

Drying Kinetics of Carrot Cubes by Infrared-Fluidized Bed Dryer

Sara Saeedfar¹, Mahdi Kashaninejad^{2*}, Mehran Alami³, Alireza Asadi⁴

¹Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

²Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran,
Email: kashaninejad@yahoo.com

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

⁴Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2020/08/27
Revised: 2020/09/04
Accepted: 2020/09/09

Keywords:
Infrared
Combined fluidized bed
Drying
Kinetics
Carrot

ABSTRACT

Background and objectives: Among the various hot air drying methods, fluidized bed drying has significant advantages such as high heat and mass transfer, uniform moisture reduction of products with a short time and high drying rate and uniform process at the entire surface of the product due to efficient mixing with the drying air and high efficiency of the process. In recent years, the application of infrared drying to dry food products has increased over conventional drying methods due to its higher product quality, more uniform heat distribution, higher energy efficiency and heat transfer rate and less processing time. Moreover, infrared heating offers better control over temperature and other process parameters, along with reduced air demand to flow through the product. In this study, the drying kinetics of carrot cubes by an infrared-fluidized bed dryer was investigated.

Materials and methods: Fresh carrots were washed with tap water, peeled manually, and diced. Then, carrot cubes (0.5 and 1 cm³) were dried by a combined infrared-fluidized bed dryer, using air temperatures of 50, 60 and 70 °C and three levels of infrared power (200, 400 and 600 W). Finally, five mathematical models (Page, Modified Page, Henderson & Pabis, Midilli and Logarithmic) were evaluated to describe the infrared-fluidized bed drying behavior of carrot cubes.

Results: The results demonstrated that the change in inlet air temperature, size of carrot cubes and infrared power had a significant effect ($P < 0.05$) on water removal from the sample. Also, drying time decreased with a reduction in carrot cubes size and increasing both air temperature and infrared power. Therefore, the energy consumption was considerably reduced, decreasing from 12.63 Kwh/kg in the bed fluidized method (without infrared power) to 2.28 Kwh/kg using infrared-fluidized bed drying. The Page model was best fitted to the experimental data to describe the drying kinetics of carrot cubes by an infrared-fluidized bed dryer.

Conclusion: The analysis of variance (ANOVA) showed that air temperature, sample size and infrared power had significant effects on the water removal rate of samples and therefore drying time. According to the results, using infrared-fluidized bed drying as a combined method in comparison with conventional hot air drying methods can reduce drying time and energy consumption, considerably.

Cite this article: Saeedfar, S., Kashaninejad, M., Alami, M., Asadi, A.R. 2022. Drying Kinetics of Carrot Cubes by Infrared-Fluidized Bed Dryer. *Food Processing and Preservation Journal*, 14 (1), 59-72.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/FPPJ.2022.18315.1635

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی سینتیک خشک کردن قطعات هویج با استفاده از خشک کن ترکیبی مادون قرمز-بسترسیال

سارا سعیدفر^۱، مهدی کاشانی نژاد^{۲*}، مهران اعلمی^۳، علیرضا اسدی امیرآبادی^۴

^۱دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۲دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: kashaninejad@yahoo.com

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

^۴دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: در میان روش‌های مختلف خشک کردن با هوای داغ، استفاده از بسترسیال از مزایای قابل توجهی مانند سرعت بالای انتقال جرم و حرارت، یکنواختی فرآیند در تمام سطوح ماده غذایی (به علت اختلاط مناسب با هوای داغ) و همچنین راندمان حرارتی بالا همراه با دمای یکنواخت و قابل کنترل بستر برخوردار است. در سال‌های اخیر استفاده از پرتو مادون قرمز برای خشک کردن محصولات غذایی با توجه به کیفیت بالاتر محصول، توزیع یکنواخت حرارت، بازدهی بالای انرژی، سرعت بالای انتقال حرارت و کاهش زمان فرآیند، تسهیل کنترل دمای مواد اولیه، نیاز کم به عبور جریان هوا از میان محصول و بالا بودن امکان کنترل پارامترهای فرآیند نسبت به روش‌های متداول خشک کردن، افزایش یافته است.
واژه‌های کلیدی: مادون قرمز ترکیبی بسترسیال خشک کردن سینتیک هویج	مواد و روش‌ها: هویج‌های تازه پس از شست‌وشو با آب، با استفاده از پوست‌گیر دستی، پوست‌گیری شده و سپس با خلال‌کن به قطعات مکعب‌شکل تقسیم شدند. دستگاه خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-بسترسیال برای خشک کردن، طراحی و ساخته شد. در این پژوهش، خشک کردن قطعات مکعب‌شکل هویج در قالب طرح آزمایشی فاکتوریل در سه توان لامپ مادون قرمز (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ وات)، سه سطح دمایی (۵۰، ۶۰، ۷۰ درجه سانتی‌گراد) و دو اندازه نمونه (۵/۰ و ۱ سانتی‌متر مکعب) و در سه تکرار انجام گرفت. جهت توصیف رفتار فرآیند خشک شدن نمونه‌های هویج به روش ترکیبی مادون قرمز-بسترسیال، داده‌های آزمایشی بر روی پنج مدل ریاضی (پیچ، پیچ اصلاح شده، هندرسون و پایس، میدیلی و لگاریتمی) برازش شد.
	یافته‌ها: نتایج به دست آمده نشان داد تغییر دمای هوای ورودی، اندازه قطعات هویج و توان لامپ مادون قرمز اثر معنی‌داری ($P < 0/05$) بر خروج آب از نمونه دارد. با افزایش دمای هوا و توان لامپ و کاهش اندازه قطعات هویج، زمان خشک شدن کاهش پیدا کرد؛ در نتیجه میزان انرژی مصرفی نیز به طور قابل توجهی کاهش داشت؛ به طوری که از ۱۲/۶۳ در روش بسترسیال (به تنهایی) به میزان ۲/۲۸ کیلووات ساعت بر کیلوگرم با استفاده از روش ترکیبی مادون قرمز-بسترسیال، تقلیل پیدا کرد. با در نظر گرفتن بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین میزان خطای استاندارد، مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها پیشگویی بهتری از داده‌های آزمایشی داشت.
	نتیجه گیری: تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که هر سه متغیر (دمای هوا، اندازه قطعات نمونه و توان لامپ

