

ارزیابی شاخص‌های انرژی خشک کردن کیوی در خشک‌کن نیمه‌صنعتی بستر ثابت مجهز به مواد تغییر فاز دهنده

زهرا شیخانی نژادفلاح^۱، مرتضی زنگنه^{۲*} و نرگس بنائیان^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و استادیاران گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۲۲

چکیده

هدف این تحقیق بررسی اثر دما (در سه سطح ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سلسیوس) و مواد تغییر فاز دهنده (PCM) بر چهار شاخص کمی شامل: میزان انرژی مصرفی کل، مقدار انرژی ویژه، مدت زمان خشک شدن و یکنواختی خشک شدن است. با ترکیب متغیرهای مستقل، مجموعاً شش تیمار به دست آمد. فرآیند خشک کردن تحت پیش تیمار توان فرسوخ ۲۵۰ وات، زمان فرسوخ ۱۰ دقیقه، توان ریزموج ۴۰۰ وات، زمان ریزموج ۴ دقیقه و آنزیم‌بری در خشک‌کن بستر ثابت طبقاتی دنبال شد. این مطالعه به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار برای متغیرهای انرژی مصرفی کل، انرژی ویژه و زمان خشک شدن؛ و با شش تکرار برای متغیر یکنواختی اجرا شد. داده‌ها در نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 26 تجزیه و تحلیل شدند. در پایان، به منظور یافتن بهترین تیمار از روش ادغامی کپ لند استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که اثر تیمارها بر میزان انرژی مصرفی کل معنی‌دار نیست. بهترین تیمار از نظر انرژی ویژه مصرفی تیمار دمای ۷۵ درجه سلسیوس - نبود مواد PCM با مقدار ۱/۰۲ کیلووات ساعت بر کیلوگرم است. بهترین تیمار از نظر میزان انرژی مصرفی کل، انرژی ویژه مصرفی و زمان خشک شدن را دمای ۷۵ درجه سلسیوس - نبود مواد PCM نشان داد.

واژه‌های کلیدی

آنزیم‌بری، ریزموج، فرسوخ، مدت زمان خشک شدن، مقدار انرژی ویژه، یکنواختی خشک کردن

مقدمه

۲۰۲۱ با تولید ۲۹۴/۲۶ هزارتن کیوی چهارمین کشور تولیدکننده این میوه در جهان بوده است (Kholghi Eshkalak et al., 2021). با اینکه سهم ایران ۷/۹۲ درصد از تولید کیوی در جهان است اما از نظر میزان صادرات میوه کیوی در رده هشتم کشورهای جهان قرار دارد که مهم‌ترین دلیل آن کمبود صنایع فرآوری و بسته‌بندی مناسب است (Aidani et al., 2017). یکی از مؤثرترین راهکارها به منظور کاهش حجم ضایعات و اتلاف محصولات

میوه کیوی^۱ به دلیل داشتن طعم و عطر مناسب و ارزش غذایی و دارویی فراوان، از محبوب‌ترین میوه‌ها در جهان به شمار می‌رود (Mohammadi et al., 2019). سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد^۲، پس از موز، مرکبات و سیب، کیوی چهارمین میوه مورد علاقه از نظر مردم دنیا است (Aidani et al., 2017). بر اساس گزارش سالانه این سازمان، ایران در سال

<http://10.22092/AMSR.2023.362142.1449>

Email: zanganeh@guilan.ac.ir

*نگارنده مسئول:

1- *Acitiniadia deliciosa*

2- FAO

در تحقیقی روی فرایند خشک کردن بادام‌زمینی، اثر چهار دمای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و دو سرعت هوای ۲ و ۳ متر بر ثانیه در یک خشک‌کن هوای داغ بررسی و نشان داده شد که بهترین تیمار شامل دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه است (Gholami Parshokohi *et al.*, 2018).

در پژوهشی دیگر، یک خشک‌کن خورشیدی طراحی و ساخته شد که دارای جمع‌کننده^۱ نوآورانه‌ای بود. برای ساخت این جمع‌کننده از قوطی‌های خالی نوشابه استفاده شده و مجهز به مواد تغییر فاز دهنده^۲ برای ذخیره‌سازی حرارت بود. دمای تغییر فاز مواد مورد استفاده در این تحقیق ۵۱ تا ۵۳ درجه سلسیوس بود و زمانی که دمای محفظه خشک‌کن به بیش از ۵۳ درجه سلسیوس می‌رسید مواد تغییر فاز می‌دادند و انرژی حرارتی ذخیره شده خود را به محفظه خشک‌کن می‌رساندند (Jannatkah *et al.*, 2018).

خشک‌کن‌های کابینتی از مهم‌ترین ابزار خشک کردن میوه‌ها هستند. پژوهشی در سال ۲۰۲۱ برای بررسی مدت‌زمان و ویژگی‌های خشک شدن میوه انگور با استفاده از یک خشک‌کن خورشیدی کابینتی به اجرا درآمد. در این پژوهش برای یافتن زمان بهینه خشک شدن از مدل‌سازی تحلیلی استفاده شد. این مدل ویژگی‌های خشک شدن را برای دمای هوای ۳۴ تا ۵۲ درجه سلسیوس و سرعت گردش هوای ۰/۴ تا ۰/۹ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. سینتیک خشک شدن، مانند دمای هوا و سرعت، نقش مهمی در فرآیند خشک شدن دارد (Komble *et al.*, 2021).

تقی‌نژاد و همکاران (Taghinezhad *et al.*, 2020) در پژوهشی روی خشک‌کن ترکیبی هوای

کشاورزی، ایجاد و توسعه صنایع تبدیلی است (Karami, 2019). صنایع تبدیلی در بخش کشاورزی گام اصلی در تکمیل زنجیره ارزش به شمار می‌رود که سبب ایجاد ارزش افزوده و ارزآوری می‌شود (Shokhi *et al.*, 2022).

خشک کردن میوه جزئی از صنایع تبدیلی است که از جمله روش‌های نگهداری طولانی‌مدت محصولات است. با کاهش مقدار رطوبت ماده غذایی، امکان فساد میکروبی آن از بین می‌رود و وزن و حجم آن نیز به مقدار زیادی کاهش می‌یابد (Jannatkah *et al.*, 2018). یکی از معمول‌ترین روش‌ها برای فرآوری و صادرات محصولات کشاورزی خشک کردن محصولات است. با انتخاب و استفاده از روش مناسب برای خشک کردن محصول، می‌توان مدت نگهداری را طولانی‌تر کرد و خطر آلودگی، هزینه نگهداری و حمل‌ونقل را کاهش داد (Aidani *et al.*, 2017). برخی از مشکلات اساسی فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی، مصرف انرژی بالا و مدت‌زمان طولانی خشک شدن محصولات است.

تحقیقات فراوانی در زمینه فرآیند خشک شدن انواع محصولات کشاورزی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است. در این تحقیقات، آزمایش‌ها در سطوح مختلفی از تیمارها اجرا شده است. تیمارها شامل دما، سرعت جریان هوا و ضخامت قطعه و... است. پارامترهای اندازه‌گیری شده طی آزمایش‌ها، مربوط به فرآیند خشک شدن محصول بوده و از نوع کمی است. پارامترهای کمی مانند میزان انرژی ویژه مصرفی (مگاژول بر کیلوگرم)، ضریب پخش مؤثر رطوبت (متر مربع بر ثانیه) و مدت‌زمان خشک شدن است. در ادامه، بخشی از پژوهش‌های مرتبط با موضوع طرح بیان می‌شود.

