

## بررسی تأثیر حالت‌های مختلف ترکیب هوای گرم و پرتوهای فروسرخ بر خشک کردن زردآلو

منصوره مظفری گنبری<sup>۱\*</sup>، حسین غفاری ستوبادی<sup>۲</sup>، حمیدرضا گازر<sup>۳</sup> و جابر سلیمانی<sup>۴</sup>

۱ و ۴- استادیاران بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران.  
۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.  
۳- دانشیار بخش تحقیقات ماشین‌های کشاورزی، مؤسسه فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶

### چکیده

خشک کردن با هوای گرم متداول‌ترین روش برای محصولات کشاورزی است که زمان بر است و مصرف انرژی بالایی دارد. به دلیل خشک شدن سریع سطح محصول در روش خشک کردن همرفتی، توزیع و انتقال حرارت و رطوبت در داخل محصول نسبتاً غیریکنواخت است. در میوه‌هایی مانند زردآلو پوشش مومی موجود روی پوست میوه اثر کنترل‌کننده و بازدارنده‌ای در فرایند خشک کردن دارد. از این‌رو، استفاده از بعضی روش‌های ترکیبی در خشک کردن میوه‌هایی مانند زردآلو می‌تواند زمان خشک شدن و انرژی مصرفی را کاهش دهد. در پژوهش حاضر خشک‌کن همرفتی به سیستم پرتودهی فروسرخ مجهز و اثر ترکیب هوای گرم و پرتوهای فروسرخ در حالت‌های مختلف در خشک کردن زردآلو ارزیابی و مقایسه شد. آزمایش‌ها با تیمارهای هوای گرم و پرتوهای فروسرخ به تنهایی، هم‌زمان و در ترکیب دومرحله‌ای و متناوب پرتوهای فروسرخ در یک خشک‌کن ترکیبی در مقیاس آزمایشگاهی اجرا شد. دمای هوای گرم ۶۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای گرم ۱/۵ متر بر ثانیه و توان لامپ‌های فروسرخ ۴۰۰ وات انتخاب شد. نتایج پژوهش نشان داد که زمان خشک شدن، انرژی مصرفی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارها قرار می‌گیرند. مدل میدیلی و همکاران به خوبی توانست رفتار خشک کردن زردآلو را برای همه حالت‌های مختلف ترکیبی تحت بررسی توصیف کند.

### واژه‌های کلیدی

انرژی، خشک‌کن ترکیبی، زمان خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

### مقدمه

به رطوبت بالای زردآلو در موقع برداشت، عرضه میوه تازه زردآلو مشکلات زیادی دارد و میزان ضایعات و حساسیت آن به آسیب‌های مکانیکی پس از برداشت زیاد است. از طرف دیگر، حساسیت نسبت به نگهداری در دمای پایین و بروز عارضه قهوه‌ای شدن درونی، عامل محدودکننده نگهداری این میوه در سردخانه است. بنابراین، خشک کردن میوه زردآلو

مطابق آخرین آمار سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو)، تولید زردآلو در ایران معادل ۳۲۳۰۱۹ تن در سال ۲۰۲۱ بوده است که رتبه سوم تولید این محصول در جهان بعد از ترکیه و ازبکستان است (Anon, 2021). این محصول به عنوان میوه تازه، خشک و فراوری شده استفاده می‌شود. با توجه

یکی از راه‌های متداول به منظور جلوگیری از فساد سریع محصول است که در کشور ما به دو روش سنتی و صنعتی صورت می‌گیرد.

فرآیند خشک کردن سنتی معایب فراوانی از جمله سرعت پایین فرآیند تولید برگه، رنگ و شکل نامطلوب و آلودگی محصول را به دنبال دارد، اما در روش صنعتی که شرایط حرارتی در آن تحت کنترل و مدت‌زمان فرآیند خشک کردن کوتاه است، محصول فراوری شده نسبت به روش سنتی کیفیت مناسب‌تری دارد. خشک کردن همرفتی معمول‌ترین روش در صنعت خشک کردن محصولات کشاورزی است (Unal & Sacilik, 2011; An *et al.*, 2016; Dehghannya *et al.*, 2018). با این همه، این روش به انرژی و زمان زیادی نیاز دارد و افزایش زمان خشک شدن موجب افزایش فعالیت‌های قهوه‌ای شدن و افت کیفیت محصول می‌شود (Onwude *et al.*, 2016; 2017; Dehghannya *et al.*, 2018). هدایت حرارتی پایین محصولات غذایی سرعت انتقال حرارت را در فرآیند خشک کردن محدود می‌کند و در میوه‌هایی مانند زردآلو پوشش مومی موجود روی پوست اثر کنترل‌کننده‌ای در فرایند خشک کردن دارد و باعث کاهش سرعت خشک شدن می‌شود (Doymaz, 2007). خشک کردن همرفتی بین ۱۲ تا ۲۰ درصد تقاضای انرژی صنعتی در کشورهای توسعه‌یافته را شامل می‌شود (Bardy *et al.*, 2015). از این‌رو، کاهش مقدار انرژی مورد نیاز برای کشورهایمانند ایران که تولیدکننده خشکبار هستند از نظر اقتصادی بسیار مهم است. بنابراین، لازم است از روش‌های ترکیبی خشک کردن برای افزایش سرعت خشک کردن این میوه‌ها و کاهش مصرف انرژی استفاده کرد.

امروزه از روش‌های تکمیلی یا جایگزین مانند پرتوهای فرسرخ، مایکروویو و امواج فراصوت در تحقیقات استفاده می‌شود که می‌توانند سرعت خشک کردن محصول را بالا برند و بهبود بخشند. در سال‌های اخیر، در خصوص خشک کردن ترکیبی محصولات کشاورزی مطالعاتی شده است (Zhang *et al.*, 2017). در این مطالعات به ویژه نشان داده شده است که به دلیل اثر هم‌افزایی پرتوهای فرسرخ همراه با هوای گرم، استفاده از انرژی پرتوهای فرسرخ در ترکیب با خشک‌کن هوای گرم تأثیر معنی‌داری در خشک کردن محصولات کشاورزی داشته است (Onwude *et al.*, 2016).

در پژوهشی خشک کردن هویج و سیب‌زمینی توسط هوای گرم و پرتوهای فرسرخ و نیز به صورت ترکیبی بررسی و نشان داده شد در خشک کردن ترکیبی، در مقایسه با هوای گرم، ۴۸ درصد زمان خشک شدن و ۶۳ درصد مصرف انرژی کاهش می‌یابد (Hebbar *et al.*, 2004). در پژوهشی دیگر، انرژی مصرفی و زمان خشک شدن پسته در یک خشک‌کن ترکیبی خورشیدی-فرسرخ بررسی شد. آزمایش‌ها در دماهای هوای خشک‌کننده ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس و سه شدت تابش پرتوهای فرسرخ صفر، ۰/۰۷ و ۰/۱۴ وات بر سانتی‌مترمربع اجرا و انرژی مصرفی، سهم انرژی خورشیدی و زمان خشک شدن در تیمارهای مختلف بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که افزایش شدت تابش پرتوهای فرسرخ موجب کاهش مصرف انرژی تا ۳۶ درصد می‌شود. کمترین انرژی مصرفی در تیمار ۵۵ درجه سلسیوس هوای گرم و شدت تابش پرتوهای فرسرخ ۰/۱۴ وات بر سانتی‌مترمربع و کمترین

هوای گرم، افزایش مصرف انرژی و کاهش ویتامین C دیده شد (Łechtańska *et al.*, 2015).