مادون قرمز) روی مقدار و سرعت خروج آب از نمونه و در نتیجه زمان فرآیند خشک شدن اثر معنی دار داشتند. استفاده از سامانه ترکیبی مادون قرمز-بسترسیال در مقایسه با روش های معمول خشک کردن با هوای داغ، مدت زمان فرآیند را به طور قابل توجهی کاهش داده و به این ترتیب میزان انرژی مصرفی در این روش به شکل چشمگیری کاهش یافت.

استناد: سعیدفر، س.، کاشانی نژاد، م.، اعلمی، م.، اسدی امیرآبادی، ع.ر. (۱۴۰۱). بررسی سینتیک خشک کردن قطعات هویچ با استفاده از خشک کن ترکیبی مادون قرمز-بسترسیال. *فرآوری و نگهداری مواد غذایی*، ۱۴ (۱)، ۷۲-۵۹.

DOI: 10.22069/FPPJ.2022.18315.1635



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

هویج (*Daucus carota* L.) یکی از سبزیجات ریشه‌ای مهم و با ارزش تغذیه‌ای است که دارای مقادیر قابل توجهی ویتامین ب_۱، ب_۲، ب_۶ و ب_{۱۲} بوده و بتاکاروتن (ترکیب ضد سرطان و از پیش‌سازهای ویتامین آ) و حاوی برخی مواد معدنی مهم از جمله پتاسیم و منیزیم است (۱۲، ۱۵، ۲۹). خشک کردن، رایج‌ترین روش نگهداری مواد غذایی است (۲۵) و گسترده‌ترین تجهیزات تجاری خشک کردن مورد استفاده برای محصولات صنعتی کشاورزی - غذایی، خشک‌کن‌های جابه‌جایی هوای داغ هستند (۱). در روش خشک کردن با جابه‌جایی هوای داغ کارایی انرژی پایین و مدت زمان فرآیند طولانی است و عمدتاً کاهش سریع رطوبت سطحی ماده غذایی منجر به چروکیدگی ماده غذایی، کاهش انتقال رطوبت و گاهی کاهش انتقال حرارت می‌گردد. در میان روش‌های مختلف خشک کردن با هوای داغ، استفاده از بسترسیال مزایای قابل توجهی مانند سرعت بالای انتقال جرم و حرارت، کاهش یکنواخت رطوبت محصولات با سرعت بالا و زمان کم، یکنواخت بودن فرآیند در تمام سطوح ماده غذایی به علت اختلاط مناسب با هوای داغ (۳۲، ۳۸) و همچنین راندمان حرارتی بالا همراه با دمای یکنواخت و قابل کنترل بستر را دارا است (۸).

پرتو مادون قرمز در صنعت غذا به‌طور گسترده‌ای برای فرآوری و خشک کردن محصولات غذایی استفاده شده است (۲۲)، زیرا به علت توزیع ثابت و یکنواخت حرارت در مقایسه با روش‌های حرارتی متداول (مانند خشک کردن با هوای داغ و بخار)، کیفیت بالاتری از محصول قابل دستیابی است (۴) و به سبب انتقال حرارت از طریق تابش و عدم نیاز به واسطه گرمایی از تابش دهنده به سطح ماده غذایی، بازدهی انرژی بالایی دارد. همچنین سرعت بالای

انتقال حرارت و کاهش زمان فرآیند، تسهیل کنترل دمای مواد اولیه، نیاز کم به عبور جریان هوا از میان محصول و بالا بودن امکان کنترل دقیق پارامترهای فرآیند از دیگر مزایای این شیوه است (۶، ۱۴، ۲۵، ۲۸).

یکی از روش‌های غلبه بر ویژگی‌های نامطلوب خشک کردن همرفتی، به‌کارگیری این روش در ترکیب با سایر روش‌های خشک کردن از جمله تلفیق خشک کردن همرفتی با روش مادون قرمز است. در واقع مزیت فناوری مادون قرمز این است که می‌تواند با حالت همرفتی، ترکیب شود (۳). هبار و همکاران (۲۰۰۴ و ۲۰۱۰) در بررسی خشک کردن سیب‌زمینی و هویج مشاهده کردند که سامانه خشک کردن ترکیبی مادون قرمز-هوای داغ در مقایسه با روش هوای داغ (به‌تنهایی)، می‌تواند تا ۴۸ درصد زمان خشک شدن را کاهش دهد (۱۶، ۱۷). زارع و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی مصرف انرژی و ویژگی‌های کیفی شلتوک برنج را با روش ترکیبی مادون قرمز-هوای داغ به این نتیجه رسیدند که با در نظر گرفتن هردو فاکتور کیفیت و مصرف انرژی ویژه، ایده‌آل‌ترین تیمار برای خشک کردن شلتوک می‌تواند با به‌کارگیری دمای هوای ورودی پایین (۳۰ درجه سانتی‌گراد)، سرعت هوای ورودی متوسط (۰/۱۵ m/s) و شدت تشعشع مادون قرمز پایین (2000 W/m^2) به‌دست آید (۳۷). شارما و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند در خشک کردن لایه‌نازک قطعات پیاز با استفاده از خشک‌کن مادون قرمز-هوای داغ، توان مادون قرمز، سرعت و دمای هوا، اثر معنی‌داری بر سرعت خشک کردن دارد و با تغییر توان مادون قرمز از ۳۰۰ به ۵۰۰ وات، افزایش دمای هوا از ۳۵ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد و افزایش سرعت جریان هوا از ۱ به ۱/۵ متر بر ثانیه، زمان خشک شدن ۲/۵ برابر کاهش پیدا کرد (۳۱). پراوین‌کومار و همکاران (۲۰۰۵) دریافتند