1- Collector

2- Phase Change Material(PCM)

گرم-فروسرخ^۱ و با پیش تیمار فراصوت^۲، پارامترهای انرژی و اکسرژی، رنگ محصول و انتشار گازهای گلخانه‌ای را تجزیه و تحلیل کردند و به این نتیجه دست یافتند که با افزایش زمان پیش تیمار فراصوت و دمای هوای ورودی، تغییرات رنگ کاهش می‌یابد. بیشترین میزان نشر گازهای گلخانه‌ای در دمای هوای ۵۰ درجه سلسیوس و بدون پیش تیمار فراصوت بود و بیشترین بازده اکسرژی در دمای هوای ۷۰ درجه سلسیوس و زمان پیش تیمار ۴۵ دقیقه حاصل شد. جمعی از محققان یک واحد ذخیره‌سازی حرارتی فاز از نوع بستر فشرده را در ساخت یک خشک‌کن استفاده کردند و نشان دادند که انتخاب ماده تغییر فاز دهنده با دمای تغییر فاز مناسب، داری اهمیت بالایی است و عامل کلیدی برای دوری از فساد مواد غذایی به شمار می‌رود (Esakkimuthu et al., 2013).

به منظور ارزیابی عملکرد یک دستگاه خشک‌کن، در پژوهشی تأثیر شرایط خشک کردن روی کیفیت ورقه‌های سیب خشک شده با تعیین پارامترهای کیفی از قبیل نسبت جذب آب، چگالی ظاهری، درصد چروکیدگی و تغییر رنگ سطحی ارزیابی شد (Esakkimuthu et al., 2013). رفتار خشک شدن لایه نازک ورقه‌های سیب بر اساس مدل‌های ریاضی خشک شدن مورد استفاده در منابع بررسی گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که پارامترهای کارایی اکسرژی خشک‌کن، عمیقاً به دما و سرعت هوا بستگی دارد و بازده اکسرژی فرآیند خشک شدن به طور کلی به دلیل استفاده از مبدل حرارتی بهبود پیدا کرده است. در تحقیقی مشابه به منظور ارزیابی عملکرد یک دستگاه خشک‌کن کابینتی خورشیدی، آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه

سلسیوس و سه سطح سرعت جریان هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه اجرا شد (Ansarifar et al., 2016). اثر سه دمای ۵۰، ۶۰، ۷۰ درجه سلسیوس و سه ضخامت بستر ۴، ۶، ۸ سانتی‌متر در یک خشک‌کن ترکیبی بستر ثابت-سیال برای خشک کردن گندم بررسی و نشان داده شد که بیشترین مصرف انرژی در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۸ سانتی‌متر است (Vartehparvar et al., 2014). در تحقیقی دیگر تأثیر عوامل دما (۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس) و سرعت جریان هوا (۱/۵ و ۲/۵ متر بر ثانیه) و پیش تیمار آماده‌سازی در چهار سطح شامل کربنات پتاسیم و روغن سبزه، روغن زیتون، آب داغ و بدون پیش تیمار بر شدت خشک شدن انگور در یک خشک‌کن کابینتی بررسی شد (Ayoubi et al., 2016). نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش دما و سرعت هوای خشک‌کننده و نیز استفاده از پیش‌تیمار آماده‌سازی کربنات پتاسیم و روغن سبزه باعث افزایش شدت خشک شدن انگور می‌شود.

برخی محققان ترکیبی از روش‌های خشک کردن مختلف را به کار گرفته‌اند. برای مثال، صفری و همکاران (Safari et al., 2017) فرآیند خشک کردن مغز بادام را در خشک‌کن‌های پیوسته نیمه‌صنعتی با پیش تیمار ریزموج^۳، خلأ - فروسرخ با پیش تیمار ریزموج و فروسرخ با پیش تیمار ریزموج در سطوح مختلف دمای هوا، توان ریزموج، سرعت خطی تسمه‌نقاله و فشار خلأ آزمایش کردند و بهترین ترکیب روش‌های خشک کردن و سطوح تنظیمات را از نظر میزان چروکیدگی، ضریب پخش مؤثر رطوبت، انرژی ویژه مصرفی و تغییرات کلی

1- Infrared (IR)
3- MicroWave

2- Ultrasound

رنگ انتخاب کردند.

جنت‌خواه و همکاران (Jannatkah et al., 2018) یک خشک‌کن خورشیدی را طراحی کردند و ساختند که از مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌سازی حرارت در آن استفاده شد. دمای تغییر فاز مواد مورد استفاده در این تحقیق ۵۱ تا ۵۳ درجه سلسیوس بود و زمانی که دمای محفظه خشک‌کن به بیش از ۵۳ درجه سلسیوس می‌رسید مواد تغییر فاز می‌دادند و انرژی حرارتی ذخیره شده خود را به محفظه خشک‌کن می‌رساندند. قاسم‌خانی و همکاران (Ghasemkhani et al., 2019) یک خشک‌کن دوار لایه نازک تحقیقاتی را طراحی کردند و ساختند. تجزیه و تحلیل برای این خشک‌کن که به یک مبدل حرارتی هوا به هوای جریان متقاطع متصل شده بود صورت گرفت. سه سطح دمای خشک کردن و سرعت چرخش سینی به ترتیب در محدوده ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس و صفر تا ۶ دور بر دقیقه به کار گرفته شد. برای هر سطح دما و سرعت چرخش سینی، دو سطح سرعت جریان هوا و در دو حالت با مبدل حرارتی و بدون آن در محدوده ۱ تا ۲ متر بر ثانیه تنظیم می‌شد. آزمایش‌ها برای ارزیابی تأثیر متغیرهای آزمایش روی پارامترهای کارایی اکسرژی اجرا شد.

با بررسی منابع داخلی مشخص شد که تحقیقات اغلب روی فرآیند خشک شدن و بهینه‌سازی پارامترهای خشک شدن انواع محصولات متمرکز شده است و به غیر از چند مورد اخیر که بررسی شد روی تأثیر طراحی محفظه، مبدل حرارتی، نحوه قرارگیری پروانه‌های^۱ چرخش هوای گرم و ... میزان انرژی مصرفی و سرعت خشک شدن تحقیقات چندانی نشده است. در طرح حاضر تأثیر تعدادی از عوامل طراحی خشک‌کن بر میزان

انرژی مصرفی و سرعت خشک شدن بررسی خواهد شد.

خشک‌کن‌های کابینتی مهم‌ترین ابزار خشک کردن میوه‌ها هستند. به دلیل بستر ثابت این نوع خشک‌کن‌ها، یکنواختی خشک کردن در تمامی طبقات خشک‌کن عامل بسیار محدودکننده‌ای برای فعالیت صحیح این خشک‌کن‌هاست. برای غلبه بر این مشکل، تحقیقاتی صورت گرفته است. برای مثال، امانلو و زمردیان (Amanlou & Zomorodian 2010) با استفاده از روش CFD (دینامیک سیالات محاسباتی) شکل بهینه محفظه خشک‌کن کابینتی را مطالعه کردند. پارامترهای مورد نظر در طراحی محفظه در این تحقیق عبارت است از اندازه دهانه ورودی هوا، اندازه دهانه خروجی هوا، محل خروج هوا، زاویه واگرایی محفظه ورود هوای داغ، فاصله سینی‌های میوه از سقف خشک‌کن، عرض محفظه جانبی ورود هوای داغ، شکل دهانه خروجی هوا و وجود منحرف‌کننده هوا در مسیر ورود هوای داغ به محفظه خشک‌کن. در این مطالعه هفت طراحی مختلف از محفظه خشک‌کن و محفظه ورود هوای داغ با استفاده از آزمون دستی و دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شدند. تحقیقات مختلفی برای بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن در انواع خشک‌کن‌ها صورت گرفته است. برخی از روش‌های مورد استفاده در بهینه‌سازی فرآیند عبارت‌اند از روش سطح پاسخ، روش الگوریتم ژنتیک و روش شبکه‌های عصبی مصنوعی.

