



Research Paper

Evaluation of Mass and Energy Transfer Indices of Orange Slices During Drying by the Refractance Window

Behzad Bakhshi¹, Reza Tabatabaekoloor^{2*}, Mohammadreza Bayati¹, Abbsa Rouhani¹, Elham Azarpajouh³

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

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

³ Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Mashhad, Iran.

Article History

Submitted: 2026/04/19

Revised: 2026/06/16

Accepted: 2026/06/28

Published
online: 2026/09/23

Keywords:

Refractance window,
Mass transfer coefficient,
Effective diffusion
coefficient
Activation energy

*Corresponding author
email:

r.tabatabaei@sanru.ac.ir

ORCID: 
0000-0002-1853-5121



Abstract

There are several alternatives for drying with superior quality and food preservation; one of them, refractive window drying, has attracted the attention of researchers. The simultaneous exchange of mass and heat during drying has made this phenomenon complex in terms of mass transfer and moisture removal. In this study, a refractivity window system was used to dry orange slices with three thicknesses of 4, 6 and 8 mm at three temperatures of 60, 75 and 90 degrees Celsius, and the mass and energy transfer parameters including activation energy, convective mass coefficient, specific energy, drying efficiency and specific moisture evaporation rate were calculated using the two models of Denser and Dost and the Crank model. The results showed that the drying rate constant and the effective moisture diffusion coefficient (internal mass transfer coefficient) increased with increasing temperature and sheet thickness. The highest activation energy was obtained by the Denser and Dost method at 13.20 kJ/mol and at 90 degrees Celsius, respectively. The highest convective mass coefficient was calculated to be 7.95×10^{-7} at 75°C and 6 mm thickness. The lowest and highest specific energy requirements were 2.5 and 17.2 kWh/kg, respectively. Also, the highest drying efficiency and specific moisture evaporation rate (SMER) were 11.8% and 0.167%, respectively, at 90°C and 8 mm thickness.

How to cite this paper:

Bakhshi, B., Tabatabaekoloor, R., Bayati, M.R., Rouhani, A., Azarpajouh, E. (2026). Evaluation of Mass and Energy Transfer Indices of Orange Slices During Drying by the Refractance Window. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*. 40: 81-94. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14986.761> (In Persian)



Authors retain the copyright and full publishing rights. Published by [Shahrekord University](https://www.shahrekord.ac.ir). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14986.761>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The use of fruit drying to produce dried fruit chips is becoming increasingly widespread. The simultaneous exchange of mass and heat in the drying process has made this phenomenon a complex process in terms of mass transfer and moisture removal. Citrus fruits are among the horticultural products that can be converted into fruit chips. Citrus fruits are among the most important subtropical fruits, native to South Asia, East Asia, Southeast Asia, and Australia. Drying fruits has always been a challenging task. Conventional methods of drying, such as sunlight or hot-air drying, negatively impact flavor, color, nutritional quality, and the preservation of bioactive compounds due to exposure to high temperatures. Fruits are major sources of vitamins and minerals, but these nutrients are vulnerable to oxidation during conventional drying processes at high temperatures. One of the important processes in drying operations is knowing how mass and moisture are removed from the product being dried. Knowing the moisture distribution and temperature of the products is necessary for process design, quality control, appropriate storage selection, and proper product transport. The purpose of this research is to investigate and evaluate internal and external mass transfer parameters using two models: Crank and Dinser and Doost, and to evaluate energy in drying orange layers in a refractivity window dryer.

Material and Methods

This study was conducted to evaluate the energy parameters of a refractance window dryer for drying sliced orange slices. A refractance window dryer system designed at the Mashhad Agricultural Engineering and Technical Research Center was used for the experiments. Orange fruit samples were selected for their uniform color, shape, and size, then washed and after being transported to the testing site, cut into slices with a diameter of 8 cm and thicknesses of 4, 6, and 8 mm. Mass transfer phenomena in the drying

of agricultural products and food are complex and are usually classified into pressure diffusion, forced diffusion, and normal diffusion as pure mass transfer without fluid motion. Accordingly, Fick's second law for unsteady conditions by cranking can describe the moisture transfer in the descending stage of the drying process. Drying curves occur mainly in the descending stage and moisture diffusion is controlled by internal diffusion.

Results and Discussion

To determine the internal mass transfer coefficient by the crank method, $\ln(MR)$ was plotted against time (minutes) at different temperatures and thicknesses of sliced orange slices, and the slopes of the resulting graphs were determined. As shown in the graphs, with increasing drying air temperature, the drying time decreases and the slopes of the plots increase, indicating faster moisture removal from the middle layers to the surface and, as a result, faster drying. This process of moisture removal in the dryer is carried out more quickly and in less time. Also, comparing the thicknesses of the samples shows that increasing the temperature increases the rate of moisture removal at lower thicknesses, and the slopes of the graphs increase. As the drying air temperature increases, the slope of the plotted graphs increases, indicating faster moisture removal from the middle layers to the surface and, consequently, faster drying. This process of moisture removal in the dryer is carried out more quickly and in less time. The results showed that the highest activation energy by the crank method was 36.35 kJ/mol in a cabinet dryer at 60 degrees Celsius, and the lowest value of this parameter was 20.13 kJ/mol in a refractance window by the Dinser and Dost method at 90 degrees Celsius. The lowest energy consumption and specific energy requirement were 2.53 kW and 6.75 kWh/kg, respectively, at 90 degrees Celsius and 4 mm thickness in the cabinet dryer, and the highest values of these two parameters were 5.8 kW and 2.17 kWh/kg, respectively, at 60 degrees Celsius and 8 mm thickness in the refractance window dryer. The reason for

this is that, as drying temperature increases, the faster rate of moisture removal from the product and the reduction in saturated vapor pressure increase the ability of the drying air to absorb moisture from the product's surface, allowing the product to dry in less time.

Conclusions

In this study, a refractance window system was used to dry orange slices with three thicknesses of 4, 6 and 8 mm at three temperatures of 60, 75 and 90 degrees Celsius, and the mass and energy transfer parameters including activation energy, convective mass coefficient, specific energy, drying efficiency and specific moisture evaporation rate were calculated using the two models of Dinser and Dost and the Crank model. The results showed that the drying rate constant and the effective moisture diffusion coefficient (internal mass transfer coefficient) increased with increasing temperature and slice thickness. The highest activation energy was obtained by the Denser and Dost method. The highest convective mass coefficient was calculated at 75 degrees Celsius and 6 mm thickness at 7.95×10^{-7} . The minimum and maximum specific energy required were 2.5 and 17.2 kWh/kg, respectively. Also, the highest drying efficiency and specific moisture evaporation rate (SMER) were obtained at 90°C and 8 mm thickness, respectively, which were 11.8% and 0.167%. Therefore, it can be said that the energy parameters of the refractivity window dryer are affected by the thickness of the fruit slices and the dryer temperature.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the technicians of the Central Laboratory at Sari Agricultural University for their cooperation in conducting the tests.

Author Contributions

First Author: Writing original draft, Resources, Methodology, Funding acquisition and Analysis.

Second Author: Writing-review & editing, Visualization, Supervision and Conceptualization.

Third Author: Writing-review & editing, Visualization, Supervision and Conceptualization, Methodology, Funding acquisition and Analysis.

Forth Author: Visualization, Validation, Conceptualization, Supervision and Formal Analyses.

Fifth Author: Writing-review & editing, Investigating, Visualization, Project administration.

Data Availability Statement

Data will be made available on request.

Ethical Considerations

The authors confirm that research ethics were considered throughout the research methodology, including data definition, data collection, data analysis, data interpretation, and plagiarism, to provide the final report, including avoidance of data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of Interest

The authors declare that The authors declare that they have no knowledge competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Funding Statement

The authors received no specific funding for this research



ارزیابی شاخص‌های انتقال جرم و انرژی برش‌های پرتقال در خشک‌کردن به روش فرکتنس ویندو

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

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲. گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۳. بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، مشهد، ایران.

