

مقایسه خشک کردن پوره آلو با رفرکتنس ویندو، رفرکتنس ویندو مجهز به تابش فروسرخ، و هوای داغ

محمدرضا روزگار^۱، الهام آذرپژوه^{۲*}، عباس روحانی^۳ و مجید رضایی فریمانی^۴

^۱ پژوهشگر پسا دکتری صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور، تهران، ایران

^{۲*} دانشیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات و آموزش ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

^۳ استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۴ دانشجوی دکتری مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

چکیده

خشک کردن به روش رفرکتنس ویندو یکی از روش‌های نوین خشک کردن است که در سال‌های اخیر به دلیل مزیت‌های متعدد، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. استفاده از پرتو فروسرخ در این خشک‌کن‌ها منجر به خشک کردن محصولات حساس به گرما از جمله آلو با کیفیت بهتر در زمان کوتاه‌تر می‌شود. در این پژوهش از سه روش خشک کردن شامل رفرکتنس ویندو (RWD)، رفرکتنس ویندو مجهز به پرتو فروسرخ (IFRWD) و لایه نازک هوای داغ (HAD) به منظور خشک کردن پوره آلو به ضخامت ۵ میلی‌متر در دمای ۷۰ درجه سلسیوس استفاده شد. مدت زمان خشک شدن محصول در IFRWD و RWD و HAD به ترتیب برابر با ۲۱۰ دقیقه، ۲۷۵ دقیقه و ۳۹۰ دقیقه بود و روش IFRWD موجب کاهش مدت زمان خشک شدن به میزان ۴۶ درصد نسبت به HAD و ۲۳/۶ درصد نسبت به RWD گردید. نتایج حاصل از نسبت رطوبت به دست آمده از آزمایش‌ها در هر سه روش خشک کردن، با هشت مدل ریاضی خشک کردن لایه نازک موجود در پیشینه پژوهش برازش گردید که در میان آن‌ها، مدل میدیلی بهترین مدل انتخاب گردید. بیشترین مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و همچنین نسبت باز جذب رطوبت در IFRWD به مقدار $1.824 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ و $3/24$ و کمترین در HAD به مقادیر $1.0^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ و $1/24$ به دست آمد. یافته‌ها نشان دادند که بهترین شرایط خشک کردن در IFRWD حاصل می‌شود؛ از این رو، به کارگیری این روش برای خشک کردن پوره آلو در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۵ میلی‌متر توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ضریب نفوذ مؤثر، فروسرخ، مدل سازی، نسبت باز جذب

مقدمه

اول، خشک‌کن‌های تونلی، کوره‌ای، کابینتی و خشک‌کن‌های نوار نقاله با جریان چرخشی قرار دارند. نسل دوم شامل خشک‌کن‌های پاششی و استوانه‌ای (بشکه‌ای) است. در نسل سوم، خشک‌کن‌های انجمادی و اسمزی استفاده می‌شوند. در نسل چهارم شامل خشک‌کن‌های مایکروویوی، پمپ حرارتی، فرکانس رادیویی و رفرکتنس ویندو است که به‌عنوان

خشک کردن محصولات کشاورزی یکی از قدیمی‌ترین و مؤثرترین روش‌های نگهداری مواد غذایی، به‌ویژه میوه‌ها، سبزی‌ها و دیگر محصولات فاسدشدنی با رطوبت بالاست. فناوری‌های خشک کردن را می‌توان بر اساس نوع عملکرد و سطح پیشرفت آن‌ها به چهار نسل تقسیم‌بندی کرد. در نسل

فناوری‌های پیشرفته‌ی خشک‌کردن با راندمان بالا شناخته می‌شوند (Qadri *et al.*, 2020).

خشک‌کردن به روش فرکتنس ویندو یکی از روش‌های نوین خشک‌کردن به‌شمار می‌رود که در سال‌های اخیر به دلیل مزایای متعدد، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. مطالعات در مورد خشک‌کردن فرکتنس ویندو در درجه اول بر خشک‌کردن محصولات مایع (آبمیوه/عصاره) و محصولات نیمه مایع (پالپ/پوره) متمرکز شده است (Tontul *et al.*, 2018; Yoha *et al.*, 2023). این خشک‌کن‌ها برای خشک‌کردن مواد غذایی حساس به حرارت مانند میوه‌ها، سبزی‌ها و گوشت‌ها توصیه می‌شود (Miano & Rojas, 2024). با این حال در سال‌های اخیر، این روش برای خشک‌کردن اسلایس‌ها و پوره میوه نیز جذابیت بیشتری پیدا کرده است و در مورد خشک‌کردن زغال اخته، گیلاس ترش، توت فرنگی (Nemzer *et al.*, 2018)، درخت نان (جک فروت) (Nansereko *et al.*, 2022)، میوه خربزه درختی (پاپایا) (Minuye *et al.*, 2021)، پوره سیب زمینی (Duarte-*Correa et al.*, 2021)، سیب (Franco *et al.*, 2019) و پوره انبه (Kumar *et al.*, 2022) گزارش‌های کمی در دسترس است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که روش خشک‌کردن فرکتنس ویندو قادر است ترکیبات حساس به حرارت مانند ویتامین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها را بهتر حفظ کند و در مقایسه با روش‌های خشک‌کردن متداول مانند خشک‌کردن انجمادی، پاششی و هوای داغ، موجب حفظ رنگ طبیعی‌تر محصول و افزایش بازده انرژی می‌شود. خشک‌کن فرکتنس ویندو به‌عنوان یک فناوری نوظهور می‌تواند امولسیون‌ها را خشک و مولکول‌های لیپوفیلیک (چربی‌گرا) را کپسوله‌سازی کند. توانایی این روش در تأمین پایداری بالاتر و کیفیت برتر محصول نهایی، آن را به گزینه‌ای جذاب و کارآمد نسبت به روش‌های سنتی خشک‌کردن تبدیل کرده است (Henao-*Ardila et al.*, 2023).

در خشک‌کن‌های فرکتنس ویندو، به منظور خشک‌کردن محصولات حساس به حرارت در زمان کوتاه‌تر و با حفظ کیفیت بالاتر، از پرتو فرسرخ استفاده می‌شود. زمانی که مواد غذایی در معرض میدان الکترومغناطیسی قرار می‌گیرند، امواج فرسرخ مستقیماً به درون ماده نفوذ می‌کند و موجب گرمایش حجمی سریع می‌شود. در این شرایط، مولکول‌های آب انرژی را به‌سرعت جذب می‌کنند و در نتیجه تبخیر سریع رطوبت رخ می‌دهد. بخار حاصل به سمت بیرون ماده هدایت می‌شود و این فرایند سبب کاهش زمان خشک‌شدن، حداقل‌سازی تلفات کیفیت و ایجاد گرمایش یکنواخت در محصول می‌گردد. بدین ترتیب، استفاده از پرتو فرسرخ در خشک‌کن‌های فرکتنس ویندو از مهم‌ترین روش‌های مؤثر در بهبود کارایی خشک‌کردن و کیفیت محصول نهایی محسوب می‌شود.

