

# بررسی سینتیک خشک شدن لایه نازک توت‌فرنگی به روش تابش فروسرخ

فخرالدین صالحی<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۴

۱۰۹

## چکیده

**مقدمه:** یکی از روش‌های جدید در خشک کردن مواد غذایی، استفاده از تابش فروسرخ است که باعث افزایش سرعت خشک کردن، حفظ کیفیت محصول نهایی و کاهش هزینه‌های فرآیند می‌شود.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش مدل‌سازی سینتیک خشک شدن توت‌فرنگی در یک خشک‌کن فروسرخ بررسی شد. تأثیر توان لامپ پرتودهی (۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات) و فاصله نمونه از لامپ (۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر) بر زمان خشک شدن و ضریب نفوذ رطوبت در طی فرآیند خشک شدن توت‌فرنگی بررسی شد. برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها در طی آزمایش بدون خروج آن‌ها از خشک‌کن، سینی با نمونه‌ها بر روی ترازو دیجیتال قرار گرفتند. مدل‌های استاندارد (ونگ و سینگ، هندسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، پیچ اصلاح‌شده، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی) جهت بررسی سینتیک خشک شدن بر داده‌های آزمایشی برازش داده شد و کیفیت برازش آن‌ها (ضریب تعیین و خطای استاندارد) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

**یافته‌ها:** با افزایش توان لامپ فروسرخ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات زمان خشک شدن توت‌فرنگی ۷۹/۸ درصد کاهش یافت. کاهش فاصله لامپ از سطح نمونه از ۱۰ به ۵ سانتی‌متر باعث کاهش ۴۰/۱ درصدی در زمان خشک کردن شد. افزایش توان منبع حرارتی و کاهش فاصله مقدار ضریب نفوذ مؤثر افزایش می‌یابد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت توت‌فرنگی بین  $1/54 \times 10^{-9}$  تا  $13/83 \times 10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه بود.

**نتیجه‌گیری:** تأثیر توان لامپ پرتودهی و فاصله بر فرآیند خشک شدن توت‌فرنگی معنی‌دار می‌باشد. مدل‌سازی فرآیند خشک کردن توت‌فرنگی نشان داد تمامی مدل‌ها نتایج قابل قبولی را در بر داشتند ولی در کل مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی با بزرگ‌ترین مقدار ضریب تعیین ( $R^2=0.999$ ) و کوچک‌ترین خطا ( $<0/11$ )، نتایج نزدیک‌تری به داده‌های آزمایشی را داشت.

**واژه‌های کلیدی:** توت‌فرنگی، خشک کردن، ضریب نفوذ مؤثر، فروسرخ، مدل‌سازی سینتیک، مدل پیچ

## مقدمه

توت‌فرنگی متعلق به تیره گل‌سرخیان<sup>۱</sup> و جنس فراگاریا<sup>۲</sup> بوده و گیاهی علفی چند ساله می‌باشد. رشد این گیاه علفی در آب‌وهوای معتدل گرم و در بستر غنی از گیاخاک و خاک اسیدی بسیار خوب است. میوه توت‌فرنگی که به صورت خام و یا فرآوری شده استفاده می‌شود سرشار از ویتامین‌های E، C و B و انواع آنتی‌اکسیدان‌ها می‌باشد (Samimi, Akhijahani and Khodaei, 2011). از جمله محصولات تولیدی از این میوه مغذی می‌توان به فرآورده‌هایی مثل مربا، شربت، کمپوت، ژل و طعم‌دهنده‌ها اشاره کرد. توت‌فرنگی به دلیل میزان تنفس بالا، مقدار آب فراوان (حدود ۹۱٪)، فعالیت متابولیسی بالا و حساسیت به فساد قارچی زمان نگهداری کوتاهی دارد (El-Beltagy et al., 2006; Zhang et al., 2006). از اینرو توسعه راهکارهایی که بتواند سبب حفظ کیفیت فیزیکی‌شیمیایی آن همراه با افزایش طول مدت نگهداری گردد، بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

