



Drying Kinetics and Mathematical Modeling of Orange Slices in Refractance Window Drying System

Behzad Bakhshi¹, Mohamad Reza Bayati^{1*}, Reza Tabatabaekoloor², Abbas Rohani¹, Elham Azarpazhooh³

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Sari, Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

3- Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center.

ARTICLE INFO

Keywords:

Activation energy,
Moisture diffusion,
Color change,
Shrinkage,
Drying,
Refractance window

Received:
May 14, 2025

Revised:
August 23, 2025

Accepted:
September 6, 2025

* Corresponding author:
bayati@um.ac.ir

ABSTRACT

In this study, the drying parameters and kinetics of sliced orange (Thomson variety) were investigated in a refractance window dryer at temperatures (60, 75, and 90 degrees Celsius) and slice thicknesses (4, 6, and 8 mm). Analysis of variance was used to determine the effects of temperature and thickness on the parameters of color change, shrinkage, and resorption intensity. Five mathematical models were selected to describe and compare the drying kinetics of orange slices, and the coefficient of determination (R^2), chi-square (χ^2), and root mean square error (RMSE) were used for evaluation. Also, the moisture transfer from orange slices was described by fitting the Fick diffusion model. The results showed that drying temperature and slice thickness had a significant effect on the drying behavior of orange slices. Drying time decreased with increasing temperature and decreasing thickness. Temperature and thickness had little effect on the total color changes, shrinkage rate, and resorption intensity of dried orange slices. Among the mathematical models, the modified Page model had the best fit with the lowest error and the highest coefficient of determination. The effective diffusion coefficient (D_{eff}) increased with increasing drying temperature and was found to be in the range of 39.6×10^{-10} - 42.5×10^{-10} m²/s. The temperature dependence of the effective diffusion was described by the Arrhenius equation and the activation energy for moisture diffusion in orange slices was determined to be 27.5 kJ/mol.

Introduction

Iran ranks seventh in the world in terms of citrus production. The country's annual citrus production is about six million tons, of which three million tons are oranges. A significant portion of the oranges produced, after consumption as fresh fruit and export, can be used in various processing and complementary industries, including fruit juice and dried fruit. Since fruit drying can be done on a small and home scale, the development of suitable dryers with high energy efficiency is very important. Refractance Window, known as the fourth generation of dryers, is a moisture removal system for producing high-quality dried or concentrated foods. Refractance window dryers can produce dried products with relatively low energy consumption, in a short time, and with minimal thermal damage. In the refracting system, the thermal energy of hot water is transferred to the fruit slices placed on the film through a polymer film. The moisture removal process in this system is fast, under atmospheric pressure, self-regulating, and at a temperature lower than the temperature of the hot water used, so thermal damage to the material being dried is minimized. The resulting water vapor is removed from the dryer chamber by a fan (Ortez-Jeres, 2015). Researchers have used various methods in the field of drying agricultural products and cut fruits. Given the

How to cite:

Bakhshi, B., Bayati, MR., Tabatabaekoloor, R., Rohani, A. and Azarpazhooh, E. (2025). *Drying Kinetics and Mathematical Modeling of Orange Slices in Refractance Window Drying System*. Journal of Agricultural Mechanization, 10 (3):1-15. <https://doi.org/10.22034/jam.2025.67311.132567311.1325>.



extensive research conducted on these methods, this study attempts to address the research conducted on the refractivity window dryer system.

Materials and Methods

Thomson variety of oranges were obtained from orchards in the city of Jooybar, Mazandaran province. First, the oranges were washed in water and after drying, they were sliced into 4, 6, and 8 mm thick slices using a slicer. All samples were weighed before drying. The weight of the samples was measured using a digital scale (AND-EK-600G) with an accuracy of ± 0.01 . A refractance window dryer was used to dry the samples. The refractance window device used in the experiments is located at the Mashhad Agricultural Jihad Research and Development Center, which uses hot water circulation as a heat source with a boiling temperature at atmospheric pressure, which can be changed with the water temperature controller due to the elements inside the tank. Hot water in the hot water bath is circulated through a heating unit to maintain a constant water temperature and increase thermal efficiency. A valve is installed between the hot water bath and the water heating tank to pump water until the water temperature is lower than the desired value. A pump is provided to pump hot water from the hot water tank to the bath. The heat energy from heating the water is transferred to the product through a Mylar polyester plastic sheet. For drying, the predetermined samples are spread on a transparent plastic sheet (Mylar) and its bottom is placed in contact with hot water from a shallow container. The Mylar sheets pass the pure energy from the hot water through conduction and radiation, causing the product to dry. Also, two fans are located at the top of the Mylar sheet to remove the moisture created in the chamber. Orange slices with a thickness of 4 mm were placed in a single layer on the drying chamber tray, and experimental treatments for drying thin slices of apple were performed, including drying temperatures from 30 to 70 degrees Celsius, with an increase of 10 degrees Celsius, and air speeds from 1 to 2 meters per second, with an increase of 0.5 meters per second. After turning on the heat pump dryer, the temperature and air speed were adjusted to the desired treatment, and then the drying process began. Drying continued until the weight of the thin slices of apple was approximately constant, and the collected data were recorded every ten minutes. A factorial experimental design based on a completely randomized design with three replications was used for data analysis.

Results and Discussion

The drying intensity decreased continuously with drying time. As can be seen, increasing the drying temperature resulted in an increase in the drying rate and consequently a decrease in the drying time. With increasing drying temperature and due to the intensification of the heat transfer rate, water molecules moved faster and accelerated the water transfer from the product. The higher drying rate occurred during the initial drying period, which was due to lower external resistance and greater water migration into the product. As the thickness of the samples decreased, the time to reach the end point decreased from 190 minutes for 8 mm thickness to 140 minutes for 4 mm thickness. Also, the moisture removal rate was higher in the initial stage of drying, which then decreased. It is obvious that the time to reach the end point of drying of orange slices changes with the thickness of the sample. This indicates that the thickness of the sample affects the drying time. It can be seen that among these equations, the three mathematical models of modified Page, logarithmic and Medley et al. with a coefficient of determination higher than 0.99 can well describe the law of moisture change. Among them, the modified Page model has the highest R^2 and the lowest χ^2 and RMSE. It can be concluded that the modified Page model is the best model for describing the drying of sliced orange slices in a refractance window dryer. It was found that its range of variation changed from 39.6×10^{-10} to 42.5×10^{-10} m²/s. As expected, the D_{eff} values increased with increasing air temperature during the drying process, which was due to the increase in vapor pressure inside the samples, which led to molecular motion and rapid movement of water at high temperatures. Also, with increasing thickness, the mass transfer rate increased, which led to an increase in the effective diffusion coefficient. The highest and lowest activation energies were 28.38 and 21.94 kJ/mol, respectively, for treatments at 90°C and 8 mm thickness and 60°C and 4 mm thickness.

Conclusion

The use of refractivity window for drying orange slices was tested and the best model was presented using mathematical models to fit the experimental data and predict the drying behavior. Increasing the temperature and decreasing the thickness of the orange slices both accelerate the drying process. Among them, the modified Page model has the highest R^2 and the lowest χ^2 and RMSE. It can be concluded that the modified Page model is the best model to describe the drying of orange slices in the refractivity window dryer. The D_{eff} values increased with increasing drying temperature, which is due to the increase in vapor pressure inside the samples, which leads to rapid movement of water at high temperatures. The activation energy for moisture diffusion was obtained from the Arrhenius equation as 27.5 kJ/mol.

سینتیک خشک کردن و شبیه سازی ریاضی برش های پرتقال در خشک کن رفرکتنس ویندو

بهزاد بخشی^۱، محمدرضا بیاتی^{۱*}، رضا طباطبائی کلور^۲، عباس روحانی^۱، الهام آذرپژوه^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

- ۱- گروه مهندسی بیوسیستم - دانشکده کشاورزی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران
- ۲- گروه مهندسی یوسیستم - دانشکده مهندسی زراعی - دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری - ساری - ایران
- ۳- بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی

* نویسنده مسئول: E-mail: bayati@um.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، از یک سیستم رفرکتنس ویندو برای بررسی سینتیک خشک کردن برش های پرتقال رقم تامسون با سه ضخامت ۴، ۶ و ۸ میلی متر و سه دمای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سلسیوس استفاده شد. آنالیز واریانس برای تعیین اثر دما و ضخامت بر روی پارامترهای تغییر رنگ، چروکیدگی و شدت جذب مجدد استفاده شد. پنج مدل ریاضی برای توصیف و مقایسه سینتیک خشک کردن ورقه های پرتقال انتخاب شد و ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و مجموع خطای میانگین (RMSE) برای ارزیابی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، انتقال رطوبت از ورقه های پرتقال با برازش مدل انتشار فیک توصیف شد. نتایج نشان داد که دمای خشک کنی و ضخامت ورقه ها تاثیر معنی داری بر رفتار خشک کردن برش های پرتقال داشت. زمان خشک کردن با افزایش دما و کاهش ضخامت کاهش یافت. دما و ضخامت تاثیر کمی بر تغییرات کل رنگ، نرخ چروکیدگی و شدت جذب مجدد برش های خشک شده پرتقال داشتند. در میان مدل های ریاضی، مدل پیچ اصلاح شده با کمترین خطا و بیشترین ضریب تعیین بهترین برازش را داشت. ضریب نفوذ موثر (D_{eff}) با افزایش دمای خشک کردن افزایش یافت و در محدوده 10^{-10} تا $6/39 \times 10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه بدست آمد. وابستگی دمای نفوذ موثر با رابطه آرنیوس توصیف شد و انرژی فعال سازی برای نفوذ رطوبت در برش های پرتقال ۲۷/۵ کیلوژول بر مول تعیین شد.