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه: ابتدا هویج‌های سالم که حتی‌الامکان از نظر شکل و اندازه یکنواخت باشند، از بازار محلی گرگان (استان گلستان) خریداری و سپس نمونه‌ها با آب شسته و با استفاده از پوست‌گیر دستی پوست‌گیری شدند. در ادامه، هویج‌ها با استفاده از خلال‌کن به قطعات مکعب‌شکل با ابعاد مشخص و مساوی در دو اندازه حدودی ۰/۵ سانتی‌متر مکعب و ۱ سانتی‌متر مکعب تقسیم شد (به مقدار موردنیاز روزانه). نمونه‌ها تا زمان شروع آزمایشات در یخچال (دمای ۴ درجه‌سانتی‌گراد) نگهداری (۵، ۱۲) و نیم‌ساعت قبل از شروع آزمایش‌ها از یخچال خارج شد تا با دمای محیط به تعادل برسد.

اندازه‌گیری محتوای رطوبت اولیه و رطوبت تعادلی:

برای تعیین رطوبت اولیه هویج مقدار ۳ تا ۵ گرم نمونه در آن با دمای ۱۰۵ درجه‌سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد. رطوبت اولیه هویج‌های براساس وزن مرطوب و خشک (رابطه ۱ و ۲: M_0) وزن اولیه و M وزن نهایی نمونه) محاسبه شد. جهت به‌دست‌آوردن داده‌های قابل‌قبول، این کار در سه تکرار صورت گرفت و میانگین آن‌ها گزارش گردید.

$$\text{رابطه ۱. } MC(\% \text{ wb}) = \frac{M_0 - M}{M_0} \times 100$$

$$\text{رابطه ۲. } MC(\% \text{ db}) = \frac{MC(\% \text{ wb}) \times 100}{100 - MC(\% \text{ wb})}$$

رطوبت تعادلی قطعات هویج در هریک از روش‌های خشک‌کردن محاسبه شد. به‌این‌ترتیب که نمونه تا رسیدن به وزن ثابت با توجه به تیمارهای تعریف‌شده در هر روش، خشک شد. سپس محتوای رطوبت نمونه خشک‌شده در سه تکرار توسط آن (در دمای ۱۰۵ درجه‌سانتی‌گراد) اندازه‌گیری و براساس وزن خشک گزارش گردید. میزان رطوبت محاسبه شده بیانگر میزان رطوبت تعادلی نمونه است. رطوبت تعادلی (براساس وزن خشک) جهت محاسبه نسبت

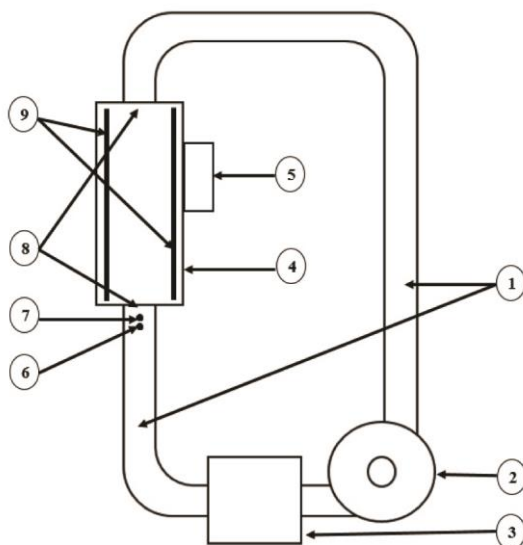
برای برش‌های پیاز، ترکیب مادون‌قرمز- هوای داغ نسبت به روش هوای داغ به‌تنهایی، منجر به کوتاه‌تر شدن زمان خشک‌کردن و بهترشدن کیفیت محصول نهایی شد (۳۰).