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰	جایگزین‌های متعددی برای خشک‌کردن با ایجاد کیفیت برتر و حفظ مواد غذایی وجود دارد که یکی از این جایگزین‌ها که موردتوجه محققان قرار گرفته است، خشک‌کردن به روش فرکتنس ویندو است. تبادل هم‌زمان جرم و حرارت در فرایند خشک‌کردن سبب شده است تا این پدیده فرایندی پیچیده از نظر انتقال جرم و خروج رطوبت باشد. در این تحقیق، از یک سامانه فرکتنس ویندو برای خشک‌کردن برش‌های پرتقال با سه ضخامت ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر در سه دمای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سلسیوس استفاده شد و عامل‌های انتقال جرم و انرژی شامل میزان انرژی فعال‌سازی، ضریب جرم همرفتی، میزان انرژی مخصوص، بازده خشک‌کردن و نرخ تبخیر رطوبت ویژه با استفاده از دو مدل دینسر و دوست و مدل کرنک محاسبه شدند. نتایج نشان داد که آهنگ ثابت خشک‌شدن و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (ضریب انتقال جرم داخلی) با افزایش دما و ضخامت ورقه روند افزایشی داشتند. بیشترین میزان انرژی فعال‌سازی به روش دینسر و دوست به ترتیب به میزان ۱۳/۲۰ و ۱۳/۲۰ در دمای ۹۰ درجه سلسیوس به دست آمد. بالاترین ضریب جرم همرفتی در دمای ۷۵ درجه سلسیوس و ضخامت ۶ میلی‌متر به میزان $10 \times 7/95$ محاسبه گردید. کمترین و بیشترین انرژی مخصوص موردنیاز به ترتیب به میزان ۲/۵ و $17/2 \text{ kWh/kg}$ به دست آمد. همچنین، بالاترین میزان بازده خشک‌کردن و نرخ تبخیر رطوبت ویژه (SMER) به ترتیب ۱۱/۸ درصد و ۰/۱۶۷ در دمای ۹۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۸ میلی‌متر به دست آمد.
واژه‌های کلیدی: فرکتنس ویندو ضریب انتقال جرم ضریب نفوذ مؤثر انرژی فعال‌سازی	
پست الکترونیکی نویسنده * مسئول: r.tabatabaei@sanru.ac.ir	
ORCID:  ۰۰۰۰-۰۰۰۲-۱۸۵۳-۵۱۲۱	
	

نحوه استناد به این مقاله:

بخشی، ب.، طباطبائی کلور، ر.، بیاتی، م.ر.، روحانی، ع.، آذرپژوه، ا. (۱۴۰۵). ارزیابی شاخص‌های انتقال جرم و انرژی برش‌های پرتقال در خشک‌کردن به روش فرکتنس ویندو. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۴۰: ۸۱-۹۴.

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14986.761>

مقدمه

باتوجه به حجم بالای تولید محصولات باغی در کشور ضرورت توجه به مدیریت پس از برداشت این محصولات بسیار ضروری است. در همین راستا یکی از راه های استفاده بهینه از این محصولات تبدیل آن ها به فراورده های خشک شده به صورت ورقه های برش خورده است. مرکبات از جمله محصولات باغی است که قابلیت تبدیل به صورت چیپس میوه را دارد. ایران سهمی معادل ۳/۷ درصد از تولید مرکبات جهان را در اختیار دارد و رتبه هفتم جهان را به خود اختصاص داده است. ایران با سطح زیر کشت مرکبات حدود ۳۱۱۰۰۰ هکتار، رتبه نهم سطح زیر کشت مرکبات جهان را به خود اختصاص داده (FAO, 2025). بر اساس آمارنامه جهاد کشاورزی، از مجموع ۲۱ میلیون تن تولید محصولات باغبانی، حدود ۷/۷ میلیون تن معادل ۳۶/۷ درصد مربوط به میوه های گرمسیری است که از این میزان تولید میوه پرتقال ۳۷/۷، نارنگی، ۹/۸، لیموترش ۷/۵، لیموشیرین، ۸/۳، گریپ فروت ۱/۳، نارنج ۱/۸ و سایر مرکبات یک درصد از کل میزان تولید میوه های نیمه گرمسیری را تشکیل می دهد (Annual Agricultural Statistics, 2024). پرتقال منبع خوبی از ویتامین ها، مواد مغذی، فیبر، کاروتنوئیدها و پروتئین ها است (Borse et al., 2025). به دلیل فواید زیادی که این میوه برای سلامتی دارد مصرف خارج از فصل آن به صورت ورقه های خشک شده چیپسموردتوجه قرار گرفته است.

خشک کردن یکی از مهم ترین عملیات در فراوری مواد غذایی است و هدف آن کاهش رطوبت در مواد غذایی است. این فرایند به افزایش ماندگاری، کاهش هزینه های حمل و نقل و نگهداری و جلوگیری از آلودگی میکروبی و بروز سایر واکنش های شیمیایی مضر مانند قهوه ای شدن آنزیمی کمک می کند (Catalan et al., 2026). برای انجام این عملیات در صنعت مواد غذایی، از خشک کن های سنتی استفاده می شود که درصد زیادی از انرژی را مصرف می کنند. این فرایند علاوه بر اتلاف انرژی به شکل گازهای خروجی داغ که منجر به انتشار بالای گازهای گلخانه ای می شود و به نوبه خود مواد غذایی را در معرض زمان خشک شدن طولانی مدت و قرار گرفتن در معرض دمای بالا قرار می دهد، راندمان انرژی پایینی دارد و هزینه های تولید بالایی را ایجاد می کند. این عوامل باعث

از بین رفتن عامل های کیفی مرتبط با مواد غذایی، مانند خواص فیزیکی، شیمیایی و تغذیه ای می شوند (Byarugaba et al., 2025).

یکی از فرایندهای مهم در عملیات خشک کردن دانستن نحوه خروج جرم و رطوبت از محصول در حال خشک شدن است. پدیده های انتقال جرم در خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی پیچیده بوده و به طور معمول برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی به صورت انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال طبقه بندی می شود. ضریب انتشار یکی از مشخصات محصولات کشاورزی است و داشتن اطلاعات در مورد آن برای طراحی و مدل سازی فرآیند انتقال جرم، مانند آب زدایی، جذب سطحی و دفع رطوبت در طول انبارداری، لازم می باشد. قانون دوم فیک^۱ اغلب برای توصیف انتشار رطوبت در فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی به کار می رود. این قانون توزیع رطوبت را به صورت شعاعی، یکنواخت و ثابت فرض می کند. پدیده ضریب انتشار مؤثر رطوبتی مواد را می توان با استفاده از قانون فیک و با روش های کرنک^۲ و دینسر و دوست^۳ محاسبه کرد (Leilayi et al., 2025; Asrate & Ali, 2025).

جایگزین های متعددی برای خشک کردن با ایجاد کیفیت برتر و حفظ مواد غذایی وجود دارد که یکی از این جایگزین ها که مورد توجه محققان قرار گرفته است، خشک کردن به روش رفراکتانس ویندو^۴ است. خشک کن رفراکتانس ویندو به عنوان نسل چهارم خشک کن ها شناخته می شود. این خشک کن از یک تسمه نقاله (که در بالای سطح کم عمق حاوی آب گرم با دمای ۹۵ تا ۹۸ درجه سانتی گراد قرار دارد) ساخته شده که از پلی استر^۵ شفاف مانند مایلار^۶ تشکیل شده است. تسمه نقاله انرژی حرارتی را از آب گرم به مواد خشک کننده ساطع می کند (Al-Hilphy et al., 2020).