برخی از مشکلات اساسی خشک‌کن‌های محصولات کشاورزی، مصرف انرژی بالا و مدت زمان طولانی خشک شدن محصولات است. در پژوهش حاضر، استفاده هم‌زمان از مکانیسم انتقال حرارت

شرکت A&D ژاپن وزن شدند. میزان رطوبت اولیه نمونه‌ها بر اساس استاندارد ای او ای سی^۱ و برابر رابطه ۱ به دست آمد (Ozgen & Celik, 2019):

$$MC(d \cdot b. \%) = \frac{(m_{wet} - m_{dry})}{m_{dry}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن،

$MC(d \cdot b. \%)$ = رطوبت بر پایه خشک (درصد) = m_{wet} جرم قبل از آون‌گذاری (جرم اولیه) (گرم)؛ m_{dry} = جرم بعد از آون‌گذاری (جرم نهایی) (گرم).

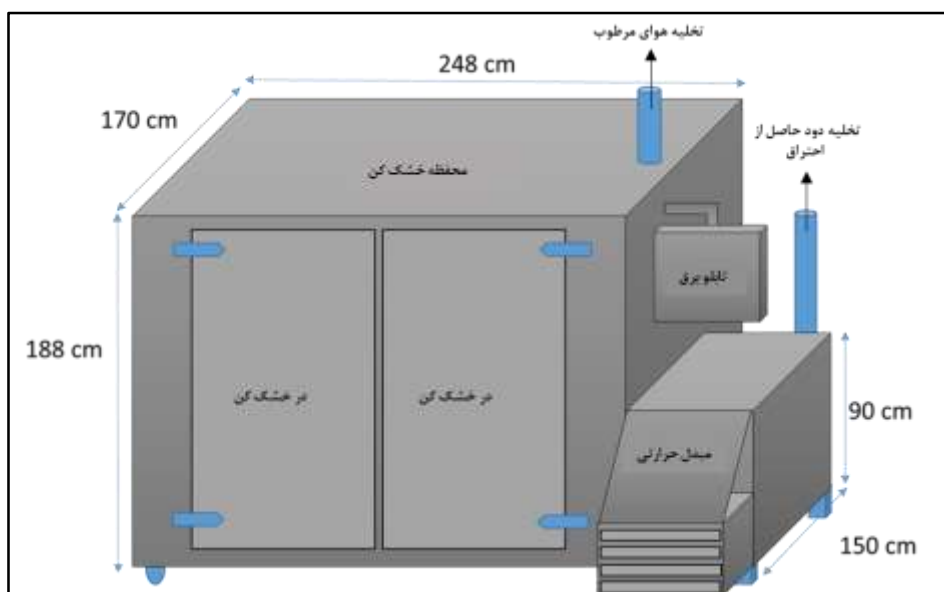
متغیرهای مستقل شامل این دو مورد هستند: دمای هوا در سه سطح ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سلسیوس و مواد تغییر فاز دهنده در دو سطح بود یا نبود. در مجموع شش تیمار از ترکیب پارامترهای مورد تغییر به دست آمد. برای خشک کردن از یک دستگاه خشک‌کن بستر ثابت طبقاتی ساخته شده در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه گیلان استفاده شد. طول، عرض و ارتفاع این خشک‌کن به ترتیب ۲۴۸، ۱۷۰ و ۱۸۸ سانتی‌متر است (شکل ۱). بدنه داخلی دستگاه از جنس استیل ۳۰۴ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر است. جداره بیرونی دستگاه نیز از جنس ورق گالوانیزه با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر ساخته شده است. بین دو جداره دستگاه، عایق پشم سنگ پانلی با ضخامت ۳ سانتی‌متر و تراکم ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب گذاشته شده است تا عایق‌بندی مناسبی برای حفظ گرمای درون محفظه خشک‌کن ایجاد کند. یک پروانه تخلیه هوای مرطوب روی سقف محفظه نصب شده است که با افزایش میزان رطوبت داخل محفظه هوای مرطوب را تخلیه می‌کند (شکل ۱). سه عدد پروانه در داخل دستگاه تعبیه شده که وظیفه گردش هوای داغ داخل محفظه خشک‌کن را برعهده دارند (شکل ۲).

تابشی، مواد تغییر فاز دهنده، مکانیسم تخلیه کامل گرمای تولید شده در کوره هوای داغ به منظور کاهش مصرف انرژی و مدت‌زمان خشک کردن ورقه نازک میوه کیوی در یک خشک‌کن طبقاتی بستر ثابت بررسی شد. با طراحی مناسب خشک‌کن و کنترل فرآیند خشک شدن می‌توان علاوه بر ارتقای کیفیت مواد خشک شده، هزینه عملیاتی فرآیند خشک کردن را نیز کاهش داد. این تحقیق با هدف انتخاب بهترین تیمار برای خشک کردن میوه کیوی از نظر شاخص‌های کمی شامل میزان انرژی مصرفی کل، مقدار انرژی ویژه، مدت‌زمان خشک شدن و یکنواختی خشک شدن اجرا شده است.

مواد و روش‌ها

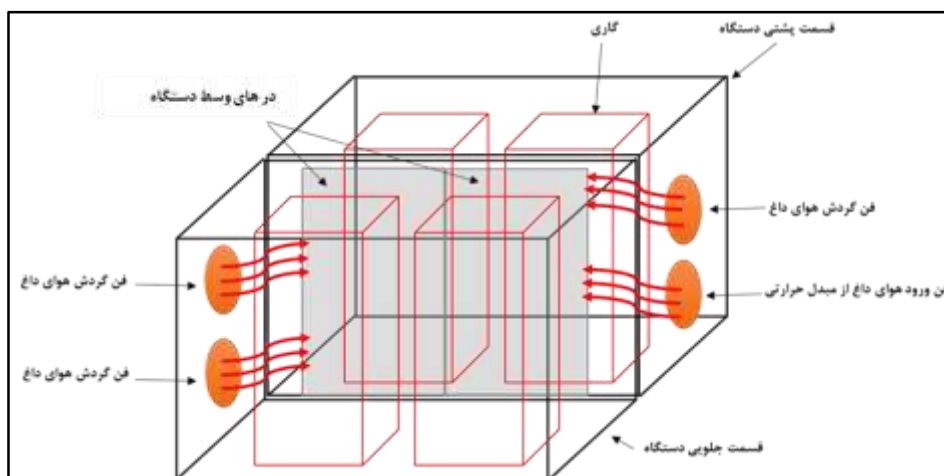
آزمایش‌ها روی کیوی تازه تهیه شده از بازار اجرا شد. کیوی‌ها در یخچال با دمای ۴ درجه سلسیوس در مدت‌زمان اجرای آزمایش‌ها نگهداری شدند. نمونه‌ها ۲ ساعت قبل از آغاز آزمایش‌ها از یخچال بیرون آورده شدند تا به حالت تعادل با دمای محیط برسند (Gholami Parshokohi et al., 2018). کیوی‌ها با آب شسته شدند و سطح آنها با کاغذ صافی خشک شد (Yousefi et al., 2016). پس از پوست‌گیری، کیوی‌ها با ضخامت ۷ میلی‌متر توسط یک ورقه‌کن دستی برش داده شدند.