توان یا شدت پرتو مادون‌قرمز، در خشک‌کردن ترکیبی مادون‌قرمز و هوای داغ، از طریق تأثیر بر زمان خشک‌کردن، شدت خشک‌کردن را تغییر می‌دهد (۹، ۲۳، ۲۶، ۳۱، ۳۳). افزایش شدت پرتو مادون‌قرمز باعث افزایش شدت خشک‌کردن می‌شود؛ بنابراین زمان خشک‌کردن را کوتاه می‌کند. با این حال، از آن‌جایی که شدت پرتو بالاتر دمای محصول را افزایش می‌دهد، می‌تواند اثر منفی بر کیفیت محصول داشته باشد (۲). داندی (۲۰۱۱) در بررسی روش خشک‌کردن ترکیبی دانه‌های سویا با پرتوهای مادون‌قرمز نزدیک و بسترسیال نشان دادند این روش میزان شکستن و خرد شدن دانه‌ها را کاهش داده و با افزایش توان پرتو مادون‌قرمز، شدت خشک‌کردن افزایش یافت (۱۰). کشاورز و همکاران (۲۰۱۰) نیز در بررسی تأثیر پارامترهای دمای هوای ورودی، سرعت هوای ورودی به سیستم و میزان توان لامپ فرو سرخ بر روی خشک شدن توده‌ای تکه‌های مکعبی‌شکل کدو در یک خشک‌کن مادون‌قرمز-بسترسیال نشان دادند بالاترین میزان از دست‌رفتن رطوبت و کاهش قابل‌ملاحظه در زمان فرآیند در خشک‌کن‌های بسترسیال با منبع حرارتی مادون‌قرمز به‌مراتب بیشتر از خشک‌کن‌های بسترسیالی به‌تنهایی است (۲۰).

هدف این پژوهش، استفاده از سامانه ترکیبی مادون‌قرمز-بسترسیال جهت خشک‌کردن قطعات هویج و بررسی اثر توان‌های مختلف لامپ مادون‌قرمز، دمای هوا و اندازه قطعات روی سینتیک فرآیند و همچنین برازش داده‌های تجربی به‌دست‌آمده با مدل‌های ریاضی موجود است.

یک توری فلزی مشبک، مسدود شده بود تا از خروج نمونه‌ها طی فرآیند خشک کردن، جلوگیری گردد. دو لامپ مادون قرمز هریک با توان ۱۰۰۰ وات به عنوان منبع تابش پرتو مادون قرمز درون محفظه‌هایی در دو سمت لوله پیرکس قرار داشت. کنترل ولتاژ ورودی و تنظیم توان لامپ‌ها با استفاده از یک واریابل صورت می‌گرفت. هوای گرم پس از عبور از محفظه خشک‌کن وارد لوله برگشت‌دهنده می‌شد تا مجدداً وارد دمنده گردد. کلیه لوله‌ها و محل اتصالات به وسیله عایق حرارتی پوشیده شده بود تا از اتلاف انرژی و همچنین نوسانات دمایی ممانعت به عمل آید. جهت کاهش رطوبت نسبی هوا، بخشی از هوای محیط وارد سامانه خشک‌کن می‌شد.

رطوبت (MR) و برازش مدل‌های تجربی با داده‌های آزمایشی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. **خشک کردن:** در این پژوهش جهت خشک کردن قطعات هویج با روش ترکیبی مادون قرمز-بسترسیال، دستگاهی طراحی و ساخته شد (شکل ۱). در این دستگاه، ابتدا هوا از طریق یک دمنده وارد گرماساز الکتریکی شده و در ادامه وارد محفظه خشک‌کن می‌شد. سرعت جریان هوای ورودی از طریق اینورتر کنترل می‌گردید. در محل ورود به محفظه، یک صفحه فلزی مشبک جهت قرارگیری ظرف حاوی نمونه و نیز یک حسگر دمایی نوع K جهت کنترل و تنظیم دمای هوا قرار داشت. داخل محفظه خشک‌کن یک لوله پیرکس با قطر ۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر جاگذاری و انتهای آن توسط



شکل ۱- خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- بسترسیال مورد استفاده در این پژوهش: ۱. لوله‌های انتقال‌دهنده جریان هوا، ۲. دمنده، ۳. گرماساز الکتریکی، ۴. محفظه خشک‌کن، ۵. اینورتر، ۶. حسگر اندازه‌گیری سرعت جریان ورودی، ۷. حسگر اندازه‌گیری دمای هوای ورودی، ۸. صفحات مشبک، ۹. لامپ‌های مادون قرمز.

Figure 1- IR-Fluidized bed dryer used in this study: 1. Air conveying pipeline, 2. Blower, 3. Electric heating unit, 4. Dryer chamber, 5. Inverter, 6. Inlet air velocity Sensor, 7. Inlet air temperature sensor, 8. Mesh plates, 9. Infrared lights.

(۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ وات)، سه سطح دمایی (۵۰، ۶۰، ۷۰ درجه سانتی‌گراد) و دو اندازه نمونه (۰/۵ و ۱

خشک کردن قطعات مکعب‌شکل هویج در قالب طرح آزمایشی فاکتوریل در سه توان لامپ مادون قرمز

برش‌های هویج با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد؛ که در آن M_t : رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه خشک (d.b)، M_e : رطوبت تعادلی نمونه بر پایه خشک (d.b) و M_0 : رطوبت اولیه نمونه (d.b) است. برای زمان‌های طولانی خشک‌کردن، مقدار M_e در مقایسه با مقادیر M_0 و M_t بسیار کوچک می‌باشد. لذا می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک‌شدن را به صورت رابطه ۴ نوشت و برای محاسبه نسبت رطوبت، نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست (۱۱).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad \text{رابطه ۴}$$

مدل‌های سینتیکی موجود، نشان‌دهنده فرآیند انتقال جرم و حرارتی است که در طی خشک‌کردن اتفاق می‌افتد (۲۷). به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک‌شدن قطعات هویج مطابق جدول ۱ از مدل‌های مختلف خشک‌کردن استفاده گردید.

