



Original Article

Drying Kinetics of Apple Slices in a Water-Based Solar Dryer Equipped with a Parabolic Trough Collector

Milad Teymori-Omran*¹, Ezzatollah Askari Asli-Ardeh¹, Ali Motevali², Ebrahim Taghinezhad³

1-Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

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

3-Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Apple,
Drying Kinetics,
Parabolic Trough
Collector,
Refractance Window,
Solar Dryer

Received:
November 16, 2024

Revised:
April 8, 2025

Accepted:
April 11, 2025

* Corresponding Author:
miladtomran@uma.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

Today, a high percentage of industrial dryers are convection dryers. Currently, most of the energy used for drying comes from fossil fuels, which have irreparable environmental damage. Solar energy is a clean and renewable energy used for the drying process since ancient times. Over time, various solar dryers were produced and investigated in research. Researches show that most of these dryers are convective and work based on the hot air-drying method. The refractance window dryers are a new generation of dryers with high-quality dried products. Like other dryers, the drying process in these dryers is energy-intensive. This research has tried to provide the energy needed to heat water in an RW dryer system by receiving solar energy through a PTC collector. An attempt has been made to study the drying kinetics of apple slices inside a combined solar dryer. The combined dryer included a refractance window dryer and PTC collector.

Materials and Methods

In this research, an attempt has been made to study the drying kinetics of apple slices inside the combined dryer included a refractance window dryer and a PTC collector. The drying experiments were divided into three categories. The first group of tests was related to the common drying method (RW), which was performed at three temperature levels (65, 75, and 85°C). To conduct tests in the first category, only city electricity was used to heat water. The second group of experiments was conducted as combined drying by solar energy (PRW). In this method, three temperature levels (65, 75, and 85°C) were used. Fick's second law was used to measure the effective diffusion coefficient. Mathematical models were used to describe the drying curves of the thin layer to investigate the drying kinetics. Experimental data obtained from the drying of apple slices were described using Logarithmic, Henderson and Pabis, Newton, Modified Page, and Midili models.

Results and Discussion

The drying time was 140-320 min in the first method, 160-260 min in the second method, and 240 min in the third method. In the first method, the results showed by increasing the temperature from 65 to 85°C, the drying time decreased by 56.25% (from 320 to 140 minutes) and by 38.46% (from 260 minutes to 160 minutes) in the second method. The fitting of the used models with the real data showed that all the used models had good accuracy in determining the process of exiting moisture from the apple

How to cite:

Teymori-Omran, M. Askari Asli-Ardeh, E. Motevali, A. Taghinezhad, E. (2025). *Drying Kinetics of Apple Slices in a Water-Based Solar Dryer Equipped with a Parabolic Trough Collector*. Journal of Agricultural Mechanization, 10 (2):15-25.
<https://doi.org/10.22034/jam.2025.64427.1304>.



slices. Among the investigated models, the Midili model was more accurate than other models due to having higher R^2 and lower SSE and RMSE. The lowest and highest effective moisture diffusivity coefficients obtained in the experiments conducted by RW-65 and RW-85 methods as 8.93×10^{-13} and 4.82×10^{-12} , respectively. Also, the effective moisture diffusion coefficient in the solar method was obtained as 1.74×10^{-12} in SRW.

Conclusion

In fitting the data with the Midili model, the mean values of R^2 , SSE, and RMSE were obtained as 0.963, 0.031, and 0.062, respectively. After the Midili model, modified Page, Henderson, logarithmic and Newton models were more accurate in describing the exit of moisture from the product, respectively. Also, the results showed with increasing the water temperature in the system, the effective moisture diffusion coefficient increases. The presented combined solar dryer has a good ability to dry the apple slices and reduced energy consumption compared to non-renewable resources.

Acknowledgment

This study has been conducted as an interior research project of the University of Mohagheh Ardabili.



سینتیک خشک شدن برگه‌های سیب در یک خشک‌کن خورشیدی برپایه آب مجهز به سیستم متمرکزکننده سهموی خطی

میلاد تیموری عمران^{۱*}، عزت اله عسکری اصلی ارده^۱، علی متولی^۲، ابراهیم تقی نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

- ۱- گروه مهندسی بیوسیستم-دانشکده کشاورزی- دانشگاه محقق اردبیلی-اردبیل-ایران.
- ۲- گروه مهندسی بیوسیستم -دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی-ساری- ایران.
- ۳- گروه مهندسی بیوسیستم -دانشکده کشاورزی-دانشگاه تربیت مدرس-تهران-ایران.

E-mail: miladtomran@uma.ac.ir

* نویسنده مسئول

چکیده

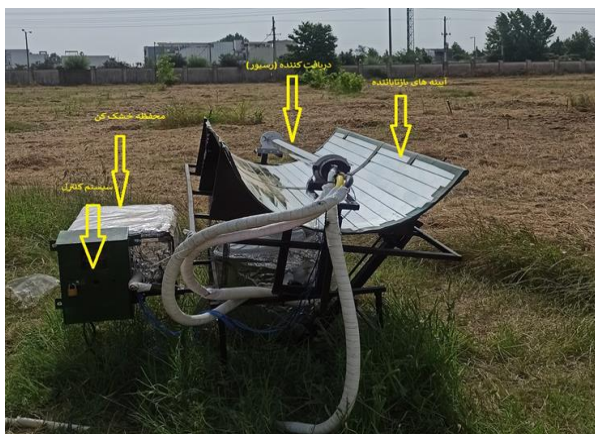
خشک‌کن‌های پنجره انکساری (RW) نسل جدیدی از خشک‌کن‌هایی هستند که کیفیت محصول خشک‌شده در آنها نسبتاً بالا است. فرایند خشک کردن در این خشک‌کن‌ها همانند خشک‌کن‌های دیگر، فرایندی انرژی‌بر محسوب می‌شود. در این پژوهش سعی شده تا سینتیک خشک شدن برگه‌های سیب در داخل یک خشک‌کن خورشیدی ترکیبی مورد مطالعه قرار گیرد. خشک‌کن ترکیبی شامل یک خشک‌کن پنجره انکساری و یک جمع‌کننده (دریافت‌کننده) خورشیدی از نوع متمرکزکننده سهموی خطی (PTC) بود. آزمایش‌های خشک کردن در سه روش شامل خشک کردن رایج پنجره انکساری (RW)، ترکیبی با انرژی خورشیدی (PRW) و روش کاملاً خورشیدی (SRW) بود. در دو روش اول، آزمایش‌ها در سه سطح از دما (65، 75 و 85°C) انجام شد؛ در حالی که در روش سوم دمای خشک کردن بستگی به دمای جمع‌کننده خورشیدی داشت. زمان خشک کردن در روش اول 140-320، در روش دوم 160-260، و در روش سوم 240 دقیقه بود. در میان مدل‌های بررسی شده، مدل میدلی به واسطه داشتن R^2 بالاتر و SSE و RMSE پایین‌تر، دقت بیشتری نسبت به دیگر مدل‌ها داشت. کمترین و بیشترین ضریب نفوذ موثر رطوبت به دست آمده در آزمایش‌های انجام شده به ترتیب به روش‌های RW-65 و RW-85 به مقادیر 8.93×10^{-13} و 4.82×10^{-12} اختصاص داشت. همچنین مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت در روش خورشیدی SRW به میزان 1.74×10^{-12} بدست آمد.