استفاده هم‌زمان از هوای گرم و پرتوهای فروسرخ در خشک کردن لایه نازک میوه‌ها و سبزی‌ها به دلیل تأمین مداوم انرژی پرتوهای فروسرخ در داخل محصول، موجب کاهش زمان خشک شدن و کاهش انرژی مصرفی شد؛ ولی بر ویژگی‌های کیفی تأثیر منفی داشت (Onwude *et al.*, 2016). مطابق پژوهش‌های بعدی، آنوده و همکاران (Onwude *et al.*, 2018) استفاده متناوب از انرژی پرتوهای فروسرخ به هنگام خشک کردن همرفتی موجب غلبه بر توزیع غیریکنواخت گرما و رطوبت و تقاضای انرژی بالا مرتبط با استفاده هم‌زمان و پشت سرهم پرتوهای فروسرخ و هوای گرم در خشک کردن سیب‌زمینی شیرین شد.

کایران و دویماز (Kayran & Doymaz, 2017) اثر پیش‌تیمار متابی‌سولفیت و توان پرتوهای فروسرخ را بر ویژگی‌های خشک شدن زردآلو در خشک‌کن فروسرخ بررسی کردند. زردآلوه‌ها با توان‌های ۶۲، ۷۴، ۸۸ و ۱۰۴ وات پرتوهای فروسرخ خشک شدند. در این بررسی مشاهده شد که ویژگی‌های خشک کردن زردآلو به شدت تحت تأثیر پیش‌تیمار و توان فروسرخ قرار دارد. برای انتخاب مناسب‌ترین مدل خشک‌کردن لایه نازک برای فرآیند خشک کردن، ده مدل خشک کردن ریاضی به داده‌های تجربی برازش داده شد. مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با افزایش توان پرتوهای فروسرخ افزایش یافت. انرژی فعال‌سازی توسط یک معادله نوع آرنیوس اصلاح شده تخمین زده شد.

در پژوهشی، تأثیر پوشش پلی‌ساکاریدی (صمغ بذر زانتان و بالانگو) بر سینتیک خشک شدن برش‌های زردآلو بررسی گردید و در آن مدل‌های الگوریتم

زمان خشک شدن در تیمار ۶۵ درجه سلسیوس هوای گرم و شدت تابش پرتوهای فروسرخ ۰/۱۴ وات بر سانتی‌متر مربع به دست آمد (Rekabi *et al.*, 2016).

از خشک‌کن ترکیبی فروسرخ و هوای گرم برای خشک کردن برگه خرما در پژوهشی استفاده شد. آزمایش‌ها در سه دمای هوای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس اجرا شد. خشک‌کن فروسرخ مجهز به یک لامپ فروسرخ با توان ۱۳۰۰ وات بود. برای داده‌های مربوط به خشک کردن با پرتوهای فروسرخ و هوای گرم در دماهای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس مدل لگاریتمی و در ۷۰ درجه سلسیوس مدل دو جمله‌ای نتایج برازش خوبی را به دست دادند (Mosavi Bayegi *et al.*, 2016).

رفتار و سینتیک خشک کردن برگه‌های زردآلو در آن ترکیبی مایکروویو- هوای گرم در توان‌های مایکروویو ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰ وات و دمای هوای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس بررسی گردید. آزمایش‌ها تا رسیدن به رطوبت ۲۵ درصد بر پایه تر ادامه یافت. منحنی‌های خشک کردن فقط شامل دوره نزولی خشک کردن بود. افزایش توان و دمای هوای گرم منجر به افزایش سرعت خشک شدن و کاهش زمان فرایند شد. یازده مدل ریاضی برای بررسی سینتیک خشک کردن زردآلو به کار گرفته شد که مدل لجستیک اصلاح شده بهترین برازش را با داده‌های آزمایشی به دست داد (Horuz *et al.*, 2017).

روش ترکیبی- ترتیبی هوای گرم و پرتوهای فروسرخ روی خشک کردن فلفل سبز بررسی و نشان داده شد که با این روش می‌توان زمان خشک شدن را تا ۳۸ درصد کاهش داد. با این همه در روش ترکیبی در مقایسه با خشک کردن

خشک کردن این محصول با هدف کاهش ضایعات، کاهش زمان خشک کردن و انرژی مصرفی فرایند ضروری است که در این راستا استفاده از خشک‌کن‌های ترکیبی اجتناب‌ناپذیر است. مطالعات کمی در خصوص خشک کردن زردآلو با ترکیب پرتوهای فرسرخ و هوای گرم وجود دارد که محدود به استفاده هم‌زمان یا استفاده از پیش تیمار فرسرخ بوده است؛ این در حالی است که مطابق منابع استفاده متناوب از انرژی پرتوهای فرسرخ به هنگام خشک کردن همرفتی موجب توزیع یکنواخت گرما و رطوبت و کاهش انرژی مصرفی می‌شود (Onwude et al., 2018). مطالعات موجود نشان می‌دهد که تاکنون اثر حالت‌های مختلف ترکیبی و ترتیبی هوای گرم و پرتوهای فرسرخ بر خشک کردن زردآلو بررسی نشده است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر روش‌های مختلف ترکیبی و ترتیبی هوای گرم و پرتوهای فرسرخ در خشک کردن زردآلو بر مبنای زمان و نرخ خشک کردن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی اجرا شده است.

### مواد و روش‌ها

#### آماده‌سازی نمونه

زردآلوی مورد استفاده در آزمایش‌ها، رقم تبرزه بود که از باغ‌های اطراف تبریز تهیه و تا زمان استفاده در سردخانه با دمای ۴ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۹۶ درصد نگهداری شد. میانگین رطوبت اولیه نمونه‌ها ۷۸ درصد بر پایه تر بود. حدود ۲ تا ۳ ساعت پیش از آزمون‌های خشک کردن، نمونه‌های زردآلو از یخچال خارج شد تا دمای آنها به دمای محیط برسد. زردآلوهایی برای آزمایش انتخاب شدند که از نظر اندازه یکنواخت و عاری از هرگونه

ژنتیک-شبکه عصبی مصنوعی (GA-ANN) و سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) برای پیش‌بینی زمان خشک شدن و میزان رطوبت زردآلو پوشش داده شده در یک خشک‌کن فرسرخ به کار گرفته شد. ورودی مدل‌ها شامل توان تابش پرتوهای فرسرخ (در سه سطح ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات) و فاصله نمونه‌ها از سطح لامپ (در ۳ سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر) برای پیش‌بینی میانگین زمان خشک شدن بودند. برای پیش‌بینی میزان رطوبت، این مدل‌ها با سه ورودی توان پرتوهای فرسرخ، فاصله لامپ و زمان حرارت‌دهی تغذیه شدند. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که توان پرتوهای فرسرخ و زمان تیمار به ترتیب حساس‌ترین فاکتورها برای پیش‌بینی زمان خشک شدن و میزان رطوبت برش‌های زردآلوی پوشش داده شده بودند. پیش‌بینی‌ها به خوبی با مجموعه داده‌های آزمایشی مطابقت داشتند (Satorabi et al., 2021).