کلمات کلیدی: انرژی فعال سازی، انتشار رطوبت، تغییر رنگ، چروکیدگی، خشک کردن، رفرکتنس ویندو

۱- مقدمه

ایران در رتبه هفتم جهانی از نظر تولید مرکبات قرار دارد. میزان تولید مرکبات در کشور سالانه حدود شش میلیون تن است که از این میزان سه میلیون تن به پرتقال اختصاص دارد (Agricultural statistics of Iran, 2023). پرتقال منبع خوبی از ویتامین ها، مواد مغذی، فیبر، کاروتنوئیدها و پروتئین ها است. پروتئین پرتقال نسبتاً کم است. پروتئین در ۱۰۰ گرم پرتقال بدون پوست، حدود ۰/۹ گرم می باشد (Richa et al. 2023).

به دلیل فولید زیادی که این میوه برای سلامتی دارد مصرف خارج از فصل آن به صورت ورقه های خشک شده چپس مورد توجه قرار گرفته است. خشک کردن میوه ها با کاهش فعالیت آبی و افزایش پایداری فیزیکی شیمیایی و میکروبیولوژیکی موجب افزایش عمر ماندگاری آنها می شود (Li et al., 2019).

خشک کردن میوه ها همواره یک کار چالش برانگیز بوده است. در روش های متداول خشک کردن با نور خورشید یا هوای گرم به دلیل قرار گرفتن محصول در معرض دمای بالا بر روی طعم، رنگ، کیفیت غذایی و حفظ ترکیبات فعال زیستی تأثیر منفی می گذارد. میوه ها منابع اصلی ویتامین ها و مواد معدنی هستند، این ویتامین ها و مواد معدنی به دلیل قرار گرفتن در معرض دمای بالا در طی فرآیندهای خشک کردن معمولی در برابر اکسیداسیون آسیب پذیر هستند (Vishnuvardhan & Chandramohan, 2021).

علاوه بر این، خشک کردن یک فرآیند انرژی بر است و با کمبود و افزایش قیمت سوخت، صرفه جویی در انرژی اهمیت زیادی دارد. از این رو، در یک سیستم خشک کن مناسب انتظار می رود که هم بهره وری انرژی و هم کیفیت محصول بالا باشد.

رفرکتنس ویندو که به عنوان نسل چهارم خشک کن ها شناخته می شود یک سیستم حذف رطوبت، جهت تولید مواد غذایی خشک یا تغلیظ شده با کیفیت بالا می باشد. خشک کن رفرکتنس ویندو می تواند با صرف انرژی نسبتاً پایین و در مدت زمان کوتاه و با حداقل صدمه حرارتی محصول خشک شده تولید نماید. در سیستم رفرکتنس انرژی حرارتی آب داغ به واسطه یک فیلم پلیمری به ورقه های میوه قرار گرفته بر روی فیلم منتقل می شود. فرایند حذف رطوبت در این سیستم سریع، تحت فشار اتمسفری و به صورت خود تنظیم شونده و در دمایی پایین تر از دمای آب داغ مصرفی انجام می شود، بنابراین صدمه حرارتی به ماده خشک شونده به حداقل می رسد. بخار آب حاصل توسط یک فن از محفظه خشک کن خارج می شود (Ortez-Jeres, 2015). محققان در زمینه خشک کردن محصولات کشاورزی و میوه های برش خورده از روش های مختلفی استفاده کرده اند. با توجه به گسترده گی تحقیقات انجام شده در

خصوص این روش ها، در این پژوهش سعی می شود به تحقیقات انجام شده بر روی سیستم خشک کن رفرکتنس ویندو پرداخته شود.

در تحقیقی یک سیستم ناپیوسته رفرکتنس ویندو برقی، مجهز به سیستم های کنترل کننده دمای آب، نازل پخش کننده مواد و سیستم اندازه گیری مصرف برق طراحی و ساخته شد و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. نمونه های مواد غذایی شامل پوره هویج، ژل آلوه ورا، سس کچاپ و آب گوجه فرنگی خشک شده توسط این سیستم با نمونه های خشک شده توسط خشک کن انجمادی آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج بیانگر پایین تر بودن رطوبت نمونه های خشک شده توسط سیستم رفرکتنس ویندو و برابری خصوصیات رنگ سنجی و میزان اسید آسکوربیک محصولات خشک شده توسط این دو نوع خشک کن با یکدیگر بود؛ در حالی که مدت زمان فرایند، انرژی مصرفی و در نتیجه اثر نامطلوب محیط زیستی در سیستم رفرکتنس ویندو بسیار کم تر بود (Baeghbali & Niakousari, 2016).

در پژوهش دیگر سینتیک خشک شدن و خواص فیزیکی برش های گوجه فرنگی خشک شده با استفاده از روش خشک کردن رفرکتنس ویندو با روش های ماکروویو، هوای داغ و روش آفتابی مقایسه شد. نتایج نشان داد سرعت خشک شدن گوجه فرنگی ها ابتدا در روش ماکروویو و متعاقب آن در روش رفرکتنس ویندو بیش تر از هوای داغ و روش آفتابی بود. در منحنی های خشک شدن در روش های رفرکتنس ویندو و ماکروویو، دوره خشک کردن ثابت مشاهده نشد. کم ترین و بیش ترین مقدار چروکیدگی به ترتیب مربوط به نمونه های خشک شده با روش رفرکتنس ویندو و هوای داغ بود. با توجه به ارزیابی حسی رنگ، نمونه های خشک شده با روش رفرکتنس ویندو به طور معنی داری بیش ترین امتیاز رنگ و در روش ماکروویو کم ترین امتیاز رنگ را کسب کردند. بنابراین، نتیجه گیری می شود که از روش رفرکتنس ویندو می توان به عنوان یک جایگزین مناسب برای خشک کردن برش های گوجه فرنگی در هوای داغ و ماکروویو استفاده نمود (Zomorodi, 2019).

در تحقیقی برش های پیاز به سه روش خشک کن انجمادی، هوای گرم و رفرکتنس ویندو در دو دمای ۵۷ و ۹۰ درجه سلسیوس خشک شدند. نرخ مصرف انرژی در سه روش خشک کن مورد بررسی قرار گرفت و به صورت نمودار رسم گردید، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی برش های پیاز نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سینتیک خشک کردن در دو روش خشک کن رفرکتنس ویندو و هوای گرم تنها در ناحیه نزولی انجام می شود، همچنین پیازهای خشک شده توسط رفرکتنس ویندو نیز ظرفیت آنتی اکسیدانی مناسب مشابه خشک کردن انجمادی و بالاتر از هوای گرم را از خود نشان دادند. رفرکتنس ویندو یک تکنیک نسبتاً ساده و ارزان است که به دلیل زمان کوتاه خشک کردن، مصرف انرژی کم تر یک روش نوید بخش در

در پژوهشی خشک کردن میوه‌ها و سبزی‌ها به روش رفراکتانس ویندو با فرآیندهای مختلف خشک کردن مقایسه شد. یافته‌ها نشان داد که خشک شدن رفراکتانس ویندو تحت تأثیر ضخامت پوره یا برش‌ها و درجه حرارت خشک شدن قرار دارد، زیرا نمونه‌های ضخیم به زمان خشک شدن بیشتری نیاز دارند. تغییراتی در پارامترهای رنگ و ضریب انتشار مؤثرتر ایجاد می‌شود. خشک کردن با روش رفراکتانس ویندو از ماندگاری بیش‌تر عناصر غذایی برخوردار بوده و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است. نمونه‌های خشک شده رفراکتانس ویندو در مقایسه با سایر روش‌های خشک کردن سنتی از نظر رنگ و کیفیت بافت بهتر بودند (Shende & Datta, 2019).

تحقیقی با هدف کشف مزایای خشک کردن برش سیب با استفاده از روش رفراکتانس ویندو با و بدون پیش تیمار به عنوان پیش تیمار و در مقایسه با خشک کردن معمول در هوای گرم با توجه به ویژگی‌های کیفیت مانند رنگ و بافت و با استفاده از محلول ساکارز (۴۵ بریکس) صورت گرفت. برش‌های سیب (با و بدون پیش تیمار) با استفاده از روش رفراکتانس ویندو در ۷۵، ۵۵ و ۹۵ درجه سلسیوس خشک شده و در مقایسه با خشک کردن معمول در هوای گرم در ۵۵ درجه سلسیوس به عنوان شاهد مقایسه گردید. نتایج نشان داد که خشک کردن با استفاده از خشک کن رفراکتانس ویندو هم با و بدون پیش تیمار در دمای ۹۵ درجه سلسیوس محصول خشک شده با کیفیت خشک کردن در هوای گرم معمولی در ۵۵ درجه سلسیوس می‌دهد. همچنین این روش زمان خشک کردن را نسبت به روش دیگر کاهش می‌دهد. علاوه بر این، روند خشک کردن با استفاده از رفراکتانس ویندو رفتار انتشار غیرعادی را در برش‌های سیب با $\alpha > 1$ (ضریب انتشار حرارتی بزرگ‌تر از یک) ارائه می‌دهد (Hernández et al., 2020).