به‌کارگیری تابش فرسرخ در خشک‌کن‌های فرکتنس ویندو روشی کارآمد برای تولید پالپ یا پوره میوه خشک‌شده با کیفیت بالا به‌شمار می‌آید. استفاده از تابش فرسرخ با توان ۲۵۰ وات در خشک‌کن فرکتنس ویندو موجب می‌شود در میوه عروسک پشت پرده (فیسالیس) زمان فرآیند خشک‌کردن تا رسیدن به رطوبت تعادلی ده درصد، حدود ۶۰ درصد کاهش یابد (Puentes-Díaz *et al.*, 2020). در بررسی خشک‌کردن پالپ جمبو، نتایج تحقیق نشان می‌دهد خشک‌کن فرکتنس ویندو مجهز به تابش فرسرخ، نسبت به خشک‌کن فرکتنس ویندو با انرژی میکروویو، از نظر سرعت خشک‌کردن و پارامترهای کیفی محصول عملکرد بهتری دارد (Zhang *et al.*, 2024).

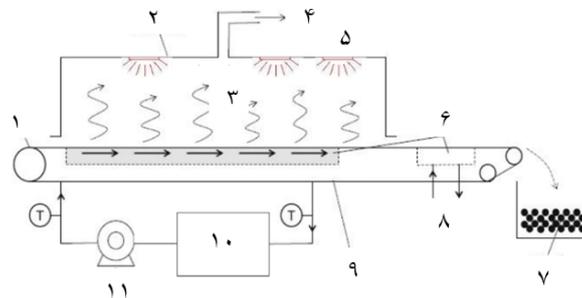
مطالعات متعددی به مقایسه خشک‌کن‌های متداول صنعتی مانند خشک‌کن‌های انجمادی، پاششی و هوای داغ با خشک‌کن فرکتنس ویندو در محصولات مختلف پرداخته‌اند از جمله موز (Dadhaneeya *et al.*, 2023)، کنسانتره آب انار (Baeghbali *et al.*, 2016)، پودر گوجه‌فرنگی (Jeyaprakash *et al.*, 2020)، پالپ توت طلایی

مقایسه شده است. داده‌های نسبت رطوبت در فرآیند خشک شدن محصول، با هشت مدل ریاضی خشک کردن از جمله پیچ، نیوتون، لگاریتمی، وانگ و سینگ، هندرسون و پاییس، دوجمله ای نمایی، میدیلی و دیفیوژن اپروچ برازش و بهترین مدل انتخاب گردید.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از خشک کن پیوسته رفرکتانس ویندو موجود در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی استفاده شد. اجزای اصلی این خشک کن شامل پمپ آب گرم، مخزن آب و واحد گرمایش، حمام حرارتی، محفظه فولادی ضدزنگ، تسمه نقاله‌ای از جنس پلی استر مایلار، لامپ‌های فرسرخ و فن است که شماتیکی از آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

(Puentes *et al.*, 2020)، سیب (Rajoriya *et al.*, 2019)، پالپ زغال اخته (Rurush *et al.*, 2022)، پالپ گیلاس (Tontul *et al.*, 2018)، دانه‌های کدو تنبل (Ortiz-Jerez *et al.*, 2022)، آرد موز (Padhi & Dwivedi, 2022) و ژل آلونه ورا (Seyfi *et al.*, 2021). با این حال در زمینه خشک کردن پوره آلو به روش رفرکتانس ویندو و بررسی اثر تابش فرسرخ بر زمان خشک کردن، نسبت رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر و همچنین مقایسه آن با خشک کن هوای داغ مطالعات اندک است. در این تحقیق، رفتار خشک شدن پوره آلو بخارا (رقم متداول در خراسان رضوی) با ضخامت ۵ میلی‌متر در دمای ۷۰ درجه سلسیوس (دمای متداول مورد استفاده در خشک کن رفرکتانس ویندو (Sabarez 2016; Shende & Datta., 2019) با سه روش خشک کردن شامل خشک کن هوای داغ، خشک کن رفرکتانس ویندو، و خشک کن رفرکتانس ویندو مجهز به پرتو فرسرخ ارزیابی و



شکل ۱- طرحواره‌ای از خشک کن پیوسته رفرکتانس ویندو

Fig. 1- The schematic of a continuous Refractance Window Dryer

۱) ورودی محصول ۲) محفظه فولادی ضدزنگ ۳) بخار و هوا ۴) خروج ۵) لامپ فرسرخ ۶) جریان آب

۷) محصول خشک شده ۸) آب خنک کننده ۹) تسمه نقاله پلاستیکی ۱۰) مخزن آب و واحد گرمایش ۱۱) پمپ آب گرم

- 1) Product application 2) Stainless steel hood 3) Vapor + Air 4) Exhaust 5) Infrared lamp 6) Water flumes
7) Dried product 8) Cooling water 9) Plastic conveyor belt 10) Water tank and heating unit 11) Hot water pump

پخش گردید. در فرآیند خشک شدن محصول، هر سه روش انتقال حرارت شامل رسانایی، همرفت و تابش در آب رخ داد و فیلم شفاف پلی استر مایلار به عنوان پنجره‌ای عمل کرد که به آب گرم اجازه می‌داد تابش حرارتی رخ دهد و به انتقال سریع حرارت به محصول و تبخیر سریع رطوبت منجر گردد. با خشک شدن پوره آلو، پنجره بسته شد (window closed)

حمام حرارتی استاتیکی مورد استفاده در این خشک کن از جنس فولاد ضدزنگ و با حجم ۲۰۰ لیتر است و با آب پر شد. سطح آب با فیلم پلی استر مایلار به ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر و مساحت ۶۰ × ۶۰۰ سانتی‌متر مربع پوشیده شد و پوره آلو با ضخامت مشخص ۵ میلی‌متر روی تسمه نقاله پلاستیکی شفاف مایلار به صورت لایه‌ای نازک و یکنواخت

زیرا رطوبت دیگر با پلاستیک تماس نداشت و انتقال حرارت تنها از طریق رسانش صورت گرفت. از آنجایی که پلاستیک هدایت حرارتی ضعیفی دارد، مقدار کمی از گرما از دست رفت و در نتیجه اکثر تابش به داخل آب خم شد (refracts) و تنها گرمای هدایت شده به عنوان وسیله خشک کردن باقی ماند که از تخریب رنگ و طعم محصول جلوگیری کرد. علاوه بر این، استفاده از خشک کن رفرکتانس ویندو موجب شد

دمای محصول به طور معناداری پایین تر از دمای آب در گردش زیر تسمه نقاله حفظ شود و در نتیجه از رخداد واکنش های اکسیداسیونی در محصول پیشگیری گردد. برای تجهیز خشک کن رفرکتانس ویندو به پرتو فرسرخ، از لامپ فرسرخ ۲۵۰ وات در داخل محفظه فولادی خشک کن استفاده شد (شکل ۲).



شکل ۲- خشک کن رفرکتانس ویندو و خشک کن رفرکتانس ویندو مجهز به تابش فرسرخ

Fig. 2- The view of a Refractance Window Dryer (RWD) and an Infrared-Assisted Refractance Window (IFRWD)

روی سینی خشک کن قرار گرفت و کاهش وزن نمونه ها در فاصله های زمانی مشخص، هر ۱۵ دقیقه یکبار، با استفاده از ترازوی دیجیتال مدل AXIS BTA2100 ساخت ژاپن با دقت ۰/۰۱ گرم ثبت شد. آزمایش ها در سه تکرار دنبال شد و خشک شدن نمونه ها تا رسیدن به وزن ثابت ادامه یافت. برای تأمین گرمای مورد نیاز خشک کن، از هیتر الکتریکی مجهز به سه المنت جداگانه با توان های ۲۵۰۰، ۲۵۰۰ و ۱۵۰۰ وات (مجموعاً ۶۵۰۰ وات) و با برق سه فاز استفاده گردید.