آکتاش و همکاران (Aktash et al., 2017) انتقال حرارت و جرم زردآلو را در خشک‌کن فرسرخ بررسی و به روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کردند. آزمایش‌ها با زردآلوی شکرپاره در دو سرعت هوای ۰/۵ و ۰/۲۵ متر بر ثانیه و دمای سطح محصول ۶۰ تا ۶۵ درجه سلسیوس اجرا شد. این محققان آزمایش‌ها را در شرایط مختلف به منظور استفاده مؤثر از انرژی و بهبود شرایط خشک کردن دنبال کردند. مناسب‌ترین شرایط برای مصرف انرژی در بررسی‌های آنان دمای ۶۵ درجه سلسیوس سطح محصول و سرعت هوای ۰/۲۵ متر بر ثانیه گزارش شد.

مطابق منابع موجود، با توجه به حساسیت بالا و فسادپذیر بودن میوه زردآلو، بهبود فرایندهای

مجهز به المنت‌های پره‌ای و دمنده هوای National VIK-30L4T بود. محفظه میانی شامل خطی‌سازهای جریان هوا، قفسه‌های خشک‌کن و لامپ‌های فروسرخ، یک عدد ترازوی دیجیتال (Sartorius, Canada) با دقت ۰/۱ گرم متصل به سینی نمونه، دو عدد حسگر PT100 برای اندازه‌گیری دمای هوای خشک‌کن و دو عدد رطوبت‌سنج برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی هوای داخل خشک‌کن بود که قبل و بعد از محل قرارگیری سینی‌های خشک‌کن نصب شده بودند. خشک‌کن به تابلو فرمان و تجهیزات جانبی برای تنظیم دما و سرعت هوای گرم مجهز بود. دمای خشک‌کن با استفاده از کنترل‌کننده PID با دقت  $\pm 1$  درجه سلسیوس کنترل می‌شد و سرعت جریان هوای گرم با استفاده از یک اینورتور با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه تنظیم می‌شد. کنترل دمای هوای داخل خشک‌کن، کنترل سرعت جریان هوای گرم و تنظیم توان لامپ‌های فروسرخ توسط تابلو و مدار فرمان صورت می‌گرفت به طوری که دما در خلال آزمون از ۶۵ درجه سلسیوس تجاوز نکند. کلیه اجزای خشک‌کن با انرژی برق راه‌اندازی و استفاده می‌شد.

آلودگی و ضربه‌دیدگی بودند. برای کاهش فعالیت‌های آنزیمی و واکنش‌های قهوه‌ای شدن، نمونه‌های انتخاب شده به مدت یک دقیقه در آب با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس تحت فرایند آنزیم‌بری قرار گرفتند. زردآلوها با چاقوی تیز و تمیز از وسط نصف شدند، هسته آن‌ها بیرون آورده شد و پس از دو نیم کردن، روی سینی توری چیده و به خشک‌کن انتقال داده شدند (شکل ۱).

### آزمون خشک کردن

برای عملیات خشک کردن از یک خشک‌کن همرفتی نمونه‌سازی شده استفاده شد. این خشک‌کن به واحد پرتودهی فروسرخ و اندازه‌گیر انرژی مجهز گردید (شکل ۱). بدین منظور از دو لامپ میله‌ای فروسرخ به طول ۳۰ سانتی‌متر با حداکثر توان هزار وات و با زاویه تابش ۱۸۰ درجه در طراحی و ساخت واحد پرتودهی فروسرخ استفاده شد. لامپ‌های فروسرخ در قسمت میانی دستگاه در بالای قفسه‌های خشک‌کن نصب شد. تجهیزات لازم به منظور تنظیم توان لامپ‌های فروسرخ از طریق تغییر ولتاژ به تابلو فرمان خشک‌کن اضافه شد. این خشک‌کن شامل یک کانال و سه محفظه ورودی، میانی، خروجی و تابلو فرمان دستگاه بود. محفظه ورودی



شکل ۱- خشک‌کن مورد استفاده

Fig. 1- Used dryer

- ۲- استفاده از پرتوهای فروسرخ (T2)
- ۳- استفاده از هوای گرم در ابتدای خشک کردن به مدت دو ساعت و پس از آن استفاده از پرتوهای فروسرخ (T3)
- ۴- استفاده از پرتوهای فروسرخ در ابتدای خشک کردن به مدت دو ساعت و پس از آن استفاده از هوای گرم (T4)
- ۵- استفاده هم‌زمان از پرتوهای فروسرخ و هوای گرم (T5)
- ۶- استفاده متناوب از پرتوهای فروسرخ به ترتیب با فاصله‌های زمانی ۳۰ دقیقه روشن و ۶۰ دقیقه خاموش (T6)
- ۷- استفاده متناوب از پرتوهای فروسرخ به ترتیب با فاصله‌های زمانی ۳۰ دقیقه روشن و ۳۰ دقیقه خاموش (T7).

### زمان خشک کردن و تغییرات نسبت رطوبت به هنگام خشک کردن

نحوه تغییرات نسبت رطوبت محصول به هنگام خشک کردن برای هر تیمار بررسی شد. زمان لازم برای رسیدن محصول به رطوبت پانزده درصد بر مبنای تر برای هر تیمار اندازه‌گیری شد. نسبت رطوبت، مقدار رطوبت نمونه‌ها را در هر لحظه نسبت به رطوبت اولیه بیان می‌کند که در هر لحظه از رابطه ۱ محاسبه گردید.

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

که در آن،

$MR$  = نسبت رطوبت (بدون واحد)؛  $M_t$  = رطوبت محصول در زمان مورد نظر؛ و  $M_0$  = رطوبت اولیه محصول.

حدود یک ساعت پیش از آغاز فرآیند خشک کردن، دستگاه خشک‌کن روشن شد تا دمای هوای داخل خشک‌کن و دمای سطح لامپ‌های فروسرخ به حالت پایدار برسد. نمونه‌ها در دمای ۶۵ درجه سلسیوس (Aktash *et al.*, 2017; Ivanova *et al.*, 2017) و توان ۴۰۰ وات لامپ فروسرخ تا رسیدن به میزان رطوبت ۱۵ درصد بر پایه تر (Ozkan *et al.*, 2003) خشک شدند. سرعت هوای گرم ۱/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. جریان هوای گرم به طور موازی به سطح نمونه‌ها دمیده می‌شد. وزن نمونه‌ها با استفاده از ترازو در فاصله‌های زمانی نیم ساعت اندازه‌گیری و ثبت شد. رطوبت نسبی و سرعت هوای گرم نیز هر نیم ساعت اندازه‌گیری و کنترل شد.

### طرح آزمایشی و تیمارهای مورد استفاده

طرح آماری مورد استفاده در این پژوهش طرح کاملاً تصادفی با ۷ تیمار و سه تکرار بود. مطالعات انجام شده روی خشک کردن ترکیبی با پرتوهای فروسرخ و هوای گرم تا کنون بیشتر به صورت استفاده هم‌زمان یا به صورت پیش تیمار بوده است (Onwude *et al.*, 2016). در این پژوهش، تیمارهای آزمایشی طوری انتخاب شدند که حالت‌های ترکیبی و نیز حالت‌های ترتیبی پرتوهای فروسرخ و هوای گرم در خشک کردن زردآلو بررسی شوند و در عین حال بتوانند با شرایطی مقایسه شوند که در آن فقط یک واحد حرارت‌دهی هوای گرم یا پرتوهای فروسرخ به تنهایی به کار گرفته می‌شود.