پیش از فرآیند خشک کردن، به منظور تعیین رطوبت اولیه کیوی، مقدار معینی ورقه کیوی با وزنی مشخص در دمای 10.5 ± 2 درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه آون مدل BF-120 محصول شرکت پروانه آزماگستر ایران قرار داده شد تا وزن خشک و رطوبت اولیه محصول به دست آید (Khayati & Amiri Chayjan, 2016). نمونه‌ها قبل و بعد از آون‌گذاری با ترازوی دیجیتالی محصول



شکل ۱- طرح‌واره بیرونی خشک‌کن بستر ثابت طبقاتی

Fig. 1- The outer scheme of the Semi-Industrial Fixed Bed Dryer



شکل ۲- محل قرارگیری پروانه‌های مخصوص چرخش هوای داغ

Fig. 2- Placement of hot air circulation fans

به محیط پس می‌دهند. مواد تغییر فاز دهنده معمولاً می‌توانند بدون هیچ‌گونه تغییر، حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز، انرژی گرمایی را درون خود حفظ کنند (Demirbas, 2006). در این پژوهش، پارافین گرانول گرید آزمایشگاهی به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در خشک‌کن به کار گرفته شد. برای ساخت مبدل گرمای PCM از یک رادیاتور ۲۰ لول مسی به

مواد تغییر فاز دهنده ترکیبات آلی یا معدنی دارند که قابلیت جذب و ذخیره پنهان مقادیر زیادی از انرژی گرمایی درون خود را دارا هستند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد در فرآیند تغییر فاز (تغییر حالت جامد به مایع و بالعکس) اتفاق می‌افتد. این مواد در هنگام تغییر فاز، گرما را از محیط جذب می‌کنند و در فرآیند تغییر فاز برعکس خود گرما را

سانتی‌متر عرض و ۵۰ سانتی‌متر ارتفاع بود. بدنه داخلی از جنس استیل ۳۰۴ با ضخامت ۵ میلی‌متر و بدنه بیرونی از جنس آهن سیاه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است که با عایق پشم سنگ با ضخامت ۳۰ میلی‌متر و تراکم ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب عایق‌بندی شد. دستگاه به سه عدد لامپ نور فرورسرخ E۲۷ ۲۵۰ وات^۱ به منظور خشک کردن و یک زمان‌سنج پایش زمان به منظور ارسال فرمان خاموش شدن به لامپ‌ها مجهز شد. یک پروانه در قسمت پشت محفظه نصب شد که برای تخلیه هوای مرطوب از آن استفاده می‌شود که در کل زمان اجرای فرایند خشک کردن در حال کار است. دستگاه ریزموج مورد استفاده به منظور اعمال دومین پایش تیمار روی ورقه‌های کیوی، ریزموج برند ویکتور^۱ بود.

همراه پره‌های آلومینیمی استفاده شد که در آن پارافین به عنوان مواد تغییر فاز دهنده حرارت را ذخیره‌سازی می‌کند.

نمونه‌ها پیش از وارد شدن به دستگاه خشک‌کن بستر ثابت طبقاتی و اعمال تیمارهای مورد نظر در این تحقیق، ابتدا تحت پایش تیمار منتخب^۲ توان فرورسرخ ۲۵۰ وات، زمان فرورسرخ ۱۰ دقیقه، توان ریزموج ۴۰۰ وات، زمان ریزموج ۴ دقیقه و آنزیم بری با آب جوش قرار گرفتند (Amiri Pour *et al.*, 2017; Sheykhani Nejad Fallah *et al.*, 2023). برای خشک کردن با روش فرورسرخ از یک دستگاه خشک‌کن فرورسرخ (شکل ۳) طراحی و ساخته شده در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه گیلان استفاده شد (Sheykhani Nejad Fallah *et al.*, 2023). ابعاد خارجی این خشک‌کن ۵۰ سانتی‌متر طول، ۵۰



شکل ۳- خشک‌کن فرورسرخ مورد استفاده در پایش تیمار

Fig. 3- Infrared dryer used in the pretreatment section

زمانی ۳۰ دقیقه‌ای تنظیم شد تا رطوبت نمونه به رطوبت ۱۵ درصد بر مبنای تر برسد (Anon, 2007; Gholami Parshokohi *et al.*, 2018). این پژوهش با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی^۲ با چهار تکرار اجرا شد. شش تیمار با ترکیب متغیرهای مستقل دما (در

دستگاه خشک‌کن، به منظور ایجاد شرایط یکسان در هنگام اندازه‌گیری متغیرهای وابسته، ۱۰ دقیقه پیش از اعمال هر یک از تیمارها روشن شد. برای اجرای فرآیند خشک کردن، وزن مشخصی از نمونه روی سینی خشک‌کن به صورت تک لایه قرار داده شد. داده‌برداری‌ها (توزین) در فاصله‌های

1- Victor

2- Randomized Complet Block Design (RCBD)

جدا می‌شوند. هر قسمت دارای دو گاری است و هر گاری ۳۰ طبقه برای قرارگیری سینی‌های خشک‌کن روی آن دارد. برای ارزیابی یکنواختی، ورقه‌های کیوی در چهار موقعیت (گاری جلو - سمت چپ - سینی بالا، گاری جلو - سمت چپ - سینی پایین، گاری عقب - سمت راست - سینی بالا و گاری عقب - سمت راست - سینی پایین) قرار داده شدند که در شکل ۴ موقعیت آنها در دستگاه خشک‌کن مشخص شده است. داده‌برداری‌ها (توزین نمونه‌های در حال خشک شدن) در فاصله‌های زمانی ۳۰ دقیقه تنظیم شد تا زمانی که میزان رطوبت نمونه‌ها به ۱۵ درصد بر مبنای خشک برسد (Anon, 2007; Gholami, Parshokohi et al., 2018). برای بررسی یکنواختی خشک شدن نمونه‌ها، تیمارهای آزمایش (ترکیب سه سطح دما و مواد تغییر فاز دهنده) به عنوان تکرار و محل قرارگیری نمونه‌ها به عنوان تیمار در نظر گرفته شدند. اثر تیمارها با استفاده از تجزیه واریانس و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون تعقیبی^۳ دانکن^۴ تحلیل شد. متغیرهای وابسته مورد مطالعه چهار عدد بود، از این رو به منظور یافتن بهترین تیمار از نظر تمام عوامل، از روش ادغام کپ‌لند^۵ استفاده شد. روش کپ‌لند یک روش ادغام رتبه‌بندی است که از سیستم امتیازدهی بردها، باخت‌ها و تساوی‌ها برای تعیین برنده نهایی استفاده می‌کند (Razavi et al., 2021).

سه سطح ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سلسیوس) و مواد تغییر فاز دهنده به دست آمد. تأثیر تیمارها بر چهار شاخص کمی فرآیند خشک شدن ورقه‌های کیوی شامل: میزان انرژی مصرفی کل، مقدار انرژی ویژه، مدت‌زمان خشک شدن و یکنواختی خشک شدن بررسی گردید. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار IBM SPSS26 استفاده شد.

میزان گاز مصرفی خشک‌کن بستر ثابت طبقاتی با استفاده از کنتور گاز دیافراگمی گاز سوزان مدل G6، و میزان برق مصرفی با استفاده از نمایشگر برق Efergy مدل Elite تعیین گردید. میزان انرژی مصرفی کل^۱ از جمع مصرف برق و گاز به صورت کیلووات ساعت محاسبه شد.