خشک‌کردن محصولات کشاورزی اهمیت زیادی در محافظت و افزایش عمر و ماندگاری آن‌ها دارد. با این روش علاوه بر جلوگیری از فساد ماده غذایی به وسیله میکروارگانیسم‌ها و یا واکنش‌های شیمیایی، وزن ماده غذایی کاهش یافته و صرفه‌جویی بسیاری در هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری حاصل می‌شود (Salehi, 2019a). توت‌فرنگی خشک می‌تواند به عنوان یک میان وعده غذایی در نظر گرفته شود که منبع خوبی از ویتامین‌ها و مواد معدنی است. خشک‌کردن میوه‌ها به وسیله تابش خورشید یک روش معمول برای کاهش رطوبت آن‌ها محسوب می‌شود. از آنجایی که استفاده از این روش نرخ انتقال رطوبت از محصول بسیار کم است، در نتیجه خشک‌کردن خورشیدی زمان بر است (Doymaz et al., 2008). استفاده از اشعه فرورسرخ به ویژه به شکل لایه نازک جهت خشک کردن این محصول استراتژیک می‌تواند روش مناسبی باشد. در این روش حرارت در محصول بدون ایجاد تغییرات نامطلوب ایجاد می‌شود، در نتیجه کیفیت ساختاری محصول نهایی ضمن کاهش ضایعات محصول، افزایش و هزینه‌های فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد (Jun et al.,

بررسی سینتیک خشک شدن لایه نازک توت‌فرنگی به روش تابش فرورسرخ

2011). اشعه فرورسرخ 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 (Salehi et al., 2017). بیشتر اشعه فرورسرخ توسط مولکول‌های سطحی جذب می‌شود. این پدیده سبب گرم شدن سریع محصول شده و سبب کاهش تنش‌های حرارتی در محصول و در نتیجه حفظ کیفیت آن می‌شود (Salehi, 2019b).

مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک‌کردن برای طراحی، بهبود سیستم‌های خشک‌کن موجود و حتی کنترل فرآیند استفاده می‌شود (Doymaz, 2007). اخیراً مطالعات زیادی برای توصیف رفتار خشک شدن میوه‌ها و سبزی‌ها مختلف جهت یافتن بهترین مدل ریاضی صورت گرفته است. Doymaz (2009) با مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن کیوی در سه سطح دمایی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲/۴ متربرثانیه و رطوبت نسبی ۱۰ تا ۲۵٪ گزارش کردند که مدل هنرسون و پاییس<sup>۳</sup> اصلاح شده و مدل ورما<sup>۴</sup> و همکاران نتایج بهتری نشان دادند. Abe و Afzal (1997) با مدل‌سازی خشک‌کردن لایه نازک شلتوک برنج با فرورسرخ مدل‌سازی کردند و مدل پیچ<sup>۵</sup> به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. Togrul (2006) خشک شدن هویج با فرورسرخ در محدوده ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس دریافتند که مدل میدلی<sup>۶</sup> را جهت توصیف رفتار خشک‌کردن پیشنهاد داد.

با توجه به بررسی منابع منتشرشده مشخص شد که تاکنون پژوهشی در خصوص مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در طی خشک‌کردن توت‌فرنگی در خشک‌کن فرورسرخ صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر توان لامپ پرتودهی فرورسرخ و فاصله لامپ از نمونه بر خشک‌کردن توت‌فرنگی و مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم آن می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### - خشک‌کردن

برای انجام آزمایش‌ها توت‌فرنگی از گلخانه‌ای در استان همدان تهیه گردید. برای انجام فرآیند خشک‌کردن ابتدا توت‌فرنگی‌ها به قطعاتی با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر

<sup>1</sup> Rosaceae <sup>2</sup> Fragaria <sup>3</sup> Henderson and Pabis

<sup>4</sup> Verma

<sup>5</sup> Page

<sup>6</sup> Midilli

طبقه‌بندی می‌شود. قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک‌کردن را توصیف کند:

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

که در آن  $X$  مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک،  $t$  زمان و  $x$  شاخص فضایی می‌باشد. مطالعه‌ی انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم در طی دوره‌ی سرعت نزولی خشک‌کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد (Wong, 2001). 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 رابطه ۴ می‌باشد:

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

در اینجا،  $L$  نصف ضخامت تیغه (برحسب متر)،  $n$  تعداد عبارات در نظر گرفته‌شده 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:

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

ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک‌کردن برحسب لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت ( $LnMR$ ) نسبت به زمان تعیین می‌گردد. هنگامی که نمودار مقدار  $LnMR$  نسبت به زمان رسم گردد، شیب خط به دست‌آمده 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 دست‌آمده میانگین گرفته و نتیجه اعلام شد.