در مطالعه‌ای، به روش رفراکتانس ویندو در حالت ایستایی در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به خشک کردن محصول تفاله گلدنبری^۲ پرداخته شد. زمان خشک کردن ۱۸۰ دقیقه به طول انجامید. چندین ویژگی کیفی ارزیابی و با محصولات حاصل از خشک شدن انجمادی، خشک شدن همرفتی و خشک شدن اشعه مادون قرمز مقایسه شد. مشخص شد که روش رفراکتانس ویندو حتی در مدت زمان خشک شدن طولانی مدت محصولی با کیفیت بالا تولید می‌کند که از بسیاری جهات با محصولات خشک شده به روش خشک کن انجمادی قابل مقایسه است. محتوای فنلی کل تفاوت معنی‌داری نداشت، درحالی‌که کل فلاونوئید و کل کاروتنوئید فقط کمی پایین‌تر بود. نمونه‌های روش رفراکتانس ویندو نسبت به محصول خشک شده انجمادی، رنگی نزدیک به نمونه تازه را حفظ کردند. پروفایل‌های اسیدآمینو نمونه‌های روش رفراکتانس ویندو و خشک کردن انجمادی مشابه بودند (Puentes et al., 2020).

خشک کردن پیاز است که کیفیت مناسبی از خشک کردن پیاز را در مقایسه با سایر روش‌های خشک کردن نشان می‌دهد (Azizi, 2014).

در پژوهشی خشک کردن انبه به روش رفراکتانس ویندو بررسی شد. تأثیر ضخامت قالب‌های خمیر انبه (۲، ۳ و ۴ میلی‌متر) و درجه حرارت خشک شدن (۸۵، ۹۰ و ۹۵ درجه سلسیوس) بر فاکتورهای مدت‌زمان خشک کردن، اسید اسکوربیک، محتوای فنلی کل و سختی بافت انبه خشک شده مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که خشک شدن انبه به ضخامت ۲ میلی‌متر کوتاه‌ترین زمان خشک شدن را به خود اختصاص داد، اما بهینه‌ترین اسید اسکوربیک و محتوای فنلی کل در در ضخامت ۳ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر تعیین شد. سختی بافت انبه خشک شده روش رفراکتانس ویندو در محدوده جویدنی ۳۳/۵ الی ۶۲/۳ نیوتن تعیین شد. نمونه بهینه انبه خشک شده با سیستم رفراکتانس ویندو، در دمای ۹۵ درجه سلسیوس با ضخامت ۲/۴۹ میلی‌متر تعیین گردید. مواد مغذی بیش‌تری در لایه زیر پوست انبه انبه حفظ شد و همچنین ریزساختار پودر انبه به صورت صاف و پوسته با ضخامت یکنواخت ذرات پودر با فرآیند خشک کردن روش رفراکتانس ویندو در مقایسه با خشک شدن سینی و فر در دمای خشک شدن ۹۵ درجه سلسیوس و ضخامت تفاله انبه ۲/۵ میلی‌متر مشاهده شد (Shende & Datta, 2020).

در پژوهشی به وسیله خشک کن رفراکتانس ویندو خشک کردن چغندر با ضخامت ۱ و ۵ میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. رنگ، بافت، محتوای کل فنل، محتوای فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی چغندر با روش خشک کردن آون، رفراکتانس ویندو و روش ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین نتایج از دست دادن آب و افزایش مواد جامد با محلول ساکارز ۶۵٪ در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به دست آمد. روش آون تا حدی محتوای آب نمونه‌ها را کاهش داد و باعث کاهش زمان خشک شدن با رفراکتانس ویندو در ۸۵ درجه سلسیوس شد. با این حال، حفظ کیفیت‌هایی مانند محتوای کل فنل، محتوای فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در چغندر با خشک شدن ترکیبی توسط آون-رفراکتانس ویندو در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تحت شرایط ۶۵٪ محلول ساکارز به دست آمد (Calderón-Chiu, et al., 2020).

پژوهشی با هدف بررسی اثر دما، ضخامت خشک شدن، شرایط فرآیند نانو امولسیون و فرمولاسیون امولسیون بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آووکادو انجام شد. نتایج نشان داد که پوسته‌های آووکادو از نظر شاخص‌های فیزیکی، رطوبتی در محدوده ۱/۴ تا ۵/۶ درصد بودند و فعالیت آبی مطلوبی در بازه ۰/۲۶ تا ۰/۵۸ داشتند. این ویژگی‌ها تحت تأثیر ریزساختار و کاهش پیچیدگی هندسی^۱ با افزایش دمای خشک کردن و همچنین بهبود شاخص رفراکتانس ویندو حاصل شدند (Hernández Carrión et al., 2021).

² Goldenberry¹Fractal dimension

۲-۲- خشک کن رفركتنس ويندو

برای خشک کردن نمونه ها از دستگاه رفركتنس ويندو موجود در مركز تحقيقات و آموزش كشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی استفاده شد كه از چرخش آب داغ به عنوان منبع حرارتی با دمای جوش در فشار اتمسفر استفاده می كند كه با وجود المنت های داخل مخزن دمای آب با كنترلر دستگاه قابل تغییر می باشد. آب گرم در حمام آب گرم از طریق واحد گرمایش به گردش در می آید تا دمای ثلث آب حفظ شود و رلندمان حرارتی افزایش یابد. دریچه ای بین حمام آب گرم و مخزن گرمایش آب تعبیه شده است تا زمانی كه دمای آب كم تر از مقدار مورد نظر باشد، آب را پمپاژ می كند. پمپی برای پمپاژ آب گرم از مخزن آب گرم به حمام در نظر گرفته شده است. انرژی گرمایی حاصل از گرم شدن آب، از طریق یک ورق پلاستیکی مایلار از جنس پلی استر به محصول منتقل می شود. جهت خشک شدن، نمونه های از پیش تعیین شده روی صفحه پلاستیکی شفاف (مایلار) پهن شده و قسمت زیرین آن در تماس با آب داغ حاصل از یک ظرف كم عمق قرار می گیرد. ورق های مایلار انرژی خالص رسیده از آب گرم را از طریق هدایتی و تابش عبور می دهند و باعث خشک شدن محصول می شود و همچنین در قسمت بالای ورق مایلار دو فن جهت خروج رطوبت ایجاد شده در محفظه، قرار گرفته است. نمایش تصویری سیستم خشک كن رفركتنس ويندو به همراه اجزاء در شكل ۱ نشان داده شده است.

۲-۳- روش خشک کردن و شبیه سازی ریاضی

برش ها با ضخامت ۴، ۶ و ۸ میلی متر به طور جداگانه روی سینی محفظه خشک كن به صورت یک لایه قرار گرفتند. عمل خشک کردن در سه دمای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سلسیوس انجام شد. خشک شدن تا زمان ثابت شدن تقریبی وزن ورقه های نازك پرتقال ادامه داشت. نمونه ها در طول خشک شدن در هر ده دقیقه توزین شدند.

در اكثر موارد، سینتیک خشک کردن بر مبنای نسبت رطوبت گزارش شده است. نسبت رطوبت (MR) ورقه های پرتقال در حین خشک شدن با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد:

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

كه در آن M_t و M_0 میزان رطوبت در زمان t و مقدار اولیه بر پایه خشک است M_e . مقدار رطوبت تعادلی است، كه در مقایسه با M_t و M_0 نسبتاً كوچك است. بنابراین MR می تواند به $MR = M_t/M_0$ ساده شود (Ayub Hussain et al., 2013).

در پژوهشی با استفاده خشک كن رفركتنس ويندو اقدام به خشک کردن محصول سیب صورت گرفت. نتایج نشان داد محصول خشک شده با روش رفركتنس ويندو، یک ریزساختر همگن و خواص مکانیکی خوب ارائه می دهد. خشک کردن به روش رفركتنس ويندو به عنوان یک روش مناسب و كم هزینه برای تولید اسلایس خوراکی، تولید محصولات با مشخصات فنی مناسب و ارزش غذایی بالا مشخص شد. محصولات خشک شده آن می تواند به طور مستقیم مصرف شود و یا به عنوان مواد اولیه در تولید محصولات غذایی استفاده شود (Nascimento et al., 2020).

مطالعه ای با هدف بررسی تأثیر درجه حرارت خشک کردن، تأثیر اشعه مادون قرمز و ضخامت اسلایس در طول خشک شدن پوره میوه فیسالیس پرو وینا^۱ یا گیلان زمینی (از خانواده بری ها) با استفاده از روش رفركتنس ويندو انجام گردید. برای این منظور، از یک خشک كن رفركتنس ويندو در دماهای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۰/۱۹، ۰/۲۵ و ۰/۳۰ میلی متر استفاده شد. نتایج نشان داد خشک کردن پوره این میوه با استفاده از خشک کردن رفركتنس ويندو و به كمك اشعه مادون قرمز به طور مؤثر روند خشک کردن را تسریع می كند كه باعث کاهش زمان خشک شدن حدود ۶۰٪ می شود. بنابراین، فرایند خشک كنی در رفركتنس ويندو به شدت تحت تأثیر درجه حرارت و قدرت مادون قرمز اعمال شده و کمی تحت تأثیر ضخامت قرار دارد (Puente-Díaz et al., 2020).