مقدار انرژی ویژه مصرفی^۲ خشک کردن برای دفع یک کیلوگرم آب با استفاده از رابطه^۲ محاسبه شد (Khayati & Amiri Chayjan, 2016):

$$SEC_{total} = \frac{E_{total}}{M_{total}} \quad (2)$$

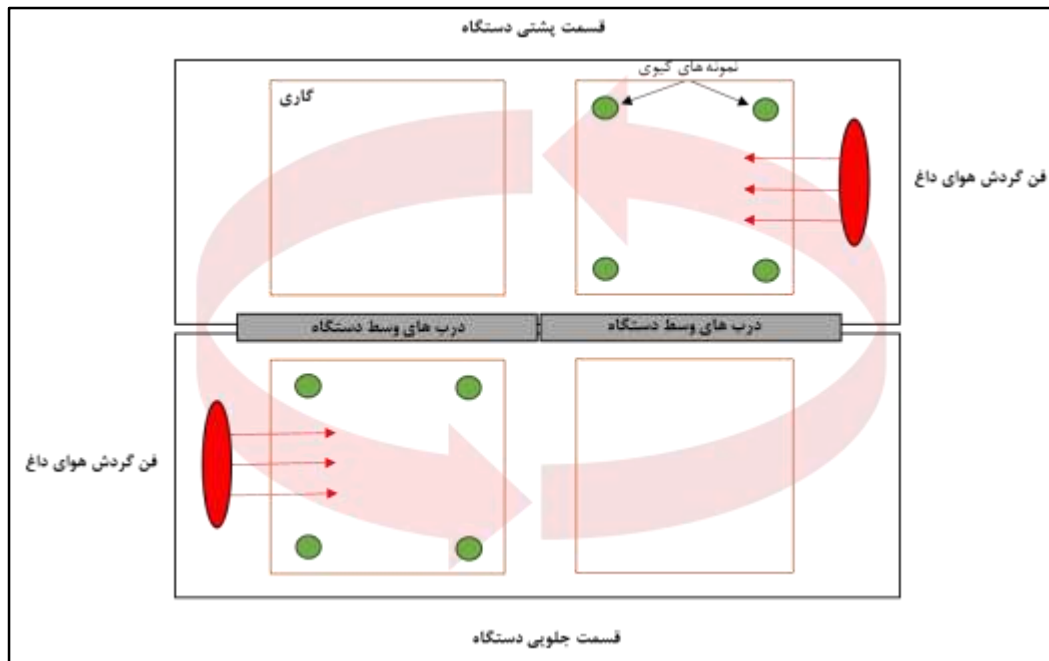
که در آن،

SEC_{total} = انرژی ویژه مصرفی کل (کیلووات ساعت بر کیلوگرم)؛ E_{total} = توان انرژی مصرفی کل (کیلووات ساعت)؛ M_{total} = جرم آب از دست رفته کل (کیلوگرم).

محفظه اصلی خشک‌کن از دو قسمت مجزای جلویی و عقبی ساخته شده است که با یک در از هم

1- Total Energy Consumption
3- Post Hoc Test
5- Copeland's Method

2- Specific Energy Consumption
4- Duncan's test



شکل ۴- محل قرارگیری نمونه‌های کیوی برای بررسی یکنواختی خشک شدن (نمای عمودی)

Fig. 4- Placement of kiwi samples to check drying uniformity (vertical view)

نتایج و بحث

محاسبه شد. با توجه به نتیجه تجزیه واریانس

انرژی مصرفی کل (جدول ۱)، اثر تیمار از نظر آماری بر انرژی مصرفی کل معنی‌دار نشده است. اثر بلوک در سطح ۹۵ درصد اطمینان معنی‌دار شده است.

جرم نمونه کیوی پس از آون‌گذاری به مدت ۲۴ ساعت در دمای 2 ± 10.5 درجه سلسیوس، از $149/43$ گرم به $20/49$ گرم رسید. بدین ترتیب میزان رطوبت اولیه کیوی بر پایه تر $86/29$ درصد

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس انرژی مصرفی کل

Table 1- Variance analysis results of Total Energy Consumption

| سطح معنی‌داری The significance level | درجه آزادی df | مجموع مربعات Sum of squares | منبع تغییرات Source | |
|---|------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------|
| 0.017 | 8 | 16.86 ^a | Corrected Model | مدل اصلاح شده |
| 0.000 | 1 | 435.65 | Intercept | عرض از مبدأ مدل |
| 0.075 ^{ns} | 5 | 7.50 | Treatment | تیمار |
| 0.011* | 3 | 9.36 | Block | بلوک |
| | 15 | 8.91 | Error | خطا |
| | 24 | 461.41 | Total | مجموع |
| | 23 | 25.76 | Corrected Total | مجموع اصلاح شده |

a ضریب تعیین = $0/654$ (ضریب تعیین تعدیل شده = $0/470$)

ns نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و * وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ احتمال درصد

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس مقدار انرژی ویژه بلوک در سطح ۹۵ درصد اطمینان معنی‌دار شده را نشان می‌دهد؛ مشاهده می‌شود که اثر تیمار و اثر

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس انرژی ویژه

Table 2- Variance analysis results of Specific Energy Consumption

| سطح معنی داری The significance level | درجه آزادی df | مجموع مربعات Sum of squares | منبع تغییرات Source | مدل اصلاح شده |
|---|------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------|
| 0.014 | 8 | 0.02 ^a | Corrected Model | مدل اصلاح شده |
| 0.000 | 1 | 4.93 | Intercept | عرض از مبدأ مدل |
| 0.024* | 5 | 0.01 | Treatment | تیمار |
| 0.034* | 3 | 0.01 | Block | بلوک |
| | 15 | 0.01 | Error | خطا |
| | 24 | 0.53 | Total | مجموع |
| | 23 | 0.03 | Corrected Total | مجموع اصلاح شده |

a ضریب تعیین = ۰/۶۵۴ (ضریب تعیین تعدیل شده = ۰/۴۷۰)

ns نبود تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و * وجود تفاوت معنی دار در سطح ۵ احتمال درصد

(2022). با این حال، توجه به این نکته مهم است که دمای بیش از حد بالا ممکن است منجر به خشک شدن بیش از حد و تخریب حرارتی شود که می‌تواند بر کیفیت و ارزش غذایی میوه خشک تأثیر منفی بگذارد. بنابراین لازم است تعادل بین دما، رطوبت و جریان هوا به هنگام خشک کردن میوه حفظ شود تا نتایج مطلوب به دست آید (Hasani *et al.*, 2020; Gawałek, 2022).

نتایج تجزیه واریانس متغیر مدت زمان خشک شدن در جدول ۴ آورده شده است. اثر تیمار و اثر بلوک در سطح ۹۵ درصد اطمینان معنی دار شده است. مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون تعقیبی دانکن در جدول ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که بین T3، T5، T6 و T2 از نظر آماری تفاوت معنی داری وجود ندارد و همه آنها در زیرگروه اول قرار دارند. این تیمارها دارای کمترین مدت زمان خشک شدن هستند. با افزایش دما و حرارت داخل خشک‌کن، میزان خروج رطوبت از محصول به دلیل افزایش تبخیر سطحی بیشتر می‌شود و به انتقال سریع رطوبت از قسمت مرکزی به سطح می‌انجامد. با افزایش دمای هوا به دلیل افزایش میزان انتقال جرم در

نتایج مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون دانکن در جدول ۳ ارائه شده است. بین تیمارهای T2، T3، T4، T5 و T1 تفاوت معنی داری وجود ندارد و همه در یک زیرگروه قرار دارند. T6 با مقدار ۱/۰۲ کیلووات ساعت بر کیلوگرم، کمترین مقدار انرژی ویژه مصرفی را دارد. در مطالعه دیگری، مقدار انرژی ویژه مصرفی خشک کردن کیوی بین ۲/۱۶ تا ۲/۷۸ کیلووات ساعت بر کیلوگرم گزارش شد (Darvishi *et al.*, 2016).