محققان در زمینه خشک کردن محصولات کشاورزی و میوه های برش خورده از روش های مختلفی استفاده کرده اند. باتوجه به گستردگی تحقیقات انجام شده در خصوص روش های مختلف خشک کردن در این بخش سعی می شود بر تحقیقات انجام شده روی سامانه خشک کن رفراکتانس ویندو متمرکز شود. سه نوع انتقال حرارت مختلف در سامانه خشک کردن رفراکتانس ویندو در حین خشک کردن به عنوان هدایت^۷

^۵ Polyester

^۶ Maylar

^۷ Conduction

^۱ Fick

^۲ Crank

^۳ Dincer and Dost

^۴ Refractance Window (RW)

قابل توجهی بر مصرف انرژی و راندمان خشک‌کن تأثیر گذاشتند. ضریب نفوذ رطوبت مؤثر و انرژی فعال‌سازی با افزایش ضخامت ورقه انبه و دمای خشک‌کردن افزایش یافت. خشک‌شدن کاملاً در دوره نرخ نزولی رخ داد و مدل پیچ بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک‌شدن انبه بود. خشک‌کردن انبه با استفاده از فرکتانس ویندو پتانسیل خود را برای کاهش قابل توجه ضایعات پس از برداشت میوه‌ها نشان داد (Gebeyehu et al., 2025).

برش‌های سیب (با و بدون پیش تیمار) با استفاده از روش فرکتانس ویندو در ۵۵، ۷۵ و ۹۵ درجه سلسیوس خشک‌شده و در مقایسه با خشک‌کردن معمول در هوای گرم در ۵۵ درجه سلسیوس به‌عنوان شاهد مقایسه گردید. نتایج نشان داد که خشک‌کردن با استفاده از خشک‌کن فرکتانس ویندو هم با و بدون پیش تیمار در دمای ۹۵ درجه سلسیوس محصول بهتر حفظ کرد (Nuru et al., 2026).

در گوجه‌فرنگی، کاهش ضخامت منجر به زمان پردازش کوتاه‌تر و سرعت خشک‌شدن بالاتر می‌شود. ضخامت نمونه به طور قابل توجهی بر سرعت خشک‌شدن تأثیر می‌گذارد. زمانی که ضخامت نمونه از دو به سه میلی‌متر تغییر می‌کند، زمانی که دمای آب در بالاترین دما (۹۵ درجه سانتی‌گراد) باشد، زمان لازم برای رسیدن به میزان رطوبت سه درصد، حدود ۳۰ درصد افزایش یافت (Gao et al., 2020).

در برش‌های میوه کیوی، زمانی که اندازه نمونه از ۲/۴ به ۰/۸ میلی‌متر کاهش یافت، زمان خشک‌شدن کیوی نیز ۱۵ تا ۲۵ دقیقه کاهش می‌یابد. ضخامت کیوی تأثیر بسزایی در زمان خشک‌شدن دارد (Channe & Datta, 2018).

بررسی منابع مختلف نشان داد که تاکنون عامل‌های انرژی در خشک‌کن‌های فرکتانس ویندو مورد ارزیابی قرار نگرفته است. همچنین، مقایسه‌ای بین روش‌های محاسبه ضریب انتقال جرم داخلی و خارجی انجام نشده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی و ارزیابی عامل‌های انتقال جرم داخلی و خارجی با استفاده از دو مدل کرنک و مدل دینسر و دوست و ارزیابی انرژی در خشک‌کردن لایه‌های پرتقال در یک خشک‌کن فرکتانس ویندو است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور ارزیابی عامل‌های انرژی یک خشک‌کن فرکتانس ویندو برای خشک‌کردن ورقه‌های برش خورده

همرفت^۱ و تابش^۲ رخ می‌دهد (Seyfi, et al., 2021). به‌طور کلی، انتقال حرارت هدایتی در سامانه غالب است، اما هر شکل انتقال حرارت در قسمت‌های مختلف سامانه خشک‌کن رخ می‌دهد. در سامانه خشک‌کردن فرکتانس ویندو، محصول با رطوبت بالا بر روی یک لایه پلاستیکی نازک قرار می‌گیرد. این لایه فیلمی نازک، از زیر با گردش آب گرم، گرم شده و ماده غذایی را خشک می‌کند (Fazia et al., 2023). لایه پلاستیکی نازک یک "پنجره" در سامانه ایجاد می‌کند که در آن امکان انتقال گرما و جرم از آب گرم به مواد مرطوب را ایجاد می‌کند. این "پنجره" اجازه می‌دهد تا انرژی مادون قرمز از ماده مرطوبی که روی فیلم پلاستیکی قرار گرفته است، عبور کند (Silva et al., 2023). با کاهش رطوبت در محصول، پنجره به تدریج بسته می‌شود و انتقال تابش حرارتی کاهش می‌یابد. با بسته‌شدن پنجره، از رسیدن مواد به دمای حمام آب (۹۵-۹۷ درجه سانتی‌گراد) جلوگیری می‌شود (Fazia et al., 2023). در سامانه خشک‌کردن فرکتانس ویندو، از مولکول‌های آب در حال گردش در دمای ۹۵-۹۷ درجه سانتی‌گراد و در فشار جو برای انتقال حرارت به محصول استفاده می‌گردد و دمای محصول به‌طور کلی زیر ۷۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند (Mahanti & Kumar, 2021).

در پژوهشی به‌وسیله خشک‌کن فرکتانس ویندو خشک‌کردن چغندر با ضخامت یک و پنج میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. رنگ، بافت، محتوای کل فنل، محتوای فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی چغندر با روش خشک‌کردن فرکتانس ویندو مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین نتایج از دست‌دادن آب و افزایش جامد کل با محلول ساکارز ۶۵ درصد در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به دست آمد. روش فرکتانس ویندو (RW) تا حدی محتوای آب برش‌ها را کاهش داد و باعث کاهش زمان خشک‌شدن در ۸۵ درجه سلسیوس شد. با این حال، حفظ کیفیت‌هایی مانند رنگ، بافت، فنل کل، فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در چغندر با خشک‌شدن توسط RW در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تحت شرایط ۶۵ درصد ساکارز به دست آمد (Calderón-Chiu et al., 2020).

عملکرد خشک‌کن فرکتانس ویندو با استفاده از دماهای خشک‌کردن مختلف (۷۵، ۸۵ و ۹۵ درجه سلسیوس) و ضخامت‌های مختلف ورقه انبه (۱، ۳ و ۵ میلی‌متر) ارزیابی شد. دمای خشک‌کردن و ضخامت ورقه انبه به طور

²- Radiation

¹- Convection

کم عمق قرار داده شده و با آب داغ پر می شود تا سطح آب با سطح زیرین فیلم برخورد کند و در کنار این حمام گرم، حمام آب سرد برای خنک کردن محصول قبل از خروج از خشک کن وجود خواهد داشت. آب گرم در حمام آب گرم از طریق واحد گرمایش به گردش در می آید تا دمای ثابت آب حفظ شود و راندمان حرارتی افزایش یابد.

دریچه ای بین حمام آب گرم و مخزن گرمایش آب تعبیه شده است تا زمانی که دمای آب کمتر از مقدار مورد نظر باشد، آب را پمپ زنی کند. پمپی برای پمپ زنی آب گرم از مخزن آب گرم به حمام در نظر گرفته شده است. پوره ای که حاوی رطوبت بالایی است به طور یکنواخت در یک انتهای فیلم اعمال می شود و پوره خشک شده در انتهای دیگر خشک کن جمع می شود. در بالای فیلم، یک هواپراکننده فولاد ضد زنگ برای تخلیه بخار تبخیر شده از محصول در نظر گرفته شده است. نمایش تصویری سامانه خشک کردن رفراکتنس ویندو به همراه اجزاء در شکل ۱ نشان داده شده است.