در مجموع بررسی منابع نشان داد كه روش رفركتنس ويندو دارای مزیت های خوبی در مقایسه با دیگر روش های خشک کردن است و گزارشی مبنی بر استفاده از این روش برای خشک کردن محصولات پربابی مانند مرکبات ارائه نشده است. بنابراین در این تحقیق از رفركتنس ويندو برای خشک کردن برش های پرتقال استفاده شد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- آماده سازی نمونه ها

پرتقال رقم تامسون از باغ های شهر جویبار تهیه شد. ابتدا پرتقال ها در آب شسته شده و بعد از خشک کردن توسط یک ورقه ساز به ضخامت های ۴، ۶ و ۸ میلی متر برش داده شد. کلیه نمونه ها قبل از خشک کردن توسط یک ترازوی دیجیتالی (AND-EK-600G) با دقت ۰/۰۱ ± توزین شدند.

¹Physalis peruviana L.

شدن است. برای دوره‌های طولانی خشک شدن، معادله بالا را می‌توان بیش‌تر ساده کرد و به صورت لگاریتمی با رابطه ۷ بیان نمود:

$$\ln MR = \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \right] - \left[\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \right] t \quad (7)$$

D_{eff} با استفاده از روش شیب برآورد شد. از منحنی‌های خشک کردن لگاریتمی، میانگین D_{eff} را می‌توان در دماهای مختلف به دست آورد.

۵-۲- محاسبه انرژی فعال سازی

وابستگی دمایی ضریب نفوذ موثر را می‌توان با معادله آرنیوس توصیف کرد (رابطه ۸) (Mohamadi et al., 2019).

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right) \quad (8)$$

که در آن D_0 ضریب پیش‌نمایی معادله آرنیوس (m^2/s)؛ E_a انرژی فعال سازی (kJ/mol)؛ T دمای هوای خشک شدن ($^{\circ}C$) و R ثابت گاز جهانی ($8.314 \times 10^{-3} kJ mol^{-1} K^{-1}$) است. معادله ۸ را می‌توان به فرم رابطه ۹ بازآرایی کرد:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R(T + 273.15)} \quad (9)$$

نمودار $\ln(D_{eff})$ به عنوان تابعی از متقابل مطلق دمای $(1/(T + 273.15))$ یک خط مستقیم با شیب برابر با $(-E_a/R)$ ، که پارامترهای E_a را می‌توان از آن تخمین زد.

۶-۲- تغییرات رنگ (ΔE)

مقادیر رنگ هر نمونه با استفاده از یک رنگ سنج هانتربل اندازه‌گیری شد. تغییرات در هر کدام از پارامترهای رنگ از طریق رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ محاسبه شد:

$$\Delta L = L^* - L_0^*, \quad \Delta a = a^* - a_0^*, \quad \Delta b = b^* - b_0^* \quad (10)$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (11)$$

۷-۲- نرخ چروکیدگی (SR)

تغییرات حجم در اثر از دست دادن رطوبت در محیط خشک‌کن را چروکیدگی می‌نامند. روش جایگزینی جامد برای ارزیابی نرخ چروکیدگی ورقه‌های پرتقال در خشک کن پمپ حرارتی استفاده شد و به صورت درصدی از حجم نمونه در مقایسه با حجم اولیه بیان شد (رابطه ۱۲) (Shi et al., 2011).

نرخ خشک شدن برش‌های پرتقال در طول آزمایش‌های خشک کردن با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$DR = -\frac{dM_d}{dt} = -\frac{M_{d,i+1} - M_{d,i}}{t_{i+1} - t_i} \quad (2)$$

که در آن M_d مقدار رطوبت (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک)، $M_{d,i}$ رطوبت در زمان i ، $M_{d,i+1}$ رطوبت در زمان t_{i+1} کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک و t زمان خشک شدن بر حسب ساعت است. منحنی‌های خشک کردن بر روی پنج مدل که به طور گسترده در اکثر مواد آلی و بیولوژیکی استفاده می‌شود برازش شد. مدل‌های انتخاب شده شامل نیوتن، پیچ اصلاح شده، هندرسون و پایس، لگاریتمی و میدیلی و همکاران می‌باشد (جدول ۱). تجزیه و تحلیل رگرسیون مدل‌های خطی و غیر خطی با استفاده از نرم افزار آماری SPSS انجام شد. برای برآورد ضرایب مدل‌های داده شده برازش پارامترهای آماری مربوطه، مانند ضریب تعیین R^2 ، مربع کای کاهش یافته (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های تجربی و پیش بینی شده توسط محاسبات مورد آزمایش قرار گرفت. مقادیر R^2 بالاتر و مقادیر کمتر χ^2 و RMSE نشان دهنده برازش مناسب‌تر این پارامترها است (رابطه‌های ۳، ۴ و ۵).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})(MR_{pre,i} - \overline{MR_{pre}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR_{pre}})^2}} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

۴-۲- تعیین نفوذ رطوبت موثر

خشک شدن عمدتاً در دوره نزولی رخ می‌دهد و انتقال رطوبت در طول خشک شدن مواد جامد با انتشار داخلی کنترل می‌شود. نفوذ رطوبت موثر در فرآیندهای خشک کردن مواد غذایی و مدل‌سازی سایر مواد مهم است و تابعی از دما و رطوبت است. ضریب نفوذ موثر ورقه‌های پرتقال در طول خشک شدن با استفاده از مدل انتشار فیک ساده شده تفسیر می‌شود. حل سری دوم قانون فیک در حالت کروی، با مفروضات مهاجرت رطوبت از طریق انتشار، چروکیدگی ناچیز، ضرایب انتشار ثابت و دما هماهنگ است که به صورت رابطه ۶ آورده شده است (Chapchaimoh et al., 2016).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (6)$$

که در آن D_{eff} ضریب نفوذ موثر (m^2/s) و L ضریب نفوذ موثر است. ضخامت نمونه‌ها (m)، n عدد صحیح مثبت و t زمان خشک

۹-۲- روش های آماری

آنالیز واریانس (ANOVA) برای تعیین اثر دما و ضخامت بر روی پارامترهای تغییر رطوبت، چروکیدگی و تغییر رنگ استفاده شد. تست دانکن در سطح احتمال ۹۵ درصد ($P < 0.05$) برای تعیین تفاوت معنی داری بین تیمارها بر اساس آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت. از نرم افزار SPSS (version 22.0.0, IBM Institute Inc, USA) برای تحلیل داده ها استفاده شد و مقادیر به صورت میانگین گزارش شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده های مربوط به پارامترهای خشک کردن از جمله چروکیدگی، بازجذب، تغییرات رنگ، ضریب انتشار رطوبت و انرژی فعال سازی در جدول ۲ نشان داده شده است. همان طوری که از جدول ۲ مشاهده می شود تاثیر ضخامت بر چروکیدگی و تغییر رنگ معنی دار نمی باشد.

$$S_R/\% = \frac{(V_2 - V_1) - (V_4 - V_3)}{V_2 - V_1} \times 100 \quad (12)$$

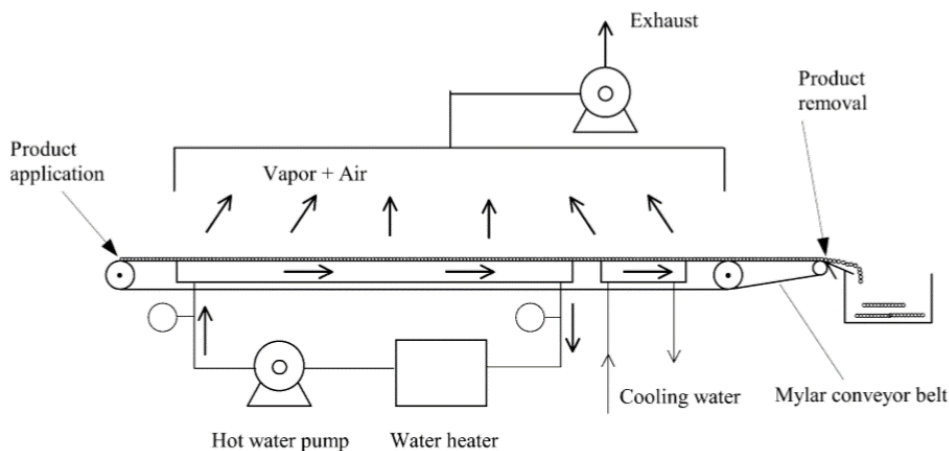
که در آن V_1 و V_2 به ترتیب حجم شن کوارتز و نمونه ها قبل و بعد از خشک شدن؛ V_3 و V_4 حجم کل کوارتز و نمونه ها قبل و بعد از خشک شدن است. مقادیر متوسط S_R نمونه ها در سه تکرار ثبت شدند.

۸-۲- نرخ بازجذب (R_R)

ظرفیت بازجذب با استفاده از نرخ جذب رطوبت بیان می شود که با نسبت وزن نمونه بازجذب شده (W_R) به وزن نمونه خشک (W_D) بیان شد (رابطه ۱۳) (Jafarian et al., 2017).

$$R_R = \frac{W_R}{W_D} \quad (13)$$

نمونه های خشک شده در آب مقطر با دمای ۴۵ درجه سلسیوس غوطه ور می شوند و بعد از یک ساعت بیرون آورده شده و آب اضافی حذف و تغییرات وزن ثبت شد. تیمارها در سه تکرار انجام شدند.