دلیل کاهش انرژی ویژه مصرفی در دمای بالا، تبخیر سریع تر آب آزاد میوه و کاهش قابل توجه زمان فرآیند خشک شدن است (Kaveh, 2017). این نتیجه مشابه نتیجه‌ای است که کاوه و همکاران (Kaveh *et al.*, 2019) و خوش تقاضا و همکاران (Khoshtaghaza *et al.*, 2015) در مطالعه‌ای به ترتیب روی توت سفید و سویا گزارش داده‌اند.

رابطه بین دما و مصرف انرژی ویژه در خشک کردن میوه به طور کلی معکوس است. نتایج به دست آمده از دیگر مطالعات نیز حاکی از آن است که با افزایش دما، مصرف انرژی ویژه به دلیل افزایش سرعت حذف رطوبت کاهش می‌یابد (Nwakuba *et al.*, 2017; Kaveh *et al.*, 2021; Kumar *et al.*,

اثر افزایش دما زمان فرآیند کمتر می‌شود و درویشی، Behroozi-Khazaei & Darvishi (2019) به نتایجی مشابه در خشک کردن به ترتیب و آصفی (Gitiban & Asefi, 2019) و بهروزی خزائی میوه به و توت‌فرنگی دست یافتند.

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین به روش دانکن برای انرژی ویژه

Table 3- Results of mean comparison by Duncan's method for Specific Energy Consumption

| 2 | 1 | تعداد Number | تیمار Tretment |
|-------|------|-----------------|---|
| | 1.02 | 4 | T6 (دمای ۷۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T6 (Temperature 75 °C, Absence of PCM) |
| 1.49 | | 4 | T2 (دمای ۶۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T2 (Temperature 65 °C, Presence of PCM) |
| 1.51 | | 4 | T3 (دمای ۷۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T3 (Temperature 75 °C, Presence of PCM) |
| 1.54 | | 4 | T5 (دمای ۶۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T5 (Temperature 65 °C, Absence of PCM) |
| 1.76 | | 4 | T4 (دمای ۵۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T4 (Temperature 55 °C, Absence of PCM) |
| 1.79 | | 4 | T1 (دمای ۵۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T1 (Temperature 55 °C, Presence of PCM) |
| 0.207 | 1 | | The significance معنی‌داری |

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس زمان خشک شدن (ساعت)

Table 4- Variance analysis results of Drying time (hours)

| سطح معنی‌داری The significance level | درجه آزادی df | مجموع مربعات Sum of squares | منبع تغییرات Source |
|---|------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 0.004 | 8 | 3.792a | مدل اصلاح شده Corrected Model |
| 0.000 | 1 | 73.500 | عرض از مبدأ مدل Intercept |
| 0.009** | 5 | 2.375 | تیمار Treatment |
| 0.012* | 3 | 1.583 | بلوک Block |
| | 15 | 1.542 | خطا Error |
| | 24 | 79.000 | مجموع Total |
| | 23 | 5.500 | مجموع اصلاح شده Corrected Total |

a ضریب تعیین = ۰/۷۲۰ (ضریب تعیین تعدیل شده = ۰/۵۷۰)

ns نبود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد، * وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد و ** وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ درصد

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین به روش دانکن برای زمان خشک شدن

Table 5- Results of mean comparison by Duncan's method for Drying time (hours)

| 3 | 2 | 1 | تعداد Number | تیمار Treatment |
|-------|-------|-------|-----------------|---|
| | | 1.38 | 4 | T3 (دمای ۷۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T3 (Temperature 75 °C, Presence of PCM) |
| | 1.50 | 1.50 | 4 | T5 (دمای ۶۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T5 (Temperature 65 °C, Absence of PCM) |
| | 1.50 | 1.50 | 4 | T6 (دمای ۷۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T6 (Temperature 75 °C, Absence of PCM) |
| 1.88 | 1.88 | 1.88 | 4 | T2 (دمای ۶۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T2 (Temperature 65 °C, Presence of PCM) |
| 2.00 | 2.00 | | 4 | T4 (دمای ۵۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T4 (Temperature 55 °C, Absence of PCM) |
| 2.25 | | | 4 | T1 (دمای ۵۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T1 (Temperature 55 °C, Presence of PCM) |
| 0.137 | 0.059 | 0.059 | | The significance معنی‌داری |

با توجه به جداول ۶ و ۷ که نتایج روش کپلند را نشان می‌دهند، در انتها بهترین تیمار از نظر سه شاخص انرژی مصرفی کل، انرژی ویژه مصرفی و زمان خشک شدن، T6 است. تیمارهای T3، T2 و T5 به طور مشترک در رتبه دوم قرار دارند. می‌توان نتیجه گرفت که دمای ۵۵ درجه سلسیوس از نظر شاخص‌های کمی هیچ‌گونه برتری در خشک کردن ورقه‌های کیوی در خشک‌کن بستر ثابت طبقاتی نداشته است.

جدول ۶- نتایج مقایسات زوجی و تعداد بردها و باخت‌های هر تیمار

Table 6- The results of pairwise comparisons and the number of wins and losses of each treatment

| T6 | T5 | T4 | T3 | T2 | T1 | تیمار Treatment |
|----|----|----|----|----|----|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | T1 (دمای ۵۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T1 (Temperature 55 °C, Presence of PCM) |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T2 (دمای ۶۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T2 (Temperature 65 °C, Presence of PCM) |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T3 (دمای ۷۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T3 (Temperature 75 °C, Presence of PCM) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | T4 (دمای ۵۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T4 (Temperature 55 °C, Absence of PCM) |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T5 (دمای ۶۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T5 (Temperature 65 °C, Absence of PCM) |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | T6 (دمای ۷۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T6 (Temperature 75 °C, Absence of PCM) |

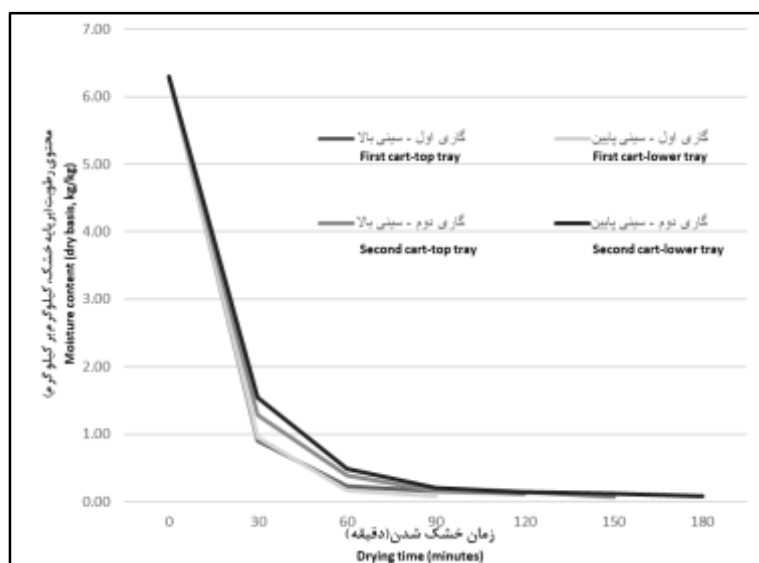
جدول ۷- رتبه‌بندی نهایی تیمارها از نظر سه شاخص کمی با روش کپلند