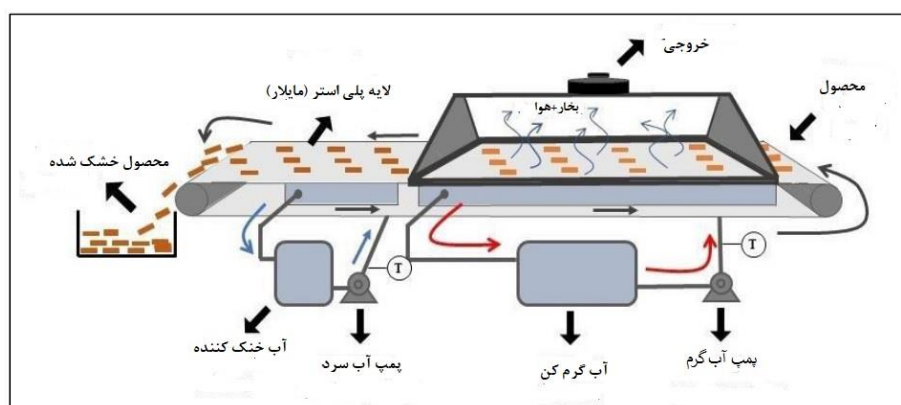
پرتقال انجام شد. از یک سامانه خشک کن رفراکتنس ویندو طراحی شده در مرکز تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی مشهد برای انجام آزمایش ها استفاده شد.

تهیه نمونه

نمونه های میوه پرتقال از بازار محلی در شهرستان جویبار استان مازندران به دست آمد. نمونه ها از نظر رنگ، شکل و اندازه یکنواخت انتخاب شدند و سپس شسته و پس از انتقال به محل آزمایش به برش هایی به قطر ۸ سانتی متر با ضخامت های ۴، ۶ و ۸ میلی متر برش داده شدند.

خشک کن رفراکتنس ویندو

سامانه خشک کردن رفراکتنس ویندو عمدتاً از فیلم مایلار برای انتقال انرژی تابشی به محصول برای خشک کردن محصول و انتقال از یک طرف به طرف دیگر تشکیل شده است. این فیلم روی دو قرقره انتهایی برای حرکت دادن فیلم در طول فرایند خشک کردن پشتیبانی می شود. در زیر فیلم، یک حمام آب



(الف)



(ب)

شکل ۱- طرح شماتیک سامانه: رفراکتنس ویندو و اجزای آن (الف) و نمونه مورد استفاده در آزمایش (ب)

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \quad 0/1 < B_i < 100$$

$$A_n = \frac{2(-1)^{n+1}}{\mu_n} \quad B_i > 100 \quad (5)$$

$$B_n = \exp(-\mu_n^2 F_0) \quad 0/1 < B_i < 100, B_i > 100$$

در معادله بالا μ_n ریشه n ام (بدون بعد)، F_0 عدد فوریه و Bi عدد بایوت هستند. عدد فوریه^۱ و بایوت^۲ برای محصولات به شکل صفحه‌ای (ورقه‌ای) می‌تواند از روابط زیر به دست آید:

$$Fo = \frac{Dt}{L^2} \quad (7)$$

در رابطه بالا D ضریب مؤثر رطوبت (m^2/s)، L نصف ضخامت محصول در حال خشک شدن (m)، t ضریب انتقال جرم (m/s) است. برای ترم‌های بالا در معادله ۴ به علت کوچک شدن عدد فوریه، این معادله را می‌توان خلاصه و به صورت معادله ۸ بیان کرد (Li et al., ۲۰۱۹).

$$MR \cong A_1 B_1 \quad (8)$$

عامل‌های A_1 و B_1 از رابطه ۸ به منظور محاسبه نسبت رطوبت می‌توانند از روابط زیر تعیین گردند (Bernaert et al., 2019).

$$A_1 = G = \exp\left[\frac{0.2533Bi}{1.3 + Bi}\right] \quad (9)$$

$$B_1 = \exp(\mu_1^2 Fo) \quad (10)$$

در معادله بالا G ، فاکتور لاگ^۳ (بدون بعد) است. فاکتور لاگ را با استفاده فن برازش معادله بر منحنی تغییرات رطوبت نسبت به زمان به دست آورد. رابطه (۱۱)، معادله برازشی بر منحنی داده‌های نسبت رطوبت نسبت به زمان می‌باشد.

$$MR = G \exp(-St) \quad (11)$$

در رابطه بالا S آهنگ ثابت خشک شدن (s^{-1}) می‌باشد. ضریب نفوذ رطوبت را با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه نمود (Motevali et al., 2014).

$$D = \frac{SL^2}{\mu_1^2} \quad (12)$$

به منظور محاسبه عامل انتقال جرم با استفاده از روش دینسر و دوست (Dicer and Dost, 1995)، ابتدا ضریب لاگ را از رابطه (۹) به دست آورده و به دنبال آن با استفاده از رابطه (۱۱) ضریب بایوت محاسبه می‌گردد. با محاسبه عدد بایوت

انتقال جرم

محاسبه ضریب نفوذ رطوبت (ضریب انتقال جرم داخلی) به روش کرنک

ضریب نفوذ مؤثر رطوبتی (ضریب انتقال جرم داخلی) برای اجسام صفحه تخت با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد (Jafarian et al., 2017).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial^2} \quad (1)$$

به منظور حل معادله بالا باید فرضیاتی را در نظر گرفت تا بتوان آن را حل نمود که این فرضیات عبارتند از: ۱- پخش یکنواخت رطوبت در جرم جسم، ۲- تعادل رطوبت سطح نمونه با هوای محیط، ۳- مقاومت برابر سطح نمونه با مقاومت داخلی آن در برابر انتقال جرم، ۴- انتقال جرم فقط از طریق پدیده پخش، ۵- ضریب پخش رطوبت ثابت.

کرنک معادله (۱) را برای توزیع مقدار رطوبت باتوجه به شرایط مرزی ذکر شده را حل کرد و برای زمان‌های طولانی خشک کردن رابطه (۲) ساده شده زیر را استفاده کرد (Li et al., 2019).

که MR نسبت رطوبت، a نصف ضخامت ورقه‌ها، D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبتی و n عدد صحیح مثبت است.

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

با خطی‌سازی (لگاریتم‌گیری از طرفین رابطه ۲) و تعیین شیب خط (K_0) به دست می‌آید. ضریب K_0 با رسم منحنی $\ln(MR)$ در مقابل زمان (بر حسب ثانیه) مطابق رابطه (۳)، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (ضریب انتقال جرم داخلی) محاسبه می‌شود (Jafarian et al., 2017).

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4a^2} \quad (3)$$

محاسبه ضریب نفوذ رطوبت (ضریب انتقال جرم داخلی) به روش دینسر و دوست

نسبت رطوبت در طول فرایند خشک کردن می‌تواند از رابطه ۴ به دست آید (Liu et al., ۲۰۱۸).

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \quad (4)$$

که در رابطه بالا A_n و B_n با استفاده از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید (Mahanti & Kumar, 2021).

³ Lug factor

¹ Fourier number

² Biot

$$\text{slope}(K_2) = \left(\frac{E_a}{R_g} \right) \quad (15)$$

ضریب انتقال جرم همرفتی

ضریب انتقال جرم همرفتی یا ضریب انتقال جرم خارجی محصول در حال خشک شدن است که می توان با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه کرد (Bernaert et al., 2019).

$$Bi = \frac{kL}{D} \quad (16)$$

در رابطه بالا D ضریب مؤثر رطوبت (m^2/s)، L نصف ضخامت محصول در حال خشک شدن (m)، k ضریب انتقال جرم (m/s) می باشد.

محاسبه عامل های انرژی

به منظور محاسبه انرژی مصرفی در طول فرایند خشک کردن ورقه های پرتقال در تیمارهای مختلف خشک کردن از یک شمارگر استفاده گردید که مجموع انرژی مصرفی در بخش های مختلف خشک کردن از جمله اجاقک ها، پمپ حرارتی، فن و حسگرها را اندازه گیری می کرد. انرژی مخصوص مصرفی مورد نیاز، بازده خشک شدن و نرخ تبخیر رطوبت ویژه (SMER) به ترتیب با استفاده از رابطه های ۱۷، ۱۸ و ۲۰ محاسبه گردید (جدول ۱).

می توان ضریب μ_1 را محاسبه نمود و به دنبال آن ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را می توان با استفاده رابطه (۱۲) محاسبه کرد.