خشک کن لایه نازک هوای داغ

به منظور بررسی آهنگ خشک کردن پوره آلوبخارا، از خشک کن لایه نازک هوای داغ موجود در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی استفاده شد (شکل ۳). بدین منظور، حدود نیم ساعت پیش از آغاز فرآیند خشک کردن، دستگاه خشک کن روشن و دمای آن متناسب با دمای مورد نیاز (۷۰ درجه سلسیوس) تنظیم گردید تا دمای هوای داخل خشک کن به حالت پایدار برسد. پوره آلو با ضخامت ۵ میلی متر به صورت لایه ای یکنواخت



شکل ۳- خشک کن لایه نازک هوای داغ

Fig. 3- The view of a hot air thin layer dryer (HAD)

آماده سازی نمونه ها

نمونه ها اندازه گیری شد. این فرایند تا زمانی ادامه یافت که تغییرات وزن نمونه ها در سه تکرار به مقدار ثابتی رسید و دیگر تغییری مشاهده نشد (Seyfi *et al.*, 2021). از آنجا که سینتیک خشک کردن در بیشتر پژوهش ها بر اساس شاخص نسبت رطوبت (MR) گزارش می شود، برای محاسبه نسبت رطوبت نمونه های مورد آزمایش در طول فرایند خشک کردن از معادله (۲) استفاده شد:

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

که در آن: M_t : میانگین رطوبت (درصد، بر مبنای ماده تر) در زمان t ، M_0 : رطوبت اولیه (درصد، بر مبنای ماده تر)، M_e : رطوبت در حالت تعادل (درصد، بر مبنای ماده تر) است. مقدار M_e در مقایسه با M_t یا M_0 برای زمان خشک کردن، بسیار کوچک است، بنابراین MR به صورت معادله (۳) می تواند ساده شود (El-Sebaili & Shalaby, 2013):

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (3)$$

در این پژوهش از هشت مدل ریاضی خشک کردن استفاده گردید که در پیشینه های تحقیق بیشترین کاربرد را داشته اند. این مدل های ریاضی عبارتند از: پیچ، نیوتون، لگاریتمی، وانگ و سینگ، هندرسون و پابیس، میدیلی، دوجمله ای نمایی و دیفیوژن اپروچ (Tunckal & Doymaz, 2020; Razola-Díaz *et al.*, 2023) این مدل ها در جدول ۱ نشان داده شده اند. برای تعیین بهترین مدل و به دست آوردن ضریب های آن، مدل های یاد شده با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی و به کمک نرم افزار متلب، بر داده های حاصل از مراحل مختلف خشک کردن برازش داده شدند.

در این تحقیق، برای خشک کردن پوره آلو با روش فرکتانس ویندو و لایه نازک هوای داغ از آلوی رقم بخارا استفاده شد. آلو بخارای مورد نیاز از ایستگاه تحقیقاتی گلکان، استان خراسان رضوی تأمین گردید. برای اندازه گیری رطوبت، ابتدا ظرف های فلزی مخصوص خشک کردن در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس (Rajoriya *et al.*, 2019; Asimwe *et al.*, 2022) به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شدند. پس از دسیکاتور گذاری و توزین، وزن ثابت ظروف فلزی به دست آمد. پس از آن مقدار مشخصی از محصول در ظرف ها ریخته شد و در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت مطابق با استاندارد AOAC ۲۰۰۵ خشک گردید (AOAC, 2005). پس از خشک شدن، ظرف حاوی نمونه با استفاده از گیره فلزی به دسیکاتور منتقل شد و پس از رسیدن به وزن ثابت وزن گردید. این آزمایش ها در سه تکرار ادامه یافت. مقدار رطوبت نمونه ها بر مبنای ماده تر با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد:

$$M_{wb} = \frac{m_w - m_d}{m_w} \quad (1)$$

که در آن: m_w : وزن کل یا وزن تر نمونه (g)، m_d : وزن خشک نمونه (g)، و M_{wb} : درصد رطوبت بر مبنای ماده تر است.

سینتیک خشک کردن

به منظور بررسی سرعت خشک کردن، در هر آزمایش در فاصله های زمانی معین (هر ۱۵ دقیقه یک بار) تغییرات وزن

جدول ۱- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای توصیف سرعت خشک کردن

Table 1- Mathematical models used to describe the drying kinetics

منبع Reference	معادله مدل Model equation	نام مدل Name of model	ردیف Number
Singh <i>et al.</i> , 2024	$MR = \exp(-kt)$	نیوتن Newton	۱
Bombana <i>et al.</i> , 2023	$MR = a \exp(-kt)$	هندرسون و پابیس Henderson and Pabis	۲
Zia <i>et al.</i> , 2023	$MR = \exp(-kt^n)$	پیچ Page	۳
Laskar <i>et al.</i> , 2023	$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی Logarithmic	۴
Agbede <i>et al.</i> , 2020	$MR = 1 + at + bt^2$	وانگ و سینگ Wang and Singh	۵
Chauhan <i>et al.</i> , 2021	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	دیفیوژن اپروچ Diffusion approach	۶
Laskar <i>et al.</i> , 2023	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	دوجمله ای نمایی Two-term exponential	۷
Moura <i>et al.</i> , 2021	$MR = \exp(-kt^n) + bt$	میدیلی Midilli	۸

برای ارزیابی بهترین مدل، از سه معیار ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مربع کای (χ^2) استفاده شد که به با معادله‌های ۴ تا ۶ محاسبه گردیدند. معیار انتخاب بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک کردن، بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر χ^2 و RMSE بود (Agbede *et al.*, 2020; Bombana *et al.*, 2023).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp,i}})(MR_{pre,i} - \overline{MR_{pre,i}}))^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp,i}})^2 \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - \overline{MR_{pre,i}})^2} \quad (6)$$

که در آن: $MR_{exp,i}$: نسبت رطوبت مشاهده شده تجربی
 $MR_{pre,i}$: نسبت رطوبت پیش‌بینی شده i ام، N : تعداد مشاهدات و n : تعداد ثابت‌های معادله است. ضریب‌ها (ثابت‌های) معادله انتخاب شده به متغیرهای مورد استفاده در فرایند خشک کردن ارتباط داده شد و معادله‌ای کلی به دست آمد که می‌تواند ویژگی‌های خشک کردن نمونه‌ها را در شرایط آزمایش شده پیش‌بینی کند.
 نسبت باز جذب رطوبت^۱ (RR) نسبت باز جذب رطوبت یکی از شاخص‌های کلیدی کیفیت محصولات خشک است و تغییرات فیزیکوشیمیایی ناشی از روش‌های خشک کردن را منعکس می‌کند. این نسبت نشان‌دهنده ظرفیت محصول در جذب مجدد آب است و کاهش آن معمولاً ناشی از تخریب ساختار میکروبی و فروپاشی بافت داخلی محصول است.