کلمات کلیدی: پنجره انکساری، خشک‌کن خورشیدی، سیب، سینتیک خشک کردن، متمرکزکننده سهموی خطی.

۱- مقدمه

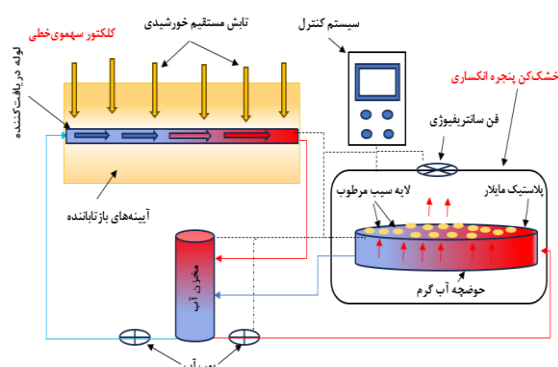
امروزه درصد زیادی از خشک کن های صنعتی از نوع خشک کن های همرفتی هستند. در خشک کن همرفتی هوای داغ ایجاد شده توسط یک گرمکن به کمک یک دمنده جریان می یابد و با برخورد با سطح محصول - تر موجب خشک شدن آن می شود. امروزه در زمینه ساخت خشک کن ها شاهد نسل های سوم و چهارم خشک کن ها از جمله خشک کن های انجمادی، اسمزی، مایکروویو، مادون قرمز، رادیو فرکانسی، و خشک کن پنجره انکساری هستیم (EL-Mesery et al, 2021; Onwude et al., 2018). هزینه بالای ساخت، تجهیزات پیچیده، فرآیند خشک کردن تدریجی (در خشک کن های انجمادی)، رطوبت نهایی و محتوای قندی بالای محصول (در خشک کن اسمزی) و از دست رفتن عطر، طعم و ترکیبات بیواکتیو باعث شده تا خشک کن های جدید از توسعه صنعتی مطلوبی برخوردار نباشند (Calín-Sánchez et al., 2020). خشک کن پنجره انکساری، یکی از خشک کن های نسل چهارم هست که در سال های اخیر توسعه پیدا کردند. در این روش از آب گرم به عنوان عامل انتقال حرارت به محصول تر استفاده می شود. دمای آب در این روش به نزدیکی نقطه جوش آن در شرایط اتمسفر (100°C) می رسد. محصول به صورت لایه نازک بر روی سطحی شفاف که حایل بین محصول و آب است، قرار می گیرد و با انتقال حرارت از آب داغ به محصول تر، فرایند خشک شدن انجام می شود. نکته قابل توجه این است که جریان هوا در قسمت بالای محصول، باعث می شود تا دمای محصول همواره کمتر از 70°C باشد و از گرمایش بیش از حد محصول جلوگیری شود. نرخ خشک کردن تا حدود زیادی به ضخامت محصول بستگی دارد و با افزایش ضخامت محصول، نرخ خشک شدن کاهش می یابد و ویژگی های کیفی محصول خشک شده تغییر می کند (Mahanti et al., 2021). در سال های اخیر پژوهش های زیادی بر روی این خشک کن ها صورت گرفته است. برای مثال طی پژوهشی با مقایسه خشک کن RW و خشک کن انجمادی، دریافتند که هزینه راه اندازی یک خشک کن RW حدودا 50-70% کمتر از خشک کن انجمادی است. همچنین مصرف انرژی به هنگام کارکرد در خشک کن های RW تقریبا 50% کمتر بود (Nindo and Tang., 2007). طی پژوهشی دیگر در خشک کردن بر گه های کیوی به ضخامت 0.8، 1.6 و 2.4 mm و در 3 سطح دمای 80، 90 و 100°C بوسیله خشک کن RW، نتایج بدست آمده از بررسی محصول خشک شده در این خشک کن نشان داد که تغییرات رنگ (ΔE) و پروکیدی در محصول خشک شده در خشک کن RW، بمراتب کمتر از محصول خشک شده در آن بود (Jafari et al., 2016). همچنین در پژوهش های دیگر نیز به کیفیت مطلوب محصول نهایی خشک شده به روش RW اشاره شده است (Tontul et al, 2018; Rajoriya., 2020). به طور کلی مصرف انرژی در خشک کن ها بسیار زیاد است و در خشک کن RW نیز از آنجاییکه دمای آب باید به نزدیکی نقطه جوش برسد و در آنجا ثابت نگه داشته شود، مصرف انرژی بالا است.