انرژی فعال سازی

به منظور تعیین انرژی فعال سازی در خشک کردن برگه های پرتقال در یک خشک کن بازگردشی جریان هوای گرم از مقادیر ضریب نفوذ به دست آمده از دو روش کرنک و روش دینسر و دوست استفاده شد (Dicer and Hussein, 2002). معادله آرنیوس (رابطه ۱۳) همبستگی بین دما و ضریب نفوذ رطوبت را تعریف می کند (Leilayi et al., 2025).

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{R_g(T + 273.15)} \right) \quad (13)$$

در رابطه بالا D_0 ، ثابت ضریب پخش (m^2/s)، E_a ، انرژی فعال سازی (kJ/mol)، R_g ، ثابت جهانی گازها ($kJ/mol.K$)، T ، دمای مطلق هوا (K) است.

رابطه خطی E_a با استفاده از رابطه (۱۴) به دست آمد

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \left(\frac{E_a}{R_g} \right) \left(\frac{1}{T + 273.15} \right) \quad (14)$$

در نهایت، انرژی فعال سازی برای دماهای مختلف با تعیین شیب نمودار $\ln D_{eff}$ در برابر دما با استفاده از معادله (۱۵) محاسبه شد (Leilayi et al., 2025).

جدول ۱- روابط مربوط به محاسبه انرژی مخصوص مصرفی مورد نیاز، بازده خشک شدن و نرخ تبخیر رطوبت ویژه (SMER)

منبع	شماره معادله	معادله
(Mustafa et al., 2017)	(۱۷)	$S.E.C = \left[\frac{E.C_{total}}{M_i - M_f} \right]$
(Majumdar&Menon, 1995)	(۱۸)	$D.E = \frac{Q_w + Q_m}{E.C_{total}}$ $= \frac{h_{fg} \cdot (M_i - M_f) + M_f C_m (T_{m2} - T_{m1})}{E.C_{total} \times 3600}$
(Majumdar&Menon, 1995)	(۱۹)	$C_m = 1465.0 + 3560.0 \left(\frac{M_p}{1 + M_p} \right)$
(Majumdar&Menon, 1995)	(۱۹)	$M_p = \left(\frac{M_i - M_f}{M_f} \right)$
(Nindo & Tang, 2007)	(۲۰)	$SMER = \frac{M_i - M_f}{E.C_{total}}$

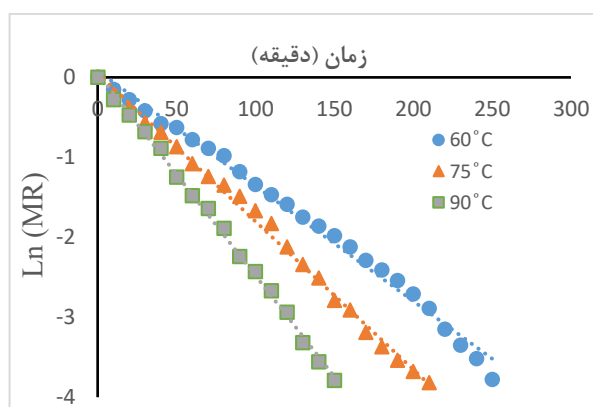
C_m گرمای ویژه محصول ($kJ/kg \cdot ^\circ K$)، T_{m1} دمای اولیه محصول ($^\circ K$)، T_{m2} دمای نهایی محصول ($^\circ K$)، M_p محتوی رطوبتی محصول (kg_{water}/kg_{solid}) و SMER نرخ تبخیر رطوبت ویژه است (kg/kWh).

در رابطه های بالا S.E.C انرژی مخصوص مصرفی (kJ/kg)، $E.C_{total}$ کل انرژی مصرفی (kJ)، M_i وزن اولیه محصول، M_f وزن نهایی محصول، D.E بازده خشک کردن (kg)، Q_m انرژی لازم برای گرم کردن (kJ)، Q_w انرژی لازم برای تبخیر رطوبت از محصول (kJ)، h_{fg} گرمای نهان تبخیر (kJ/kg).

نتایج و بحث

انتشار رطوبت مؤثر

به‌منظور تعیین ضریب انتقال جرم داخلی به روش کرنک، نمودار $\ln(MR)$ نسبت به زمان (دقیقه) در دماهای مختلف و برای نمونه در ضخامت ۶ میلی‌متر ورقه‌های برش خورده پرتقال در شکل ۲ رسم شد و بر اساس آن شیب نمودارها تعیین گردید. همان‌طور که از نمودارها پیداست با افزایش دمای هوای خشک‌کردن به علت کاهش زمان خشک‌شدن، شیب نمودارهای رسم شده افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده خروج سریع‌تر رطوبت از لایه‌های میانی به سطح و در نتیجه خشک‌شدن سریع‌تر می‌باشد.



شکل ۲- تغییرات $\ln(MR)$ در دماهای مختلف نسبت به زمان در خشک‌کن رفراکتنس ویندو

جدول ۲ عامل‌های مربوط به برازش مدل ریاضی (معادله ۱۰) را بر داده‌های نسبت رطوبت (شکل ۴) نشان می‌دهد. همچنین ریشه اول غیرجبری (μ) و ضریب بایوت نیز در این جدول آمده است. نتایج نشان داد که آهنگ ثابت خشک‌شدن (S) با افزایش دما روند افزایشی داشت که دلیل این امر افزایش گرادیان حرارتی در محصول در حال خشک‌شدن بوده که سبب خروج سریع‌تر رطوبت از ورقه‌های پرتقال گردیده و زمان خشک‌شدن کاهش یافته و شیب منحنی خشک‌شدن افزایش می‌یابد که روی ضرایب مدل اثرگذار خواهد بود و مقدار آن‌ها را افزایش می‌دهد.

در طول دوره خشک‌شدن با نرخ نزولی، انتقال جرم در اثر مقاومت داخلی انجام می‌گیرد و انتقال رطوبت در حین خشک‌شدن توسط انتشار داخلی واپایش می‌شود. در این مورد، قانون دوم فیک می‌تواند برای تخمین نفوذ مؤثر رطوبت استفاده شود. مقادیر تعیین شده ضریب رطوبت مؤثر برای تمام

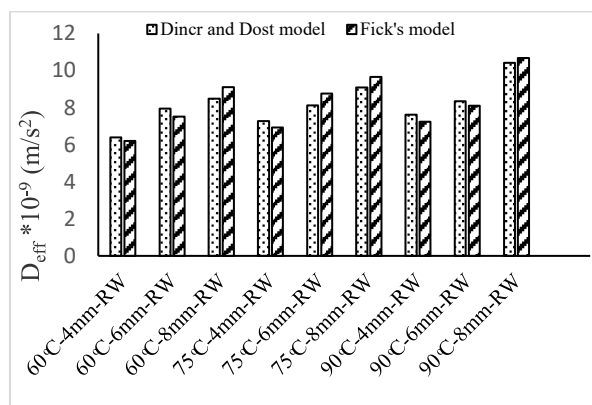
شرایط خشک‌کردن در شکل ۳ نشان شده است. مشخص شد که تغییرات رطوبت مؤثر آن از $6/21 \times 10^{-9}$ تا $10/68 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه در خشک‌کن رفراکتنس ویندو تغییر کرد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مقادیر D_{eff} با افزایش دمای هوا در فرایند خشک‌کردن روند افزایشی داشت که این امر به دلیل افزایش فشار بخار داخل نمونه‌ها بوده که منجر به ایجاد جنبش مولکولی و حرکت سریع آب در دمای بالا می‌شود. همچنین، با افزایش ضخامت میزان انتقال جرم افزایش یافت که موجب افزایش ضریب نفوذ مؤثر شد.