¹ Rehydration Ratio

برای زمان‌های طولانی خشک کردن، n برابر با ۱ است، پس معادله (۱۰) را می‌توان به صورت معادله (۱۱) نوشت (Agbede *et al.*, 2020):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (11)$$

محققانی زیادی نشان دادند که می‌توان معادله (۱۱) را به معادله خط مستقیم (۱۲) تبدیل کرد: (Vijayan *et al.*, 2020)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (12)$$

با رسم نمودار $\ln(MR)$ در مقابل زمان خشک کردن، شیب (K_0) محاسبه می‌شود و از آن مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محصول نیز محاسبه می‌گردد (معادله ۱۳):

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{(4L^2)} \quad (13)$$

آزمایش‌های مدنظر با سه روش خشک کردن شامل رفراکتنس ویندو (RWD)، رفراکتنس ویندو مجهز به پرتو فرسرخ (IFRWD) و لایه نازک هوای داغ (HAD) با سه تکرار و در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی استفاده گردید.

نتایج و بحث

به منظور بررسی سینتیک خشک کردن پوره آلو، مقدار رطوبت نمونه‌ها در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری و داده‌ها به نمودار نسبت رطوبت بر حسب زمان منتقل شد. مقدار رطوبت اولیه پوره‌های آلو با ضخامت ۵ میلی‌متر حدود 0.8 ± 0.05 درصد بر پایه تر بود. در خشک‌کن رفراکتنس ویندو (RWD) و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، پس از ۲۷۵ دقیقه، و در خشک‌کن هوای داغ (HAD)، پس از ۳۹۰ دقیقه و در همان دما، رطوبت به سطح نهایی 0.12 ± 0.05 درصد بر پایه تر رسید. این نتایج نشان‌دهنده کاهش ۲۹/۵ درصدی مدت زمان خشک شدن با استفاده از خشک‌کن رفراکتنس ویندو در مقایسه با خشک‌کن هوای داغ است. استفاده از تابش فرسرخ در خشک‌کن رفراکتنس (IFRWD) سبب کاهش ۲۳/۶ درصدی زمان خشک‌شدن محصول نسبت به

به‌منظور به‌دست‌آوردن نسبت بازجذب رطوبت محصول، ابتدا نمونه‌های خشک‌شده وزن شدند. پس از آن به مدت ۳۰ دقیقه در آب با دمای ۵۰ درجه سلسیوس غوطه‌ور گردیدند. پس از آن، آب اضافی نمونه‌ها گرفته شد، وزن آن‌ها ثبت گردید و نسبت بازجذب رطوبت (RR) با استفاده از معادله ۷ محاسبه شد (Salehi *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2020):

$$RR = \frac{m_2}{m_1} \quad (7)$$

که در آن: m_1 : وزن ماده خشک (g) و m_2 : وزن ماده پس از آبرسانی مجدد (g) است. همه آزمایش‌ها در سه تکرار اجرا شد.

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

معادله کلی ضریب نفوذ در خشک کردن از معادله (۸) به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (8)$$

در بسیاری از مواد غذایی و زیستی، نمونه به صورت یک لایه تخت با نیم‌ضخامت L در نظر گرفته می‌شود. بنابراین:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad 0 < z < L \quad (9)$$

با شرایط مرزی:

تقارن در مرکز: $\frac{\partial M}{\partial z}(z=0, t) = 0$ و تعادل سطحی (انتقال خارجی سریع): $M(z=L, t) = M_e$

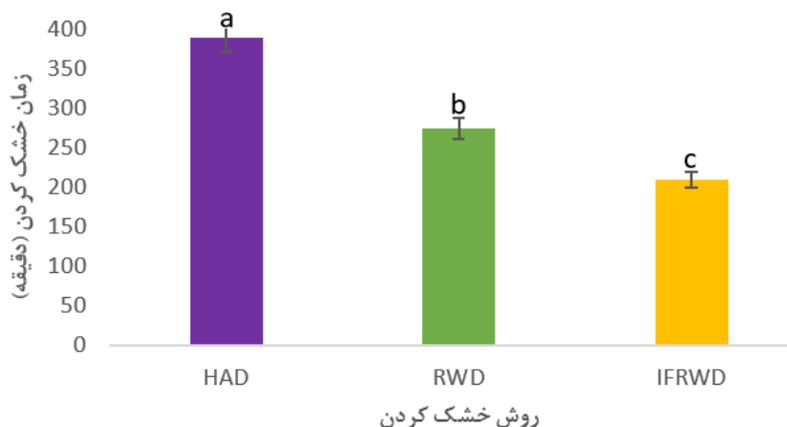
برای زمان‌های نسبتاً طولانی، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در فرآیند خشک کردن از معادله (۱۰) به‌دست می‌آید (Doymaz, 2006):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (10)$$

که در آن: MR : نسبت رطوبت، D_{eff} : ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m^2/s)، L : نصف ضخامت نمونه (m)، t : زمان خشک شدن (s)، M : مقدار رطوبت، و ∇^2 : عملگر لاپلاسین (برای تغییرات مکانی در یک بعد، دو بعد یا سه بعد) است.

داد که خشک‌کن رفراکتنس ویندو زمان خشک شدن اسلایس‌های سیب را نسبت به خشک‌کن هوای داغ به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. این کاهش زمان ناشی از مکانیسم ویژه انتقال حرارت در خشک‌کن رفراکتنس ویندو از طریق هدایت و تابش است. خشک‌کن رفراکتنس ویندو همراه با تابش فرورسرخ باعث کاهش بیشتری در زمان خشک شدن شده است؛ این اثر به هم‌افزایی گرمایش رفراکتنس ویندو و تابش فرورسرخ و انتشار سریع‌تر رطوبت نسبت داده می‌شود (Rajoriya et al., 2020; Rajoriya et al., 2019).

خشک‌کن رفراکتنس ویندو و کاهش چشمگیر ۴۶ درصدی نسبت به خشک‌کن هوای داغ گردید (شکل ۴)، که این نشان‌دهنده تاثیر شگرف استفاده از خشک‌کن رفراکتنس ویندو مجهز به پرتو فرورسرخ در کم کردن زمان خشک شدن محصول است، این نتایج مشابه تحقیقات پادی و دوویدی (Padhi & Dwivedi, 2022) و همکاران (Seyfi et al., 2021) و روروش و همکاران (Rurush et al., 2022) و داده‌نایا و همکاران (Dadhaneeya et al., 2023) است. مطالعات راجوریا و همکاران (Rajoriya et al., 2020) نشان



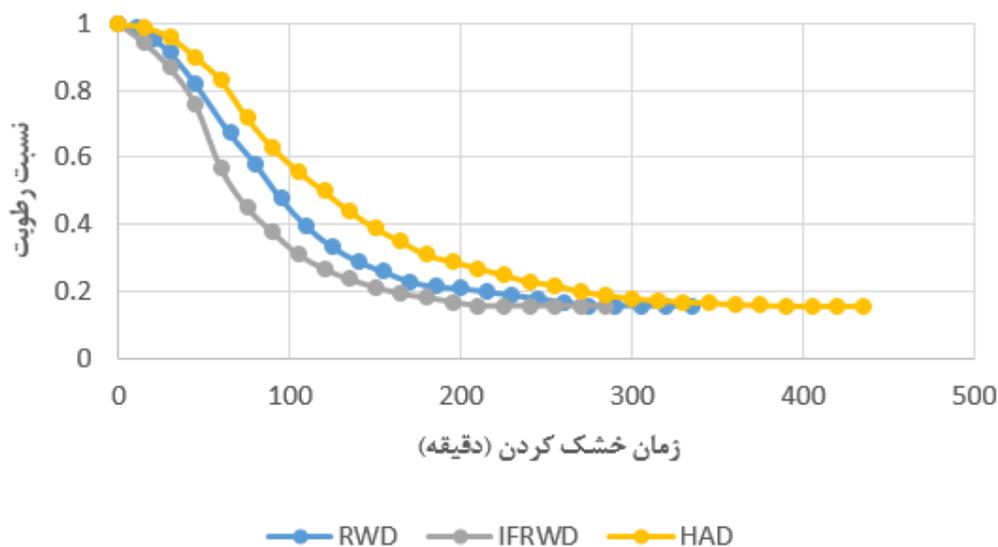
شکل ۴- تاثیر روش خشک کردن بر زمان خشک کردن پوره آلو