در حال حاضر عمده انرژی مورد نیاز برای فرایند خشک کردن از سوخت های فسیلی تامین می شود باعث آلودگی های زیست محیطی جبران ناپذیری می شود. انرژی خورشیدی انرژی پاک و تجدیدپذیری است که سابقه استفاده از آن برای فرایند خشک کردن به زمان باستان برمی گردد. خشک کن های خورشیدی موجود عمدتا از نوع هوای گرم هستند و از هوای گرم برای خشک کردن محصولات استفاده می کنند. در این خشک کن ها، بطور مستقیم و غیرمستقیم هوای گرم شده توسط جمع کننده خورشیدی به داخل محفظه خشک کن منتقل می شود و در برخورد با محصول تر، فرایند خشک کردن انجام می شود. خشک کن های خورشیدی کابینتی، خشک کن های خورشیدی ترکیبی و خشک کن های خورشیدی گلخانه ای کاملا توسعه یافته اند (Chaudhari and slave., 2014). بررسی این خشک کن ها نشان می دهد که عمده این خشک کن ها از نوع همرفتی هستند. در صورتی که در برخی خشک کن ها مانند خشک کن RW از آب گرم برای خشک کردن محصول استفاده می شود. تامین آب گرم توسط یک سیستم خورشیدی نیازمند به کارگیری یک سیستم کارآمد است. متمرکزکننده های سهموی خطی که نوعی جمع کننده خورشیدی محسوب می شوند یکی از سیستم های دریافت انرژی خورشیدی با کارایی مناسب هستند که برای خشک کردن نیز از آن استفاده می شود. برای تامین حرارت لازم طی فرایند خشک کردن، متمرکزکننده سهموی خطی تابش خورشید را بر روی دریافت کننده (رسیور) خطی متمرکز می کند. هر چند به دلایلی نمی توان کل اشعه تابش خورشید را بر روی دریافت کننده متمرکز کرد، با این وجود، این متمرکزکننده ها یکی از بهترین جمع کننده های خورشیدی محسوب می شوند، که در محدوده وسیعی از دما کار می کنند. ویژگی انعکاسی، قیمت مواد به کار رفته و شکل متمرکزکننده ها از عوامل مهم در طراحی متمرکزکننده ها بشمار می آیند (Akbarzadeh and Valipour, 2018). در سال های اخیر پژوهش های زیادی بر روی این متمرکزکننده ها انجام شده است. در پژوهشی یک سیستم ردیابی گردشی با یک سیستم ردیابی تک محور، برای سیستم متمرکزکننده سهموی خطی (PTC) مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که سیستم ردیابی گردشی ارائه شده در مقایسه با سیستم تک محوره تلفات کسینوسی را تا 15% در زمستان کاهش می دهد و بازدهی سالانه را 4% افزایش می دهد (Peng et al., 2013). نتایج یک پژوهش دیگر که طی آن، یک نوار پیچشی در داخل لوله های جاذب نصب شده بود، نشان داد که استفاده از نوار پیچشی باعث چرخش محوری سیال در داخل لوله شده و با افزایش عدد ناسلت و عدد رینولدز و در نتیجه باعث بهبود انتقال حرارت همرفتی بین سیال و لوله جاذب می شود (Jaramillo et al., 2016). با بررسی و مطالعه عددی یک جمع کننده PTC با سیال فوق بحرانی دی اکسید کربن (S-CO_2) توسط (Gharehdaghi et al., 2021)، مشخص شد که مدل عددی کارایی خوبی جهت پیش بینی انتقال حرارت در PTC دارد. بررسی نتایج حاصله از خشک کن RW نشان داد از آنجایی که خشک کن های RW بر پایه آب گرم کار می کنند،



شکل ۱- خشک کن ترکیبی ساخته شده بر پایه آب گرم، ترکیبی از یک جمع کننده سهموی خطی و یک خشک کن پنجره انکساری

Fig 1. Combined water-based dryer, a combination of a parabolic trough collector and a refractance window dryer



شکل ۲- تصویر شماتیک از سیستم RW-PTC به کار رفته

در این پژوهش

Fig 2. Schematic picture of the RW-PTC system used in this research

۲-۲- جزئیات آزمایش

برای انجام این پژوهش میوه سیب (رقم Golden Delicious) با برش افقی به صورت برگه‌های با ضخامت 3mm به عنوان نمونه انتخاب شد. آزمایش‌های خشک کردن به سه دسته تقسیم بندی شد. دسته اول آزمایش‌ها مربوط به خشک کردن (RW) متداول بود که در سه سطح دمایی (65، 75 و 85°C) انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها در دسته اول فقط از الکتریسیته شهری برای گرم کردن آب استفاده شد. دسته دوم آزمایش‌ها به صورت خشک کردن ترکیبی با کمک انرژی خورشیدی (PRW) انجام گرفت. در این روش نیز از سه سطح دمایی (65، 75 و 85°C) استفاده شد با این تفاوت که ابتدا دمایی آب در سیستم به کمک جمع کننده خورشیدی به 60°C می‌رسید، سپس به کمک گرمکن برقی (الکتریسیته شهری) دما به سطوح مد نظر (65، 75 و 85°C) افزایش داده می‌شد و پس آن گرمکن برقی خاموش و تامین حرارت تا پایان فرآیند خشک کردن توسط جمع کننده خورشیدی ادامه می‌یافت. در دسته سوم آزمایش‌ها (SRW)، کل انرژی مورد نیاز برای خشک کردن

مصرف انرژی بالایی دارند و تامین انرژی مورد نیاز آنها از طریق انرژی خورشیدی نیاز به طراحی یک سیستم خورشیدی با ظرفیتی مناسب دارد و از طرف دیگر، سیستم‌های خورشیدی از نوع جمع کننده سهموی خطی (PTC) به علت کار کردن در دامنه وسیعی از دما، یکی از بهترین جمع کننده‌های خورشیدی برای گرم کردن موثر سیال بشمار می‌آیند. در این پژوهش تلاش شد در خشک کردن برگه‌های سیب، انرژی حرارتی مورد نیاز یک سیستم خشک کن RW، به وسیله یک جمع کننده PTC تامین شود. همچنین سیستم به گونه‌ای طراحی شود تا از انرژی خورشیدی دریافتی در جمع کننده PTC به صورت غیرمستقیم برای خشک کردن برگه‌های سیب استفاده شود. سپس با استفاده از داده‌های بدست آمده، سینتیک خشک شدن و انتقال جرم در برگه‌های سیب به طریق لایه نازک مورد بررسی قرار گیرد. همچنین سعی شده است تا سینتیک خشک شدن برگه‌های سیب در روش خشک کردن ترکیبی با روش خشک کردن مرسوم پنجره انکساری و روش همرفتی مقایسه شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- جزئیات خشک کن