برش داده شدند. ورقه‌های توت‌فرنگی بلافاصله پس از برش جهت پرتودهی توسط خشک‌کن فرورسرخ مورد استفاده قرار گرفتند. جهت خشک‌کردن نمونه‌های برش خورده با خشک‌کن فرورسرخ از متغیرهایی شامل توان‌های لامپ فرورسرخ<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 با دقت  $\pm 0.01$  گرم که در خشک‌کن تعبیه شده بود، ثبت گردید.

آزمایش‌ها در سه تکرار و در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند. برای رسم نمودارها از برنامه (Excel ۲۰۰۷) و برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار Minitab 16 در سطح معنی‌داری ۵٪ استفاده شد.

جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن توت‌فرنگی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (Doymaz, 2007):

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

$MR$ : نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$ : رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه خشک (d.b)،  $M_e$ : رطوبت تعادلی 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 اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست (Doymaz, 2007).

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

### -تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

پدیده‌های انتقال معمولاً برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال)

<sup>1</sup> Infrared Heat Lamp (NIR), Noor Lamp Company, Iran.

## بررسی سینتیک خشک شدن لایه نازک توت‌فرنگی به روش تابش فرسرخ

فرسرخ، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت توت‌فرنگی افزایش می‌یابد (شکل ۱).

بیشترین زمان خشک شدن مربوط به توان پرتو دهی ۱۵۰ وات و در فاصله ۱۰ سانتی‌متری بود (۹۹ دقیقه). کمترین زمان خشک شدن نیز مربوط به توان پرتو دهی ۳۷۵ وات و در فاصله ۵ سانتی‌متری است که مدت‌زمان ثبت‌شده برای این تیمار ۱۲ دقیقه به دست آمد.

شکل ۳ روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت (LnMR) را نسبت به زمان در توان‌های متفاوت در فاصله ۷/۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. شکل ۴ نیز روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت نسبت به زمان برای فواصل مختلف لامپ پرتو دهی ۱۵۰ وات از سطح توت‌فرنگی 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 پرتو دهی و کاهش فاصله نمونه از لامپ ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است.

به‌منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن توت‌فرنگی، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک‌کردن استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن توت‌فرنگی در جدول ۱ به نمایش درآمده است (Wong, 2001; Doymaz, 2007).

## یافته‌ها

نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر توان لامپ فرسرخ و فاصله بر زمان خشک شدن توت‌فرنگی آنالیز و در جدول ۲ به نمایش درآمده است. کاهش فاصله لامپ از سطح نمونه از ۱۰ به ۵ سانتی‌متر باعث کاهش زمان خشک‌کردن از ۵۲ دقیقه به ۳۳ دقیقه شد (توان ۲۵۰ وات). با افزایش توان لامپ فرسرخ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات زمان خشک شدن توت‌فرنگی ۷۹/۸ درصد کاهش یافت.

اثر فاکتورهای مورد بررسی در پژوهش بر تغییرات رطوبت در واحد زمان در شکل‌های ۱ و ۲ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ

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

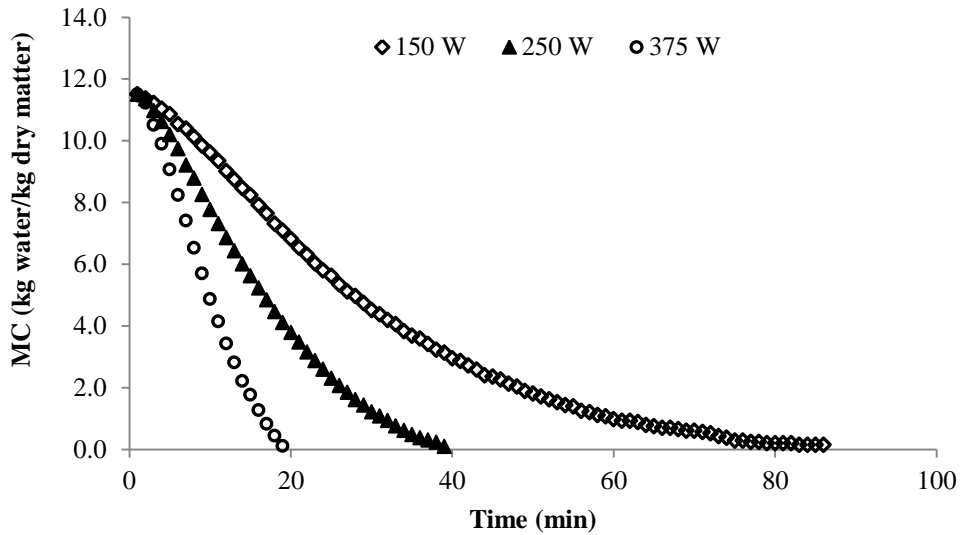
معادله	مدل	Model
$MR = 1 + at + bt^2$	ونگ و سینگ	Wang and Singh
$MR = a \exp(-kt)$	هندسون و پاپیس	Henderson and Pabis
$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	تقریب انتشار	Approximation of diffusion
$MR = \exp(-kt^n)$	پیج	Page
$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$	پیج اصلاح‌شده	Modified Page -II
$MR = \exp(-kt)$	نیوتن	Newton
$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	میدیلی	Midilli
$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی	Logarithmic

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

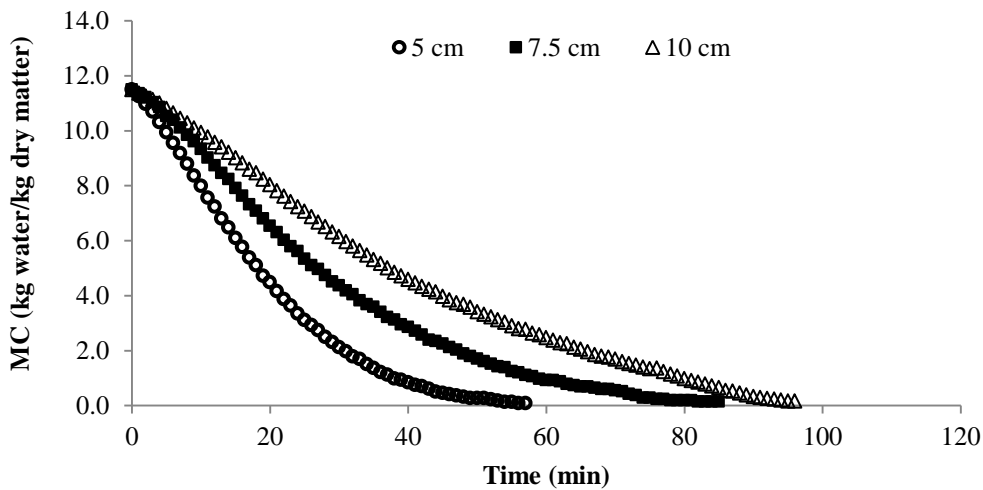
در این مطالعه به‌منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک‌کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها، از نرم‌افزار Curve Expert ویرایش ۱/۳۴ (شرکت مایکروسافت، آمریکا) استفاده شد.