شکل ۱- نمایی از خشک کردن برش های پرتقال در دستگاه رفراکتانس ویندو

Fig. 1. A view of orange slices drying in a refractance window dryer.

جدول ۱- مدل های ریاضی خشک کردن به روش لایه نازک

Table 1. Mathematical models of thin layer drying

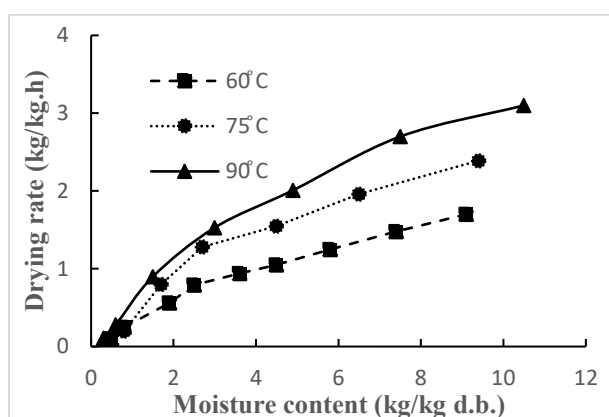
شماره	مدل	معادله	منبع
No.	Model	Equation	Reference
1	Newton	$MR=\exp(-kt)$	Meng et al. (2023)
2	Modified Page	$MR=\exp(-kt)^n$	Shi et al. (2013)
3	Henderson & Pabis	$MR=a\exp(-kt)$	Henderson and Pabis (1961)
4	Logarithmic	$MR=a\exp(-kt)+c$	Togrul and Pehlivan (2002)
5	Middilli et al.	$MR=a\exp(-ktn)+bt$	Midilli et al (2002)

جدول ۲- تجزیه واریانس متغیرهای دما و ضخامت ورقه‌های پرتقال برای پارامترهای مختلف خشک کردن به روش رفراکتانس ویندو

Table 2. Analysis of variance of temperature and orange slice thickness for different refractance window drying parameters

متغیر	درجه آزادی	چروکیدگی	تغییر رنگ	بازجذب	ضریب انتشار رطوبت	انرژی فعال‌سازی	Variable
	df	Shrinkage	Color change	Reabsorption	Moisture diffusion coefficient	Activation energy	
دما	2	145.4 **	237.2 **	157.6 **	264.8 **	89.4 **	Temperature(A)
ضخامت	2	2.3 ns	6.8 ns	117.2 **	198.7 **	67.2 **	Thickness(B)
دما×ضخامت	4	88.9 **	124.2 **	37.4 **	107.3 **	41.6 **	A × B

** معنی دار در سطح احتمال ۱٪ و ns غیر معنی دار بودن را نشان می‌دهد



شکل ۲- نمودار نرخ خشک کردن در مقابل رطوبت ورقه‌های پرتقال در دماهای مختلف (ضخامت ۶ میلی‌متر)

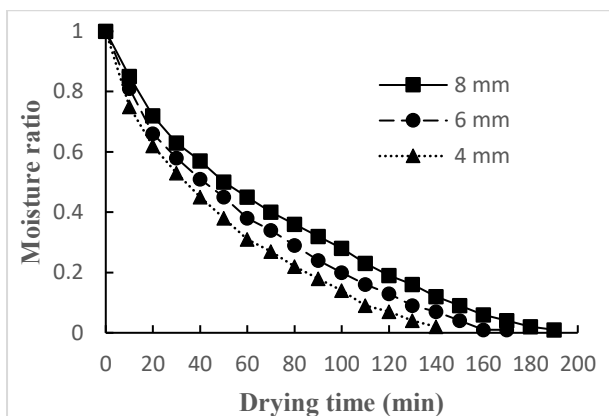
Fig. 2. Drying rate vs. moisture content of orange slices at different temperatures (Thickness 6 mm)

شکل ۳ منحنی خشک شدن را در دماهای مختلف نمونه نشان می‌دهد. دما موجب گردید که سرعت خروج رطوبت از محصول افزایش یافته، سرعت خشک شدن تشدید شود و تغییرات نسبت رطوبت محصول در واحد زمان دارای روند کاهشی قابل توجهی باشد. همانطور که انتظار می‌رفت، رطوبت به طور مداوم با زمان خشک شدن کاهش یافت. بدیهی است که دمای خشک شدن نقش مهمی در کل فرآیند خشک کردن دارد. همانطور که مشاهده می‌شود، زمان خشک شدن با افزایش دما از ۶۵ به ۹۰ درجه سلسیوس به طور چشمگیری کاهش یافت. با بالا رفتن دمای خشک کردن گرادیان حرارتی در داخل جسم افزایش می‌یابد و در نتیجه سرعت تبخیر رطوبت محصول بیش‌تر می‌شود. برای رسیدن به نسبت رطوبت ۱/۱، زمان لازم خشک شدن با افزایش دما از ۶۰ به ۷۵ درجه سلسیوس حدود ۱۷٪ درصد کاهش یافت. با افزایش دما به ۹۰ درجه

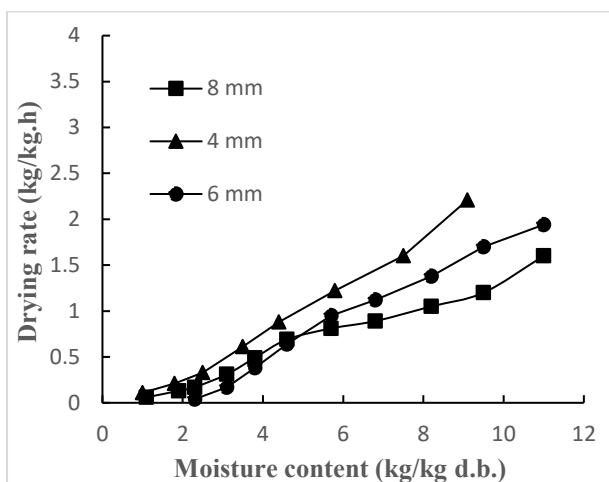
۳-۱- بررسی سینتیک خشک شدن

۳-۱-۱- تاثیر دمای هوا

شکل ۲ تغییرات سرعت خشک شدن را به عنوان تابعی از میزان رطوبت بر مبنای خشک در دماهای مختلف و ضخامت ۶ میلی‌متر متر بر ثانیه نشان می‌دهد. واضح است که شدت خشک کردن به طور پیوسته با زمان خشک کردن کاهش یافت. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش دمای خشک کردن موجب افزایش در نرخ خشک کردن و در نتیجه کاهش زمان خشک کردن شد. با افزایش دمای خشک کردن و در اثر تشدید سرعت انتقال حرارت، مولکول‌های آب سریع‌تر حرکت کرده و موجب سرعت بخشیدن به انتقال آب از داخل محصول می‌شود. نرخ خشک شدن بیش‌تر در طول دوره اولیه خشک شدن ایجاد شد که به دلیل مقاومت خارجی کم‌تر و مهاجرت بیش‌تر آب به داخل می‌باشد. با این حال، نرخ خشک شدن کم‌تر در آخرین مراحل خشک کردن مشاهده شد که ممکن است به انتشار رطوبت بسیار کم در طول دوره خشک شدن نسبت داده شود. عمدتاً، فرآیند خشک کردن کلی در دوره نزولی اتفاق می‌افتد، که نشان می‌دهد نرخ خشک شدن بر اساس فرآیند کنترل انتقال جرم با پدیده انتشار داخلی کنترل می‌شود (Mohammadi et al., 2019). نتایج قابل مقایسه برای محصولات کشاورزی مختلف گزارش شده است (Meng et al., 2023; Kashaninejad et al., 2007; Subrahmanyam et al., 2024).



شکل ۴- نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک کردن برش‌های پرتقال در ضخامت‌های مختلف ورقه‌ها (دمای ۷۵ درجه سلسیوس)
Fig. 4. Moisture ratio vs. drying time of orange slices at different slice thickness (Temperature 75°C)

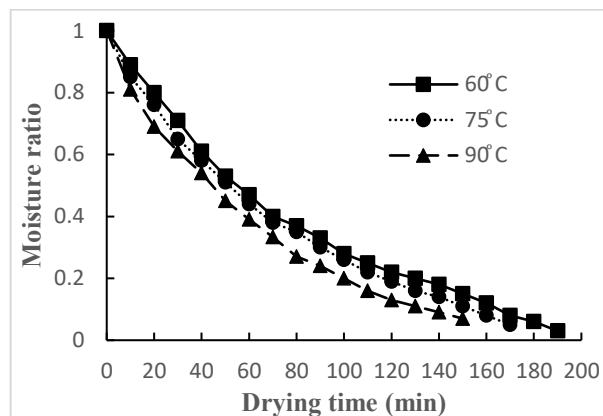


شکل ۵- نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک کردن برش‌های پرتقال در ضخامت‌های مختلف (دمای ۷۵ درجه سلسیوس)
Fig. 5. Drying rate vs. moisture content of orange slices at different slice thickness (Temperature 75°C)

شکل ۵ تغییرات نرخ خشک کردن را به عنوان تابعی از رطوبت نشان می‌دهد. مطابق شکل، سرعت خشک شدن با کاهش ضخامت ورقه افزایش می‌یابد. می‌توان گفت که ضخامت‌های کم‌تر، نرخ تبخیر آب بیشتری را در سطح برش‌های پرتقال به همراه دارد. در مرحله اولیه خشک کردن، رطوبت پایه بر مبنای خشک زیاد است و با تغییر ضخامت سرعت انتقال رطوبت از سطح محصول و در نتیجه تبخیر آب سریع‌تر شده و در نتیجه سرعت خشک شدن بیش‌تر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که انتشار داخلی به احتمال زیاد مکانیسم فیزیکی حاکم بر حرکت رطوبت در حین خشک کردن با رفرکتانس ویندو است.

