

# مدل سازی سینتیک خشک شدن هلو با استفاده از خشک کن فرسرخ

فخرالدین صالحی<sup>۱</sup>، اشرف گوهری اردبیلی<sup>۲\*</sup>

۱- گروه مهندسی ماشین های صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۷/۲۵

## چکیده

هلوی تازه از بیش از ۸۶ درصد آب تشکیل شده است و جزء غنی ترین منابع ویتامین ها و مواد معدنی است. بنابراین می بایست آن را در طول سال به صورت تازه یا خشک مصرف نمود. در این پژوهش مدل سازی سینتیک خشک شدن هلو در یک خشک کن فرسرخ بررسی شد. تأثیر توان لامپ پرتو دهی در سه سطح ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات و فاصله نمونه از لامپ در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی متر بر زمان خشک شدن و ضریب نفوذ رطوبت در طی فرآیند خشک شدن هلو بررسی شد. مدل های استاندارد (ونگ و سینگ، هندسون و پایس، تقریب انتشار، پیچ، پیچ اصلاح شده، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی) جهت بررسی سینتیک خشک شدن بر داده های آزمایشی برازش داده شد و کیفیت برازش آن ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد تأثیر توان لامپ پرتو دهی و فاصله بر فرآیند خشک شدن هلو معنی دار می باشد. با افزایش توان لامپ فرسرخ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات زمان خشک شدن هلو ۶۷/۹ درصد کاهش یافت. کاهش فاصله لامپ از سطح نمونه از ۱۰ به ۵ سانتی متر باعث کاهش ۳۵/۶ درصدی در زمان خشک کردن شد. اثر توان حرارتی فرسرخ و فاصله نمونه از لامپ بر تغییرات ضریب نفوذ مؤثر هلو بررسی و نشان داد که با افزایش توان منبع حرارتی و کاهش فاصله مقدار ضریب نفوذ مؤثر افزایش می یابد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت هلو بین  $10^{-9} \times 1/42$  تا  $10^{-9} \times 6/83$  مترمربع بر ثانیه بود. در مدل سازی فرآیند خشک کردن هلو مدل لگاریتمی نسبت به سایر مدل ها با بزرگ ترین مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) و کوچک ترین خطا، نتایج نزدیک تری به داده های آزمایشی را داشت.

**واژه های کلیدی:** پرتو دهی، ضریب نفوذ مؤثر، مدل سازی، هلو.

## ۱- مقدمه

هلوی تازه (*Prunus persica* L.) از بیش از ۸۶ درصد آب تشکیل شده است و جزء غنی ترین منابع ویتامین ها و مواد معدنی است. بنابراین می بایست آن را در طول سال به صورت تازه یا خشک مصرف نمود (۱). فصل برداشت هلو کوتاه بوده و به دلیل نرم و حساس بودن بافت میوه در مرحله پس از برداشت، بهتر است جهت نگهداری طولانی مدت فرآوری شود. امروزه صنعت خشکبار در جهان بسیار بیشتر از گذشته رونق یافته و به یک تجارت ۱۴۲۰ میلیون دلاری بدل شده است. در این بین دستیابی به بازارهای مصرف و افزایش درآمد تولیدکنندگان بخش کشاورزی منوط به افزایش کمی و کیفی محصولات کشاورزی و فرآورده های آنهاست (۲-۴). میوه هلو را علاوه بر مصرف به شکل تازه، می توان به صورت آب میوه، مربا و خشک شده نیز استفاده نمود. بهینه سازی فرآیند تولید برگه هلو با استفاده از اسمز توسط صوتی خیابانی و همکاران (۲۰۰۳) بررسی شده است. روش اسمز با استفاده از محلول های ساکاروز، شربت گلوکز و مخلوط آنها در مدت زمان ۶ ساعت انجام شد و استفاده از این روش به عنوان یک فرآیند جهت افزایش کیفیت محصول قبل از خشک کردن در هوای آزاد توصیه شده است (۵). صحرایی و همکاران (۲۰۰۶) خصوصیات فیزیکوشیمیایی هلو ورقه شده در طی پیش تیمار و آبگیری اسمزی را بررسی نمودند. شرایط بهینه خشک کردن و خصوصیات محصول خشک شده گزارش شده است (۶). کینگسلی و همکاران (۲۰۰۷) اثر پیش تیمار (متاپتاسیم، بی سولفیت و اسید آسکوربیک) و دمای هوای خشک کردن (۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس) بر رفتار خشک شدن برش های هلو را بررسی نمودند (۱). جرمر و همکاران (۲۰۱۰) اثر دما و غلظت شربت ساکاروز بر آبگیری اسمزی هلو را ارزیابی نمودند (۷). اشعه فرورسرخ 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. بیشتر اشعه