Fig. 4- The effect of drying method on the drying time of plum puree

محققانی مانند آشتیانی و همکاران و سلام و همکاران (Ashtiani et al, 2017; Sallam et al., 2015) گزارش گردیده است. در واقع، در آغاز فرآیند خشک شدن، رطوبت محصول با سرعت زیادی کاهش می‌یابد زیرا سطح آن دارای رطوبت زیاد است و تبخیر به سرعت پیش می‌رود. بیشتر حرارت منتقل شده از هوا به محصول صرف تبخیر رطوبت سطح می‌شود و تنها مقدار کمی به داخل نفوذ می‌کند. پس از آن رطوبت داخلی به سطح منتقل می‌شود تا جای آن را پر کند؛ این امر نشان می‌دهد که حرکت رطوبت عمدتاً از طریق انتشار مولکولی است. با کاهش رطوبت، سرعت خشک شدن نیز کاهش می‌یابد.

شکل ۵ منحنی تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان را برای خشک کردن پوره آلو با خشک‌کن رفراکتنس ویندو، خشک‌کن رفراکتنس ویندو مجهز به تابش فرورسرخ و خشک‌کن هوای داغ در دمای ۷۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همان گونه که در نمودار مشاهده می‌شود، در خشک شدن پوره آلو با هر سه روش، دوره ثابت وجود ندارد و فرایند خشک شدن به دلیل ویژگی‌های انتقال جرم و انرژی ناشی از کاهش دسترسی به آب آزاد، افزایش مقاومت انتقال جرم، کاهش اختلاف فشار بخار آب درون نمونه و هوای اطراف و تغییر دمای محصول، در مرحله افت سرعت خشک شدن رخ می‌دهد. نتیجه‌هایی مشابه برای مطالعات سینتیک خشک شدن مواد غذایی و محصولات کشاورزی توسط

مقایسه خشک کردن پوره آلو با رفرکتانس ویندو، رفرکتانس ویندو مجهز به تابش فروسرخ، و هوای داغ



شکل ۵- تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان در هر سه روش خشک کردن پوره آلو
 Fig. 5- Variation of moisture ratio versus the time by three drying methods of plum puree

بیشترین ضریب همبستگی و کمترین مقدار میانگین مربعات خطا و مربع کای، بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. شکل ۶ نیز نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های آزمایشی همخوانی بسیار خوبی دارند (ضریب همبستگی ۰/۹۹)، به طوری که داده‌ها حول خط ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند. بنابراین، مدل میدیلی بهترین مدل برای تشریح و پیش‌بینی رفتار خشک کردن پوره آلو انتخاب شد و این مدل برای تعیین پارامترهای عملیاتی خشک‌کن قابل اعتماد است.

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

مقادیر ضریب نفوذ مؤثر حاصل از آزمایش‌ها با هر سه روش خشک‌کردن پوره آلو، همراه با مقادیر R^2 در جدول ۳ نشان داده شده است.

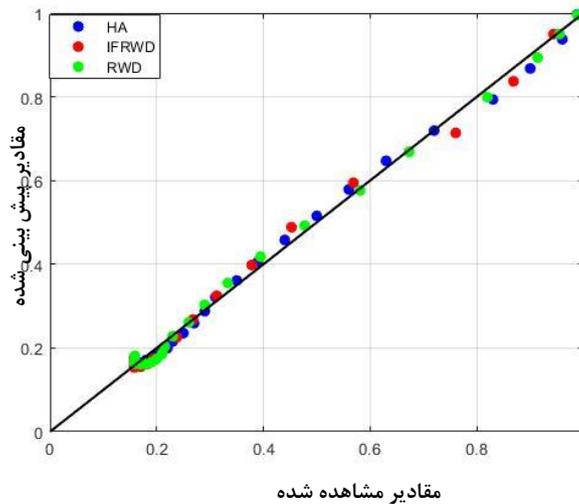
داده‌های آزمایشی با هشت مدل خشک‌شدن لایه نازک ارائه شده توسط محققان در پیشینه پژوهش، همان گونه که در جدول ۱ آمده است، برازش داده شد. نتایج تجزیه و تحلیل آماری این مدل‌ها برای هر سه روش خشک‌کن هوای داغ (HAD)، خشک‌کن رفرکتانس ویندو (RWD) و خشک‌کن رفرکتانس ویندو با تابش فروسرخ (IFRWD) در جدول ۲ نمایش داده شده است. مدلی که دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا و مقدار مربع کای بود به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید.

بر اساس داده‌های جدول ۲، مدل میدیلی در تمامی روش‌های خشک‌کردن پوره آلو (رفرکتانس ویندو، رفرکتانس ویندو با پرتو فروسرخ و هوای داغ) با داشتن

جدول ۲- نتایج آماری مدل سازی ریاضی منحنی های خشک کردن پوره آلو با سه روش خشک کردن HAD, RWD و IFRWD
 Table 2- Statistical results of mathematical modeling of plum puree drying curves by three drying methods: HAD, RWD, and IFRWD