در این پژوهش خشک کردن سیب در یک خشک کن پنجره انکساری که انرژی مورد نیاز خود را از تابش خورشید به وسیله یک جمع کننده خورشیدی از نوع متمرکز کننده سهموی خطی می‌گرفت، بررسی شد. دستگاه استفاده شده در این پژوهش شامل دو بخش بود که بخش اول مربوط به اجزاء جمع کننده خورشیدی و بخش دوم مربوط به خشک کن پنجره انکساری بود. در شروع راه اندازی دستگاه، آب از مخزن از طریق یک لوله وارد پمپ شده و از آنجا به درون جمع کننده خورشیدی پمپاژ می‌شد. بعد از عبور جریان آب از داخل دریافت کننده (دریافت کننده از نوع لوله خلا خورشیدی) به دلیل تمرکز نور خورشید از طرف بازتابنده بر روی آن، دمای آب بالا رفته و با گذشت زمان و نزدیک شدن به ظهر، دمای آب افزایش یافت. بعد از گذشت مدت زمان کوتاهی، نمونه‌ها داخل محفظه خشک کن قرار داده شدند. خشک کن استفاده شده در این پژوهش از نوع پنجره انکساری در مقیاس کوچک بود. آب گرم مورد نیاز برای حمام خشک کن از خروجی سیستم خورشیدی تامین می‌شد و بعد از عبور از حمام مجدداً به سیستم خورشیدی بازگردانده می‌شد. شکل (۱) و شکل (۲) تصاویر واقعی و شماتیک از سیستم خشک کن ترکیبی خورشیدی به کار گرفته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

شد. در جدول (1) روابط 6 تا 10 جزئیات مدل های استفاده شده در این پژوهش ارائه شده است. برای پیدا کردن مقادیر ثابت ها در مدل های مختلف از رگرسیون غیرخطی با کمک نرم افزار MATLAB استفاده شد. از ضریب تعیین (R^2)، میانگین مربعات خطاها (RMSE) و مجموع مربعات خطاها (SSE) در برازش مدل های مناسب استفاده شد. در نهایت مدلی که در آن مقدار (R^2) بیشینه و مقدار (RMSE) و (SSE) کمینه بود به عنوان مدلی کارآمدتر در پیش بینی روند خروج رطوبت در خشک کردن گزارش شد.

جدول ۱- معادلات مربوط جهت تعیین ضرایب مدل های خشک کردن لایه نازک

Table 1. Equations to determine coefficients of thin layer drying models (El-Mesery., 2021; Cruz et al., 2015)

Model name	Model	Equation number
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(6)
Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	(7)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(8)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(9)
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(10)

۳- نتایج و بحث

بررسی نتایج نشان داد که افزایش دما در هر دو روش مرسوم و ترکیبی از 65 به 85°C منجر به کاهش زمان فرایند خشک شدن شد. با افزایش دمای سیستم از 65 به 85°C در روش RW زمان خشک شدن از 320 دقیقه به 140 دقیقه (56.25٪) کاهش یافت. در روش ترکیبی (PRW) نیز با افزایش دما از 65 به 85°C، زمان خشک کردن از 260 دقیقه به 160 دقیقه (38.46٪) کاهش یافت. مدت زمان خشک شدن نمونه ها (رسیدن از رطوبت ۸۵٪ به رطوبت زیر ۲۰٪) در روش SRW که تنها منبع حرارت آن انرژی خورشید بود، ۲۴۰ دقیقه (۴ ساعت) بود. به طور مشابه در پژوهشی دیگر که در آن به خشک کردن برگه های سیب در داخل یک خشک کن ترکیبی خورشیدی از نوع هوای گرم با ترکیب مواد ذخیره ساز انرژی حرارتی (TES) انجام شد، در مدت زمان ۳/۵ ساعت رطوبت محصول از ۸۰٪ به ۲۱/۷٪ (بر مبنای تر) رسید (Singh et al., 2022). همچنین در پژوهشی که بر روی خشک کردن فلفل و انگور در داخل یک خشک کن خورشیدی از نوع گلخانه ای صورت گرفت، زمان خشک شدن محصول به ترتیب ۷ و ۱۷ ساعت گزارش شد (ELkhadraoui et al., 2015).

فقط از جمع کننده خورشیدی تامین می شد و دمای خشک کردن در طول فرایند متغیر بود. در این روش نمونه ها بعد از رسیدن به دمای 60°C در خشک کن قرار داده می شدند. فرایند خشک کردن در تمامی آزمایش ها تا رسیدن به رطوبت 20٪ (بر مبنای تر) ادامه می یافت. مقدار دبی آب در خشک کن برای تمامی آزمایش ها 3 lit/min بود. آزمایش ها در فصل تابستان و از اواسط ماه تیر تا پایان مرداد و در روزهای کاملاً آفتابی، از ساعت ۱۰ صبح تا ۳ بعد از ظهر ادامه داشت و دستگاه حدود نیم ساعت قبل از شروع آزمایش روشن می شد تا به شرایط پایدار برسد. فاصله زمانی ثبت داده ها ۱۰ دقیقه تنظیم شد.

۳-۲- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

در این پژوهش برای اندازه گیری مقدار ضریب نفوذ مؤثر از قانون دوم فیک (رابطه ۱) که برای توصیف نفوذ رطوبت در محصولات کشاورزی بکار می رود، استفاده شد. (Samadi and loghmanieh, 2013).

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

با این فرض که انتقال جرم در حالت گذرا و تنها در یک جهت (محور x) صورت می پذیرد (با توجه به برش تیغه ای)، حل معادله فیک با روش Crank برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با در نظر گرفتن فرضیات بیشتر جهت ساده سازی به رابطه (۲) ختم می شود (Cruz, 2015; Sevik et al, 2019).

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

با توجه به زمان خشک کردن طولانی ($Fox > 0.2$) سری بالا خیلی زود همگرا شده و تنها از عبارت اول می توان با دقت بالایی آنرا تقریب زد، در این صورت رابطه 2 به صورت رابطه (3) نوشته می شود (Sadin, 2014).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4l^2}\right] \quad (3)$$

رابطه (۳) را می توان به شکل لگاریتمی (۴) زیر نوشت:

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

در نهایت با مشتق گیری از رابطه (۴) مقدار D_{eff} از شیب نمودار لگاریتمی، نسبت رطوبت بدست می آید (Mohammadi et al, 2019).