فرورسرخ توسط مولکول های سطحی جذب می شود (۳). این پدیده سبب گرم شدن سریع محصول شده و سبب کاهش تنش های حرارتی در محصول و در نتیجه حفظ کیفیت آن می شود (۸). مدل سازی ریاضی فرآیند خشک کردن برای طراحی، بهبود سیستم های خشک کن موجود و حتی کنترل فرآیند استفاده می شود (۹). دیماز (۲۰۰۹) خشک کردن کیوی را مدل سازی نمود. آزمایش ها در سه سطح دمایی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲/۴ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۱۰ تا ۲۵٪ انجام شد. در این تحقیق مدل هنرسون و پایس اصلاح شده و مدل ورما و همکاران نتایج بهتری نشان دادند (۱۰). طغرل (۲۰۰۶) خشک شدن هویج را با فرورسرخ در محدوده ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس مدل سازی کرد و مدل میدلی را جهت توصیف رفتار خشک کردن پیشنهاد داد (۱۱). در پژوهشی طغرل و پهلوان (۲۰۰۴) سینتیک خشک کردن لایه نازک هلو تحت فرآیندهای خشک کن خورشیدی را مدل سازی نمودند (۱۲). مدل سازی ریاضی و شبکه عصبی خشک کردن لایه نازک برش های هلو توسط یزدانی و همکاران (۲۰۱۳) انجام شده است. ابتدا برش های هلو در دماهای مختلف (۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس) و سرعت های ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه خشک شدند. نتایج نشان داد که مدل میدلی در تمامی شرایط آزمایش در مقایسه با سایر مدل ها نتایج بهتری را ارائه می نماید ( $R^2=0.998$ ). شبکه پرسپترون چندلایه جهت مدل سازی سینتیک خشک کردن استفاده شد. بر اساس نتایج شبکه ای با ساختار ۱-۴-۶-۳ بهترین کارایی را در مدل سازی خشک کردن هلو با هوای داغ داشت ( $R^2=0.999$ ) (۱۳). با توجه به بررسی منابع منتشر شده مشخص شد که تاکنون پژوهشی در خصوص مدل سازی سینتیک انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در طی خشک کردن هلو در خشک کن فرورسرخ صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر توان لامپ پرتودهی فرورسرخ و فاصله لامپ از نمونه بر خشک کردن هلو و مدل سازی سینتیک انتقال جرم آن می باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- خشک کردن

برای انجام آزمایش‌ها هلو از استان همدان تهیه گردید. برای انجام فرآیند خشک کردن ابتدا هلوها به قطعاتی با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر برش داده شدند. مقدار رطوبت اولیه هلوها برابر ۸۸/۲ درصد بر پایه مرطوب بدست آمد. برش‌های هلو بلافاصله پس از برش جهت پرتو دهی توسط خشک‌کن فرسرخ مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۱). جهت خشک کردن نمونه‌های برش خورده با خشک‌کن فرسرخ از متغیرهایی شامل توان‌های لامپ فرسرخ<sup>۱</sup> در سه سطح ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات و فاصله لامپ از نمونه در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی<sup>۲</sup> با دقت ۰/۰۱ ± گرم که در خشک‌کن تعبیه شده بود، ثبت گردید (۱۴).

MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$ : رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه خشک (d.b)،  $M_e$ : رطوبت تعادلی نمونه‌ها (d.b) و  $M_0$ : رطوبت اولیه نمونه‌ها (d.b) می‌باشند. با توجه به رابطه ۱، نسبت رطوبت به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طی خشک شدن وابسته است. برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر  $M_e$  در مقایسه با مقادیر  $M_0$  و  $M_t$  بسیار کوچک می‌باشد؛ بنابراین می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نیست (۱۵).