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

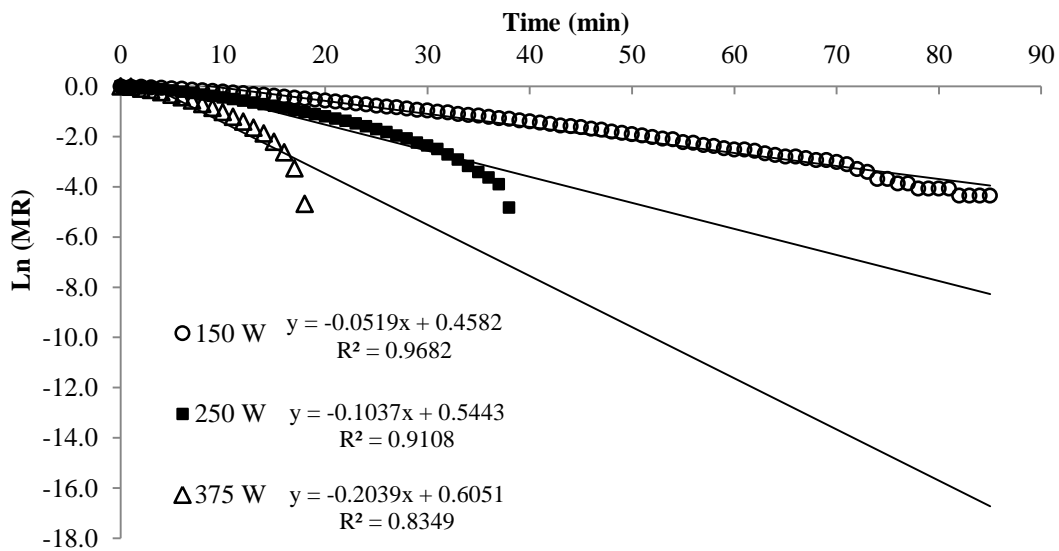
منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	P
توان	۲	۱۲۱۵۲/۳	۶۰۷۶/۲	۰/۰۰۰
فاصله	۲	۱۶۳۳/۳	۸۱۶/۷	۰/۰۰۰
توان × فاصله	۴	۸۰۳/۳	۲۰۰/۸	۰/۰۰۰
خطا	۹	۶۹/۰	۷/۷	
کل	۱۷	۱۴۶۵۸/۸		



شکل ۱- اثر تغییر توان منبع حرارت دهی بر رطوبت توت‌فرنگی (در فاصله ۷/۵ سانتی‌متر)

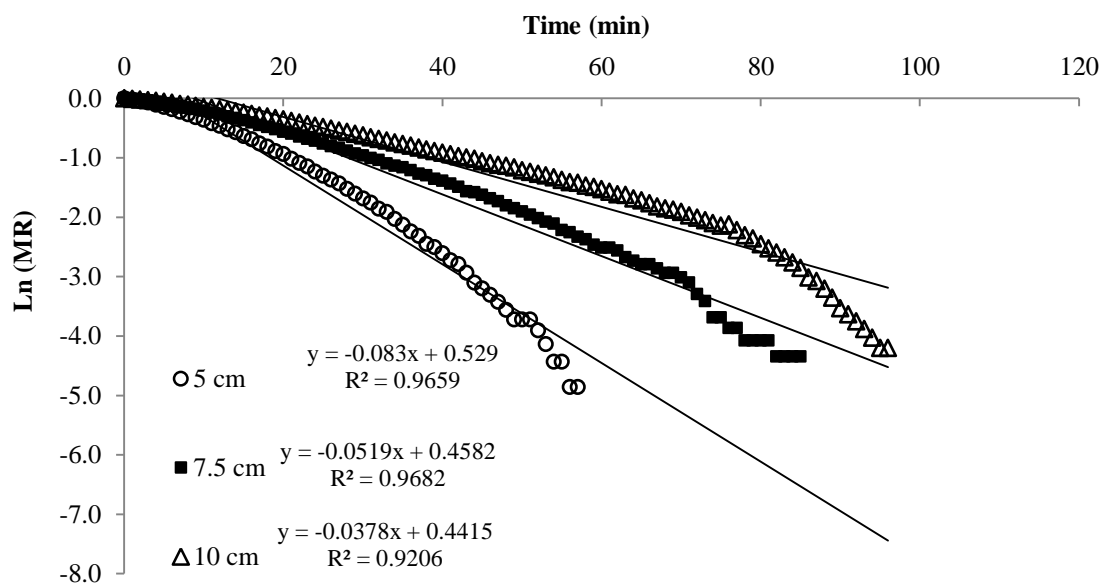


شکل ۲- اثر تغییر فاصله لامپ پرتو دهی از سطح نمونه بر رطوبت توت‌فرنگی (لامپ پرتو دهی ۱۵۰ وات)