RMSE	$\chi^2(E-4)$	R ²	ضرایب coefficients	روش خشک کردن Drying Method	نام مدل Name of model
۰/۰۵۲۲	۲۸	۰/۹۷	k= ۰/۰۰۳۳۴	HAD	نیوتن Newton
۰/۰۵۵۶	۳۲	۰/۹۷	k= ۰/۰۰۷۲۹	RWD	
۰/۰۵۷۸	۳۵	۰/۹۶	k= ۰/۰۰۹۲	IFRWD	
۰/۰۵۰۱	۳۷	۰/۹۷	k= ۰/۰۰۳۴ n= ۱/۰۹۱	HAD	پیج page
۰/۰۵۳۸	۳۲	۰/۹۷	k= ۰/۰۰۴۷ n= ۱/۰۸۸	RWD	
۰/۰۵۷۷	۳۷	۰/۹۶	k= ۰/۰۰۸۱ n= ۱/۰۲۶	IFRWD	
۰/۰۴۵۳	۲۲	۰/۹۷	a= ۱/۰۸ k= ۰/۰۰۶	HAD	هندرسون و پابیس Henderson and Pabis
۰/۰۴۹۴	۳۷	۰/۹۷	a= ۱/۰۷۱ k= ۰/۰۰۷۸	RWD	
۰/۰۵۵۳	۳۴	۰/۹۶	a= ۱/۰۵۲ k= ۰/۰۰۹۷	IFRWD	
۰/۰۳۸۷	۱۷	۰/۹۸	a= ۱/۰۳۴ k= ۰/۰۰۷۵ c= ۰/۰۸۲۵	HAD	لگاریتمی Logarithmic
۰/۰۴۲۲	۲۰	۰/۹۸	a= ۱/۰۱۷ k= ۰/۰۰۹۹ c= ۰/۰۸۶۵	RWD	
۰/۰۵۲۷	۳۱	۰/۹۶	a= k= c=	IFRWD	
۰/۰۳۳۳	۱۲	۰/۹۸	a= - ۰/۰۰۵۳۶ b= ۷/۷۸ × ۱۰ ^{-۶}	HAD	وانگ و سینگ Wang and Singh
۰/۰۳۵۳	۱۴	۰/۹۸	a= - ۰/۰۰۷ b= ۱/۳۴۱ × ۱۰ ^{-۵}	RWD	
۰/۰۴۰۴	۱۹	۰/۹۷	a= - ۰/۰۰۸۴ b= ۱/۹۴۱ × ۱۰ ^{-۵}	IFRWD	
۰/۰۵۲۱	۲۹	۰/۹۷	a= ۰/۷۰۵۵ k= ۰/۰۰۶۱	HAD	دوجمله ای نمایی Two term exponential
۰/۰۵۵۴	۳۴	۰/۹۷	a= ۰/۶۴۰۴ k= ۰/۰۰۸۶	RWD	
۰/۰۵۶۵	۳۵	۰/۹۶	a= ۰/۵۱۴۲ k= ۰/۰۱۲۹	IFRWD	
۰/۰۹۷۵	۱۰۶	۰/۹۴	a= -۶/۳۲۸ × ۱۰ ^{-۱۲} k= ۰/۰۵۵۲۱ b= -۰/۷۵۹	HAD	دیفیوژن اپروچ Diffusion approach
۰/۱۲۷۶	۱۸۶	۰/۹۳	a= ۱/۴۳۹ × ۱۰ ^{-۱۲} k= ۰/۰۸۶۱۲ b= -۰/۰۵۷۳	RWD	
۰/۰۴۷۴	۲۶	۰/۹۷	a= ۰/۹۹۹۷ k= -۰/۰۰۹۸ b= -۲/۱	IFRWD	
<u>۰/۰۱۶۱</u>	<u>۳</u>	<u>۰/۹۹</u>	<u>a= ۱/۰۳۱۴</u> <u>k= ۰/۰۰۰۸</u> <u>n= ۱/۴۳۳۲</u> <u>b= ۰/۰۰۰۴</u>	<u>HAD</u>	میدیلی Midilli
<u>۰/۰۱۵۹</u>	<u>۳</u>	<u>۰/۹۹</u>	<u>a= ۱/۰۱۸۸</u> <u>k= ۰/۰۰۰۹</u> <u>n= ۱/۴۹۶۱</u> <u>b= ۰/۰۰۰۵</u>	<u>RWD</u>	
<u>۰/۰۲۰۳</u>	<u>۵</u>	<u>۰/۹۹</u>	<u>a= ۱/۰۱۷۹</u> <u>k= ۰/۰۰۱۵</u> <u>n= ۱/۴۶۴۳</u> <u>b= ۰/۰۰۰۶</u>	<u>IFRWD</u>	

مقایسه خشک کردن پوره آلو با فرکتانس ویندو، فرکتانس ویندو مجهز به تابش فرسرخ، و هوای داغ



شکل ۶- مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده نسبت رطوبت توسط مدل میدیلی در سه روش خشک کردن
 Fig. 6- Observed and predicted values of moisture ratio by Midilli model by three drying methods

جدول ۳- مقادیر ضریب نفوذ مؤثر پوره آلو با هر سه روش خشک کردن

Table 3- Values of the effective diffusion coefficient of plum puree by three drying methods

R ²	ضریب نفوذ مؤثر رطوبت	K _o	روش خشک کردن
۰/۹۳	۱/۲۴۱× ۱۰ ^{-۸}	-۰/۰۰۴۹	HAD
۰/۹۲	۱/۵۹۵× ۱۰ ^{-۸}	-۰/۰۰۶۳	RWD
۰/۹۰	۱/۸۲۴× ۱۰ ^{-۸}	-۰/۰۰۷۲	IFRWD

از نتایج جدول مشاهده می‌شود خشک‌کن فرکتانس ویندو مجهز به پرتو فرسرخ دارای بیشترین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ($1/241 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) است و کمترین مقدار آن ($1/824 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) در خشک‌کن هوای داغ دیده می‌شود؛ این امر به دلیل کوتاه‌تر بودن زمان خشک شدن پوره آلو در خشک‌کن فرکتانس ویندو مجهز به پرتو فرسرخ است. نتایجی مشابه توسط محققانی چون روروش و همکاران (Rurush *et al.*, 2022) در خشک کردن پالپ بلوبری و راجوریا و همکاران (Rajoriya *et al.*, 2020) در خشک کردن سیب و مقایسه خشک‌کن فرکتانس ویندو با خشک‌کن هوای داغ گزارش شده است. برای مثال، مقدار این ضریب در خشک کردن پالپ بلوبری با خشک‌کن فرکتانس ویندو در دمای ۹۵ درجه سلسیوس $0/4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ و با خشک‌کن هوای داغ $7/94 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمده است (Zielinska & Michalska, 2018; Rajoriya *et al.*, 2020; Rurush *et al.*, 2022).

نسبت بازجذب رطوبت

مقایسه روش‌های خشک‌کردن و تأثیر آن بر نسبت بازجذب رطوبت پوره آلو در شکل ۷ نمایش داده شده است. از منحنی این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار نسبت بازجذب رطوبت متعلق به روش خشک‌کردن با خشک‌کن فرکتانس ویندو مجهز به پرتو فرسرخ با مقدار $3/24$ و کمترین آن مربوط به خشک‌کن هوای داغ با مقدار $2/64$ است که نشان‌دهنده افزایش $18/5$ درصد این نسبت به دلیل استفاده از پرتو فرسرخ است. مقدار این نسبت در خشک‌کن فرکتانس ویندو $2/9$ است که تأثیر مثبت ۹ درصد را در استفاده از فرکتانس ویندو، در مقایسه با خشک‌کن

هوای داغ، نشان می‌دهد، به نحوی که نسبت بازجذب بالا نشان‌دهنده آسیب کمتر به بافت سلولی محصول است. در خشک‌کن هوای داغ، به دلیل قرارگیری طولانی‌تر محصول در معرض حرارت مستقیم، رطوبت به‌صورت غیر یکنواخت و ناپیوسته حذف شده است و سبب آسیب رساندن جدی به نمونه‌ها می‌گردد. اثر زیان‌آور دما باعث کاراملی شدن قندها و مسدود شدن منافذ سطح محصول می‌شود و در نتیجه انتشار آب از سطح در آبرسانی مجدد کاهش می‌یابد. استفاده از پرتو فرسرخ سبب افزایش نسبت بازجذب رطوبت می‌شود زیرا وقتی پوره آلو با خشک‌کن فرکتانس

ویندو مجهز به پرتو فرسرخ خشک می‌شود، مدت زمان خشک شدن نسبت به خشک‌کن فرکتانس ویندو بدون پرتو فرسرخ کمتر است؛ در نتیجه محصول کمتر در معرض حرارت است و تحت شرایط مناسب‌تر و بهینه‌تری در محفظه خشک‌کن قرار می‌گیرد. در حالی که دوره طولانی‌تر خشک شدن، نفوذ آب را در فرآیند آبرسانی مجدد کاهش می‌دهد، استفاده از پرتو فرسرخ باعث می‌شود کاهش رطوبت به‌صورت یکنواخت رخ دهد و هندسه داخلی محصول حفظ شود (Bhardwaj et al., 2020).