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

## ۲-۲- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

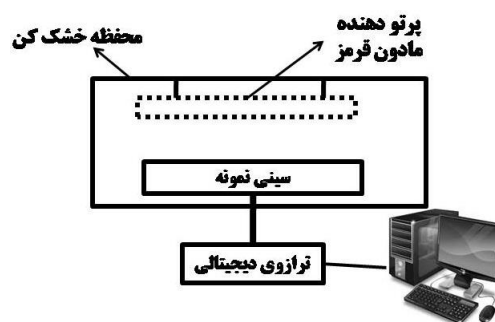
پدیده‌های انتقال معمولاً برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه‌بندی می‌شود. قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$$

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و X شاخص فضایی می‌باشد. مطالعه‌ی انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم در طی دوره‌ی سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد (۱۶). حل معادله فیک برای یک تیغه به صورت رابطه ۴ می‌باشد:

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

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:



شکل ۱- شماتیک خشک‌کن فرسرخ.

آزمایش‌ها در سه تکرار و در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند. برای رسم نمودارها از برنامه (۲۰۰۷) Excel و برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار Minitab 16 در سطح معنی داری ۵٪ استفاده شد. جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن هلو با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (۱۵):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

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

2 - Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$$

$K_0$  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 هلو، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک کردن استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن هلو در جدول ۱ به نمایش درآمده است (۱۶، ۱۵).

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

ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک کردن بر حسب لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت ( $\ln MR$ ) نسبت به زمان تعیین می‌گردد. هنگامی که نمودار مقدار  $\ln MR$  نسبت به زمان رسم گردد، شیب خط به دست آمده را در معادله ۶ قرار داده تا ضریب نفوذ مؤثر به دست آید:

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

| Model | مدل                        | معادله  |
|-------|----------------------------|---|
| (۱۶)  | Wang and Singh             | ونگ و سینگ<br>$MR = 1 + at + bt^2$                      |
| (۱۷)  | Henderson and Pabis        | هندسون و پابیس<br>$MR = a \exp(-kt)$                    |
| (۱۵)  | Approximation of diffusion | تقریب انتشار<br>$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$ |
| (۱۷)  | Page                       | پیج<br>$MR = \exp(-kt^n)$                               |
| (۱۵)  | Modified Page -II          | پیج اصلاح شده<br>$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$               |
| (۱۷)  | Newton                     | نیوتن<br>$MR = \exp(-kt)$                               |
| (۱۵)  | Midilli                    | میدیلی<br>$MR = a \exp(-kt^n) + bt$                     |
| (۱۰)  | Logarithmic                | لگاریتمی<br>$MR = a \exp(-kt) + c$                      |

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

در این مطالعه 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

است. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود اثر فاکتورهای توان لامپ، فاصله و همچنین اثر متقابل آن‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار شده است. کاهش فاصله لامپ از سطح نمونه از ۱۰ به ۵ سانتی‌متر باعث کاهش زمان خشک کردن از ۷۰ دقیقه به ۵۱ دقیقه شد (توان ۲۵۰ وات). با افزایش توان لامپ فروسرخ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات زمان خشک شدن هلو ۶۷/۹ درصد کاهش یافت.