شکل ۳- مقادیر لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان برای لامپ‌های پرتو دهی فروسرخ در فاصله ۷/۵ سانتی‌متر

بررسی سینتیک خشک شدن لایه نازک توت‌فرنگی به روش تابش فروسرخ



شکل ۴- مقادیر لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان برای فواصل مختلف لامپ پر توده‌ی ۱۵۰ وات از سطح توت‌فرنگی

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

r	ضریب نفوذ ( $m^2s^{-1}$ )	فاصله لامپ (cm)	توان (W)
-۰/۹۸۲	$۳/۴۶ \times 10^{-۹}$	۵	۱۵۰
-۰/۹۸۴	$۲/۱۳ \times 10^{-۹}$	۷/۵	
-۰/۹۵۹	$۱/۵۴ \times 10^{-۹}$	۱۰	
-۰/۹۵۸	$۴/۴۲ \times 10^{-۹}$	۵	۲۵۰
-۰/۹۵۴	$۴/۲۹ \times 10^{-۹}$	۷/۵	
-۰/۹۷۵	$۳/۴۲ \times 10^{-۹}$	۱۰	
-۰/۹۴۷	$۱۳/۸۳ \times 10^{-۹}$	۵	۳۷۵
-۰/۹۱۳	$۸/۴۶ \times 10^{-۹}$	۷/۵	
-۰/۹۵۹	$۷/۳۸ \times 10^{-۹}$	۱۰	

ماندگاری در مقایسه با سایر روش‌ها، تولید محصول با وزن و حجم کمتر و عدم نیاز به سردخانه و کاهش هزینه‌های جابه‌جایی و بسته‌بندی می‌باشد (Salehi et al., 2015). استفاده از روش فروسرخ برای خشک کردن باعث کاهش زمان خشک کردن و باعث کاهش مصرف انرژی در طی فرآیندهای حرارت‌دهی می‌شود (Zare et al., 2014). همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود اثر فاکتورهای توان لامپ، فاصله و همچنین اثر متقابل آن‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار شده است. افزایش توان لامپ باعث افزایش دمای خشک‌کن می‌گردد که از طرف دیگر باعث افزایش ظرفیت

مدل‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن توت‌فرنگی 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 توت‌فرنگی، نتایج این مدل در جدول ۴ گزارش شده است. در این جدول ضریب تعیین، خطای استاندارد و ضرایب این مدل ارائه شده است.

## بحث

خشک کردن یکی از روش‌های نگهداری مواد غذایی محسوب می‌شود. علت توجه زیاد به این روش، افزایش

جدول ۴- ضریب تعیین، خطای استاندارد و ضرایب مدل پیچ

SE	R <sup>2</sup>	n	k	فاصله لامپ (cm)	توان (W)
۰/۰۰۶	۰/۹۹۹	۱/۴۱	۰/۰۱۳	۵	
۰/۰۰۷	۰/۹۹۹	۱/۳۶	۰/۰۰۹	۷/۵	۱۵۰
۰/۰۱۳	۰/۹۹۸	۱/۳۷	۰/۰۰۶	۱۰	
۰/۰۱۴	۰/۹۹۸	۱/۴۰	۰/۰۲۱	۵	
۰/۰۱۲	۰/۹۹۹	۱/۵۱	۰/۰۱۴	۷/۵	۲۵۰
۰/۰۰۶	۰/۹۹۹	۱/۴۰	۰/۰۱۳	۱۰	
۰/۰۱۷	۰/۹۹۸	۱/۸۱	۰/۰۳۵	۵	
۰/۰۱۸	۰/۹۹۸	۱/۷۴	۰/۰۱۹	۷/۵	۳۷۵
۰/۰۱۲	۰/۹۹۹	۱/۸۲	۰/۰۱۳	۱۰	

$10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $8/46 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  افزایش یافت (فاصله ۷/۵ سانتی متر). نتایج مشابهی برای خشک کردن برش‌های انبه  $10^{-9}$  تا  $9/20 \times 10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه (Jaya et al., 2003) و برش‌های پیاز  $10^{-10}$  تا  $1/32 \times 10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه (Mitra et al., 2011) گزارش شد. میزان ضریب نفوذ مؤثر برای خشک کردن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در محدوده دمایی ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس برابر  $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $3/4 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  گزارش شده است (Abbasi et al., 2014).