شکل ۷- مقایسه روش خشک کردن بر نسبت بازجذب رطوبت

Fig. 7- Comparison of drying methods on rehydration ratio

خشک‌کن فرکتانس ویندو به ترتیب ۴۶ درصد و ۲۳/۶ درصد کاهش می‌دهد. بررسی مقادیر نسبت رطوبت به‌دست‌آمده از آزمایش‌های خشک‌کردن نشان داد که فرآیند خشک‌شدن پوره آلو عمدتاً در مرحله افت سرعت خشک‌شدن صورت گرفته است. داده‌های حاصل با هشت مدل ریاضی خشک‌کردن لایه نازک برازش گردید که در میان آن‌ها، مدل میدیلی به دلیل داشتن بالاترین ضریب همبستگی و کمترین مقادیر میانگین مربعات خطا و مربع کای مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. مقادیر نسبت بازجذب رطوبت در روش خشک‌کردن محصول با خشک‌کن

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سرعت خشک‌کردن پوره آلو به ضخامت ۵ میلی‌متر در دمای ۷۰ درجه سلسیوس با استفاده از سه نوع خشک‌کن شامل خشک‌کن هوای داغ، خشک‌کن فرکتانس ویندو و خشک‌کن فرکتانس ویندو مجهز به پرتو فرسرخ بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد استفاده از خشک‌کن فرکتانس ویندو موجب کاهش ۲۹/۵ درصد در مدت زمان خشک‌شدن محصول نسبت به خشک‌کن هوای داغ می‌شود. استفاده از پرتو فرسرخ مدت زمان خشک‌کردن نمونه را نسبت به خشک‌کن هوای داغ و

رفراکتانس ویندو مجهز به پرتو فرسرخ ۳/۲۴، در خشک کن رفراکتانس ویندو ۲/۹ و در خشک کن هوای داغ به مقدار ۲/۶۴ به دست آمد. ضریب نفوذ مؤثر محصول خشک شده نشان داد که بیشترین مقدار آن مربوط به خشک کن رفراکتانس ویندو مجهز به پرتو فرسرخ با مقدار $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ و $1/824 \times$ کمترین مقدار مربوط به خشک کن هوای داغ با مقدار $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \times 1/241$ است.

تعارض منافع

نویسندگان در رابطه با انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده ها و یا ارسال و انتشار دوباره پرهیز نموده اند و در این راستا منافع تجاری وجود ندارد.

سپاسگزاری

از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (Iran : NSF : National Science Foundation) به دلیل حمایت

منابع

- Agbede, O. O., Oke, E. O., Akinfenwa, S. I., Wahab, K. T., Ogundipe, S., Aworanti, O. A., ... & Babatunde, K. A. (2020). Thin layer drying of green microalgae (*Chlorella* sp.) paste biomass: Drying characteristics, energy requirement and mathematical modeling. *Bioresource Technology Reports*, 11, 100467.
- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis (18th ed). Association of Official Analytical Chemists International, Maryland, USA.
- Ashtiani, S. H. M., Salarikia, A., & Golzarian, M. R. (2017). Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. *Information Processing in Agriculture*, 4(2), 128-139.
- Asiimwe, A., Kigozi, J. B., Baidhe, E., & Muyonga, J. H. (2022). Optimization of refractance window drying conditions for passion fruit puree. *Lwt*, 154, 112742.
- Baeghbali, V., Niakousari, M., & Farahnaky, A. (2016). Refractance Window drying of pomegranate juice: Quality retention and energy efficiency. *LWT-Food science and technology*, 66, 34-40.
- Bhardwaj, A. K., Kumar, R., & Chauhan, R. (2019). Experimental investigation of the performance of a novel solar dryer for drying medicinal plants in Western Himalayan region. *Solar Energy*, 177, 395-407.
- Bombana, V. B., Fischer, B., Oro, C. E. D., Rigo, D., Polina, C. C., Franco Denti, A., ... & Junges, A. (2023). Drying kinetics of guabiju pulp (*Myrcianthes pungens*): Mass transfer parameters, mathematical modeling and evaluation of bioactive compounds. *Journal of Food Process Engineering*, 46(1), e14205.
- Chauhan, A., Singh, S., Dhar, A., & Powar, S. (2021). Optimization of pineapple drying based on energy consumption, nutrient retention, and drying time through multi-criteria decision-making. *Journal of Cleaner Production*, 292, 125913.
- Dadhaneeya, H., Nayak, P. K., Saikia, D., Kondareddy, R., Ray, S., & Krishnan Kesavan, R. (2023). The impact of refractance window drying on the physicochemical properties and bioactive compounds of malbhog banana slice and pulp. *Applied Food Research*, 3(1), 100279.
- Doymaz, I., 2006. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 74(3), pp.370-375.
- Duarte-Correa, Y., Vargas-Carmona, M. I., Vásquez-Restrepo, A., Ruiz Rosas, I. D., & Perez Martinez, N. (2021). Native potato (*Solanum phureja*) powder by Refractance Window Drying: A promising way for potato processing. *Journal of Food Process Engineering*, 44(10), e13819.

- El-Sebaï, A. A., & Shalaby, S. M. (2013). Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy Conversion and Management*, 74, 109-116.
- Franco, S., Jaques, A., Pinto, M., Fardella, M., Valencia, P., Núñez, H., ... & Simpson, R. (2019). Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef, and apple (Granny Smith) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. *Innovative food science & emerging technologies*, 52, 8-16.
- Henao-Ardila, A., Quintanilla-Carvajal, M. X., Santagapita, P. R., Caldas-Abril, M., Bonilla-Bravo, V., & Moreno, F. L. (2023). Effect of wall material on lipophilic functional compounds of high oleic palm oil emulsions encapsulated by Refractance Window drying. *Heliyon*, 9(11).
- Jeyaprakash, S., Heffernan, J. E., Driscoll, R. H., & Frank, D. C. (2020). Impact of drying technologies on tomato flavor composition and sensory quality. *LWT*, 120, 108888.
- Kumar, M., Madhumita, M., Srivastava, B., & Prabhakar, P. K. (2022). Mathematical modeling and simulation of refractance window drying of mango pulp for moisture, temperature, and heat flux distribution. *Journal of Food Process Engineering*, 45(9), e14090.
- Laskar, A. A., Ahmed, M., Vo, D. V. N., Abdullah, A., Shahadat, M., Mahmoud, M. H., ... & Yusuf, M. (2023). Mathematical modeling and regression analysis using MATLAB for optimization of microwave drying efficiency of banana. *Thermal Science and Engineering Progress*, 46, 102157.
- Mbegbu, N. N., Nwajinka, C. O., & Amaefule, D. O. (2021). Thin layer drying models and characteristics of scent leaves (*Ocimum gratissimum*) and lemon basil leaves (*Ocimum africanum*). *Heliyon*, 7(1).
- Miano, A. C., & Rojas, M. L. (2024). Drying strategies of spent coffee grounds using refractance window method. *Food Research International*, 178, 114007.
- Minuye, M., Getachew, P., Laillou, A., Chitekwe, S., & Baye, K. (2021). Effects of different drying methods and ascorbic acid pretreatment on carotenoids and polyphenols of papaya fruit in Ethiopia. *Food science & nutrition*, 9(6), 3346-3353.
- Moura, H. V., de Figueirêdo, R. M. F., de Melo Queiroz, A. J., de Vilela Silva, E. T., Esmero, J. A. D., & Lisbôa, J. F. (2021). Mathematical modeling and thermodynamic properties of the drying kinetics of tapiá residues. *Journal of Food Process Engineering*, 44(8), e13768.
- Nadew, T. T., Reshad, A. S., & Tegenaw, P. D. (2023, November). Oyster Mushroom Drying in Tray Dryer: Parameter Optimization, Drying Kinetics and Characterization. In 2023 AIChE Annual Meeting. AIChE.
- Nansereko, S., Muyonga, J., & Byaruhanga, Y. B. (2022). Optimization of drying conditions for jackfruit pulp using refractance window drying technology. *Food Science & Nutrition*, 10(5), 1333-1343.
- Nemzer, B., Vargas, L., Xia, X., Sintara, M., & Feng, H. (2018). Phytochemical and physical properties of blueberries, tart cherries, strawberries, and cranberries as affected by different drying methods. *Food Chemistry*, 262, 242-250.
- Ortiz-Jerez, M. J., Sánchez, A. F., & Montoya, J. E. Z. (2022). Drying kinetics and sensory characteristics of dehydrated pumpkin seeds (*Cucurbita moschata*) obtained by refractance window drying. *Heliyon*, 8(10).
- Padhi, S., & Dwivedi, M. (2022). Physico-chemical, structural, functional and powder flow properties of unripe green banana flour after the application of Refractance window drying. *Future Foods*, 5, 100101.
- Puente, L., Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K. S., Rodríguez, A., Pasten, A., Poblete, J., & Muñoz, M. (2020). Refractance Window drying of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) pulp: A comparison of quality characteristics with respect to other drying techniques. *Lwt*, 131, 109772.
- 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.
- Qadri, O. S., Srivastava, A. K., & Yousuf, B. (2020). Trends in foam mat drying of foods: Special emphasis on hybrid foam mat drying technology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(10), 1667-1676.
- Rajoriya, D., Shewale, S. R., & Hebbar, H. U. (2019). Refractance window drying of apple slices: Mass transfer phenomena and quality parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1646-1658.
- Rajoriya, D., Shewale, S. R., & Hebbar, H. U. (2019). Refractance window drying of apple slices: Mass transfer phenomena and quality parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1646-1658.

