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، آبگیری ورقه های کیوی خشک شده به ترتیب ۷/۵۵ و ۶/۴۸ درصد افزایش یافته است. مقدار آبگیری مشاهده شده برای کیوی های خشک شده در خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ در توان های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ وات به ترتیب برابر ۲۶۸/۹۳، ۲۷۶/۸۵ و ۲۸۹/۲۴ درصد بدست آمد.

- [13] Wong, J. Y. 2001. Theory of Ground vehicles.(3rd ed). John Wiley and Sons, Inc. www.FAOSTAT.org
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Gorjian, S., 2009, Modelling of thin layer drying kinetics of barberry fruit. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Farsi).
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Doymaz, I., & Pala. M., 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60, 125-130.
- [20] Mujumdar, A. S., 2000, *Drying technology in agriculture and food sciences*. Science publisher, Inc. Enfield (NH), USA.
- [21] Babalis, S. J., & Belessiotis. V. G., 2004. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying. *Journal of Food Engineering*, 65: 449-458.
- [22] Pathare, P. B., & Sharma, G. P. 2006. Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystems Engineering*, 93: 285-291.
- [3] Sahin, S. and Sumnu, S. G. 2006. Physical properties of foods. Springer Science & Business Media.
- [4] Hosseini Ghaboos, S. H., Seyedain Ardabili, S. M., Kashaninejad, M., Asadi, G. and Alami, M. 2015. Mass Transfer Kinetics of Combined Infrared-Hot Air Drying of Pumpkin. *Food Science and Nutrition Journal* (In Persian).
- [5] Salehi, F., Kashaninejad, M. and Asadi Amirabadi, A. 2014. Investigation of Mass Transfer Kinetics during Combined Hot Air-Infrared Drying of Eggplant Slices. 7: 55-62 (In Persian).
- [6] Youn, K.S. and Choi, Y.H. 1998. The Quality characteristics of Dried kiwifruit using Different Drying Methods. *Food Engineering progress*. 2(1): 49-54.
- [7] Strumillo, C. & Kudra. T. 1987. *Drying, Principles, Applications and Design*. Gordon and Breach Science Publisher, USA.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Doymaz I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79: 243-248.

## Effect of Infrared- hot air system on drying and quality of Kiwi fruit

Aidani, E. 1, Haddad khodaparast, M. H. <sup>2\*</sup>, Kashaninejad, M. <sup>3</sup>

1. PhD Student, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad., Iran.

2. Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

3. Professor, Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

(Received: 94/4/31 Accepted: 94/8/3)

Kiwi fruit has the favorable taste and aroma and due to high levels of ascorbic acid, is a fruit with high nutritional value. In this study the effect of radiation lamp power at three levels 200, 250 and 300 W, and hot air temperature at three levels 50, 60 and 70 °C on mass transfer kinetics, moisture diffusion coefficients, density, color, texture and rehydration, of the kiwi were investigated. The results showed that the lamp power and hot air temperature have significant effect on moisture loss kinetics and drying time ( $P < 0.05$ ). Increasing in infrared lamp power from 200 to 300 W, reduced 28.59 % the drying time of kiwi. Effect of infrared heat power on kiwi effective diffusivity coefficient was investigated and it was found that the effective diffusivity coefficient increased with increasing heat source power. Effective diffusivity coefficient of kiwi varied between  $6.25 \times 10^{-10}$  and  $13.3 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. The color of samples were analyzed by image processing technique and the average L\*, a\*, b\* and ΔE parameters were 47.09, 2.11, 34.75 and 13.41, respectively. The average density and hardness for samples dried in the infrared-hot air were 673 kg/m<sup>3</sup> and 7.49 N, respectively. In the kiwi drying process modeling, in the compare with other models, Page model had better match with the experimental results.

**Keywords:** Image processing, Kiwi, Page Model, Rehydration, Texture analysis.

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: Khodaparast@um.ac.ir