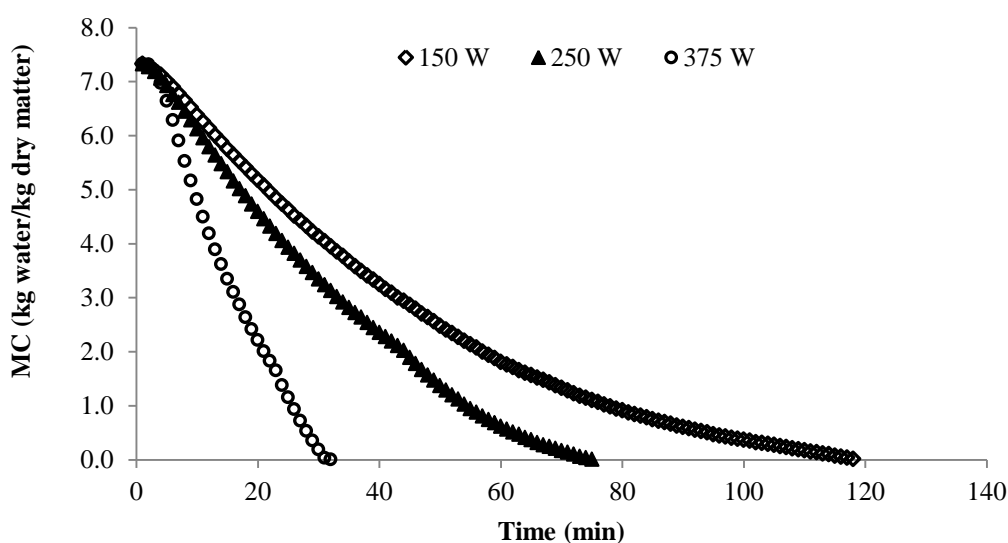
اشعه فروسرخ سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم در محصول می‌شود که نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود، سریع‌تر است و بازده بالاتری دارد (۱۸). نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر توان لامپ فروسرخ و فاصله بر زمان خشک شدن هلو آنالیز و در جدول ۲ به نمایش درآمده

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرهای توان لامپ و فاصله بر زمان خشک شدن هلو.

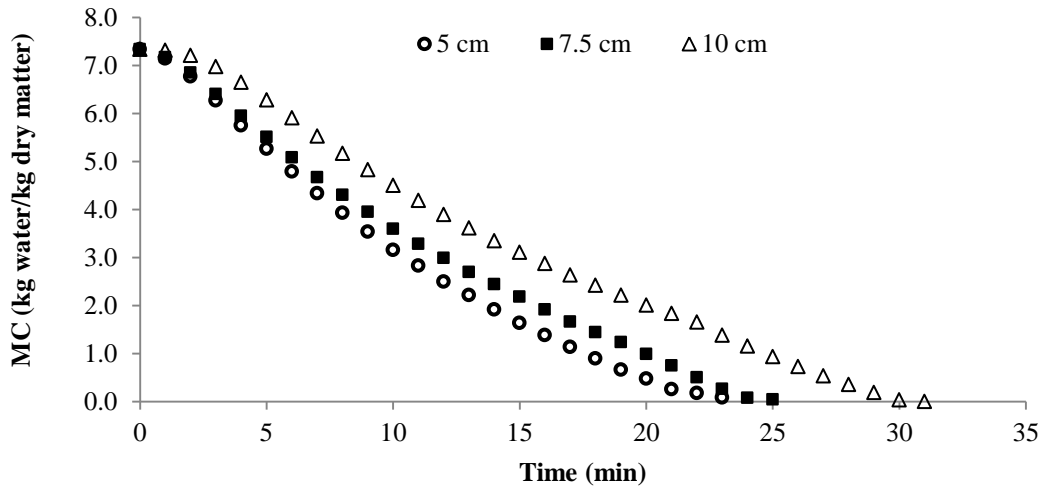
| P     | میانگین مربعات | مجموع مربعات | درجه آزادی | منابع تغییرات |
|-------|----------------|--------------|------------|---------------|
| ۰/۰۰۰ | ۴۸۴۷/۱         | ۹۶۹۴/۱       | ۲          | توان          |
| ۰/۰۰۰ | ۱۰۱۹/۶         | ۲۰۳۹/۱       | ۲          | فاصله         |
| ۰/۰۰۰ | ۲۵۹/۵          | ۱۰۳۷/۹       | ۴          | توان × فاصله  |
|       | ۲/۳            | ۲۰/۵         | ۹          | خطا           |
|       |                | ۱۲۷۹۱/۶      | ۱۷         | کل            |