سانتی‌مترمکعب) و در سه تکرار انجام گرفت. خشک‌کردن با بسترسپال (توان صفر) به‌عنوان تیمار کنترل در نظر گرفته شد. به منظور حفظ حالت سیالیت و تعلیق نمونه‌ها در طی فرآیند خشک‌کردن، با توجه به تبخیر رطوبت نمونه‌ها و کاهش وزن آن‌ها، سرعت هوای داغ ورودی طی مدت‌زمان خشک‌کردن، از ۵/۵ تا ۹ متر برثانیه متغیر بود (۷، ۱۸، ۳۸). تغییر وزن نمونه‌ها به‌صورت دستی با قراردادن یک صفحه نازک فلزی زیر ظرف محتوی نمونه و قطع لحظه‌ای جریان هوا، هر ۵ دقیقه یک‌بار با استفاده از ترازوی دیجیتال (با دقت ۰/۰۵ گرم) اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. نمونه‌ها در سه تکرار تا رسیدن به رطوبت ۱۰ درصد (بر پایه مرطوب) خشک شدند. بنابراین برای هر تیمار، منحنی تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان به‌دست آمد (۳۵).

بررسی سینتیک خشک‌کردن: با توجه به داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها و پایش فرآیند، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت (بدون بعد) در طی خشک‌شدن

جدول ۱- مدل‌های ریاضی مورد استفاده جهت توصیف سینتیک خشک‌شدن

Table 1- Mathematic models applied to describe drying kinetics

منابع	معادله	نام مدل	شماره
Reference	Equation	Model	Equation No.
(19)	$MR = \exp(-a.t^b)$	پیج (Page)	1
(36, 34)	$MR = \exp(-a.t)^b$	پیج اصلاح شده (Modified Page)	2
(19)	$MR = a.\exp(-a.t)$	هندرسون و پابیس (Henderson & Pabis)	3
(19)	$MR = a.\exp(-b.t^c) + d.t$	میدیلی (Midilli)	4
(24)	$MR = a.\exp(-b.t) + d$	لگاریتمی (Logarithmic)	5

صورت گرفت. برازش داده‌ها بر روی مدل‌های خشک‌کردن (نسبت رطوبت در برابر زمان) توسط نرم‌افزار Curve Expert (نسخه ۱.۵.۶) انجام شد.

محاسبه میزان انرژی مصرفی: میزان انرژی مصرفی خشک‌کن توسط دستگاه آنالیز توان لوترون (مدل DW-6090A) اندازه‌گیری شد. این دستگاه به‌صورت سری در مسیر جریان الکتریکی ورودی به سامانه

تأثیر متغیرهای مستقل (دمای خشک‌کردن، اندازه قطعات و توان لامپ مادون‌قرمز) بر متغیرهای وابسته با استفاده از طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی و تجزیه واریانس^۱ با نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹) انجام شد. سپس با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن (در سطح معنی‌داری ۵ درصد) گروه‌بندی و مقایسه نتایج

1. GLM

خشک کن قرار گرفته بود.

همان طور که در این جدول مشاهده می شود تغییر دمای هوای ورودی، اندازه قطعات هویج و توان لامپ مادون قرمز اثر معنی داری روی خروج آب از نمونه داشته و با افزایش دمای هوا و توان لامپ و کاهش اندازه قطعات هویج، زمان خشک شدن کاهش یافت. اما اثر متقابل دما × اندازه قطعات × توان لامپ در این رابطه، معنی دار نبود.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل تأثیر دما، اندازه نمونه و توان لامپ مادون قرمز بر زمان خشک شدن قطعات هویج و مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون دانکن ($P < 0/05$) در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تاثیر متغیرها روی زمان خشک شدن قطعات هویج به روش مادون قرمز-بسترسیال

Table 2- Results of analysis of variance on drying time of carrot cubes by IR-FB dryer

P	میانگین مربعات Mean of Squares	مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی Degree of free	منابع تغییرات Source of Variance
0.0001	12129.51389	24259.02778	2	دما (Temperature)
0.0001	7300.34722	7300.34722	1	اندازه قطعات (Size of carrot cubes)
0.0001	2464.23611	7392.70833	3	توان لامپ (Infrared power)
0.0160	119.09722	238.19444	2	دما × اندازه (Temp.* Size)
0.0097	85.06944	510.41667	6	دما × توان لامپ (Temp.* IR power)
0.0126	105.90278	317.70833	3	اندازه × توان لامپ (Size* IR power)
0.93325	7.98611	47.91667	6	دما × اندازه × توان لامپ (Temp.* Size* IR power)
-	26.38889	1266.66667	48	خطا (Error)
-	-	41332.98611	71	کل (Total)

با افزایش ضخامت ماده غذایی، به طور هم زمان کاهش قابلیت انتقال امواج و کاهش قابلیت جذب رخ می دهد و محصولات با ضخامت کم برای فرآوری با پرتو مادون قرمز توصیه شده اند (۱۶). نتایج حاصل از خشک کردن قطعات هویج به روش مادون قرمز-بسترسیال نشان داد که افزایش ضخامت نمونه ها اثر معنی داری ($P < 0/05$) بر مقدار کاهش وزن آن ها طی پرتو دهی دارد و با افزایش ضخامت قطعات هویج، زمان خشک شدن افزایش می یابد.