ضریب انتقال جرم همرفتی با افزایش ضخامت روند صعودی داشت که دلیل این امر خروج سریع‌تر رطوبت در ورقه‌های ضخیم‌تر و در نتیجه افزایش انتقال جرم از محصول گردید. بالاترین مقدار ضریب جرم همرفتی در دمای ۹۰ درجه سلسیوس و ضخامت ورقه ۸ میلی‌متر با استفاده از مدل فیک به میزان $8/19 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ به دست آمد درحالی‌که پایین‌ترین میزان این عامل در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۴ میلی‌متر به میزان $3/2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ به دست آمد. همچنین بالاترین مقدار ضریب جرم همرفتی در دمای ۷۵ درجه سلسیوس و ضخامت ۶ میلی‌متر به میزان $7/9 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ به دست آمد درحالی‌که پایین‌ترین میزان این عامل در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۴ میلی‌متر به میزان $3/12 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ به دست آمد. نتایج مشابهی توسط سایر پژوهشگران در خشک‌کردن زعفران (Shi et al., 2013) و سیب (Torki-Harchegani et al., 2017) گزارش شده است. میزان ضریب انتشار رطوبت برای خشک‌کردن کدو در یک خشک‌کن هوای داغ در محدوده دمایی ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس $3/4 \times 10^{-9}$ تا $7/3 \times 10^{-9}$ گزارش شده است (Pavan et al., 2012). همچنین در مطالعه دیگری ضریب انتشار رطوبت برای ذرت در محدوده دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس $3/6 \times 10^{-9}$ تا $8/4 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه گزارش شده است (Pathare & Sharma, 2006). مقادیر D_{eff} به‌دست‌آمده در مطالعه حاضر با داده‌های محققان دیگر تا حد قابل ملاحظه‌ای همخوانی دارد (Sadeghi et al., 2013; Rajoriya et al., 2020). تفاوت‌ها ممکن است به دلیل این واقعیت باشد که اثر نفوذ رطوبت در محصولات کشاورزی که مواد زیستی محسوب می‌شوند بر حسب ویژگی‌های آن‌ها، تنوع نمونه، ترکیب و هندسه، دمای هوا، رطوبت و پیش تیمارها متفاوت است.

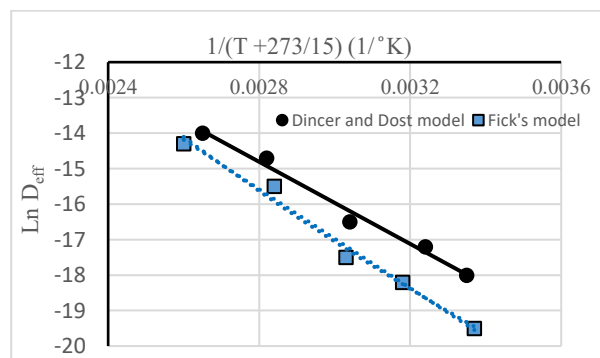
جدول ۲- مقادیر ضریب بایوت، فاکتور لاگ و آهنگ ثابت خشک شدن در تیمارهای مختلف خشک کردن

ضخامت (mm)	دما (°C)	ضریب بایوت Bi	μ	فاکتور لاگ (G)	آهنگ ثابت خشک شدن
۴	۶۰	۰/۴۰۹	۰/۵۶۴	۱/۰۶۲	۰/۰۰۰۱۰۹۸
	۷۵	۰/۴۹۶	۰/۵۹۸	۱/۰۶۵	۰/۰۰۰۱۲۴۲
	۹۰	۰/۵۳۳	۰/۶۱۱	۱/۰۶۴	۰/۰۰۰۱۸۸۲
۶	۶۰	۰/۳۳۲	۰/۵۳۷	۱/۰۵۳	۰/۰۰۰۱۴۷۵
	۷۵	۰/۳۷۹	۰/۵۷۴	۱/۰۵۹	۰/۰۰۰۱۵۸۳
	۹۰	۰/۴۱۱	۰/۵۹۷	۱/۰۶۵	۰/۰۰۰۱۶۹۲
۸	۶۰	۰/۳۰۱	۰/۵۰۷	۱/۰۳۹	۰/۰۰۰۱۵۸۴
	۷۵	۰/۳۵۶	۰/۵۲۱	۱/۰۴۴	۰/۰۰۰۱۸۱۴
	۹۰	۰/۴۰۵	۰/۵۴۸	۱/۰۵۷	۰/۰۰۰۲۳۹۶

مقادیر در محدوده گزارش شده توسط دیگر محققان به دست آمد. میزان انرژی فعال سازی برای خشک کردن کدو در یک خشک کن 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 (Pavan *et al.*, 2012). همچنین در تحقیقی برای خشک کردن انجیر در هوای داغ انرژی فعال سازی در محدوده ۳۰/۸-۴۸/۴ کیلوژول بر مول به دست آمد (Silva *et al.*, 2023).



شکل ۳- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در دو مدل فیک و مدل دینسر و دوست در شرایط مختلف خشک کردن



شکل ۴- رابطه آرنیوس بین ضریب انتشار رطوبت مؤثر و عکس دمای مطلق در ضخامت ورقه ۶ میلیمتر

انرژی مصرفی و انرژی مخصوص

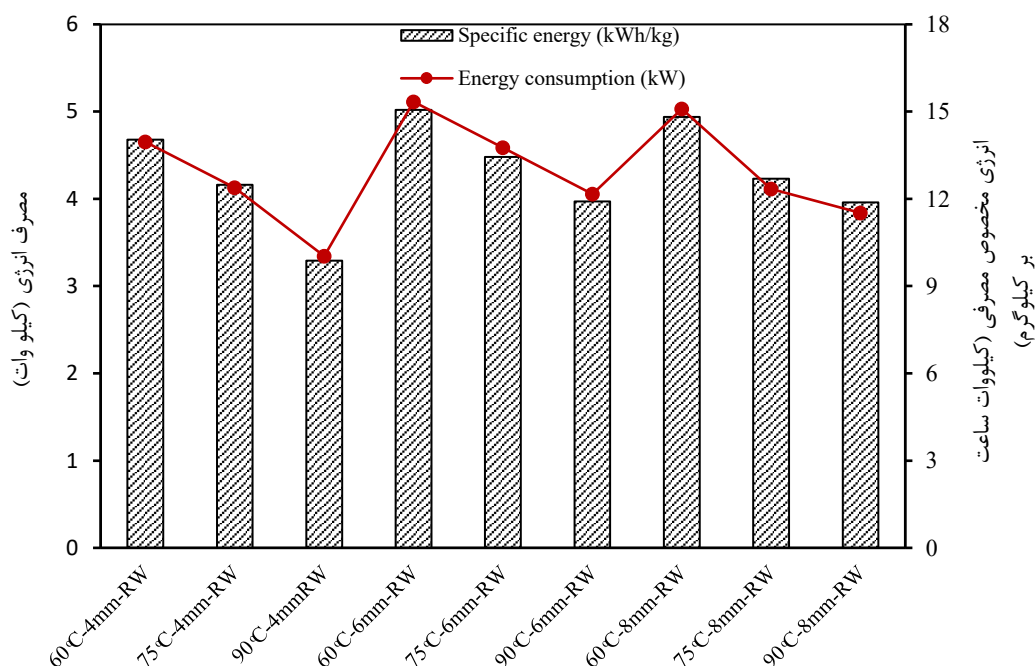
شکل ۵ تغییرات انرژی مصرفی و انرژی مخصوص مورد نیاز برای خشک کردن ورقه های پرتقال را در دو نوع خشک کن با تیمارهای دما و ضخامت مختلف نشان می دهند. پایین ترین میزان انرژی مصرفی و انرژی مخصوص مورد نیاز به ترتیب به

انرژی فعال سازی

انرژی فعال سازی به صورت لگاریتم D_{eff} به عنوان تابعی از عکس دمای مطلق در شکل ۴ ترسیم شد و یک رابطه خطی را نشان می دهد که از معادله آرنیوس به دست آمده است. انرژی فعال سازی برخی از محصولات است توسط محققان در محدوده ۱۶ الی ۳۹ کیلوژول بر مول گزارش شده است (Seyfi *et al.*, 2021; Nindo & Tang, 2007; Mustafa *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2023) از شیب خط مستقیم که از معادله آرنیوس استخراج شده است، بالاترین میزان انرژی فعال سازی به روش کرنک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به میزان ۳۶/۳۵ kJ/mol و پایین ترین میزان این عامل به میزان ۲۰/۱۳ kJ/mol در دمای ۹۰ درجه سلسیوس می باشد. این

محصول و کاهش فشار بخار اشباع، قابلیت جذب رطوبت از سطح محصول توسط هوای خشک‌کننده افزایش یافته و محصول در زمان کمتری خشک می‌گردد. برای خشک کردن کیوی بیشترین انرژی مخصوص مصرفی $20/52 \text{ kWh/kg}$ و کمترین انرژی مخصوص مصرفی $6/65 \text{ kWh/kg}$ گزارش شده است (Bernaert et al., 2019).