برش‌های پیاز (۱۷) و تفاله سیب (۲۱) گزارش شده است. بیش‌ترین زمان خشک شدن مربوط به توان پرتودهی ۱۵۰ وات و در فاصله ۱۰ سانتی‌متری (۱۱۲ دقیقه) (شکل ۲) و کمترین زمان خشک شدن نیز مربوط به توان پرتودهی ۳۷۵ وات و در فاصله ۵ سانتی‌متری بود که مدت‌زمان ثبت‌شده برای این تیمار ۲۳ دقیقه به دست آمد. آنالیز فرآیندهای خشک کردن متداول هلو توسط گولیسز و همکاران (۲۰۱۳) بررسی شده است. آزمایش‌های خشک کردن در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و در سرعت جریان‌های ۱ و ۱/۲ متر بر ثانیه انجام گرفته است. نتایج حاکی از تأثیر بیشتر دمای هوا نسبت به سرعت جریان هوا بر سرعت خشک شدن هلو بوده است. افزایش دمای هوای خشک کن باعث کاهش زمان خشک کردن شده است (۲۲).

اثر توان لامپ پرتودهی و فاصله بر تغییرات رطوبت در واحد زمان در شکل‌های ۲ و ۳ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ فرسرخ، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت هلو افزایش می‌یابد (شکل ۲). افزایش توان لامپ باعث افزایش دمای خشک‌کن می‌گردد که از طرف دیگر باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول شده و باعث گرم شدن سریع‌تر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود؛ و در نتیجه زمان خشک شدن کاهش می‌یابد (۱۹، ۲۰). با افزایش توان پرتودهی لامپ مادون قرمز، دمای سطح نمونه‌ها افزایش یافته و این افزایش دما باعث افزایش فشار بخار در داخل نمونه می‌گردد. در این پژوهش با افزایش اختلاف فشار بین سطح و داخل نمونه‌ها، نرخ خشک شدن نمونه‌ها بیشتر شد. نتایج مشابهی برای خشک شدن



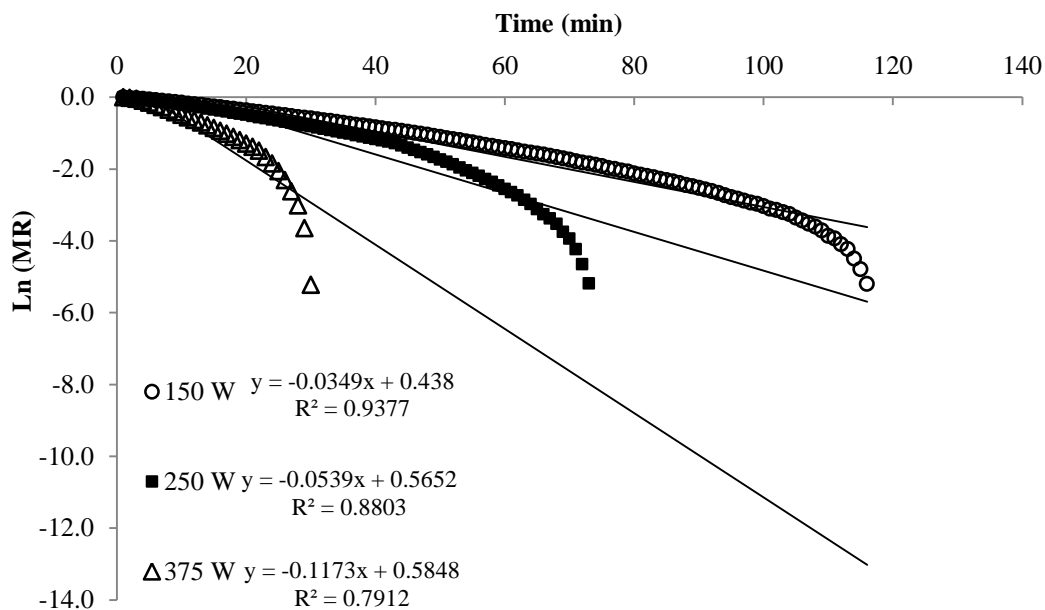
شکل ۲- اثر تغییر توان منبع حرارت دهی بر رطوبت هلو (در فاصله ۱۰ سانتی‌متر).