در مدل‌سازی فرآیند خشک کردن توت‌فرنگی تمامی مدل‌ها نتایج قابل قبولی را در برداشتند ولی در کل مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها با بزرگ‌ترین مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) و کوچک‌ترین خطا (SE)، نتایج نزدیک‌تری به داده‌های آزمایش را داشت. لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از سامانه فرورسرخ توصیه می‌شود.

Salehi و همکاران (۲۰۰۷) با خشک کردن قارچ دکمه‌ای به صورت لایه‌نازک به این نتیجه رسیدند که توان پرتودهی فرورسرخ (۱۵۰ تا ۳۷۵ وات) تأثیر مستقیمی بر سرعت خشک شدن و کیفیت نهایی محصول خشک شده دارد. این محققان از ۹ مدل سینتیکی جهت بررسی فرآیند خشک شدن استفاده کردند که از بین آن‌ها مدل پیچ بهترین کارایی را در مدل کردن فرآیند داشت. مقدار ضریب نفوذ رطوبت گزارش شده توسط این محققان نیز در محدوده  $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $2/33 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  می‌باشد.

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 (Gorjian, 2009; Doymaz and Pala, 2003).

با گذشت زمان خشک شدن و به تبع آن کاهش رطوبت نمونه‌ها نرخ خشک شدن کاهش می‌یابد. با افزایش توان پرتودهی، دمای سطح نمونه‌ها افزایش یافته و در نتیجه فشار بخار در داخل نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش اختلاف فشار بین سطح و داخل نمونه‌ها نرخ خشک شدن نمونه‌ها بیشتر شده است. نتایج مشابهی برای خشک شدن برش‌های پیاز (Jain et al., 2004) و تفاله سیب (Wang et al., 2007) گزارش شده است. بعلاوه Hebbbar و همکاران (2004) از یک خشک‌کن ترکیبی فرورسرخ با هوای داغ در سه حالت ترکیبی، فرورسرخ به‌تنهایی و هوای داغ به‌تنهایی برای خشک کردن سیب‌زمینی و هویج استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از کاهش زمان خشک شدن و کاهش انرژی مصرفی در خشک‌کن ترکیبی نسبت به فرورسرخ و هوای داغ بود.

بررسی سینتیک انتقال جرم و ضرایب نفوذ رطوبت می‌تواند یک ابزار سودمند برای کنترل شرایط فرآیند خشک کردن و افزایش کیفیت محصول باشد. مقادیر ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول ۳ گزارش شده است. با افزایش توان لامپ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از  $2/13 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  به

## منابع

Abbasi, S., Minaei, S. & Khoshtaghaza, M. H. (2014). Investigation of kinetics and energy consumption thin layer drying of corn. *Journal of Agricultural Machinery*, 4(1), 98-107.

Abe, T. & Afzal, T. M. (1997). Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67, 289 – 297.

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

Doymaz, I. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Journal of Chemical Engineering and Processing Process Intensification*, 47(5), 914-919.

Doymaz, I. (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of kiwifruit slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 33, 145-160.

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

El-Beltagy, A., Gamea, G.R. & Amer Essa, A. H. (2006). Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 456-464.

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

Hebbar, H.U., Vishwanathan, K. H. & Ramesh. M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65, 557–563.

Hosseini Ghaboos, S.H., Seyedain Ardabili, S. M., Kashaninejad, M., Asadi, G., Aalami, M. (2016). Combined infrared-vacuum drying of pumpkin slices. *Journal of Food Science and Technology*, 53 (5), 2380-2388.

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(3), 289-296.

Jaya, S. & Das, H. (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology*, 21(7), 1215–1234.

Jun, S., Krishnamurthy, K., Irudayaraj, J. & Demirci, A. (2011). Fundamentals and theory of infrared radiation. In, Pan, Z. Atungulu, G.