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4l^2} \quad (5)$$

۳-۴- سینتیک خشک کردن

به منظور بررسی سینتیک خشک شدن برگه های سیب، از مدل های ریاضی برای توصیف منحنی های خشک کردن به روش لایه نازک استفاده شد. داده های تجربی حاصل از خشک کردن برگه های سیب با مدل های لگاریتمی، هندرسون و پاییس، نیوتن، پیچ اصلاح شده، و میدلی توصیف

۱-۳- مدل سازی لایه نازک

ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز انجام شد، نیز مدل میدلی عملکردی بهتر از دیگر مدل‌ها داشت (EL-Mesery et al., 2021).

جدول ۲- ضرایب و دقت مدل نیوتن
Table 2. Coefficients and accuracy of the newton model

Treatment	k	SSE	RMSE	R-square
RW-65	4.62E-05	0.23	0.119	0.809
RW-75	9.82E-05	0.142	0.125	0.835
RW-85	1.11E-04	0.111	0.126	0.822
PRW-65	5.82E-05	0.258	0.14	0.771
PRW-75	8.20E-05	0.176	0.140	0.779
PRW-85	1.07E-04	0.107	0.11	0.853
SRW	7.18E-05	0.151	0.112	0.851

جدول ۳- ضرایب و دقت مدل هندرسون و پابیس
Table 3- Coefficients and accuracy of Henderson and Pabis model

Treatment	a	k	SSE	RMS E	R-square
RW-65	1.14	5.81E-05	0.157	0.102	0.869
RW-75	1.13	1.17E-04	0.106	0.115	0.877
RW-85	1.11	1.32E-04	0.086	0.120	0.838
PRW-65	1.15	7.32E-05	0.192	0.126	0.829
PRW-75	1.13	1.01E-04	0.134	0.129	0.832
PRW-85	1.12	1.27E-04	0.079	0.106	0.891
SRW	1.13	8.68E-05	0.105	0.097	0.897

جدول ۴- ضرایب و دقت مدل پیچ اصلاح شده

Table 4. Coefficients and accuracy of the modified Page model

Treatment	k	n	SSE	RMSE	R-square
RW-65	1.67E-05	2.75	0.15	0.123	0.832
RW-75	4.95E-05	1.98	0.11	0.133	0.864
RW-85	1.36E-05	8.12	0.08	0.136	0.858
PRW-65	1.98E-05	2.93	0.124	0.146	0.829
PRW-75	2.79E-05	2.93	0.138	0.148	0.841
PRW-85	5.41E-05	1.98	0.096	0.124	0.905
SRW	3.59E-05	2.00	0.114	0.117	0.905

در این پژوهش داده‌های تجربی حاصل از خشک‌کردن برگه‌های سیب در خشک‌کن RW-PTC با مدل‌های لگاریتمی، هندرسون و پابیس، نیوتن، پیچ اصلاح‌شده، و میدلی توصیف و برازش شد. در جداول ۲ تا ۶ جزئیات هر یک از مدل‌های بررسی شده به همراه ضرایب لازم برای پیش‌بینی رفتار خشک‌شدن محصول در هر یک از شرایط بررسی شده را نشان می‌دهد. برازش مدل‌های به کارگرفته شده با داده‌های واقعی نشان داد که کلیه مدل‌های استفاده شده دقت خوبی در تعیین روند خروج رطوبت از محصول داشتند. جدول ۲ جزئیات مدل نیوتن را نشان می‌دهد. مقدار R^2 در این روش طبق برازش‌های صورت گرفته در محدوده 0.77-0.85 قرار داشت که طبق بررسی‌ها، ضعیف‌تر از مدل‌های دیگر بود. در جدول ۳ جزئیات مدل هندرسون و پابیس ارائه شده است. مقدار R^2 در این روش در محدوده 0.82-0.89 قرار داشت. مدل هندرسون نسبت به مدل نیوتن و مدل لگاریتمی دقت بیشتری در پیش‌بینی روند خروج رطوبت داشت. اما از مدل‌های دیگر ضعیف‌تر بود. در جدول ۴ جزئیات مدل لگاریتمی ارائه شده است. مقدار R^2 در این روش در محدوده 0.80-0.87 قرار داشت. مدل لگاریتمی به نسبت مدل نیوتن عملکردی قوی‌تر و نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد ضعیف‌تری در پیش‌بینی روند خروج رطوبت داشت. جزئیات مدل پیچ اصلاح شده در جدول ۵ نشان داده شده است. این مدل به نسبت به مدل میدلی عملکردی ضعیف‌تر داشت اما نسبت به سایر مدل‌ها دقت بیشتری از خودش نشان داد. مقدار R^2 در این مدل در محدوده 0.82-0.90 قرار داشت. جدول ۶ نتایج برازش مدل میدلی با داده‌های تجربی را نشان می‌دهد. دقت این مدل بیشتر از سایر مدل‌ها بود. مقدار R^2 در این مدل در محدوده 0.91-0.99 قرار داشت. به طور کلی در میان مدل‌ها، مدل میدلی به واسطه داشتن R^2 بالاتر و SSE و RMSE پایین‌تر از دقت بیشتری نسبت به دیگر مدل‌ها برخوردار بود. در برازش داده‌ها با مدل میدلی مقدار میانگین R^2 ، SSE و RMSE به ترتیب 0.963، 0.031 و 0.062 بدست آمد. بعد از مدل میدلی به ترتیب مدل‌های پیچ اصلاح‌شده، هندرسون، لگاریتمی و نیوتن دقت بیشتری در توصیف خروج رطوبت از محصول داشتند. در مدل‌های پیچ اصلاح‌شده، هندرسون، لگاریتمی و نیوتن مقدار میانگین R^2 به ترتیب 0.866، 0.861، 0.845 و 0.817 و مقدار SSE به ترتیب 0.116، 0.123، 0.142 و 0.168 و مقدار RMSE به ترتیب 0.112، 0.122، 0.123 و 0.125 بدست آمد. در پژوهشی مشابه که در خشک‌کردن میوه فیسالیس به روش پنجره‌انکساری انجام شد، مدل میدلی نسبت به مدل‌های دیگر کارایی مناسب‌تری داشت (Puente-Díaz et al., 2020). همچنین در پژوهش‌های دیگر که به خشک‌کردن برگه‌های سیب به روش مادون‌قرمز (Sadin et al., 2014) و روش ترکیبی هوای گرم - مادون قرمز پرداخته بود، نیز مدل میدلی به عنوان مدلی کارآمدتر از سایر مدل‌ها گزارش شد (Sadin et al., 2014). در پژوهشی که بر روی خشک‌کردن برگه‌های سیب به روش