تیمارهای آزمایشی مورد استفاده شامل موارد زیر بود:

- ۱- استفاده از هوای گرم (T1)

مدل‌سازی ریاضی فرایند خشک کردن زردآلو

پس از اجرای آزمایش‌ها، به منظور بررسی و پیش‌بینی روند خشک شدن زردآلو با خشک‌کن ترکیبی فرورسرخ - هوای گرم، از مدل‌های ریاضی و معادله‌های مختلف خشک کردن لایه

نازک (جدول ۱) استفاده شد. بدین منظور ابتدا منحنی‌های خشک شدن زردآلو به صورت تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان رسم و با مدل‌های ریاضی مورد نظر برازش داده شد. برازش داده‌ها در نرم‌افزار MATLAB (R2014a) انجام شد.

جدول ۱- مدل‌های خشک کردن لایه نازک  
Table 1-Thin layer drying models

منبع Refrence	معادله* Equation	نام مدل Model name
Falade & Ogunwolu, 2014	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$	پیچ (Page)
Izli <i>et al.</i> , 2014	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	مدلی و همکاران (Midilli <i>et al.</i> , 1974)
Chinenye <i>et al.</i> , 2010	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	هندرسون و پابلیس (Henderson & Pabis)
Corzo <i>et al.</i> , 2008	$MR = a \cdot \exp(-(t/b)^n)$	ویبل (Weibull)
Onwude <i>et al.</i> , 2019	$MR = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k_1 \cdot a \cdot t)$	دو عبارتی نمایی (Two term exponential)
Aghbashlo <i>et al.</i> , 2009	$MR = \exp(-(a \cdot t / (1 + b \cdot t)))$	آغباشلو و همکاران (Aghbashlo <i>et al.</i> , 2009)
Izli <i>et al.</i> , 2014	$MR = 1 + at + bt^2$	وانگ و سینگ (Wang & Singh, 1978)

\*: a, b, k, n, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>: ثابت‌ها و ضریب‌های تجربی در مدل‌های خشک کردن هستند.

\*: a, b, k, n, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>: Empirical constants and coefficients in drying models.

مدل‌های مذکور در محیط نرم‌افزار متلب روی داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها برازش داده شد و ضریب‌های مدل‌ها استخراج شدند. از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به عنوان ملاک‌های ارزیابی میزان انطباق مدل استفاده شد (روابط ۲ و ۳). مدلی که بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا را داشت به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

$N =$  تعداد مشاهدات؛  $MR_{exp.i} =$  نسبت رطوبت تجربی  $MR_{pre.i}$ ؛ و  $am =$  نسبت رطوبت پیش‌بینی شده  $am$  توسط مدل (Kayran & Doymaz, 2017).

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از قانون دوم فیک استفاده شد. قانون دوم معادله انتشار فیک که بر انتشار جرم در دوره سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت می‌کند، در رابطه ۴ نشان داده شده است:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla [D_{eff}(VM)] \quad (4)$$

حل معادله انتشار توسط کرنک با فرض توزیع یکنواخت رطوبت اولیه، ضریب نفوذ ثابت، چشم‌پوشی از گرادیان دمایی و چروکیدگی

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre.i} - MR_{exp.i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre} - MR_{exp.i})^2} \quad (2)$$

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

که در آنها،

می‌شود. خط مستقیم با شیب ثابت زمانی به دست می‌آید که  $\ln(MR)$  در مقابل زمان رسم می‌شود (Mirzaee et al., 2009).

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (7)$$

### انرژی مورد نیاز خشک کردن

مقدار انرژی الکتریکی مصرفی برای خشک کردن زردآلو با خشک‌کن ترکیبی هوای گرم - فروسرخ توسط دستگاه آنالیز انرژی KLEA از برند کلمسان ساخت ترکیه اندازه‌گیری شد (شکل ۲). قسمت ورودی دستگاه به منبع برق و خروجی به دستگاه خشک‌کن متصل شد. جریان مصرفی دستگاه خشک‌کن ابتدا از دستگاه آنالیز انرژی عبور کرد و مجموع انرژی مورد نیاز برای خشک کردن که شامل انرژی مصرفی لامپ‌های فروسرخ، المنت‌های پره‌ای، دمنده هوا و دیگر تجهیزات بود، برحسب کیلووات ساعت ثبت شد.

محصول حین خشک شدن (Crank, 1975)، منجر به رابطه ۵ می‌شود:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

که در آن،

$D_{eff}$  = ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (مترمربع بر ثانیه)؛  $t$  = زمان (ثانیه)؛  $L$  = نصف ضخامت نمونه (متر)؛ و  $n$  = عدد صحیح مثبتی که تعداد عبارات در نظر گرفته شده از رابطه را نشان می‌دهد.

برای دوره‌های طولانی خشک کردن، رابطه ۵ را می‌توان فقط برای دوره اول سری به صورت رابطه ۶ ساده کرد (Lopez et al., 2000)، بی‌آنکه تأثیر زیادی بر دقت پیش‌بینی بگذارد.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (6)$$

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ( $D_{eff}$ ) به طور معمول با استفاده از شیب رابطه ۶ محاسبه



شکل ۲- دستگاه آنالیز انرژی

Fig. 2- Energy analyzer device

و گروه‌بندی آنها به روش آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح پنج درصد صورت گرفت. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شدند.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

نتایج حاصل با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS تحلیل شد. مقایسه میانگین تیمارها



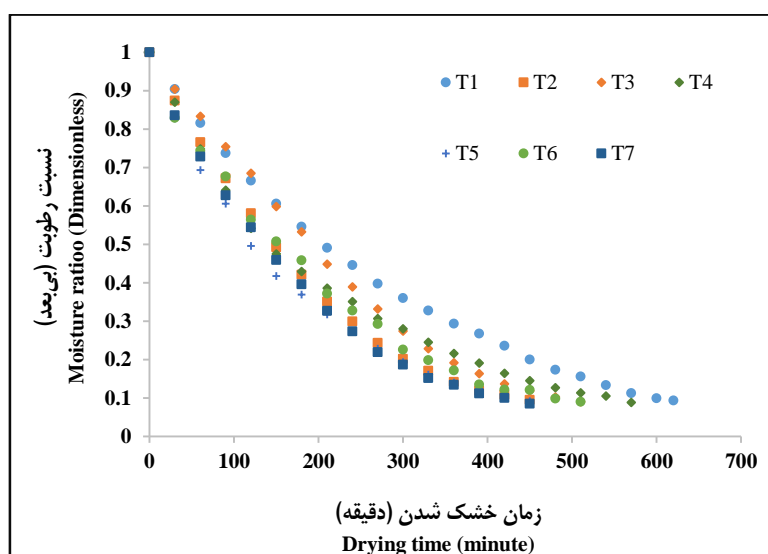
### نتایج و بحث

#### تغییرات نسبت رطوبت برگه‌های زردآلو طی فرآیند خشک کردن

تغییرات نسبت رطوبت زردآلو طی زمان فرآیند خشک کردن در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نسبت رطوبت به طور پیوسته طی فرآیند خشک کردن کاهش می‌یابد، ولی این کاهش در تیمارهایی که پرتوهای فروسرخ به تنهایی یا هم‌زمان با هوای گرم استفاده شده با شیب بیشتری صورت گرفته است که این امر موجب کاهش زمان خشک شدن و رسیدن زودتر به میزان رطوبتی مورد نظر می‌گردد.