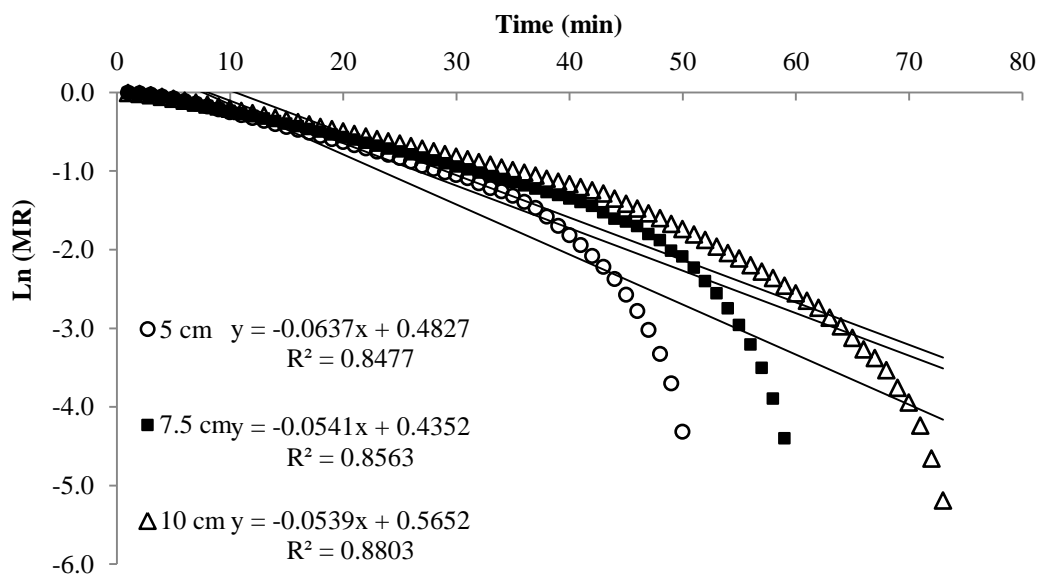
شکل ۳- اثر تغییر فاصله لامپ پرتو دهی از سطح نمونه بر رطوبت هلو (لامپ پرتو دهی ۳۷۵ وات).

همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ پرتو دهی و کاهش فاصله نمونه از لامپ، به دلیل افزایش دمای سطح نمونه و افزایش فشار بخار داخلی، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است. با افزایش توان لامپ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از  $2/38 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  به  $6/50 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  افزایش یافت (فاصله ۷/۵ سانتی‌متر). نتایج مشابهی برای خشک کردن برش‌های انبه  $1/60 \times 10^{-9}$  تا  $9/20 \times 10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه (۲۳) و برش‌های پیاز  $1/32 \times 10^{-10}$  تا  $1/09 \times 10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه (۲۴) گزارش شد.

بررسی سینتیک انتقال جرم و ضرایب نفوذ رطوبت می‌تواند یک ابزار سودمند برای کنترل شرایط فرآیند خشک کردن و افزایش کیفیت محصول باشد. شکل ۴ روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت (LnMR) را نسبت به زمان در توان‌های متفاوت در فاصله ۱۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت نسبت به زمان برای فواصل مختلف لامپ پرتو دهی ۲۵۰ وات از سطح هلو 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.



شکل ۴- مقادیر لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان برای لامپ‌های پرتودهی فرسوخ در فاصله ۱۰ سانتی‌متر.



شکل ۵- مقادیر لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان برای فواصل مختلف لامپ پرتودهی ۲۵۰ وات از سطح هلو.

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

| r     | ضریب نفوذ ( $m^2s^{-1}$ ) | فاصله لامپ (cm) | توان (W) |
|-------|---------------------------|-----------------|----------|
| ۰/۹۳۲ | $۲/۵۴ \times 10^{-۹}$     | ۵               |          |
| ۰/۹۵۳ | $۲/۳۸ \times 10^{-۹}$     | ۷/۵             | ۱۵۰      |
| ۰/۹۶۸ | $۱/۴۲ \times 10^{-۹}$     | ۱۰              |          |
| ۰/۹۲۰ | $۲/۶۳ \times 10^{-۹}$     | ۵               |          |
| ۰/۹۲۵ | $۲/۲۵ \times 10^{-۹}$     | ۷/۵             | ۲۵۰      |
| ۰/۹۳۸ | $۲/۲۱ \times 10^{-۹}$     | ۱۰              |          |
| ۰/۹۴۰ | $۶/۸۳ \times 10^{-۹}$     | ۵               |          |
| ۰/۸۹۴ | $۶/۵۰ \times 10^{-۹}$     | ۷/۵             | ۳۷۵      |
| ۰/۸۸۹ | $۴/۸۸ \times 10^{-۹}$     | ۱۰              |          |