بررسی سینتیک خشک کردن قطعات هویج به روش مادون قرمز-بسترسیال: نسبت رطوبت (MR) برای توصیف مدل های متفاوت خشک شدن ضروری می باشد. نسبت رطوبت با مدل های متفاوت

تغییر توان لامپ مادون قرمز، اثر معنی داری ($P < 0/05$) بر خروج رطوبت از قطعات هویج داشت و با افزایش توان لامپ، زمان خشک شدن کاهش یافت. بطور مشابه، بایسال و همکاران (۲۰۰۳) مشاهده کردند خشک کردن قطعات مکعب شکل هویج با استفاده از پرتو دهی مادون قرمز، دمای نمونه ها را به طور مستقیم و بدون گرم کردن هوا افزایش داد و علت سرعت بالای خشک شدن اثر گرمایی پرتو مادون قرمز بود (۵). افزایش توان لامپ به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا شده و از سوی دیگر باعث گرم شدن سریع تر محصول و تبخیر بهتر آب و در نهایت کاهش زمان خشک شدن می گردد (۱۳).

نرسد، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود. از آنجایی که استفاده از روش ترکیبی مادون قرمز-بستر سیال، با افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه باعث کوتاه تر شدن زمان فرآیند (به عنوان تابعی از دما، توان لامپ و ضخامت محصول) می شود، بنابراین به کاهش میزان مصرف انرژی کمک می نماید. جدول ۴، مدت زمان فرآیند و میزان انرژی مصرفی محاسبه شده برای هریک از تیمارها را در خشک کردن قطعات هویج به روش مادون قرمز-بستر سیال نشان می دهد. کمترین و بیشترین میزان انرژی مصرفی به ترتیب ۲/۲۸ کیلووات ساعت بر کیلوگرم برای تیمار با اندازه ۰/۵ سانتی متر مکعب، دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و توان ۶۰۰ وات و ۱۲/۶۳ کیلووات ساعت بر کیلوگرم برای تیمار با اندازه ۱ سانتی متر مکعب و دمای ۵۰ درجه سانتی گراد (توان صفر) به دست آمد.

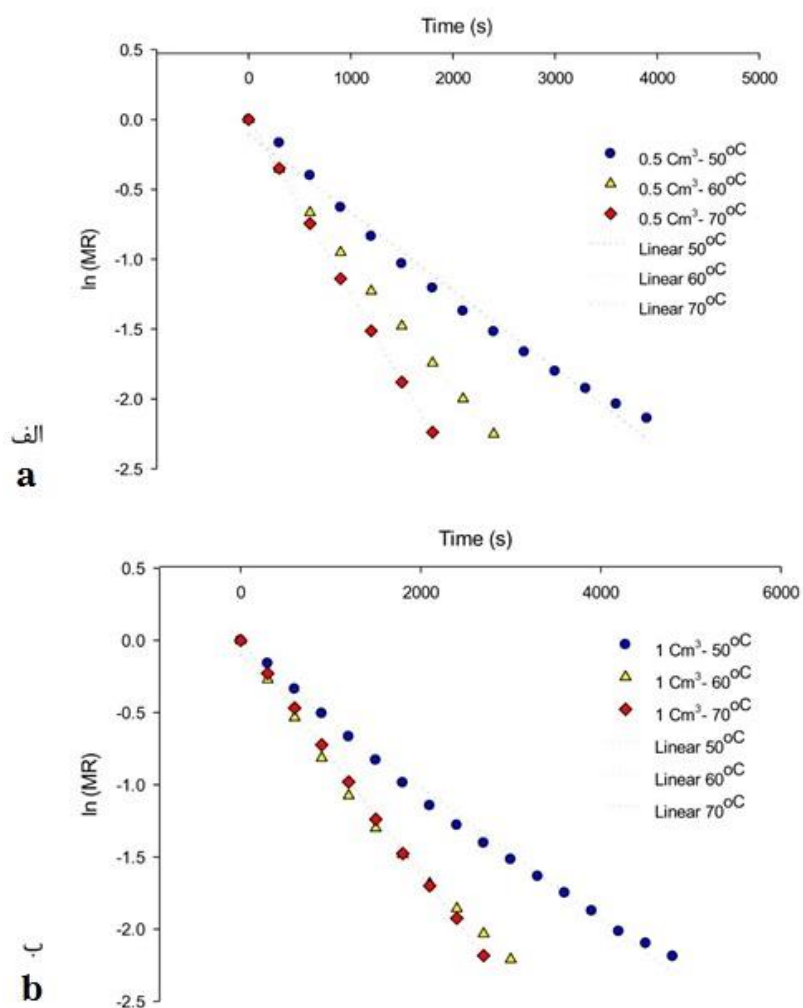
خشک شدن لایه نازک برآزش شد. با در نظر گرفتن بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین میزان خطای استاندارد، مدل پیچ نسبت به سایر مدل ها پیشگویی بهتری از داده های آزمایشی داشته و به خوبی رفتار خشک شدن قطعات هویج با روش مادون قرمز-بستر سیال را توصیف کرد که ضرایب این مدل برای کلیه تیمارها محاسبه و در جدول ۳ نشان داده شده است. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و پیشگویی شده نسبت رطوبت (شکل ۲) بیان کننده همخوانی مناسب داده های آزمایشی با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل بود.