Hosseini Ghaboos و همکاران (۲۰۱۶) از یک خشک‌کن ترکیبی فرسرخ- خلاء برای خشک کردن لایه نازک کدوخلوایی استفاده نمود. مقدار ضریب نفوذ رطوبت گزارش شده توسط این محققان نیز در محدوده  $0.71 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $2.86 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  می‌باشد. مدل درجه دوم به دلیل ضریب تبیین (R) بالا و خطای استاندارد (SE) پایین در هنگام برازش کردن داده‌های تجربی، به عنوان بهترین مدل گزارش شده است.

نتایج مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن لایه‌نازک شلتوک رقم فجر نشان داد که مدل تقریب انتشار در خشک‌کردن لایه‌نازک شلتوک رقم فجر نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بالاتری برخوردار است ولی به دلیل دقت قابل قبول و سادگی معادله پیچ، این مدل برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن شلتوک توصیه شده است ( Omid et al., 2010). در مطالعه دیگری مدل‌سازی خشک شدن لایه‌نازک برنج در دماها و سرعت‌های مختلف هوا بررسی شد. بر اساس نتایج، مدل میدیلی مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی رفتار خشک شدن لایه‌نازک برنج بود ( Doymaz and Pala, 2003).

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش سینتیک خشک‌کردن برش‌های توت‌فرنگی 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 گردید. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای توت‌فرنگی در محدوده  $1/54 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $13/83 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  به دست آمد که با افزایش توان لامپ فرسرخ و کاهش فاصله افزایش یافت. برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن توت‌فرنگی، از مدل‌های مختلفی استفاده گردید که در نهایت مدل پیچ به دلیل بالا بودن شاخص ضریب تبیین و پایین بودن خطای استاندارد، جهت بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن انتخاب گردید. لذا استفاده از این مدل جهت طراحی خشک‌کن‌های صنعتی فرسرخ و همچنین کنترل فرآیند در آن‌ها توصیه می‌شود.



G. (Eds.). Infrared heating for food and agricultural processing. New York. CRC press.

Mitra, J., Shrivastava, S. L. & Srinivasarao, P. (2011). Vacuum dehydration kinetics of onion slices. *Food and Bioproduct Processing*, 89, 1–9.

Omid, M., Yadollahinia, A. R. & Rafiee. S. (2010). Development of a kinetic model for thin layer drying of Paddy, Fajr variety. *Biosystem Engineering of Iran*. 41, 153-160. (In Farsi).

Sahin, A. Z. & Dincer, I. (2002). Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(16), 3267-3273.

Salehi, F. (2019a). Characterization of different mushrooms powder and its application in bakery products: A review. *International Journal of Food Properties*, 22 (1), 1375-1385.

Salehi, F. (2019b). Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review. *International Journal of Fruit Science*, DOI: 10.1080/15538362.2019.1616243.

Salehi, F., Abbasi Shahkoh, Z. & Godarzi, M. (2015). Apricot osmotic drying modeling using genetic algorithm - artificial neural

network. *Journal of Innovative Food Science Technology*, 7(1), 65-76.

Salehi, F., Kashaninejad, M. & Jafarianlari, M. (2017). Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices. *Heat and Mass Transfer*, 53(5), 1751-1759.

Samimi Akhijahani, H. & Khodaei, J. (2011). Some physical properties of strawberry (Kurdistan Variety). *World Applied Sciences Journal*, 13(2), 206-212.

Togrul, H. (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 77, 610–619.

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, *Journal of Food Engineering*, 40, 39–46.

Wong, J. Y. (2001). *Theory of Ground vehicles*. (3rd ed). John Wiley and Sons, Inc.

Zare, D., Naderi, H. & Ranjbaran, M. (2014). Energy and quality attributes of combined hot air-infrared drying of paddy. *Drying Technology*, 33, 570-582.

Zhang, B.M., Xiao, G. & Salokhe, V. M. (2006). Preservation of strawberries by modified atmosphere packages with other treatments, *Packaging Technology Science*, 19(4), 183-191.