در مراحل اولیه خشک کردن، کاهش رطوبت با شدت بیشتری رخ داده و با ادامه فرآیند شیب منحنی کاهش یافته است. این امر می‌تواند به

دلیل کاهش خلل و فرج نمونه‌ها هم‌زمان با افزایش چروکیدگی در خلال خشک کردن باشد. این پدیده را دانشمندان دیگر (Kocabiyik *et al.*, 2015; Kayran & Doymaz, 2017) نیز مشاهده کرده‌اند. در واقع، در ابتدای خشک کردن به دلیل افزایش سرعت انتشار، افزایش ضریب انتقال حرارت سطحی و خروج رطوبت به خصوص در تیمارهای فروسرخ به دلیل متمرکز بودن حرارت روی محصول، منحنی تغییرات رطوبتی به طور قابل توجهی شیب بالاتری را نشان می‌دهد. پرتوهای فروسرخ سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم روی محصول می‌شود که روند از دست-دادن رطوبت از محصول، نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت بر اثر خروج هوا به هدر می‌رود، سریع‌تر است و راندمان بالاتری دارد (Khir *et al.*, 2011).



شکل ۳- نمودار تغییرات نسبت رطوبت زردآلو طی خشک کردن با حالت‌های مختلف ترکیب هوای گرم و پرتوهای فروسرخ  
 Fig. 3- Changes in MR of apricot during drying with combined infrared and hot-air drying strategies

خشک کردن با مدل‌های خشک کردن لایه نازک منتخب در جدول ۲ نشان داده شده است.

مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن زردآلو نتایج آماری حاصل از برآزش منحنی‌های

جدول ۲- نتایج آماری حاصل از برازش منحنی‌های خشک کردن زردآلو با مدل‌های خشک کردن انتخاب شده

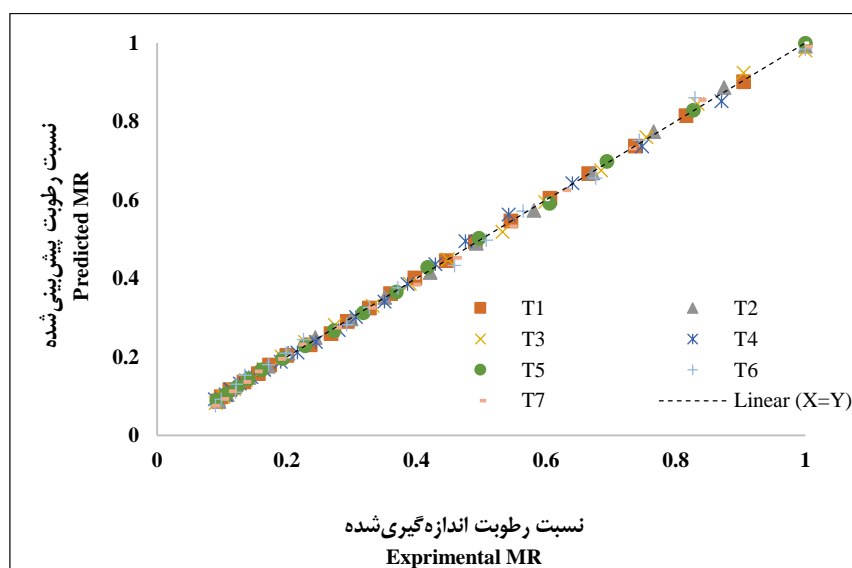
Table 2. Statistical results obtained from fitting apricot drying curves with the selected drying models.

ثابت‌ها و ضرایب مدل constants and coefficients in models	مجدور میانگین مربعات خطا RMSE	ضریب تبیین R <sup>2</sup>	تیمار Treatment	نام مدل Model Name
K=0.002513, n=1.057	0.0096	0.9988	T <sub>1</sub>	پیچ Page
K=0.002602, n=1.121	0.0072	0.9994	T <sub>2</sub>	
K=0.000897, n=1.272	0.0114	0.9986	T <sub>3</sub>	
K=0.001953, n=0.910	0.0104	0.9986	T <sub>4</sub>	
K=0.007537, n=0.943	0.0061	0.9995	T <sub>5</sub>	
K=0.004275, n=1.019	0.0171	0.9965	T <sub>6</sub>	
K=0.004352, n=1.040	0.0104	0.9988	T <sub>7</sub>	
K=0.003805, a=1.001, b=-1.027e-4, n=0.9955	0.0040	0.9998	T1	میدیلی و همکاران Midili <i>et al.</i> , 2002
K=0.002303, a=0.9919, b=1.118e-5, n=1.144	0.0074	0.9995	T2	
K=0.000669, a=0.981, b=8.828e-6, n=1.322	0.0106	0.9990	T3	
K=0.008206, a=1.009, b=-1.087e-5, n=0.8900	0.0112	0.9986	T4	
K=0.007704, a=0.9993, b=-9.396e-6, n=0.9374	0.0061	0.9995	T5	
K=0.004364, a=0.9845, b=-4.834e-5, n=1.004	0.0167	0.9971	T6	
K=0.004394, a=0.9907, b=-3.084e-5, n=1.032	0.0103	0.9990	T7	
K=0.003526, a=1.012	0.0127	0.9980	T1	هندرسون و پابیس Henderson & Pabis
K=0.005153, a=1.029	0.0178	0.9965	T2	
K=0.00432, a=1.06	0.0358	0.9866	T3	
K=0.00434, a=0.9735	0.0168	0.9963	T4	
K=0.00546, a=0.9819	0.0096	0.9989	T5	
K=0.004703, a=0.9943	0.0173	0.9964	T6	
K=0.005411, a=1.005	0.0123	0.9983	T7	
a=1.057, b=288.4	0.0096	0.9988	T1	ویبل Weibull
a=1.121, b=201.7	0.0072	0.9994	T2	
a=1.272, b=248.6	0.0114	0.9986	T3	
a=0.9097, b=221.1	0.0104	0.9986	T4	
a=0.943, b=178.3	0.0061	0.9995	T5	
a=1.019, b=211.7	0.0171	0.9965	T6	
a=1.04, b=186.5	0.0104	0.9988	T7	
a=0.00098, k0=10.62, k1=3.528	0.0139	0.9977	T1	نمایی دوعبارتی Two term exponential
a=0.00058, k0=0.6698, k1=8.577	0.0220	0.9951	T2	
a=0.00025, k0=0.8116, k1=16.08	0.0443	0.9808	T3	
a=0.045, k0=0.6151, k1=0.09442	0.0150	0.9972	T4	
a=0.0364, k0=0.8443, k1=0.1469	0.0070	0.9994	T5	
a=0.0103, k0=1.024, k1=0.4543	0.0177	0.9965	T6	
a=0.00274, k0=0.6178, k1=1.962	0.0130	0.9982	T7	
a=0.003198, b=-0.0002328	0.0068	0.9994	T1	آغباشلو و همکاران Aghbashlo <i>et al.</i> , 2009
a=0.04372, b=-0.0005125	0.0083	0.9993	T2	
a=0.003079, b=-0.0008346	0.0138	0.9980	T3	
a=0.005023, b=0.0004291	0.0108	0.9985	T4	
a=0.00595, b=0.0002966	0.0073	0.9993	T5	
a=0.004535, b=-0.0001563	0.0164	0.0164	T6	
a=0.00508, b=-0.0002413	0.0092	0.9990	T7	
a=-0.002819, b=2.243e-6	0.0179	0.9960	T1	وانگ و سینگ Wang & Singh, 1978
a=-0.004026, b=4.525e-6	0.0052	0.9997	T2	
a=-0.003165, b=2.659e-6	0.0131	0.9982	T3	
a=0.003638, b=3.751e-6	0.0403	0.9784	T4	
a=-0.004529, b=5.797e-6	0.0325	0.9871	T5	
a=-0.003815, b=4.078e-6	0.0241	0.9930	T6	
a=-0.004324, b=5.217e-6	0.0185	0.9961	T7	