میزان $3/53 \text{ kW}$ و $9/75 \text{ kWh/kg}$ در دمای 90°C به سلسیوس و ضخامت 4 mm و بالاترین میزان این دو عامل به مقدار $5/11 \text{ kW}$ و $15/2 \text{ kWh/kg}$ در دمای 60°C به سلسیوس و ضخامت 8 mm در خشک‌کن رفرکتنس ویندو مشاهده شد. دلیل این امر آن است که با افزایش دمای خشک‌کردن به دلیل سرعت بیشتر خارج کردن رطوبت از

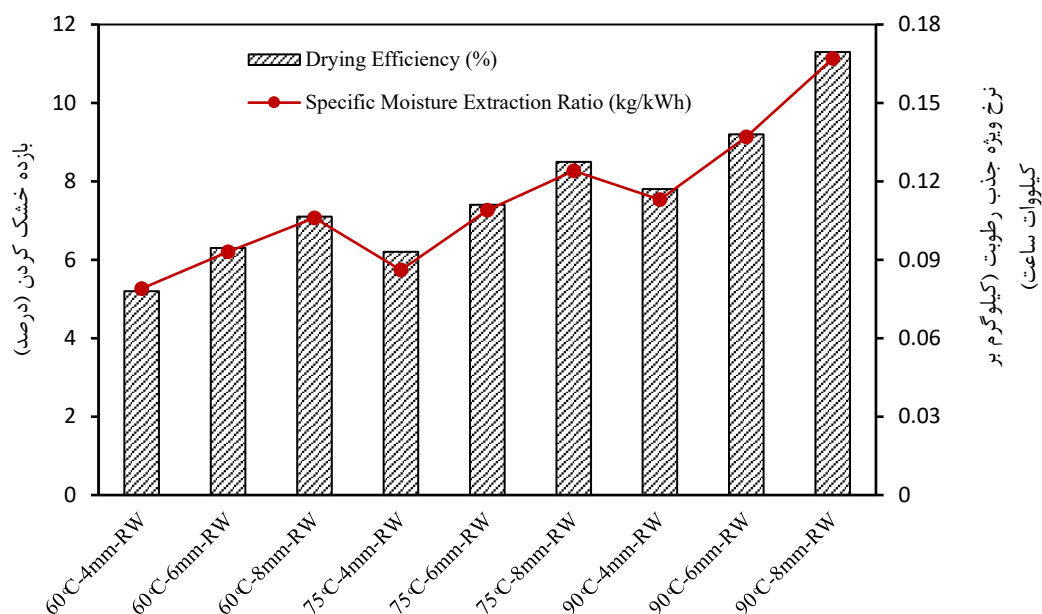


شکل ۵- انرژی مصرفی و انرژی مخصوص مورد نیاز در خشک‌کن رفرکتنس ویندو

همچنین نرخ تبخیر رطوبت ویژه بیانگر میزان انرژی مورد نیاز برای خارج کردن یک کیلوگرم آب از محصول می‌باشد. هر چه نرخ تبخیر رطوبت ویژه عددی بزرگ‌تر باشد بیانگر عملکرد بهتر سامانه حرارتی می‌باشد. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌گردد بالاترین میزان این عامل در دمای بالاتر خشک کردن یعنی 90°C به سلسیوس به دلیل نرخ تبخیر بالاتر رطوبت از محصول رخ می‌دهد. از طرف دیگر با مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان دریافت که نرخ تبخیر رطوبت ویژه با افزایش توان مصرفی روند کاهشی داشت که دلیل این امر انرژی مصرفی بالاتر به ازای خروج یک واحد رطوبت از محصول می‌باشد. نتایج مشابهی توسط سایر پژوهشگران در خشک کردن برگ‌های نعنا (Ndukwa et al., 2017; Mustafa et al., 2017)، لایه‌های هویج (Yoha et al., 2020) و زنجبیل (Shi et al., 2013) گزارش شده است.

بازده خشک کردن و نرخ تبخیر رطوبت ویژه

بررسی دو عامل بازده خشک کردن و نرخ تبخیر رطوبت ویژه (SMER) در شکل ۶ نشان داد که پایین‌ترین میزان این دو عامل به ترتیب $5/3$ درصد و $0/082$ در دمای 60°C به سلسیوس و ضخامت 4 mm و بالاترین میزان این دو عامل به ترتیب به میزان $11/6$ درصد و $0/167$ در دمای 90°C به سلسیوس و ضخامت 8 mm در خشک‌کن رفرکتنس ویندو بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما میزان هر دو عامل بازده خشک کردن و SMER روند افزایشی داشت که دلیل این امر ایجاد اختلاف گرادیان حرارتی بین محصول در حال خشک شدن و هوای خشک کردن می‌باشد که سبب افزایش نرخ انتقال رطوبت از محصول در واحد زمان شده و به دنبال آن خروج سریع رطوبت از محصول اتفاق افتاده و با صرف انرژی کمتر محصول به وزن نهایی خشک شدن می‌رسد.



شکل ۶- اثرات دما و ضخامت ورقه های برش خورده پرتقال بر بازده خشک کردن و SMER

نتیجه گیری

- نویسنده دوم: نگارش مقاله، بازبینی و اصلاح، نظارت، مفهوم سازی، اعتبارسنجی و تحلیل.
- نویسنده سوم: روش شناسی، بررسی تأمین مالی، بازبینی و اصلاح، نظارت، مفهوم سازی، اعتبارسنجی.
- نویسنده چهارم: اعتبارسنجی، بازبینی و اصلاح، تأمین مالی، مدیریت پروژه، مفهوم سازی و بررسی تأمین مالی.
- نویسنده پنجم: روش شناسی، بررسی تأمین مالی، بازبینی و اصلاح، نظارت، مفهوم سازی، اعتبارسنجی.

دسترسی به داده ها

داده ها تنها در اختیار نویسنده ها است و در صورت درخواست کتبی امکان در اختیار قرار دادن وجود دارد.

اصول اخلاقی

در تهیه این مقاله کلیه اصول اخلاقی رعایت شده است و از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته شده ای که ممکن است بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد، ندارند.

ارزیابی پدیده انتقال جرم در خشک کن فرکتنس ویندو با کمک مدل های شناخته شده کرنک و دینسر و دوست برای خشک کردن ورقه های برش خورده پرتقال در دماها و ضخامت های مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش دما موجب تسریع در انتقال جرم داخلی و کاهش انرژی فعال سازی و در نتیجه باعث خشک شدن سریع تر محصول گردید. انرژی مصرفی و انرژی مخصوص در دمای بالاتر و ضخامت کمتر کمترین مقدار را دارند. همچنین بازده خشک کردن و نرخ ویژه جذب رطوبت با افزایش دما و ضخامت برش افزایش یافت.

سپاسگزاری

از کارشناسان مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی مشهد و همچنین آزمایشگاه مرکزی دانشگاه علوم کشاورزی ساری بابت همکاری در انجام آزمایشگاه تشکر و قدردانی می شود.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

- نویسنده اول: گردآوری داده، نگارش متن اولیه مقاله، اعتبارسنجی، نرم افزار، تأمین مالی، مدیریت پروژه.