(SE)، نتایج نزدیک تری به داده های آزمایش را داشت. لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از سامانه فروسرخ توصیه می شود (۲۵). در مطالعه دیگری مدل سازی خشک شدن لایه نازک برنج در دماها و سرعت های مختلف هوا بررسی شد. بر اساس نتایج، مدل میدیلی مناسب ترین مدل برای پیش بینی رفتار خشک شدن لایه نازک برنج بود (۲۰).

با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده های آزمایشگاهی با مدل لگاریتمی در طی بررسی سینتیک خشک شدن هلو، نتایج این مدل در جدول ۴ گزارش شده است. در این جدول ضریب تعیین، خطای استاندارد و ضرایب این مدل ارائه شده است. در مدل سازی فرآیند خشک کردن هلو مدل لگاریتمی نسبت به سایر مدل ها با بزرگ ترین مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) و کوچک ترین خطا

جدول ۴- ضریب تعیین، خطای استاندارد و ضرایب مدل لگاریتمی.

| SE     | $R^2$  | a     | k     | c      | فاصله لامپ (cm) | توان (W) |
|--------|--------|-------|-------|--------|-----------------|----------|
| ۰/۰۰۹۴ | ۰/۹۹۹۵ | ۱/۵۶۹ | ۰/۰۱۷ | -۰/۵۲۷ | ۵               |          |
| ۰/۰۰۹۴ | ۰/۹۹۹۵ | ۱/۲۹۵ | ۰/۰۲۲ | -۰/۲۵۳ | ۷/۵             | ۱۵۰      |
| ۰/۰۰۹۸ | ۰/۹۹۹۴ | ۱/۱۹۷ | ۰/۰۱۸ | -۰/۱۵۲ | ۱۰              |          |
| ۰/۰۱۳۱ | ۰/۹۹۹۱ | ۲/۰۹۴ | ۰/۰۱۳ | -۱/۰۵۲ | ۵               |          |
| ۰/۰۱۰۳ | ۰/۹۹۹۴ | ۱/۶۴۷ | ۰/۰۱۶ | -۰/۶۱۶ | ۷/۵             | ۲۵۰      |
| ۰/۰۱۰۵ | ۰/۹۹۹۴ | ۱/۴۷۹ | ۰/۰۱۷ | -۰/۴۴۲ | ۱۰              |          |
| ۰/۰۱۴۷ | ۰/۹۹۹۰ | ۱/۵۷۳ | ۰/۰۴۸ | -۰/۵۲۹ | ۵               |          |
| ۰/۰۱۱۲ | ۰/۹۹۹۴ | ۱/۷۱۰ | ۰/۰۳۷ | -۰/۶۷۴ | ۷/۵             | ۳۷۵      |
| ۰/۰۱۹۳ | ۰/۹۹۸۳ | ۲/۰۳۴ | ۰/۰۲۴ | -۰/۹۶۹ | ۱۰              |          |



گردید. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای هلو در محدوده  $1/42 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $6/83 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  به دست آمد که با افزایش توان لامپ فرسرخ و کاهش فاصله افزایش یافت. برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن هلو، از مدل‌های مختلفی استفاده گردید که در نهایت مدل لگاریتمی به دلیل بالا بودن شاخص ضریب تعیین و پایین بودن خطای استاندارد، جهت بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن انتخاب گردید.