نتایج مشابه برای خشک شدن خرما (Doymaz, 2012) و کدو حلوا (Seremet et al., 2016) گزارش شده است. در مرحله

سلسیوس، زمان خشک شدن حدود ۲۶٪ کاهش یافت. افزایش سرعت خشک شدن و کاهش نسبت رطوبت در واحد زمان در تحقیقات (Tabatabaekoloor et al., 2022) برای چغندر قرمز، (Meng et al., 2023) برای سیب زمینی و (Zotarlli et al., 2015) برای انبه گزارش شده است.



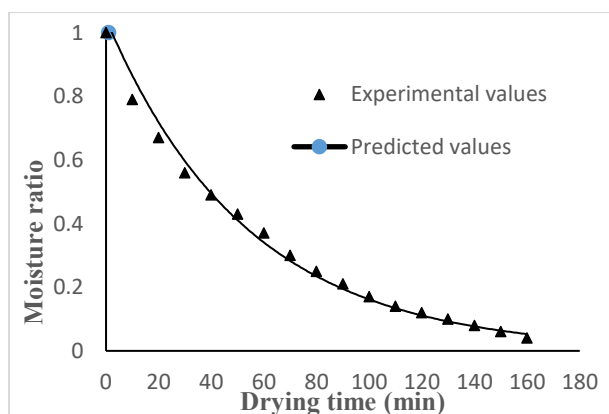
شکل ۳- نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک شدن ورقه‌های پرتقال در دماهای مختلف (ضخامت ۶ میلی‌متر)

Fig. 3. Moisture ratio vs. drying time of orange slices at different temperatures (Thickness 6 mm)

۲-۳- تأثیر ضخامت ورقه‌ها

سرعت و زمان خشک شدن محصول تحت تأثیر ضخامت ورقه‌های برش خورده قرار می‌گیرد. شکل ۴ منحنی خشک شدن را در ضخامت‌های مختلف نمونه نشان می‌دهد. از شکل ۴ می‌توان دریافت که با کاهش ضخامت نمونه‌ها، زمان رسیدن نمونه‌ها به نقطه پایانی کاهش یافت و از ۱۹۰ دقیقه برای ضخامت ۸ میلی‌متر به ۱۴۰ دقیقه برای ضخامت ۴ میلی‌متر رسید. همچنین، میزان حذف رطوبت در مرحله اولیه خشک کردن بیش‌تر بود که پس از آن کاهش یافت. سرعت انتقال جرم از لایه‌های سطحی ورقه در مراحل اولیه خشک کردن بیش‌تر است و هر چه ضخامت محصول کم‌تر باشد زمان کوتاه‌تری طول می‌کشد تا رطوبت از مرکز به سطح منتقل شده و خشک شود. این امر نشان می‌دهد که ضخامت نمونه بر زمان خشک شدن تأثیر می‌گذارد. کاهش زمان خشک شدن با کم‌تر شدن ضخامت ورقه‌های برش خورده کیوی توسط (Azizi et al., 2017) و برای برش‌های گوجه فرنگی توسط (Castoldi et al., 2015) نیز گزارش شده است.

از این مدل می توان به خوبی برای توصیف تغییر رطوبت استفاده کرد.



شکل ۶- تأیید مدل پیج اصلاح شده
Fig. 6 Confirmation of modified Page model

۳-۴- انتشار رطوبت موثر

در طول دوره خشک شدن با نرخ نزولی، انتقال جرم در اثر مقاومت داخلی انجام می گیرد و انتقال رطوبت در حین خشک شدن توسط انتشار داخلی کنترل می شود. در این مورد، قانون دوم فیک می تواند برای تخمین نفوذ موثر رطوبت استفاده شود. مقادیر تعیین شده انتشار رطوبت موثر برای تمام شرایط خشک کردن، در جدول ۵ گزارش شده است. مشخص شد که دامنه تغییرات آن از $6/39 \times 10^{-11}$ تا $10/42 \times 10^{-11}$ مترمربع بر ثانیه تغییر کرد. همانطور که انتظار می رفت، مقادیر D_{eff} با افزایش دمای هوا در فرآیند خشک کردن روند افزایشی داشت که این امر به دلیل افزایش فشار بخار داخل نمونه ها بوده که منجر به ایجاد جنبش مولکولی و حرکت سریع آب در دمای بالا می شود. هم چنین، با افزایش ضخامت میزان انتقال جرم افزایش یافت که موجب افزایش ضریب نفوذ موثر شد.

میزان ضریب انتشار رطوبت برای خشک کردن کدو در یک خشک کن هوای داغ در محدوده دمایی ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس 10^{-11} تا $3/4 \times 10^{-11}$ گزارش شده است (Serenmet et al., 2016). هم چنین در مطالعه دیگری ضریب انتشار رطوبت برای ذرت در محدوده دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس 10^{-11} تا $3/6 \times 10^{-11}$ متر مربع بر ثانیه گزارش شده است (Mujumdar, 2000). هم چنین، مقادیر D_{eff} به دست آمده در مطالعه حاضر با داده های محققان دیگر تا حد قابل ملاحظه ای همخوانی دارد (Kamal et al., 2020; Meng et al., 2023; Taseri et al., 2018). ممکن است به دلیل این واقعیت باشد که اثر نفوذ رطوبت در محصولات کشاورزی که مواد زیستی محسوب می شوند بر حسب ویژگی های آن ها، تنوع نمونه، ترکیب و هندسه، دمای هوا، رطوبت و پیش تیمارها متفاوت است.

بعدی خشک کردن، سرعت خشک شدن بین ضخامت های مختلف تغییر زیادی نمی کند. بنابراین می توان ضخامت نمونه ها را کاهش داد تا مصرف انرژی کاهش یابد و در هزینه ها در این مرحله صرفه جویی شود.

تأثیر دمای خشک کردن و ضخامت ورقه بر کیفیت پارامترهای ورقه های خشک شده پرتقال (ΔE ، SR و RR) بررسی شد و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود کم ترین تغییرات رنگی مربوط به نمونه خشک شده با ضخامت ۴ میلی متر و دمای ۶۰ درجه سلسیوس می باشد. با افزایش دمای هوا نمونه ها تیره تر شده و شاخص ΔE نیز افزایش پیدا کرد. میانگین تغییرات رنگ محاسبه شده برای پرتقال های خشک شده درون خشک کن رفرکتانس ویندو در دمای ۶۰ الی ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر است با ۱۷/۱۲، ۱۵/۲۱ و ۱۸/۱۴ به دست آمد. مقادیر چروکیدگی و بازجذب در تیمارهای مختلف تغییرات معنی داری نداشتند. این نتایج نشان داد که خشک کردن با روش پمپ حرارتی یک فرآیند ملایم دفع رطوبت است و برای محصولات حساس به حرارت مناسب است.

۳-۳- برازش مدل های خشک کردن

از پنج مدل ریاضی خشک کردن برای برازش داده های نسبت رطوبت در دماها و ضخامت های مختلف استفاده شد. مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE برای شرایط مختلف خشک کردن به روش تحلیل رگرسیون غیر خطی تعیین شد که در جدول ۴ ارائه شده است. می توان مشاهده کرد که در بین این معادلات سه مدل ریاضی پیج اصلاح شده، لگاریتمی و میدلی و همکاران با ضریب تبیین بالاتر از ۰/۹۹ به خوبی می توانند قانون تغییر رطوبت را توصیف کنند. در این میان مدل پیج اصلاح شده دارای بالاترین R^2 و کم ترین χ^2 و RMSE است. می توان نتیجه گرفت که مدل پیج اصلاح شده بهترین مدل برای توصیف خشک کردن برش های پرتقال در خشک کن رفرکتانس ویندو است. (Reis et al., 2012). سینتیک خشک شدن برش های یاکون^۱ را در خشک کن مجهز به پمپ حرارتی با خلاء بررسی کردند و با برازش بر روی مدل های مختلف خشک کن لایه نازک دریافتند که مدل پیج اصلاح شده بهترین تطابق را با داده های تجربی نشان داد. هم چنین، نتایج مشابهی برای سیب زمینی شیرین، بادمجان و قارچ به دست آمد (Artnaseaw et al., 2010; Meng et al., 2023; Singh et al., 2012).

به منظور اعتبارسنجی مدل پیج اصلاح شده، مقدار تجربی با مقدار پیش بینی شده مقایسه شد. نتایج در شرایط آزمایشی دمای ۷۵ درجه سلسیوس و ضخامت ۶ میلی متر در شکل ۶ نشان داده شده است. درجه تناسب بین مقدار آزمایشی و مقدار پیش بینی بالا است.