- Rajoriya, D., Shewale, S. R., Bhavya, M. L., & Hebbar, H. U. (2020). Far infrared assisted refractance window drying of apple slices: Comparative study on flavour, nutrient retention and drying characteristics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102530.
- Razola Díaz, M. D. C., Guerra Hernández, E. J., Gómez Caravaca, A. M., García Villanova Ruiz, B., & Verardo, V. (2023). Mathematical modelling of drying kinetics of avocado peels and its influence on flavan-3-ols content and antioxidant activity.
- Rurush, E., Alvarado, M., Palacios, P., Flores, Y., Rojas, M. L., & Miano, A. C. (2022). Drying kinetics of blueberry pulp and mass transfer parameters: Effect of hot air and refractance window drying at different temperatures. *Journal of Food Engineering*, 320, 110929.
- Sabarez, H., 2016. Drying of food materials.
- Salehi, F., Goharpour, K., & Kamran, H. R. (2024). Effects of different pretreatment techniques on the color indexes, drying characteristics and rehydration ratio of eggplant slices. *Results in Engineering*, 21, 101690.
- Sallam, Y. I., Aly, M. H., Nassar, A. F., & Mohamed, E. A. (2015). Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. *Journal of advanced research*, 6(2), 171-178.
- Seyfi, A., Asl, A. R., & 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, 162-173.
- Shende, D. and Datta, A.K., 2019. Refractance window drying of fruits and vegetables: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), pp.1449-1456.
- Singh, D., Sengar, M., Patel, S. K., Kumar, D., Pal, D., Giri, B. S., & Singh, D. (2024). Drying characteristics of thin layer of potato (*Solanum tuberosum*): experimental and computational studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(27), 38658-38675.
- Tontul, I., Eroğlu, E., & Topuz, A. (2018). Convective and refractance window drying of cornelian cherry pulp: Effect on physicochemical properties. *Journal of Food Process Engineering*, 41(8), e12917.
- Tunckal, C. and Doymaz, İ., 2020. Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system. *Renewable Energy*, 150, pp.918-923.
- Vijayan, S., Arjunan, T. V., & Kumar, A. (2020). Exergo-environmental analysis of an indirect forced convection solar dryer for drying bitter gourd slices. *Renewable Energy*, 146, 2210-2223.
- Yoha, K. S., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2023). Refractance window drying: principles, applications, and emerging innovations. In *Drying Technology in Food Processing* (pp. 417-455). Woodhead Publishing.
- Zhang, Q., Pertin, O., Kamdi, H. S., Durgawati, Xiao, H. W., & Sutar, P. P. (2024). Modified refractance window drying of jamun pulp (*Syzygium cumini*) based on innovative infrared and microwave radiation techniques. *Drying Technology*, 42(5), 775-794.
- Zhou, Y. H., Vidyarthi, S. K., Zhong, C. S., Zheng, Z. A., An, Y., Wang, J., ... & Xiao, H. W. (2020). Cold plasma enhances drying and color, rehydration ratio and polyphenols of wolfberry via microstructure and ultrastructure alteration. *Lwt*, 134, 110173.
- Zia, S., Khan, M. R., & Aadil, R. M. (2023). Kinetic modeling of different drying techniques and their influence on color, bioactive compounds, antioxidant indices and phenolic profile of watermelon rind. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(1), 1068-1081.
- Zielinska, M., & Michalska, A. (2018). The influence of convective, microwave vacuum and microwave-assisted drying on blueberry pomace physicochemical properties. *International Journal of Food Engineering*, 14(3), 20170332.

Original Research

Comparison of Plum Puree Drying with Refractance window, Infrared-Assisted Refractance Window, and Hot Air

Mohammad Reza Rouzegar ¹, Elham Azarpazhooh ^{2*}, Abbas Rohani ³ and Majid Rezaee Farimani ⁴

1- *Corresponding Author: Associate Professor, Department of Agricultural Engineering, Agricultural and Natural Resources Research Center, Mashhad, Khorasan, Iran

Email: azarpazhooh@gmail.com

Received: 28 June 2025 Accepted: 21 October 2025

<http://doi.org/10.22092/fooder.2025.36992.1425>

Abstract

Drying by the refractance window is one of the new drying methods that has attracted a lot of attention in recent years due to its many advantages. The incorporation of infrared in these dryers leads to the drying of heat-sensitive products such as plums with better quality in a shorter time. In this paper, three drying methods—Refractance Window Dryer (RWD), Infrared-Assisted Refractance Window Dryer (IFRWD), and Hot Air thin-layer Dryer (HAD)—were employed to investigate the drying kinetics of plum puree with a thickness of 5 mm at 70°C. The drying times for IFRWD, RWD, and HAD were 210, 275, and 390 minutes, respectively. The use of IFRWD reduced the drying time by 46% and 23.6% compared to HAD and RWD. Eight thin-layer drying models available in the literature were fitted to the experimental data, among which the Midilli model provided the best fit. The highest effective moisture diffusion coefficient ($1.824 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) and rehydration ratio (3.24) were observed in IFRWD, whereas the lowest values ($1.241 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ and 2.64, respectively) were recorded in HAD. The results indicated that the IFRWD provided the most efficient drying conditions; thus, this method is recommended for drying plum puree at 70 °C with a layer thickness of 5 mm.

Keywords: Effective diffusion coefficient, Infrared, Modeling, Rehydration Ratio