نیز با گرادیان حرارتی ایجاد شده در داخل محصول به سمت لایه بالای محصول انجام می شود. بنابراین زمانی که نمونه ها در دستگاه قرار داده می شوند تا انتقال حرارت به سطح بالای محصول برسد و تبخیر رطوبت سطحی از آن سمت آغاز شود مدتی زمان می برد که همین موضوع دلیل کندی خروج رطوبت و کم بودن شیب نمودار نسبت رطوبت در دقایق ابتدایی است. در ادامه فرآیند بعد از گرم شدن محصول، خروج رطوبت بعد از گذشت مدتی تسریع می شود. به طور مشابه در پژوهش های دیگران نمودار نسبت رطوبت بی بعد روندهای متفاوتی را نسبت به نمودارهای خشک کردن به روش هوای گرم داشت. در پژوهشی که بر روی خشک کردن پوره میوه فیسالیس انجام شد، تغییرات نمودار نسبت رطوبت در دماهای پایین در شروع فرایند خشک کردن همانند این پژوهش کم بود اما در دماهای بالا، روند ابتدایی متفاوت بود به طوری که شیب نمودار نسبت رطوبت زیاد و خروج رطوبت در شروع فرایند سریعتر بود (Puente-Díaz et al., 2020). تاخیر در روند خشک کردن در ابتدای فرایند خشک کردن نسبت به روش هوای گرم در نمودارهای رطوبت رسم شده در برخی پژوهش های دیگر بویژه هنگام خشک کردن با دماهای پایین و ضخامت زیاد محصول مشهود بود (Ayala-Aponte et al., 2021; Ochoa-Martínez et al., 2012; Silva et al., 2023). این تاخیر در نهایت منجر به افزایش زمان کلی فرایند خشک شدن و کاهش مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت شد. شکل ۵ نمودار ضریب نفوذ موثر رطوبت در روش های مختلف خشک کردن را نشان می دهد. ضریب نفوذ موثر (De) که از ترسیم نمودار $\ln MR$ بر حسب زمان به دست می آید، نشان دهنده انتقال رطوبت در داخل ورقه های سیب است. کمترین و بیشترین ضریب نفوذ موثر رطوبت به دست آمده در آزمایش های انجام شده به ترتیب در روش های RW-65 و RW-85 به مقدار 8.93×10^{-13} و 4.82×10^{-12} بدست آمد. مقدار ضریب نفوذ موثر در روش های خشک کردن ترکیبی (PRW) در محدوده -1.49 تا 3.87×10^{-12} قرار داشت. همچنین مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت در روش خورشیدی SRW به میزان 1.74×10^{-12} بدست آمد. بررسی نتایج نشان داد که هر چه دمای آب در سیستم افزایش یابد، مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت نیز فزونی می یابد. علت آن این است که با افزایش دمای آب، انتقال حرارت تابشی و رسانشی مابین آب و محصول بیشتر شده و در نتیجه دمای محصول نیز افزایش می یابد. با افزایش دمای محصول میزان انرژی جنبشی مولکول های آب داخل محصول بیشتر شده و از طرفی دیگر، گرادیان حرارتی در سطح بالایی محصول که بسمت محفظه بالایی است، بزرگتر می شود، در نتیجه خروج رطوبت و انتقال جرم افزایش می یابد. روند افزایشی (De) با افزایش دمای خشک کردن در پژوهش های گذشته نیز گزارش گردیده است (Cruz et al., 2015).

جدول ۵- ضرایب و دقت مدل لگاریتمی

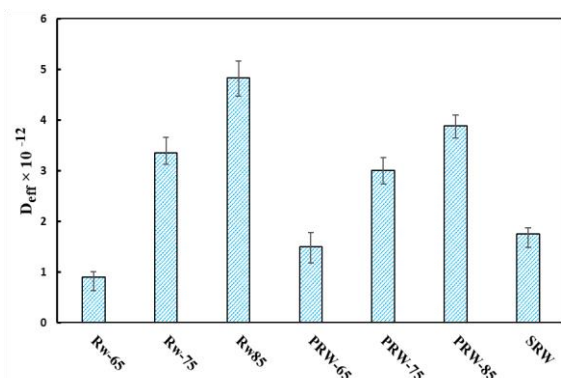
Treatment	a	k	c	SSE	RMSE	R-square
RW-65	1	6.43E-05	0.112	0.184	0.110	0.847
RW-75	1	1.25E-04	0.087	0.124	0.124	0.856
RW-85	1	1.41E-04	0.083	0.097	0.127	0.844
PRW-65	1	7.99E-05	0.109	0.112	0.135	0.805
PRW-75	1	1.10E-04	0.101	0.151	0.137	0.810
PRW-85	1	1.36E-04	0.083	0.092	0.115	0.873
SRW	1	9.39E-05	0.094	0.126	0.107	0.876

جدول ۶- ضرایب و دقت مدل میدلی

Treatment	a	k	c	n	SSE	RMSE	R-square
RW-65	0.97	-4.38E-03	-7.62E-05	0.49	0.01	0.03	0.98
RW-75	0.94	-7.11E-03	-1.53E-04	0.48	0.01	0.04	0.98
RW-85	0.81	-1.99E-02	-1.91E-04	0.41	0.04	0.10	0.92
PRW-65	0.79	-2.26E-02	-1.19E-04	0.38	0.06	0.08	0.94
PRW-75	0.78	-2.55E-02	-1.61E-04	0.38	0.06	0.10	0.91
PRW-85	0.98	-4.48E-03	-1.64E-04	0.52	0.01	0.03	0.99
SRW	0.98	-3.74E-03	-1.11E-04	0.52	0.01	0.02	0.99