فروسرخ به دست آورد. در آن ترکیبی مایکروویو- هوای گرم مدل لجستیک اصلاح شده بهترین برازش را با داده‌های آزمایشی خشک کردن زردآلو حاصل کرده بود (Horuz *et al.*, 2017).

شکل ۴ صحت بهترین مدل را در پیش‌بینی نسبت رطوبت زردآلو در تیمارهای مختلف تحت بررسی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده مدل میدیلی و همکاران (Midilli *et al.*, 1974) وجود دارد.

همه مدل‌های انتخاب شده هرچند نتایج خوبی را به دست داده‌اند، اما مطابق نتایج موجود، مدل میدیلی و همکاران (Midilli *et al.*) بهترین برازش را با داده‌های تحت بررسی با ضریب تبیین (۰/۹۹۷۱ - ۰/۹۹۹۸) و ریشه میانگین مربعات خطای (۰/۰۱۶۷ - ۰/۰۰۰۴) به دست داده است. کایران و دویماز (Kayran & Doymaz, 2017) در خشک کردن زردآلو با خشک‌کن فروسرخ نتایج مشابهی به دست آورده‌اند؛ اما صالحی (Salehi, 2018) بهترین برازش را با مدل پیچ در خشک‌کن زردآلو با توان‌های تابشی مختلف در خشک‌کن



شکل ۴- مقادیر نسبت رطوبت زردآلو در برابر مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل میدیلی و همکاران در تیمارهای تحت بررسی

Fig. 3- Experimental MR of apricot vs. predicted data by Midilli *et al* model at the selected treatments

داده شده است. بر اساس این نتایج، تأثیر تیمارهای خشک کردن بر میزان انرژی مصرفی، زمان خشک شدن و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در سطح احتمال یک درصد ( $p < 0.01$ ) معنی‌دار است.

تغییرات پارامترهای موردبررسی طی خشک کردن نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف خشک کردن بر صفات موردبررسی در جدول ۳ و نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در جدول ۴ نشان

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای مورد ارزیابی در خشک کردن ترکیبی برگه‌های زردآلو

Table 3- The results of variance analysis of evaluated parameters in combined drying of apricot halves

میانگین مربعات MS			درجه آزادی df	منابع تغییر S.O.V
ضریب نفوذ مؤثر رطوبت Deff*10 <sup>10</sup>	زمان Time	انرژی Energy		
0.819**	13342.85**	406.29**	6	تیمار (Treatment)
0.082	300	4.19	14	خطا (Error)

\*\* Significant at 1% Probability level

\*\* معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

دقیقه) و تیمار استفاده متناسب از پرتوهای فروسرخ با فاصله‌های زمانی ۳۰ دقیقه روشن و ۳۰ دقیقه خاموش است که البته اختلاف معنی‌داری با تیمارهای استفاده هم‌زمان از پرتوهای فروسرخ و هوای گرم ندارد. بیشترین زمان خشک شدن مربوط است به تیمار فقط هوای گرم که به طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای دیگر است.

میزان انرژی مصرفی و زمان خشک شدن بر اساس نتایج مقایسه میانگین (جدول ۴)، بیشترین میزان مصرف انرژی (۳۸/۸۶ کیلووات ساعت) مربوط به تیمار فقط هوای گرم و کمترین میزان مصرف انرژی (۴/۶ کیلووات ساعت) مربوط به تیمار فقط پرتوهای فروسرخ است. مطابق نتایج مقایسه میانگین، کمترین زمان خشک شدن، مربوط به تیمار فقط پرتوهای فروسرخ (۴۴۰)

جدول ۴- مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن

Table 4- Mean comparison using Duncan multiple test

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (متر مربع بر ثانیه) Deff (m <sup>2</sup> /s)	انرژی (KWh) Energy (KWh)	زمان خشک شدن (دقیقه) Drying time (min)	تیمار Treatment
3.15E-10 <sup>B</sup>	38.86 <sup>E</sup>	620 <sup>D</sup>	T <sub>1</sub>
4.47E-10 <sup>A</sup>	4.6 <sup>A</sup>	440 <sup>A</sup>	T <sub>2</sub>
4.31E-10 <sup>A</sup>	12.16 <sup>B</sup>	500 <sup>B</sup>	T <sub>3</sub>
3.48E-10 <sup>B</sup>	26.13 <sup>C</sup>	550 <sup>C</sup>	T <sub>4</sub>
4.31E-10 <sup>A</sup>	24.56 <sup>C</sup>	450 <sup>A</sup>	T <sub>5</sub>
4.14E-10 <sup>A</sup>	31.4 <sup>D</sup>	490 <sup>B</sup>	T <sub>6</sub>
4.47E-10 <sup>A</sup>	28.03 <sup>CD</sup>	440 <sup>A</sup>	T <sub>7</sub>

در هر ستون حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

Different letters indicate a significant difference.

فروسرخ (T2) به میزان ۸۸ درصد نسبت به تیمار هوای گرم کاهش نشان می‌دهد. دلیل این امر به ساختار این سیستم مربوط می‌شود. پرتوهای فروسرخ به طور مستقیم گرمای فرآیند خشک‌کنی را تأمین می‌کنند. انرژی پرتوهای فروسرخ روی محصول متمرکز می‌شود و جذب کمی در هوای اطراف دارد. در واقع انتقال انرژی از طریق پرتوهای فروسرخ بهینه‌تر است و با افزایش سهم

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد افزایش زمان استفاده از پرتوهای فروسرخ موجب کاهش زمان خشک شدن و میزان مصرف انرژی می‌شود. مطابق جدول ۴، مدت زمان خشک شدن زردآلو در حالت‌های مختلف ترکیبی-ترتیبی هوای گرم و پرتوهای فروسرخ بین ۱۱ تا ۲۹ درصد و انرژی مصرفی بین ۱۸ تا ۶۸ درصد نسبت به هوای گرم کاهش می‌یابد. مقدار انرژی مصرفی در تیمار فقط

لایه نازک سیب‌زمینی موجب کاهش زمان خشک شدن سیب‌زمینی شیرین و کاهش انرژی مصرفی شده است (Onwude *et al.*, 2016).

### ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

بر اساس نتایج تجزیه واریانس که در جدول ۳ ارائه شده است، تیمارهای خشک کردن تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ( $p < 0.01$ ) بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت زردآلو دارند. با توجه به نتایج مقایسه میانگین (جدول ۴)، بیشترین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در تیمار فقط پرتوهای فرسوخ و تیمار استفاده متناوب از پرتوهای فرسوخ با فاصله‌های زمانی ۳۰ دقیقه روشن و ۳۰ دقیقه خاموش به مقدار  $4/47 \times 10^{-10}$  مترمربع بر ثانیه به دست آمد. کمترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت هم در تیمار فقط هوای گرم به مقدار  $3/15 \times 10^{-10}$  مترمربع بر ثانیه حاصل شد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، به دما و ترکیب مواد بستگی دارد (Abbasi *et al.*, 2014). در تحقیق حاضر ترکیب زردآلو در آزمایش‌ها ثابت بود، از این رو دلیل اصلی تغییر میزان ضریب نفوذ مؤثر در تیمارهای مختلف خشک کردن مربوط به ماهیت انتقال حرارت ناشی از تیمارهای خشک کردن است. به دلیل اینکه پرتوهای فرسوخ گرمای بیشتری را روی محصول متمرکز می‌کند، رطوبت بیشتری از محصول نسبت به تیمار هوای گرم خارج می‌شود و زمان خشک شدن و مدت زمان رسیدن به رطوبت مطلوب کاهش می‌یابد. این موضوع نشان از کارایی پرتوهای فرسوخ در افزایش دمای داخلی محصول، افزایش سرعت انتقال رطوبت به سطح محصول و افزایش سرعت خشک شدن دارد. میزان ضریب نفوذ مؤثر

آن در مجموع انرژی مصرفی کمتر می‌شود. در خشک کردن محصولات با هوای گرم، خشک شدن ابتدا در لایه خارجی محصول صورت می‌گیرد. این امر موجب خشک شدن سطح محصول و کاهش نفوذپذیری آب می‌شود. لایه سخت شده سطحی مانعی در مقابل انتشار رطوبت به سطح است و خروج رطوبت را طولانی می‌کند. با استفاده از پرتوهای فرسوخ، انرژی حرارتی بی‌آنکه محیط اطراف را گرم کند، از طریق منبع تابشی به سطح محصول منتقل می‌شود و شار حرارتی ثابت را بدون در نظر گرفتن دمای محصول فراهم می‌کند در نتیجه اتلاف انرژی کاهش می‌یابد (Rekabi *et al.*, 2016). گرما در درون محصول تولید می‌شود و در نقاطی که رطوبت بیشتری وجود دارد متمرکز می‌گردد و با افزایش فشار بخار، موجب انتشار رطوبت از این نقاط به سمت لایه‌های خارجی می‌شود و حرارت یکنواخت‌تری را ایجاد می‌کند (Doymaz, 2012).

گزارش‌های متعددی ارائه شده که نشان می‌دهند افزایش توان و مدت استفاده از پرتوهای فرسوخ در خشک‌کن‌های ترکیبی، انرژی مصرفی و زمان خشک شدن را کاهش داده است. هبار و همکاران (Hebbar *et al.*, 2004) نشان دادند که در خشک کردن ترکیبی با هوای گرم و پرتوهای فرسوخ در مقایسه با هوای گرم، ۴۸ درصد زمان خشک شدن و ۶۳ درصد مصرف انرژی کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات برای خشک کردن فلفل سبز با روش ترکیبی-ترتیبی هوای گرم و پرتوهای فرسوخ نشان داد که با این روش می‌توان زمان خشک شدن را تا ۳۸ درصد پایین آورد (Łechtańska *et al.*, 2015). استفاده هم‌زمان از هوای گرم و پرتوهای فرسوخ در خشک کردن

هوای گرم و پرتوهای فروسرخ قرار دارند. کمترین زمان خشک شدن مربوط به تیمار فقط پرتوهای فروسرخ و تیمار استفاده متناوب از پرتوهای فروسرخ با فاصله‌های زمانی ۳۰ دقیقه روشن و ۳۰ دقیقه خاموش و کمترین انرژی مصرفی مربوط به تیمار استفاده از فقط پرتوهای فروسرخ بود. بیشترین زمان خشک شدن و انرژی مصرفی به تیمار هوای گرم اختصاص داشت. به منظور توصیف رفتار خشک شدن زردآلو در خشککن ترکیبی هوای گرم- فروسرخ، ۷ مدل خشک کردن لایه نازک بررسی شد. مدل میدیلی و همکاران با میانگین ضریب تبیین ۰/۹۹۸۹ و میانگین مجذور مربعات خطای ۰/۰۰۹۵ برازش خوبی با داده‌های آزمایشی نشان داد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در تیمارهای مورد بررسی بین  $۳/۲ \times ۱۰^{-۱۰}$  تا  $۴/۵ \times ۱۰^{-۱۰}$  مترمربع بر ثانیه متغیر بود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که افزایش زمان تابش پرتوهای فروسرخ در خشک کردن ترکیبی زردآلو موجب افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، کاهش زمان خشک شدن و انرژی مصرفی می‌شود.

رطوبت برای خشک کردن مواد غذایی در محدوده  $۱۰^{-۱۲}$  تا  $۱۰^{-۸}$  مترمربع بر ثانیه گزارش شده است (Zogzas et al., 1996). میرزایی و همکاران (Mirzaee et al., 2009) ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در خشک کردن همرفتی زردآلو با دماها و سرعت‌های مختلف هوای گرم را در محدوده  $۱/۷ \times ۱۰^{-۱۰}$  تا  $۱/۱۵ \times ۱۰^{-۹}$  مترمربع بر ثانیه به دست آوردند. کایران و دویماز (Kayran & Doymaz, 2017) ضریب نفوذ مؤثر رطوبت میوه زردآلو را از  $۲/۳۷ \times ۱۰^{-۹}$  تا  $۶/۲۳ \times ۱۰^{-۹}$  مترمربع بر ثانیه در خشک‌کن فروسرخ گزارش دادند.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خشک کردن زردآلو در یک خشک‌کن ترکیبی نمونه‌سازی شده در حالت‌های مختلف ترکیب هوای گرم و پرتوهای فروسرخ بررسی و معلوم شد زمان خشک شدن، انرژی مصرفی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به طور معنی‌داری تحت تأثیر حالت‌های مختلف ترکیب

### مراجع

- Abbasi, S., Minaei, S., & Khoshtaghaza, M. H. (2014). Investigation of kinetics and energy consumption thin layer drying of corn. *Journal of Agricultural Machinery*, 4(1), 98-107. <https://doi.org/10.22067/jam.v4i1.33171>. (in Persian)
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Khani, S., & Ghasemi, M. (2009). Mathematical modeling of carrot thin-layer drying using new model. *International Agrophysics*, 23, 313-317.
- Aktash, M., Sevik, S., Amini, A., & Khanlari, A. (2017). Experimental analysis and CFD simulation of infrared apricot dryer with heat recovery. *Drying Technology*, 35(6), 1532-2300. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1212871>.
- An, K., Zhao, D., Wang, Z., Wu, J., Xu, Y., & Xiao, G. (2016). Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure. *Food Chemistry*, 197, 1292-1300. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.033>.