Table 7- Final ranking of treatments by Copeland method

| رتبه Rank | تفاضل برد از باخت The difference between winning and losing | باخت Lost | برد Win | تیمار Treatment |
|-----------|--|-----------|---------|---|
| 4 | -5 | 5 | 0 | T1 (دمای ۵۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T1 (Temperature 55 °C, Presence of PCM) |
| 2 | 1 | 1 | 2 | T2 (دمای ۶۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T2 (Temperature 65 °C, Presence of PCM) |
| 2 | 1 | 1 | 2 | T3 (دمای ۷۵ درجه سلسیوس - وجود PCM) T3 (Temperature 75 °C, Presence of PCM) |
| 3 | -3 | 4 | 1 | T4 (دمای ۵۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T4 (Temperature 55 °C, Absence of PCM) |
| 2 | 1 | 1 | 2 | T5 (دمای ۶۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T5 (Temperature 65 °C, Absence of PCM) |
| 1 | 5 | 0 | 5 | T6 (دمای ۷۵ درجه سلسیوس - عدم وجود PCM) T6 (Temperature 75 °C, Absence of PCM) |

اول-سینی پایین، زودتر (به مدت ۹۰ دقیقه، معادل یک ساعت و نیم) و در موقعیت گاری دوم- سینی پایین، دیرتر (به مدت ۱۸۰ دقیقه معادل سه ساعت) تکمیل شد. دلیل سریع‌تر خشک شدن سینی پایین نسبت به سینی بالایی گاری اول، قرارگیری یکی از پروانه‌های هوای داغ در مجاورت آن است.

به منظور بررسی روند خشک شدن در نقاط مختلف دستگاه و سنجش یکنواختی عملکرد انتقال حرارت، تغییر میزان رطوبت به هنگام فرآیند خشک شدن در شکل ۵ نشان داده شده است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند خشک شدن و رسیدن به رطوبت مطلوب، در موقعیت گاری



شکل ۵- نمودار تغییرات محتوی رطوبت در هر بازه زمانی نیم‌ساعته

Fig. 5- Plot of changes in moisture content in every half-hour period

نتیجه‌گیری

درجه سلسیوس - وجود PCM دارای کمترین زمان خشک شدن هستند. به منظور بررسی یکنواختی خشک شدن در موقعیت‌های مختلف دستگاه، نتایج بررسی‌ها نشان داد در موقعیت گاری اول-سینی پایین خشک‌کن، ورقه‌های کیوی با مدت زمان ۹۰ دقیقه، زودتر از موقعیت‌های دیگر رطوبت خود را از دست داده‌اند. با استفاده از روش کپلند، بهترین تیمار از نظر میزان انرژی مصرفی کل، انرژی ویژه مصرفی و زمان خشک شدن، تیمار دمای ۷۵ درجه سلسیوس - نبود PCM معرفی شد. باید توجه داشت که در این دما مصرف انرژی کمتر است، ولی از نظر شاخص‌های کیفی مربوط به ارزش غذایی کیوی ممکن است از دیگر تیمارها برتری نداشته باشد. از این رو به منظور یافتن بهترین شرایط به کارگیری خشک‌کن، علاوه بر مصرف انرژی بهتر است شاخص‌های کیفیت مواد غذایی نیز در نظر گرفته شود و بر اساس هر دو جنبه تصمیم‌گیری شود.

در این مطالعه، اثر دما (۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سلسیوس) و مواد تغییر فاز دهنده بر چهار شاخص کمی فرآیند خشک شدن ورقه‌های کیوی شامل میزان انرژی مصرفی کل، مقدار انرژی ویژه، مدت زمان خشک شدن و یکنواختی خشک شدن بررسی گردید. نمونه‌ها قبل از ورود به خشک‌کن بستر ثابت طبقاتی تحت پایش تیمار توان فرسوخ ۲۵۰ وات، زمان فرسوخ ۱۰ دقیقه، توان ریزموج ۴۰۰ وات، زمان ریزموج ۴ دقیقه و آنزیم بری با آب جوش قرار گرفتند. پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها، مشخص شد که اثر تیمارها بر میزان انرژی مصرفی کل معنی‌دار نیست. بهترین تیمار از نظر انرژی ویژه مصرفی، تیمار دمای ۷۵ درجه سلسیوس - نبود PCM، با مقدار ۹۶۴/۶۱ کیلووات ساعت بر کیلوگرم است. تیمارهای دمای ۷۵ درجه سلسیوس - وجود PCM، دمای ۶۵ درجه سلسیوس - نبود PCM، دمای ۷۵ درجه سلسیوس - نبود PCM و دمای ۶۵

قدردانی

این پروژه تحت حمایت مالی دانشگاه گیلان اجرا شده است. بدین وسیله از دانشگاه گیلان قدردانی می‌شود.

مراجع

- Aidani, E., Haddad Khodaparast, M. H., & Kashaninejad, M. (2017). Characterization of dried kiwi by infrared systems and process modeling. *Journal of Food Technology and Nutrition*, 14(56), 53-66. (in Persian)
- Amanlou, Y., & Zomorodian, A. (2010). Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. *Journal of Food Engineering*, 101(1), 8-15. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2010.06.001.
- Amiri Pour, M., Habibi Najafi, M. B., Mohebi, M., & Emadi, B. (2017). Optimization of osmosis-hot air drying of pear using Response Surface Methodology. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 14(62), 65-57. (in Persian)
- Anon. (2007). Dried Fruit, FAO-AGS. FAO: 14.
- Ansarifar, M. H., Aghkhani, M. H., Golzarian, M. R., & Tabasi Zade, M. (2016). Investigation of mazafati dates species drying kinetics and effective moisture diffusivity under the cabinet solar dryer. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 13(56). (in Persian)

- Ayoubi, A., Sedaghat, N., Kashaninejad, M., Mohebbi, M., & Nassiri Mahalati, M. (2016). Investigation the effect of cabinet drying conditions and different pretreatments on drying rate of grape and quality of raisin. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 12(2(38)), 226-238. (in Persian)
- Behroozi-Khazaei, N., & Darvishi, H. (2019). Mathematical modeling of drying kinetic of strawberry slice in microwave-hot air dryer. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(3), 523-533. DOI:10.22059/IJBSE.2019.271750.665134. (in Persian)
- Darvishi, H., Zarein, M., & Farhudi, Z. (2016). Energetic and exergetic performance analysis and modeling of drying kinetics of kiwi slices. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 53, 2317-2333. (in Persian)
- Demirbas, M. (2006). Thermal energy storage and phase change materials: An overview. *Energy Sources, Part B, 1*, 85-95. DOI:10.1080/009083190881481.
- Esakkimuthu, S., Hassabou, A., Palaniapan, C., Spinner, M., Blumenberg, J., & Velraj, R. (2013). Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Solar Energy*, 88, 144-153. DOI:10.1016/j.solener.2012.11.006.
- Gawalek, J. (2022). Pray drying of chokeberry juice-antioxidant phytochemicals retention in the obtained powders versus energy consumption of the process. *Foods*, 11(18), 2898. DOI:10.3390/foods11182898.
- Ghasemkhani, H., Rafiee, S., Keyhani, A., & Dalvand, M. J. (2019). Evaluation of drying of apple slices in a rotating-tray air dryer equipped with heat exchanger. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 7(2(13)). (in Persian)
- Gholami Parshokohi, M., Merzanezhad, E., Ahmad Beigi, A. H., & Salimi Bani, M. (2018). Influence of temperature and air velocity changes on drying process of peanut in hot air dryer. *Journal of Food Technology and Nutrition*, 15(3), 107-115. (in Persian)
- Gitiban, A., & Asefi, N. (2019). Modeling of hardness and drying kinetics of "quince" fruit drying in an infrared convection dryer using the artificial neural network. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 15(4), 465-475. DOI:10.22067/ifstrj.v15i4.76323. (in Persian)
- Hasani, A., Khoshtaghaza, M. H., & Ebadi, M. T. (2020). Effect of different drying methods (microwave drying, shade and sun drying) on the quality of sumac fruit (*Rhus coriaria* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 36(1), 142-154. DOI:10.22092/ijmapr.2019.125302.2511. (in Persian)
- Jannatkah, j., Ghaebi, h., & Najafi, b. (2018). Design and development of asolar dryer augmented with phase change materials (PCM). *Agricultural Mechanization and Systems Research (Journal of Agricultural Engineering Research)*, 18(68), 89-106. DOI:10.22092/erams.2017.106302.1092. (in Persian)
- Karami, A. (2019). Analysis of the Consequences of the Establishment of Transformational and Complementary Industries in the Agricultural Sector, Case: The Central Part of Jiroft City. *Journal Space Economy & Rural Development*, 8(28), 223-238. (in Persian)
- Kaveh, M. (2017). Using artificial neural networks (ANNs) method in investigation and estimation of some drying characteristics of eggplant and turnip in a combined microwave – convective dryer. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 70, 27-45. (in Persian)
- Kaveh, M., Golpour, I., Gonçalves, J. C., Ghafouri, S., & Guiné, R. (2021). Determination of drying kinetics, specific energy consumption, shrinkage, and colour properties of