۳-۲- ضریب نفوذ موثر رطوبت

شکل ۳ نمودار نسبت رطوبت بی بعد (MR) را برحسب زمان در تمامی روش های خشک کردن و شکل ۴ برازش نمودار نسبت رطوبت بی بعد در روش های ترکیبی PRW و خورشیدی را با نتایج بدست آمده از مدل میدلی نشان می دهد. نمودارهای رسم شده برای نسبت رطوبت بی بعد در این پژوهش با پژوهش (Teymori-Omran et al., 2023) و یا در پژوهش های که بر روی خشک شدن به روش هوای گرم صورت گرفت، قدری متفاوت بود. تفاوت مشاهده شده در شروع فرایند خشک کردن بود. در خشک کردن به روش هوای گرم آنچه که مشاهده شد این بود که نرخ خروج رطوبت ابتدا زیاد و سپس در ادامه مقدار آن کاهش می یافت و در ادامه فرآیند وارد فاز نزولی خشک شدن می شد. اما در اینجا ابتدا نرخ خروج رطوبت کم و در میانه فرایند، نرخ خروج رطوبت افزایش یافته و سپس وارد فاز نزولی خشک شدن شد. دلیل این کندی خروج رطوبت در شروع فرایند، تاخیر در افزایش دمای محصول قرار گرفته بر روی سطح آب می تواند باشد. در روش خشک کردن همرفتی هوای گرم به سطح محصول برخورد می کند و بلافاصله با افزایش دمای سطح رطوبت سطحی را نیز خشک می کند و به خاطر تبخیر سریع رطوبت سطحی شیب نمودار تغییرات نسبت رطوبت در شروع فرایند خشک کردن زیاد است. در روش پنجره انکساری انتقال حرارت از آب به لایه زیرین محصول به طریق رسانشی و تابشی صورت می گیرد و از آنجا

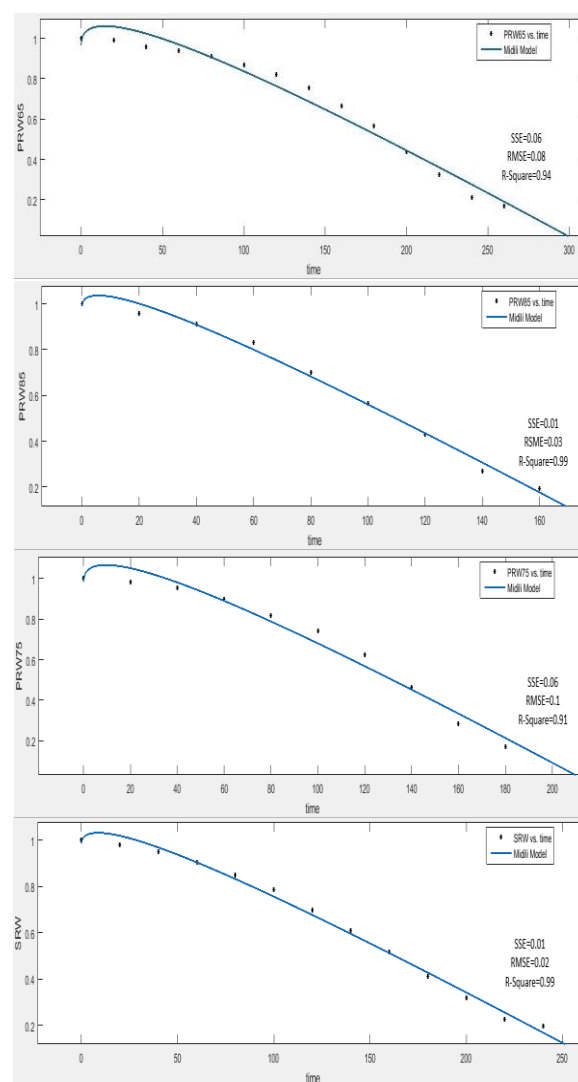


شکل ۵- ضریب نفوذ موثر رطوبت در روش های مختلف خشک کردن

Fig 5. Effective moisture diffusion coefficient in different drying method

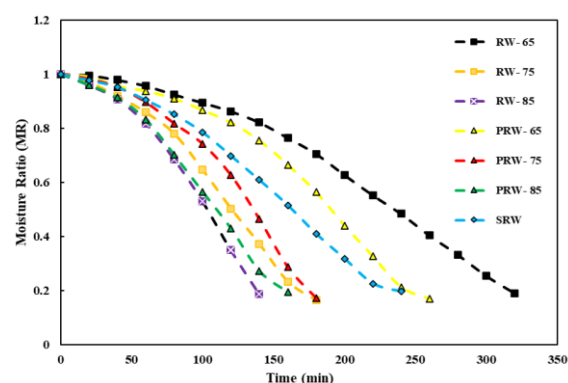
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش سینتیک خشک شدن، مدل سازی خشک کردن لایه نازک و انتقال جرم داخلی برای خشک شدن برگه های سیب در داخل یک خشک کن خورشیدی از نوع RW-PTC ارائه شد. آزمایش ها به سه روش مرسوم (RW)، ترکیبی (PRW) و کاملاً خورشیدی (SRW) انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما از 65 به 85°C زمان خشک کردن در روش اول 56.25٪ (از 320 دقیقه به 140) و در روش دوم 38.46٪ (از 260 دقیقه به 160) کاهش یافت. زمان خشک کردن محصول در روش سوم که کاملاً با انرژی خورشیدی فرایند گرم کردن آب انجام شد 240 دقیقه (۴ ساعت) بود. در برازش داده ها با مدل میدلی مقدار میانگین R^2 ، SSE و RMSE به ترتیب 0.963، 0.031 و 0.062 بدست آمد. بعد از مدل میدلی به ترتیب مدل های پیچ اصلاح شده، هندرسون، لگاریتمی و نیوتن دقت بیشتری در توصیف خروج رطوبت از محصول داشتند. کمترین و بیشترین ضریب نفوذ موثر رطوبت به دست آمده در آزمایش های انجام شده به ترتیب در روش های RW-65 و RW-85 به مقدار 8.93×10^{-13} و 4.82×10^{-12} بدست آمد. مقدار ضریب نفوذ موثر در روش های خشک کردن ترکیبی (PRW) در محدوده 1.49- 3.87×10^{-12} قرار داشت. همچنین مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت در روش خورشیدی SRW به میزان 1.74×10^{-12} بدست آمد. بطور کلی نتایج نشان داد که خشک کن ترکیبی خورشیدی ارائه شده قابلیت مناسبی برای خشک کردن محصول و کاهش مصرف انرژی از منابع تجدیدناپذیر دارد.