¹ Yacon

جدول ۳- تاثیر دما و ضخامت ورقه های پرتقال بر شاخص های تغییر رنگ، چروکیدگی و نرخ بازجذب

Table 3. Effect of temperature and thickness on color change, shrinkage and resorption intensity of orange slices

نرخ بازجذب Resorption	Shrinkage (%) چروکیدگی	تغییرات کلی رنگ Color change	ضخامت Thickness (mm)	دما Temperature (°C)
4.63±0.7 a	77.21±1.4 a	14.98±0.9 a	4	60
4.45±0.9 a	77.56±1.3 a	15.42±1.2 ab	6	
5.12±1.0 a	78.42±1.6 a	15.68±1.0 ab	8	
4.89±0.7 a	79.16±1.5 ab	16.21±1.1 b	4	75
4.94±0.8 a	79.23±1.8 ab	16.54±1.2 b	6	
4.65±1.0 a	79.34±1.6 ab	16.84±1.1 b	8	
4.88±0.7 a	79.95±1.9 ab	17.32±1.3 c	4	90
4.49±0.9 a	80.81±1.8 b	17.59±1.2 c	6	
4.76±0.7 a	80.27±1.6 b	17.83±1.3 c	8	

حروف مشابه در هر ستون نشان می دهد که تفاوت معنی داری ندارند.

جدول ۴- نتایج آماری پارامترهای مدل خشک کردن ورقه های برش خورده پرتقال به روش رفراکتنس ویندو

Table 4. Statistical results of thin layer drying parameters of orange in refractance window

Model	Drying condition	Constants	R ²	χ ²	RMSE
Newton	35°C-1.5 m/s	k= 0.026	0.986	0.00054	0.0294
	45°C-1.5 m/s	k= 0.032	0.976	0.00031	0.0267
	55°C-1.5 m/s	k= 0.037	0.989	0.00064	0.0179
	65°C-1.5 m/s	k= 0.029	0.990	0.00081	0.0325
	55°C-0.5 m/s	k= 0.049	0.986	0.00073	0.0225
	55°C-2.5 m/s	k= 0.031	0.978	0.00045	0.0208
Modified page	35°C-1.5 m/s	k= 0.019; n= 0.989	0.999	0.00008	0.0141
	45°C-1.5 m/s	k= 0.023; n= 1.009	1.000	0.00003	0.0211
	55°C-1.5 m/s	k= 0.035; n= 1.111	0.998	0.00009	0.0164
	65°C-1.5 m/s	k= 0.027; n= 1.163	0.999	0.00010	0.0218
	55°C-0.5 m/s	k= 0.041; n= 1.168	0.998	0.00007	0.0208
	55°C-2.5 m/s	k= 0.025; n= 1.192	0.999	0.00006	0.0197
Henderson & Pabis	35°C-1.5 m/s	a= 0.991; k= 0.037	0.972	0.00075	0.0329
	45°C-1.5 m/s	a= 0.987; k= 0.035	0.988	0.00046	0.0329
	55°C-1.5 m/s	a= 1.003; k= 0.039	0.966	0.00062	0.0459
	65°C-1.5 m/s	a= 1.006; k= 0.051	0.991	0.00044	0.0373
	55°C-0.5 m/s	a= 1.029; k= 0.026	0.986	0.00041	0.0238
	55°C-2.5 m/s	a= 1.034; k= 0.036	0.991	0.00050	0.0331
Logarithmic	35°C-1.5 m/s	a= 1.095; k= 0.151; c= -0.017	0.992	0.00014	0.0347
	45°C-1.5 m/s	a= 1.043; k= 0.234; c= -0.009	0.996	0.00011	0.0359
	55°C-1.5 m/s	a= 1.052; k= 0.242; c= -0.007	0.999	0.00064	0.0201
	65°C-1.5 m/s	a= 1.089; k= 0.357; c= -0.024	0.997	0.00081	0.0377
	55°C-0.5 m/s	a= 1.054; k= 0.185; c= -0.053	0.996	0.00013	0.0265
	55°C-2.5 m/s	a= 1.032; k= 0.244; c= -0.026	0.998	0.00015	0.0224
Midilli et al.	35°C-1.5 m/s	a= 0.991; k= 0.035; n= 0.678; b= 0.005	0.999	0.00043	0.0361
	45°C-1.5 m/s	a= 0.986; k= 0.036; n= 1.084; b= 0.004	0.995	0.00076	0.0332
	55°C-1.5 m/s	a= 1.004; k= 0.042; n= 1.138; b= 0.008	0.996	0.00054	0.0181
	65°C-1.5 m/s	a= 1.006; k= 0.051; n= 1.197; b= 0.006	0.999	0.00039	0.0346
	55°C-0.5 m/s	a= 1.029; k= 0.028; n= 1.245; b= 0.007	0.997	0.00029	0.0251
	55°C-2.5 m/s	a= 1.031; k= 0.036; n= 1.186; b= 0.003	0.996	0.00063	0.0201

جدول ۵- ضریب انتشار رطوبت موثر در شرایط مختلف خشک کردن ورقه‌های پرتقال در رفراکتانس ویندو

Table 5. Effective moisture diffusion coefficient at different drying conditions of orange slices in refractance window

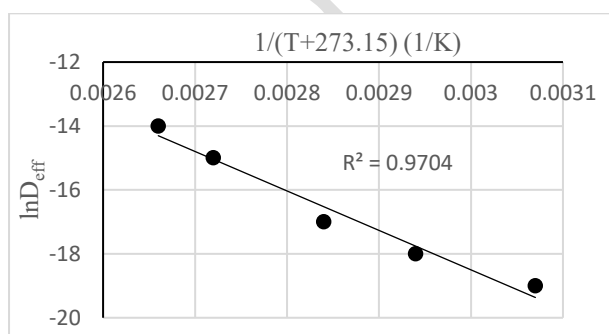
R	ضریب انتشار موثر Effective diffusion (m ² /s)	ضخامت Thickness (mm)	دما Temperature (°C)
0.997	6.39×10 ⁻¹⁰	4	60
0.998	7.27×10 ⁻¹⁰	6	
0.994	7.62×10 ⁻¹⁰	8	
0.998	8.94×10 ⁻¹⁰	4	75
0.989	8.27×10 ⁻¹⁰	6	
0.994	8.34×10 ⁻¹⁰	8	
0.996	9.83×10 ⁻¹⁰	4	90
0.998	10.18×10 ⁻¹⁰	6	
0.990	10.42×10 ⁻¹⁰	8	

جدول ۶- انرژی فعال‌سازی در شرایط مختلف خشک کردن برش‌های

پرتقال در رفراکتانس ویندو

Table 6. Activation energy at different drying conditions of orange slices in refractance window

R	انرژی فعال‌سازی Energy activation (kJ/mol)	ضخامت Thickness (mm)	دما Temperature (°C)
0.946	21.94	4	60
0.938	24.75	6	
0.979	24.92	8	
0.945	23.94	4	75
0.929	25.35	6	
0.984	25.35	8	
0.979	26.14	4	90
0.991	27.67	6	
0.987	28.38	8	



شکل ۷- رابطه آرنیوس بین ضریب انتشار رطوبت موثر و عکس

دمای مطلق در ضخامت ورقه ۶ میلی‌متر

Fig. 7. Arrhenius equation between effective moisture diffusion coefficient and revers absolute temperature at slice thickness 6 mm

۵-۳- انرژی فعال‌سازی

گزارش شده است که انرژی فعال‌سازی برای مواد غذایی در محدوده ۱۲/۲-۴۸ کیلوژول بر مول می‌باشد (Babalís et al., 2004). میزان انرژی فعال‌سازی برای خشک کردن برش‌های نازک پرتقال در دما و ضخامت‌های مختلف برش‌ها در جدول ۶ آورده شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین انرژی فعال‌سازی به ترتیب ۲۸/۳۸ و ۲۱/۹۴ کیلو ژول بر مول مربوط به تیمارهای دمایی ۹۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۸ میلی‌متر و دمایی ۶۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۴ میلی‌متر به دست آمد.

انرژی فعال‌سازی به صورت لگاریتم D_{eff} به عنوان تابعی از عکس دمای مطلق در شکل ۷ ترسیم شد و یک رابطه خطی را نشان می‌دهد که از معادله آرنیوس به دست آمده است. از شیب خط مستقیم که از معادله آرنیوس استخراج شده است، انرژی فعال‌سازی (E_a) ۲۷/۵ کیلوژول بر مول محاسبه شد. این مقدار بالاتر از انرژی فعال‌سازی برخی محصولات و پایین‌تر از انرژی فعال‌سازی برخی دیگر از محصولات است که توسط محققان در محدوده ۱۶ الی ۳۹ کیلوژول بر مول گزارش شده است (Chapchaimoh et al., 2016; Shi et al., 2013; Aktas et al., 2017; Anukirathika et al., 2021).

میزان انرژی فعال‌سازی برای خشک کردن کدو در یک خشک‌کن هوای داغ در سه دبی هوای ۱، ۱/۴ و ۱/۸ کیلوگرم بر دقیقه به ترتیب برابر ۱۴/۳، ۱۶/۲ و ۱۳/۸ کیلوژول بر مول گزارش شده است (Seremet et al., 2016). هم‌چنین در تحقیقی برای خشک کردن انجیر در هوای داغ انرژی فعال‌سازی در محدوده ۳۰/۸-۴۸/۴ کیلوژول بر مول به دست آمد (Babalís et al., 2004).