انرژی مصرفی: میزان انرژی مصرفی در هر فرآیند به میزان قابل ملاحظه ای به مدت زمان آن فرآیند بستگی دارد. ایجاد شرایطی که در آن بتوان مدت زمان فرآیند را کاهش داد تا جایی که به کیفیت محصول آسیب

جدول ۳- ضرایب مدل پیچ برای خشک کردن قطعات هویج به روش مادون قرمز-بستر سیال

Table 3- Coefficients of Page model for infrared-fluidized bed drying of carrot cubes

ضریب تبیین (r)	خطای استاندارد (Standard Error)	b	a	توان لامپ مادون قرمز (Infrared power (W)	اندازه قطعات هویج (Size of Carrot cubes (cm ³)	دما (Temperature (°C)
0.999002	0.011899	0.824747	0.057292	0	0.5	50
0.995263	0.027583	0.896031	0.049318	200		
0.994415	0.029987	0.866463	0.065828	400		
0.994402	0.032100	1.005317	0.039022	600		
0.998587	0.013751	0.839586	0.042520	0	1	50
0.998801	0.012506	0.806156	0.050970	200		
0.998169	0.016206	0.851066	0.048734	400		
0.994686	0.030026	1.000181	0.032332	600		
0.999623	0.007703	0.834926	0.069429	0	0.5	60
0.999711	0.006700	1.026304	0.038334	200		
0.999859	0.005001	0.761367	0.120296	400		
0.999977	0.002157	0.886011	0.085875	600		
0.997058	0.021287	0.879101	0.049413	0	1	60
0.999500	0.008600	0.858769	0.055326	200		
0.999690	0.559024	0.789244	0.084232	400		
0.999958	0.613469	0.753244	0.091582	600		
0.999483	0.010124	0.918169	0.071760	0	0.5	70
0.999792	0.006595	0.856413	0.098656	200		
0.9999450	0.612397	0.892041	0.100465	400		
0.9999320	0.612388	1.036167	0.067665	600		
0.999104	0.012756	1.011398	0.35745	0	1	70
0.999262	0.408305	1.073666	0.031869	200		
0.999147	0.500039	1.030314	0.040249	400		
0.99899	0.653218	1.040101	0.046218	600		



شکل ۲- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی (تجربی) و پیشگویی شده نسبت رطوبت برای دماهای مختلف خشک کردن در توان ۶۰۰ وات برای الف- اندازه نمونه 0.5 cm^3 و ب- 1 cm^3 .

Figure 2- Comparison of experimental and predicted moisture ratios of drying in different temperatures with IR power of 600W at carrot cubes sizes of a) 0.5 cm^3 and b) 1 cm^3

مصرف انرژی کاهش یافت. اثر کوتاه شدن مدت زمان فرآیند در دماهای بالاتر، بیشتر از اثر دمای بالای هوای خشک کن است (۲۱).

در پژوهش خانعلی و همکاران (۲۰۱۶) پیرامون خشک کردن برنج سبوس دار به روش بسترسیال، به علت کاهش قابل توجه زمان خشک کردن با افزایش دمای هوای خشک کن از ۶۰ به ۷۰ درجه سانتی گراد،

جدول ۴- اثر تیمارهای مختلف روی مدت زمان خشک شدن قطعات هویج (تا رطوبت ده درصد) به روش مادون قرمز-بسترسیال
Table 4- Effect of different treatments on drying time of carrot cubes (to 10% moisture content) by infrared-fluidized bed dryer

انرژی مصرفی Energy consumption (Kwh/Kg)	مدت زمان (تا رطوبت ده درصد)* Time (Min)	توان لامپ مادون قرمز Infrared power (W)	اندازه قطعات هویج Size of Carrot cubes (cm ³)	دما Temperature (°C)
9.08	90	0		
6.68	80	200	0.5	50
4.61	70	400		
3.14	65	600		
12.63	120	0		
9.65	110	200	1	60
6.67	95	400		
4.21	80	600		
7.13	65	0		
5.07	55	200	0.5	60
3.36	45	400		
2.28	40	600		
9.69	85	0		
7.24	75	200	1	70
4.74	60	400		
3.07	50	600		
5.53	45	0		
3.68	35	200	0.5	70
3.68	30	400		
3.16	30	600		
8.27	65	0		
6.03	55	200	1	70
6.36	50	400		
3.36	45	600		

* مقادیر ارائه شده برای مدت زمان خشک شدن قطعات هویج، میانگین سه تکرار هستند.

نتیجه گیری کلی

۱۲/۶۳ در روش بسترسیال (به تنهایی) به میزان ۲/۲۸ کیلووات ساعت بر کیلوگرم با استفاده از روش ترکیبی مادون قرمز-بسترسیال، تقلیل پیدا کرد. نتایج مدل سازی سینتیک خشک کردن قطعات هویج با استفاده از برازش پنج مدل سینتیک روی داده ها، نشان داد که مدل پیچ برای بررسی نسبت رطوبت مناسب بوده و این مدل در مقایسه با سایر مدل ها، همخوانی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده داشت.

نتایج این پژوهش نشان داد استفاده از سامانه ترکیبی مادون قرمز-بسترسیال، با افزایش سرعت خروج آب از نمونه، مدت زمان فرآیند را به طور قابل توجهی کاهش می دهد و تجزیه و تحلیل داده ها حاکی از آن است که هرسه متغیر (دمای هوا، اندازه قطعات نمونه و توان لامپ مادون قرمز) بر مقدار و سرعت خروج آب از نمونه و در نتیجه زمان فرآیند اثر معنی دار داشتند. به این ترتیب میزان انرژی مصرفی در این روش به شکل چشمگیری کاهش یافته و از