شکل ۳- نمودار نسبت رطوبت بی بعد بر حسب زمان

Fig 3. The graph of dimensionless moisture ratio against time



شکل ۴- نمودار برازش نتایج تجربی با مدل میدلی در روش های خشک کردن ترکیبی و خورشیدی

Fig 4. Fitting experimental results with the Midili model in combined and solar drying methods

منابع

- Mohammadi, I., Tabatabaekoloor, 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. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.099>.
- Nindo, C. I., and Tang, J. (2007). *Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method*. Drying Technology, 25(1), 37-48. <https://doi.org/10.1080/07373930601152673>.
- Ochoa-Martínez, C. I., Quintero, P. T., Ayala, A. A., & Ortiz, M. J. (2012). *Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique*. Journal of Food engineering, 109(1), 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.032>.
- Onwude, D. I., N. Hashim, K. Abdan, R. Janius and G. Chen (2019). *The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato*. Journal of Food Engineering 241: 75-87. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.008>.
- Peng, S., Hong, H., Jin, H., and Zhang, Z. (2013). *A new rotatable-axis tracking solar parabolic-trough collector for solar-hybrid coal-fired power plants*. Solar energy, 98, 492-502. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.039>.
- Puente-Díaz, L., Spolmann, O., Nocetti, D., Zura-Bravo, L., & Lemus-Mondaca, R. (2020). *Effects of infrared-assisted refractance window™ drying on the drying kinetics, microstructure, and color of physalis fruit purée*. Foods, 9(3), 343. <https://doi.org/10.3390/foods9030343>.
- Rajoriya, D., Shewale, S.R., Bhavya, M.L. and Hebbar, H.U., (2020). *Far infrared assisted refractance window drying of apple slices: Comparative study on flavor, nutrient retention and drying characteristics*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 66, p.102530. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102530>.
- Sadin, R., Chegini, G. R., and Sadin, H. (2014). *The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer*. Heat and Mass Transfer, 50(4), 501-507. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1255-3>.
- Samadi, S. H., and Loghmanieh, I. (2013). *Evaluation of energy aspects of apple drying in the hot-air and infrared dryers*. Energy Research Journal, 4(1), 30-38. <https://doi.org/10.3844/erjsp.2013.30.38>.
- Sevik, S., Aktaş, M., Dolgun, E. C., Arslan, E., and Tuncer, A. D. (2019). *Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology*. Solar Energy, 180, 537-549. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.049>.
- Silva, N. C., Freitas, L. V., Silva, T. C., Duarte, C. R., & Barrozo, M. A. (2023). *Use of Refractance window drying as an alternative method for processing the microalga spirulina platensis*. Molecules, 28(2), 720. <https://doi.org/10.3390/molecules28020720>.
- Singh, D., Mishra, S., and Shankar, R. (2022). *Experimental investigation and drying kinetics of mixed type solar dryer with thermal energy storage material for drying of apple slices*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Akbarzadeh, S., and Valipour, M. S. (2018). *Heat transfer enhancement in parabolic trough collectors: A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 92, 198-218. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.093>.
- Ayala-Aponte, A. A., Cárdenas-Nieto, J. D., & Tirado, D. F. (2021). *Aloe vera gel drying by Refractance Window®: Drying kinetics and high-quality retention*. Foods, 10(7), 1445. <https://doi.org/10.3390/foods10071445>.
- Calín-Sánchez, Á., Lipan, L., Cano-Lamadrid, M., Kharaghani, A., Masztalerz, K., Carbonell-Barrachina, Á. A., and Figiel, A. (2020). *Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs*. Foods, 9(9), 1261. <https://doi.org/10.3390/foods9091261>.
- Chaudhari, A. D., and Salve, S. P. (2014). *A review of solar dryer technologies*. International Journal of Research in Advent Technology, 2(2), 218-232.
- Cruz, A. C., Guiné, R. P., and Gonçalves, J. C. (2015). *Drying kinetics and product quality for convective drying of apples (cvs. Golden Delicious and Granny Smith)*. International Journal of Fruit Science, 15(1), 54-78. <https://doi.org/10.1080/15538362.2014.931166>.
- ELkhadraoui, A., Kooli, S., Hamdi, I., and Farhat, A. (2015). *Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape*. Renewable energy, 77, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.090>.
- EL-Mesery, H. S., Kamel, R. M., and Emara, R. Z. (2021). *Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer*. Case Studies in Thermal Engineering, 27, 101365. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101365>.
- Gharehdaghi, S., Moujaes, S. F., and Nejad, A. M. (2021). *Thermal-fluid analysis of a parabolic trough solar collector of a direct supercritical carbon dioxide Brayton cycle: A numerical study*. Solar Energy, 220, 766-787. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.039>.
- Jafari, S. M., Azizi, D., Mirzaei, H., and Dehnad, D. (2016). *Comparing quality characteristics of oven-dried and Refractance Window-dried kiwifruits*. Journal of Food Processing and Preservation, 40(3), 362-372. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12613>.
- Jaramillo, O. A., Borunda, M., Velazquez-Lucho, K. M., and Robles, M. (2016). *Parabolic trough solar collector for low enthalpy processes: An analysis of the efficiency enhancement by using twisted tape inserts*. Renewable energy, 93, 125-141. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.046>.
- Mahanti, N. K., Chakraborty, S. K., Sudhakar, A., Verma, D. K., Shankar, S., Thakur, M., . and Srivastav, P. P. (2021). *Refractance Window-Drying vs. other drying methods and effect of different process parameters on quality of foods: A comprehensive review of trends and technological developments*. Future Foods, 3, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100024>.

Environmental Effects, 44(2), 4763-4782.
<https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2079775>.

Teymori-Omran, M., Askari Asli-Ardeh, E., Taghinezhad, E., Motevali, A., Szumny, A., and Nowacka, M. (2023). *Enhancing Energy Efficiency and Retention of Bioactive Compounds in Apple Drying: Comparative Analysis of Combined Hot Air-Infrared Drying Strategies*. Applied Sciences, 13(13), 7612.
<https://doi.org/10.3390/app13137612>.

Tontul, İ., Ergin, F., Eroğlu, E., Küçükçetin, A. and Topuz, A., 2018. *Physical and microbiological properties of yoghurt powder produced by refractance window drying*. International Dairy Journal, 85, pp.169-176.