#### ۴- نتیجه‌گیری

میوه هلو خشک‌شده می‌تواند به عنوان یک میان‌وعده غذایی غنی از ویتامین‌ها و مواد معدنی در نظر گرفته شود. در این پژوهش سینتیک خشک کردن برش‌های هلو در یک خشک‌کن آزمایشگاهی فرسرخ در محدوده توان ۱۵۰ تا ۳۷۵ وات و فواصل ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. افزایش توان لامپ و کاهش فاصله آن از سطح نمونه موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت‌زمان آن

#### ۵- منابع

- Dried Carrot, Journal of texture studies, 47, 34-39.
9. Doymaz, I. 2011. Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures, Journal of Food Processing and Preservation, **35**, 280-289.
10. Doymaz, I. 2009. Mathematical modelling of thin-layer drying of kiwifruit slices, Journal of Food Processing and Preservation, 33, 145-160.
11. Toğrul, H. 2006. Suitable drying model for infrared drying of carrot, Journal of Food Engineering, 77, 610-619.
12. Toğrul, İ. T., Pehlivan, D. 2004. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process, Journal of Food Engineering, 65, 413-425.
13. Yazdani, M., Borghae, A. M., Rafiee, S., Minaei, S., Beheshti, B. 2013. Mathematical and neural networks modeling of thin-layer drying of peach (*Prunus persica*) slices and their comparison, European Journal of Experimental Biology, 3, 712-721.
14. Salehi, F., Kashaninejad, M., Jafarianlari, A. 2017. Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices, Heat and Mass Transfer, 53, 1751-1759.
15. Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, Journal of Food Engineering, 79, 243-248.
16. Wong, J. Y. 2001. Theory of ground vehicles, John Wiley & Sons,
17. Jain, D., Pathare, P. B. 2004. Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices, Biosystems Engineering, 89, 289-296.
1. Kingsly, R. P., Goyal, R. K., Manikantan, M. R., Ilyas, S. M. 2007. Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice, International Journal of Food Science & Technology, 42, 65-69.
2. Salehi, F., Abbasi Shahkoh, Z., Godarzi, M. 2015. Apricot Osmotic Drying Modeling Using Genetic Algorithm - Artificial Neural Network, Journal of Innovation in Food Science and Technology, 7, 65-76.
3. Rastogi, N. K. 2012. Recent trends and developments in infrared heating in food processing, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 52, 737-760.
4. Salehi, F., Kashaninejad, M., Asadi, F., Najafi, A. 2016. Improvement of quality attributes of sponge cake using infrared dried button mushroom, Journal of food science and technology, 53, 1418-1423.
5. Souti Khiabani, M., Sahari, M., Emam-Djomeh, Z. 2003. Improving the dehydration of dried peach by applying osmotic method, Iranian Journal of Agricultural Science, 34, 283-291.
6. Sahari, M., Souti, M., Emam-Jomeh, Z. 2006. Improving the dehydration of dried peach by osmotic method, Journal of Food Technology, 4, 189-193.
7. Germer, S. P. M., Queiroz, M. R., Aguirre, J. M., Berbari, S. A. G., Anjos, V. D. 2010. Process variables in the osmotic dehydration of sliced peaches, Food Science and Technology (Campinas), 30, 940-948.
8. Salehi, F., Kashaninejad, M., Akbari, E., Sobhani, S. M., Asadi, F. 2016. Potential of Sponge Cake Making using Infrared-Hot Air

- peach, Technical Sciences/University of Warmia and Mazury in Olsztyn.
23. Jaya, S., Das, H. 2003. A vacuum drying model for mango pulp, *Drying Technology*, 21, 1215-1234.
24. Mitra, J., Shrivastava, S., Rao, P. S. 2011. Vacuum dehydration kinetics of onion slices, *Food and Bioproducts Processing*, 89, 1-9.
25. Omid, M., Yadollahinia, A., Rafiee, S. A thin-layer drying model for paddy dryer. in: *Proc. of the International conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies*, AIT, Pathumthani, Thailand, 12th, 2006, pp. 202-211.
18. Ratti, C., Mujumdar, A. 1995. Infrared drying, *Handbook of Industrial Drying*, Ed. Mujumdar, A. S., Second edition, New York, NY, Marcel Dekker Inc., 1, 567-588.
19. Gorjian, S. Modelling of thin layer drying kinetics of barberry fruit. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. in, Farsi, 2009.
20. Doymaz, I., Pala, M. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn, *Journal of Food Engineering*, 60, 125-130.
21. Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J., Hu, X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace, *Food Research International*, 40, 39-46.
22. Golisz, E., Jaros, M., Kalicka, M. 2013. Analysis of convectonal drying process of