References

1. Abano, E., Ma, H. and Qu, W. 2011. Influence of air temperature on the drying kinetics and quality of tomato slices. *Journal of Food processing and Technology*, 2: 1-9.
2. Abe, T. and Afzal, T. 1997. Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67(4): 289-297.
3. Adonis, M. and Khan, M.T.E. 2004. Combined convective and infrared drying model for food applications. 2. 1049-1052 Vol.2.
4. Afzal, T.M. and Abe, T. 1998. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering*, 37(4): 353-365.
5. Baysal, T. et al. 2003. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *European Food Research and Technology*, 218(1): p. 68-73.
6. Bazyma, L.A. et al. 2006. The investigation of low temperature vacuum drying processes of agricultural materials. *Journal of Food Engineering*. 74(3): p. 410-415.
7. Cárdenas-Bailón, F., Osorio-Revilla, G. and Gallardo-Velázquez, T. 2017. Evaluation of quality parameters of dried carrot cubes in a spout-fluidized-bed dryer with and without draft tube. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(1): p. 245-255.
8. Chandran, A., Rao, S.S. and Varma, Y. 1990. Fluidized bed drying of solids. *AIChE Journal*: (1)36p. 29-38.
9. Das, I., Das, S.K. and Bal, S. 2009. Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying. *Journal of Food Engineering*. 95(1): 166-171.
10. Dondee, S. 2011. Reducing cracking and breakage of soybean grains under combined near-infrared radiation and fluidized-bed drying. *Journal of food engineering*. 104 (No. 1): 6-13-2011 V.104 No.1.
11. Doymaz, I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of food engineering*. 78(4): p. 12.1297-91
12. Doymaz, I. 2015. Infrared Drying Kinetics and Quality Characteristics of Carrot Slices. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39(6): 2738-2745.
13. Doymaz, I. and Pala, M. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*: 60(2): 125-130.
14. Ertekin, C. and Heybeli, N. 2014. Thin-Layer Infrared Drying of Mint Leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(4): 1480-1490.
15. Górnicki, K. and Kaleta, A. 2007. Drying curve modelling of blanched carrot cubes under natural convection condition. *Journal of Food Engineering*. 82(2): p. 160-170.
16. Hebbar, H.U., Vishwanathan, K.H. and Ramesh, M.N. 2004. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*: (4) 65.004p. 557-563.
17. Hebbar, U., Harishchandra Vishwanathan, K. and Raghavarao, K. 2010. Hot Air Assisted Infrared Drying of Vegetables and Its Quality. 16: 381-388.
18. Hu, X. 2016. fluidized Bed Dryinf of Microwave-Assisted Fluidized Bed Drying of Carrot Slices.
19. Kashaninejad, M. et al. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*. 78(1): 98-108.
20. Keshavarz, R. et al. 2010. Experimental survey on bulk drying in a fluidized bed dryer using infrared heating. *Journal of Separation Science and Engineering*. 2(2): 103-110.
21. Khanali, M., Banisharif, A. and Rafiee, S. 2016. Modeling of moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in fluidized bed drying of rough rice. *Heat and Mass Transfer*. 52(11): 2541-2549.
22. Kocabiyik, H. 2010. Combined Infrared and Hot Air Drying, in *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*. CRC Press. p. 101-116.
23. Kocabiyik, H. and Tezer, D. 2009. Drying of carrot slices using infrared radiation. *International Journal of Food*

- Science & Technology. 44(5): p. 953-959.
24. Lee, J.H. and Kim, H.J. 2009. Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices. LWT-Food Science and Technology. 42 (1):180-186.
 25. Mitrevski, V. et al. 2017. Drying Kinetics and Mathematical Modeling of Far-Infrared Vacuum Drying of Some Vegetables and Fruits. Vol. 2. 109-114.
 26. Mongpraneet, S., Abe, T. and Tsurusaki, T. 2002. Far-Infrared Vacuum and Convection Drying of Welsh Onion. Transactions of the ASAE. 45(5): 15-29.
 27. Mulet, A., Berna, A. and Rossello, C. 1989. Drying of carrots. I. Drying models. Drying Technology. 7(3): 537-557.
 28. Pan, Z., Venkitasamy, C. and Li, X. 2016. Infrared Processing of Foods ,in Reference Module in Food Science, Elsevier.
 29. Prakash, S., Jha, S. and Datta, N. 2004. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. Journal of Food Engineering. 62(3): 305-313.
 30. Praveen Kumar, D.G. et al. 2005. Infrared and Hot-Air Drying of Onions. Journal of Food Processing and Preservation. 29(2): 132-150.
 31. Sharma, G.P., Verma, R.C. and Pathare, P.B. 2005. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. Journal of Food Engineering. 67:(3)p. 361-366.
 32. Sivakumar, R. et al. 2016. Fluidized bed drying of some agro products – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 61: 280-301.
 33. Wang, J. and Sheng, K.C. 2004. Modeling of Multi-layer Far-Infrared Dryer. Drying Technology. 22(4): 809-820.
 34. White, G., Ross, I. and Poneleit, C. 1981. Fully-exposed drying of popcorn. Transactions of the ASAE. 24(2): 466-0468.
 35. Yadollahinia, A. and Jahangiri, M. 2009. Shrinkage of potato slice during drying. Journal of Food Engineering. 94(1): 52-58.
 36. Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. Energy. 26(5): 457-465.
 37. Zare, D., Naderi, H. and Ranjbaran, M. 2015. Energy and Quality Attributes of Combined Hot-Air/Infrared Drying of Paddy. Drying Technology. 33(5): 570-582.
 38. Zielinska, M. and Markowski, M. 2007. Drying Behavior of Carrots Dried in a Spout-Fluidized Bed Dryer. Drying Technology. 25(1): 261-270.