۴- نتیجه‌گیری نهایی

برش‌های پرتقال با دستگاه رفرکتانس ویندو خشک شدند و با استفاده از مدل‌های ریاضی بهترین مدل برای برازش داده‌های آزمایش و پیش‌بینی رفتار خشک کردن ارائه شد. افزایش دما و کاهش ضخامت ورقه‌های برش خورده پرتقال هر دو موجب تسریع در فرآیند خشک شدن گردید. در این میان مدل پیچ اصلاح شده دارای بالاترین R^2 و کم‌ترین χ^2 و $RMSE$ است. می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیچ اصلاح شده بهترین مدل برای توصیف خشک کردن ورقه‌های برش خورده پرتقال در خشک‌کن رفرکتانس ویندو است. مقادیر $Deff$ با افزایش دمای خشک کردن افزایش یافت که این امر به دلیل افزایش فشار بخار داخل نمونه‌ها بوده که منجر به حرکت سریع آب در دمای بالا می‌شود. انرژی فعال‌سازی برای انتشار رطوبت از رابطه آرنیوس $27/5$ کیلو ژول بر مول به دست آمد.

منابع

- Baeghbal, V., and Niakousari, M. (2016). *Evaluation of refractance window performance in drying of sensitive temperature food*. Journal of Food Science and Technology, 13(1): 185-192. (in Persian).
- Calderón-Chiu, C., Martínez-Sánchez, C., Rodríguez-Miranda, J., Juárez-Barrientos, J., Carmona-García, R., and Herman-Lara, E. (2020). *Evaluation of the combined effect of osmotic and Refractance Window drying on the drying kinetics, physical, and phytochemical properties of beet*. An International Journal Drying Technology. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1655439>, 1-14.
- Castoldi, M., Zotarelli, M. F., Durigon, A., Carciofi, B.A.M., and Laurindo, J. B. (2015). *Production of tomato powder by refractance window drying*. Drying Technology, 137: 35-46.
- Chapchaimoh, K., Poomsa-ad, N., Wiset, L., and Morris, J. (2016). *Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying*. Appl. Therm. Eng. 95: 491-498.
- Doymaz, I. (2012). *The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices*. Journal of Food Engineering, 79: 243-248.
- Hernández Carrión, M., Moyano Molano, M., Ricaurte, L., Clavijo Romero, A., and Quintanilla Carvajal, M. (2021). *The effect of process variables on the physical properties and microstructure of HOPO nanoemulsion flakes obtained by refractance window*. Journal Scientific Reports. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-88381-7>: 1-14.
- Hernández, Y., Ramírez, C., Moreno, J., Núñez, H., and Vega, O. (2020). *Effect of Refractance Window on dehydration of osmotically pretreated apple slices: Color and texture evaluation*. Journal Food Process Engineering. Volume 43, Issue 2. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13304>, 1-11.
- Jafarian, H., Tabatabaeekoloor, R., and Moosavi Seyed, S. R. (2017). *Experimental investigation on dill drying in a solar-assisted heat pump dryer*. J. Agr. Sci. Tech. 19: 835-845.
- Kamal, M. M., Ali, M. R., Shishir, M. R. I., and Mondal, S. C. (2020). *Thin layer drying kinetics of yam slices physiochemical and functional attributes of yam flour*. J. Food Process Eng., 43(8). <https://doi.org/10.1001/111/Jfpe.13448>.
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., and Tabil, L. G. 2007. *Thin layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts*. Journal of Food Engineering, 78: 98-108.
- Li, X., Wu, X., Bi, J., Liu, X., Li, X., and Guo, C. (2019). *Polyphenols accumulation effects on surface color variation in apple slices hot air drying process*. Lwt, 108, 421-428. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.098>.
- Mujumdar, A. S., (2000). *Drying technology in agriculture and food sciences*. Science publisher, Inc. Enfield (NH), USA.
- Meng, Z., Chu, X., Zhang, H., Liu, Y., Wang, Z., and Zhang, F. (2023). *Study on drying characteristics of yam slices under heat pump-electrohydrodynamics combined*
- Agricultural Statistics of Iran. (2022). Ministry of Jihad-e-Agriculture, Deputy of Planning and Economics, ICT Center. Tehran, Iran. <http://amar.maj.ir>
- Aktas, M., Khanlari, A., Amini, A., and Svik, S. (2017). *Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology*. Energy Convers. Manag., 132: 327-338.
- Anukiruthika, T., Moses, J. A., and Anandharamakrishnan, C.. (2021). *Electrohydrodynamic drying of foods: principle, applications, and prospects*. J. Food Eng. 295: 110449.
- Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., and Benjapiyaporn, C. (2010). *Drying characteristics of mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying*. Food Bioprod Process, 88: 105-114.
- Ayub Hossain, M., Gottschalk, K., and M. Shueb Hassan, M. (2013). *Mathematical model for a heat pump dryer for aromatic plant*. Procedia Engineering, 56: 510-520.
- Azizi, H. (2015). *Physico-chemical properties of onion slices in refractance window, freeze and cabinet drying methods*. MSc dissertation in Food Science and Technology, Institute of Kherad, Tehran, Iran (In Persian).
- Azizi, D., Jafari, S. M., Mirzaei, H., and Dehnad, D. (2017). *The influence of refractance window drying on qualitative properties of kiwifruit slices*. Int. J. Food Eng. 156: 57-56..
- Babal, S. J., and 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(3): 449-458. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.005>.

attributes of apple slices in Refractance window drying. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 92. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103594>.

Tabatabaeeekoloor, R., Fathabadi, M., and Motevali, A. (2022). *Investigation of drying kinetics of red beet in different drying methods*. 14 the National Congress of Mechanical Engineering of Biosystems, 6-8 Sep. 2022, Kermanshah, Iran.

Taseri, L., Aktas, M., Sevik, S., Gulgu, M., Uysel G., Secum G., and Aktekeli, B. (2018). *Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer*. Food Chemistry, 260: 152-159.

Vishnuvardhan, R. M., and Chandramohan, V. P. (2021). *Shrinkage, effective moisture coefficient, surface transfer coefficient and their factors during solar drying of food products- A review*. Solar Energy, 229: 84-101 <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.042>.

Zomorodi, Sh. (2019). *Effect of refractance window on drying kinetics of tomato slices*. Journal of Food Science and Technology, 15(83): 145-155. (in Persian).

Zotarelli, M. F., Carciofi, B. A. M., Laurindo, J. B. (2015). *Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window*. Food Research, 132: 78-85.

drying. Case Studies in Thermal Engineering, 41: 102601.

Mohammadi, I., *Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices*koloor, R., and Motevali, A. (2019). *Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices*. Energy, 170: 149–158.

Nascimento, C., Rodrigues, A., and Meller da Silva, L. (2020). *Development of a dehydrated product with edible film characteristics from mammees using Refractance Window drying*. Food Science and Technol, Campinas. 40(1). <https://doi.org/10.1590/fst.36218>.

Ortiz-Jerez, M. J., Gulati, T., Datta, A. K. and Ochoa-Martínez, C.I. (2015). *Quantitative understanding of Refractance Window drying*. Food Bioprod Process, 27: 245-256.

Puente Diaz, L., Vega-Gálvez, A., Shun Ah-Hen, K., Rodríguez, A., Pasten, A., Poblete, J., Pardo, C. M., and Muñoz, M. (2020). *Refractance Window drying of goldenberry pulp: A comparison of quality characteristics with respect to other drying techniques*. Journal Pre-proof. Volume 131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109772>, 1-30.

Reis, F. R., Lenzi, M. K., Bolzon, G. I., Nigsoki, S., and Masson, S. (2012). *Vacuum drying characteristics of yacon and the effect of process conditions on fractal dimensions and rehydration capacity*. Drying Technology, 30: 13-19.

Richa, R., Kohli, D., Vishwakarma, D., Mishra, A., Kabdal, B., Kothakota, A., Richa, S., Sirohi, R., Rohitashw Kumar, R. and B. Naik. (2023). *Citrus fruit: Classification, value addition, nutritional and medicinal values, and relation with pandemic and hidden hunger*. Journal of Agriculture and Food Research, 14: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100718>.

Seremet, L., Botez, E., Nistor, O. V., Andronoiu, D. G., and Mocanu, G. D. (2016). *Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices*. Food Chemistry, 195: 104-109.

Shende, D., and Datta, A. (2019). *Refractance window drying of fruits and vegetables: A Review*. Journal of the Science of Food and Agriculture. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9356>, 1-27.

Shende, D., and Datta, A. (2020). *Optimization study for refractance window drying process of Langra variety mango*. Journal of Food Science and Technology. 57: 683–692.

Shi, Q., Zheng, Y., and Zhao, Y. (2011). *Mathematical modeling on thin-layer heat pump drying of yacon (Smallanthus sonchifolius) slices*. Energy Conv. Manag. 71: 208-216.

Singh, N. J. and Pandey, R. K. (2012). *Covective air drying characteristics of sweet potato cube*. Food Bioprod Process, 90: 317-322.

Subrahmanyam, K., Gul, K., Paridala, S., Sehrawat, R., Sanjay, K., Dwivedi, M. and Jaddu, S. (2024). *Effect of cold plasma pretreatment on drying kinetics and quality*