- pomegranate arils submitted to microwave and convective drying. *Open Agriculture*, 6(1), 230-242. DOI:10.1515/opag-2020-0209.
- Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Golpour, I., Gandshmin, T., Abbaspour-Gilandeh, Y., & Jahedi Rad, S. (2019). Prediction of white mulberry drying kinetics in microwave convective dryer: A comparative study between mathematical model, artificial neural network and ANFIS. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 16(88), 201-219. (in Persian)
- Khayati, S., & Amiri Chayjan, R. (2016). Prediction of some thermal, physical and mechanical properties of terebinth fruit after semi-industrial continuous drying using artificial neural networks. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 13(52), 161-172. (in Persian)
- Kholghi Eshkalak, A., Ghasemnezhad, M., Fotouhi Ghazvini, R., & Sabouri, A. (2021). The study of bud break percentage and aberrant fruit shape incidence in some Hayward kiwifruit vineyard in Guilan Province. *Journal of Plant Production Research*, 28(2), 167-181. DOI:10.22069/JOPP.2021.18070.2678. (in Persian)
- Khoshtaghaza, M. H., Darvishi, H., & Minaei, S. (2015). Effects of microwave - fluidized bed drying on quality, energy consumption and drying kinetics of soybean kernels. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 52(8), 4749-4760. (in Persian)
- Komble, S. P., Kulkarni, G. N., & Sewatkar, C. M. (2021). *Experimental investigation of solar drying characteristics of grapes. Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Energy Research*. Singapore. DOI:10.1007/978-981-15-5955-6_50.
- Kumar, A., Kandasamy, P., Chakraborty, I., & Hangshing, L. (2022). Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer. *Biosystems Engineering*, 219, 85-102. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2022.04.026.
- Mohammadi, I., Tabatabaekoloor, R., & Motevali, A. (2019). Investigating some quality and thermodynamic parameters of kiwifruit thin layer drying in an air recycling dryer equipped with heat pump. *Iranian Journal of Biosystems Engineering (Iranian Journal of Agricultural Sciences)*, 50(2), 331-342. DOI:10.22059/IJBSE.2019.257420.665060. (in Persian)
- Nwakuba, N., Asoegwu, S., & Nwagwe, K. (2017). Energy consumption of agricultural dryers: an overview. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(4), 119-132.
- Ozgen, F., & Celik, N. (2019). Evaluation of design parameters on drying of kiwi fruit. *Applied Sciences*, 9(1), 10. DOI:10.3390/app9010010.
- Razavi, S. M. J., Talebpour, M., Azimzadeh, M., & Mohammadkazemi, R. (2021). Identifying and prioritizing factors involved in human capital development in Iran's sports production firms using multi-criteria analysis and Copland's approach. *Human Resource Management in Sport Journal*, 8, 1-17. DOI:10.22044/shm.2020.8079.1932. (in Persian)
- Safari, M., Amiri Chayjan, R., & Alaei, B. (2017). Modeling some properties of almond kernels in a semi industrial continuous dryer. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 14(65), 25-38. (in Persian)
- Sheykhan Nejad Fallah, Z., Zanganeh, M. & Banaeian, N. (2023). Feasibility study of completing the kiwifruit value chain by forming a cooperative of dryer workshops in the province of guilan (*M. Sc. Thesis*), University of Guilan. (in Persian)
- Shokhi, Z., Sahneh, B., & Najafi Kani, A. A. (2022). The role of conversion and complementary industries (processing of date products) in improving the sustainable livelihood of rural households for study: villages of ghirokarzin [applicable]. *Arid Regions Geographic Studies*, 12(46), 31-52. (in Persian)

- Taghinezhad, E., Kaveh, M., Khalife, E., & Chen, G. (2020). Drying of organic blackberry in combined hot air-infrared dryer with ultrasound pretreatment. *Drying Technology*, 39(14), 2075-2091, DOI: 10.1080/07373937.2020.1753066.
- Vartehparvar, V., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A., & Hasan Beygi, S. R. (2014). Exergy analysis of combined fluidized-fix bed dryer. *Nashrieh Shimi Va Mohandesi Shimi Iran (Persian)*, 32(2(68)), 47-55. (in Persian)
- Yousefi, G., Djomeh, Z. E., & Karami, Z. (2016). Modeling and optimization of effective factors in drying on quality properties of black raspberry (*Rabus Fruticosus* L.) With response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 1, 53-65. (in Persian)



Research Paper

Evaluation of Kiwi Drying Energy Indicators in Semi-Industrial Fixed Bed Dryer Equipped with Phase Change Materials

Z. Sheykhani Nejad Fallah, M. Zangeneh* and N. Banaeian

*Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: zanganeh@guilan.ac.ir

Received: 19 May 2023, Accepted: 13 September 2023

<http://doi: 10.22092/AMSR.2023.362142.1449>

Abstract

The aim of this study is to examine the impact of temperature (55, 65, and 75 °C) and phase change materials (PCM) on four measurable factors: total energy consumption, specific energy consumption (SEC), drying time, and consistency of drying. Six treatments were achieved by combining independent variables. The pre-treatment for drying involved using an infrared power of 250 W for 10 minutes, followed by a microwave power of 400 W for 4 minutes. Enzyme removal was done in a layered fixed bed dryer. The research utilized a randomized complete block design with four replications for the variables of total energy consumption, specific energy consumption, and drying time. The variable of uniformity was repeated six times as part of the factorial experiment. The data analysis was conducted using the IBM SPSS Statistics 26 program. Copeland's method integration approach was utilized to determine the optimal treatment. According to the findings, the treatments had an insignificant impact on total energy consumption. The most energy-efficient treatment was observed to be at 75°C without PCM, with a recorded value of 1.02 kWh/kg. The best treatment in terms of total energy consumption, specific energy consumption, and drying time was found to be at a temperature of 75°C without the use of PCM.

Keywords: Blanching, Consistency of Drying, Drying Time, Infrared, Microwave, Specific Energy Consumption (SEC)



© 2022 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)