- Anon. (2021). *World food and agriculture - Statistical yearbook*. FAO Rome.
- Bardy, E., Hamdi, M., Havet, M., & Rouaud, O. (2015). Transient exergetic efficiency and moisture loss analysis of forced convection drying with and without electro hydrodynamic enhancement. *Energy*, 89, 519-527. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.017>.
- Chinenye, N. M., Ogunlowo, A. S., & Olukunle, O. J. (2010). Cocoa bean (*Theobroma cacao* L.) drying kinetics. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70, 633-639.
- Corzo, O., Bracho, N., Perelra, A., & Vasquez, A. (2008). Weibull distribution for modelling air drying of coroba slices. *LWT – Food Science and Technology*, 41, 2023-2028. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.01.002>.
- Crank, J. (1975). *Mathematics of diffusion*. 2<sup>nd</sup> Ed. London: Oxford University Press.
- Dehghannya, J., Hosseinlar, S., & Heshmati, M. K. (2018). Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. *Innovation Food Science and Emerging Technologies*, 45, 132-151. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.10.007>.
- Doymaz, I. (2007). Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *Food Engineering*, 78, 591-596. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.037>.
- Doymaz, I. (2012). Drying of pomegranate seeds using infrared radiation. *Food Science and Biotechnology*, 21, 1269-1275.
- Falade, K. O., & Ogunwolu, O. S. (2014). Modeling of drying patterns of fresh and osmotically pretreated cooking banana and plantain slices. *Journal of Food Process Preservation*, 38, 373-388.
- Hebbar, H. U., Vishwanathan, K., & Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65, 557-563. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.020>.
- Horuz, E., Bozkurt, H., Karatash, H., & Maskan, M. (2017). Drying kinetics of apricot halves in a Microwave-hot air hybrid oven. *Heat Mass Transfer*, 53, 2117-2127. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00785.x>.
- Ivanova, D., Valov N., Valova I., & Stefanova, D. (2017). Optimization of convective drying of apricots. *TEM Journal*, 6(3), 572-577. <https://doi.org/10.18421/TEM63-19>.
- Izli, N., Yildiz, G. O., Unal, H., Isik, E., & Uylaser, V. (2014). Effect of different drying methods on drying characteristics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity of golden berry (*Physalis peruviana* L.). *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 9-17. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12266>.
- Kayran, S., & Doymaz, I. (2017). Infrared drying and effective moisture diffusivity of apricot halves: Influence of pretreatment and infrared power. *Journal of Food Processing and Preservation*, 00, 1-8. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12827>.
- Khair, R., Pan, Z., Salim, A., Hartsough, B. R., & Mohamed, S. (2011). Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *LWT-Food Science and Technology*, 44(4), 1126-1132. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.10.003>.

- Kocabiyik, H., Yilmaz, N., Tuncel, N. B., Sumer, S.K., & Buykcan, N. B. (2015). Drying, energy, and some physical and nutritional quality properties of tomatoes dried with short-infrared radiation. *Food Bioprocess Technology*, 8, 516-525.
- Łechtańska, J. M., Szadzińska, J., & Kowalski, S. J. (2015). Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 98, 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.10.001>.
- Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A., & Vireda P. (2000). Thin-layer drying behavior of vegetable waste from wholesale market. *Drying Technology*, 18, 995-1006. <https://doi.org/10.1080/07373930008917749>.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20, 1503-1513.
- Mirzaee, E., Rafiee, S, Keyhani, A., & Emam-Djomeh, Z. (2009). Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots. *Research in Agricultural Engineering*, 55(3), 114-120. <https://doi.org/10.17221/8/2009-RAE>.
- Mosavi Bayegi, S. F., Farahmand, A., Taghizadeh, M., & Ziafoughi, A. (2016). Modeling of thin layer drying of persimmon by hot air and infrared methods. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 53(13), 161-171. (in Persian)
- Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. (2018). 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>.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R., Abdan, K., Chen, G., & Oladejo, A.O. (2017). Non- thermal hybrid drying of fruits and vegetables: A review of current technologies. *Innovation Food Science and Emerging Technologies*, 43, 223-238. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.010>.
- Onwude, D.I., Hashim, N., & Chen, G. (2016). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends Food Science Technology*, 57, 132-145. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.012>.
- Ozkan, M, Kirca, A., & Cemeroglu, B. (2003). Effect of moisture content on CIE color values in dried apricots. *European Food Research and Technology*, 216, 217-219. <https://doi.org/10.1007/s00217-002-0627-6>.
- Rekabi, M., Abbaspourfard, M. H., & Mortezapour, H. (2016). Investigating the energy consumption and drying time of pistachios in combined solar-infrared dryer. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 39(2), 18-32. <https://doi.org/10.22055/agen.2017.12552>. (in Persian)
- Salehi, F. (2018). *Mathematical modelling of thin-layer drying of apricot in infrared dryer. Proceedings of the 11<sup>th</sup> National Congress on Mechanical Engineering, Biomaterials and Mechanization*. Sep. 3. Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran. (in Persian)
- Satorabi, M., Salehi, F., & Rasouli, M. (2021). The Influence of xanthan and balangu seed gums coats on the kinetics of infrared drying of apricot slices: GA-ANN and ANFIS modeling. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 468-480. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1898520>.



- Unal, H. G., & Sacilik, K. (2011). drying characteristics of hawthorn fruits in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35, 272-279. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00451.x>.
- Wang, C.Y. & Singh, R.P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. ASAE Paper No: 78-3001, St. Joseph, MI: ASAE.
- Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., Tang, J., Miao, S., & Wang, Y. (2017). Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1239-1255. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.979280>.
- Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., & Marinos Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14, 2225-2253. <https://doi.org/10.1080/07373939608917205>.



Research Paper

## Investigating the Effect of Different Combination Strategies of Hot Air and Infrared Radiation on Apricot Drying

M. Mozaffari Gonbari\*, H. Ghaffari Setoubadi, H. R. Gazor and J. Soleimani

\*Corresponding Author: Assistant Professor of Agricultural Engineering Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education center, AREEO, Tabriz, Iran. Email: m.mozaffary@areeo.ac.ir.

Received: 2 October 2023, Accepted: 6 January 2024

<http://doi:10.22092/AMSR.2024.363663.1462>

### Abstract

Hot air drying is the most common method used to dry agricultural products; this method is time consuming and has high energy consumption. Also, due to the rapid drying of the product surface in this method, the distribution and transferring of heat and moisture inside the product is relatively uneven. In fruits, such as apricots, skin of the fruit has a controlling and inhibitory effect on the drying process. Therefore, using some combination methods to dry fruits such as apricots, can reduce drying time and energy consumption. In the present study, a convection dryer was equipped with an infrared radiation system. The effect of hot air and infrared combination in different strategies on apricot drying was evaluated and compared. Experiments were conducted with hot air and infrared treatments alone, simultaneously and in a combination of two-stage and intermittent infrared in a combined dryer on a laboratory scale. The hot air temperature was 65 ° C, the velocity of hot air was 1.5 m/s and the power of infrared lamps was 400 watts. The results showed that the drying time, energy consumption and effective moisture penetration coefficient were significantly affected by the treatments. Midili et al.'s model was able to describe well the drying behavior of apricots for all the different combination states under investigation.

**Keywords:** Drying Time, Effective Moisture Diffusivity, Energy, Hybrid Dryer



© 2023 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)