- Drying Technology, 13: 425–435.
<https://doi.org/10.1080/07373939508916962>
- Dincer, I., & Hussain, M. M. (2002). Development of a new Bi-Di correlation for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45: 3065–3069
- FAO. (2025). World Food and Agriculture, Statistics division.(FAOSTAT).
<https://www.fao.org/statistics/en>.
- Fazia, T., Shafat, K., Dar, A., Manzoor, N., Kumar, N., & Dwivedi, M. (2023). Refractance window drying of walnut kernel (*Juglans regia* L.). *Discover Food*, 3. <https://doi.org/10.1007/s44187-023-00040-0>
- Gao, L., Ma, W., Huang, J., Yang, Y., & Sun, C. (2020). The effect of refractance window on the performance of a solar dryer with energy and exergy analyses. *Energy Conversion and Management*, 219, 113188.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113188>
- Gebeyehu, S.K., Asemu, A.M., Haile, A.S., Kass, M.G. (2025). Influence of temperature and mango thickness on the performance of refractance window dryer. *Applied Food Research*, 5(1), 100939.
<https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100939>
- Hernández, Y., Ramírez, C., Moreno, J., Núñez, H., & Vega, O. (2020). Effect of Refractance Window on dehydration of osmotically pretreated apple slices: Color and texture evaluation. *Journal Food Process Engineering*, 43(2), 1-11.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.13304>
- Jafarian, H., Tabatabaekoloor, R., & Moosavi S. R. (2017). Experimental Investigation on Dill Drying in a Solar-Assisted Heat Pump Dryer. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 19(4), 835–845.
- Leilayi, M., Arabhosseini, A., Samimi Akhijahani, H., Kaveh, M., Nezamlu, N., Aghaei, M. (2025). Energy and exergy efficiencies of batch paddy rice drying with liquefied petroleum gas dehumidification: A comprehensive analysis using adaptive neuro-fuzzy inference system and artificial neural networks approaches. *Energy Conversion and Management*, 25, 100826.
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100826>
- Li, Z., Raghavan, G., Wang, N., Vigneault, C. (2019). Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 104(2), 234–238. <https://doi.org/10.1016/j.foodeng.2010.12.014>
- Liu, S., Li, X., Song, M., Li, H., & Sun, Z. (2018). Experimental investigation on drying performance of an existed enclosed fixed frequency air source heat pump drying system. *Applied Thermal Engineering*, 130: 735–744.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.068>
- Mahanti, N. & Kumar, M. (2021). Refractance WindowTM-Drying vs. other drying methods and effect of different process parameters on quality of foods: A comprehensive review of trends and
- حمایت مالی
 نویسندگان هیچ حمایت مالی خاصی برای انجام این پژوهش دریافت نکرده‌اند.
- منابع
 Al-Hilphy, A., Ali, H., Al-Iessal, S., & Lorenzo, J. (2020). Optimization of process variables on physicochemical properties of milk during an innovative refractance window concentration. *Journal Food Processing Preservation*, 44(10), 1-13.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.14782>, 1-13
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.027>
- Asrate, D.A., & Ali, A.N. (2025). Review on the recent trends of food dryer technologies and optimization methods of drying parameters. *Applied Food Research*.5(1),100927.
<https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100927>.
- Annual Agricultural Statistics. (2024). Ministry of Jihad-e Keshavarzi, Statistics division. Iran.
- Bernaert, N., Van Droogenbroeck, B., Van Pamel, E., & De Ruyck, H. (2019). Innovative refractance window drying technology to keep nutrient value during processing. *Trends in Food Science and Technology*. 84: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.029>, 22-24
- Borse, S. M., Gupta, S. V., & Patil, B. N. (2025). A review on Refractance window drying of fruits. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 9(1), 472-482.
<https://doi.org/10.33545/26174693.2025.v9.i1.f3558>
- Byarugaba, R., Nakimbugwe, D., & Huysekens, S. (2025). Concentration of native whey through Refractance Window Drying (RWD) for the production of a novel ingredient containing galacto-oligosaccharides and functional proteins, *Applied Food Research*, 5, 101459.
<https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101459>
- Calderón-Chiu, C., Martínez-Sánchez, C., Rodríguez-Miranda, J., Juárez-Barrientos, J., Carmona-García, R., & 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*. 38(12), 1663-1675.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1655439>
- Catalan, S., Reyes, S., Valenica, P., Castro, C., Cordovan, A. (2026). Evaluation of energy efficiency and quality parameters by drying beets with arefractive window (*Betavulgaris*). *LWT- Food Science and Technology*, 245, 119238.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2026.119238>
- Channe, D. & Datta, A. (2018). Refractance window drying of fruits and vegetables: A Review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), 1449-1456. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9356>
- Dincer, I., & Dost, S. (1995). An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying.

- Science and Emerging Technologies, 66(1):102530. <https://doi.org/10.1016/2020.102530>
- Ramirez, C., Nunez, H., Vallejos, R., Belmonte, K., Almonacid, S., & Marva, F. (2026). Simultaneous application of refractance window and microwave drying: A novel hybrid technique for fruit dehydration to reducing drying time and improve bioactive compound retention. *Future Foods*, 12, 100709. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100709>
- Sadeghi, M., Mirzabeigi, Kesbi, O., & Mireei S. A. (2013). Mass transfer characteristics during convective, microwave and combined microwave-convective drying of lemon slices. *Journal of Food Science and Agriculture*, 93 (3): 471-478. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5786>
- Seyfi, A., Rezaei, A., & Motevali, A. (2021). Comparison of the energy and pollution parameters in solar refractance window (photovoltaic-thermal), conventional refractance window, and hot air dryer. *Solar Energy*, 229(7), 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.094>
- Silva, N. C. Freitas, L. V. D. Silva, T. C. Duarte, C. R. & Barrozo, M. A. S. (2023). Use of Refractance Window drying as an alternative method for processing the microalga *ppirulina platensis*. *Molecules*, 28: 720-731. <https://doi.org/10.3390/molecules28020720>
- Shi, Q., Zheng, Y., & Zhao, Y. (2013). Mathematical modeling on thin-layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices. *Energy Conversion and Management*, 71, 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.032>
- Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Maghsoodi, V., & Moheb, A. (2017). Infrared thin layer drying of saffron (*Crocus sativus* L.) stigmas: Mass transfer parameters and quality assessment. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(4), 426-432. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.09.005>
- Yoha, K., Moses, J., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Conductive hydro drying through refractance window drying – An alternative technique for drying of *Lactobacillus plantarum* (NCIM 2083). *Journal Drying Technology*, 38, 610-620. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1624972>, 1-12
- technological developments. *Future Foods*, 3: 100024. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100024>
- Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., & Khoshtaghaza, M. H., (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conversion and Management*, 87: 711-725. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.012>
- Mustafa, A., Ataollah, K., Burak, A., & Amini, A. (2017). Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer. *International journal of hydrogen energy* 42: 18034-18044. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.007>
- Mujumdar, A. S., & Menon, A. S. (1995). Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: Mujumdar, A.S.Ed (Ed.), *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Nindo, C. I. & Tang, J. (2007). Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. *Drying Technology*, 25, 37-48. <https://doi.org/10.1080/07373930601152673>
- Ndukwa, M. C., Dirioha, C., Fidelis, I., Abam, V., & Ihediwa E. (2017). Heat and mass transfer parameters in the drying of cocoyam slice. *Case Studies in Thermal Engineering*, 9: 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.12.003>
- Nuru, Z., Baye, K., Getuchew, P. (2026). Application of Refractance Window dryer for papaya (*Carica papaya* L.) drying: Evaluation of physicochemical, nutritional, and antioxidant properties. *Applied Food Research*, 6, 102206. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.102206>
- Pavan, M. A., Schmidt, S. J., & Feng, H., (2012). Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried acai (*Euterpe oleracea* Martius) juice. *LWT-Food Science and Technology*, 48, 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.02.024>
- Pathare, P. B. & Sharma, G. P. (2006). Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystem Engineering*, 93: 285-291. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.12.010>
- Rajoriya, D., Shewale, S., & Bhavya, M. (2020). Far infrared assisted refractance window drying of apple slices: Comparative study on flavour, nutrient retention and drying characteristics. *Innovative Food*

