

کاربرد روش دما متغیر در خشک‌کردن ورقه‌های سیر با گرمایش مادون‌قرمز و بررسی مشخصه‌های عملکردی و خواص کیفی محصول نهایی

حبیبه نعلبندی^{۱*}، سید صادق سیدلو^۲ و رضا حسین‌نیا^۳

چکیده

خشک‌کردن با گرمایش مادون‌قرمز با روش دما متغیر یکی از روش‌های جدید در خشک‌کردن محصولات کشاورزی است که به منظور بهره‌وری انرژی و حفظ کیفیت محصول نهایی معرفی شده است. هدف از این تحقیق ارزیابی تأثیر کاربرد الگوهای مختلف دما متغیر، در خشک‌کن مادون‌قرمز روی خواص کیفی ورقه‌های سیر، زمان عملیات، مصرف انرژی و تعیین بهترین الگوی تغییر دما در طول فرآیند خشک‌کردن است. نمونه‌ها در خشک‌کن مادون‌قرمز با استفاده از روش کاربرد دمای ثابت در سه سطح شامل ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و کاربرد دما متغیر در دو الگوی متفاوت خشکانده شدند. در الگوی اول (الف) فرآیند با دمای خشک‌کردن ۶۰ درجه سلسیوس شروع شد و پس از رسیدن دمای سطح محصول به ۵۰ درجه سلسیوس، دمای خشک‌کردن به ۵۰ درجه سلسیوس کاهش داده شد. در الگوی دوم (ب)، فرآیند با دمای ۷۰ درجه سلسیوس شروع شد و پس از ۳۰ دقیقه، دمای خشک‌کردن به ۵۰ درجه سلسیوس کاهش داده شد. زمان خشک‌شدن، میزان مصرف انرژی و شاخص‌های کیفی مانند چروکیدگی، دانسیته واقعی، تغییرات کلی رنگ و محتوی آنتی‌اکسیدان و پلی‌فنل در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مصرف انرژی در کاربرد دما ثابت ۷۰ درجه سلسیوس و الگوی ب دما متغیر به ترتیب معادل ۰/۷۶ و ۱/۱۶ کیلووات‌ساعت بود. ولی با توجه به اینکه الگوی ب موجب تغییرات رنگ کم‌تری در محصول نهایی برای دمای ۷۰ درجه سلسیوس بود (۴/۹۲ در مقابل ۱۴/۲۲)، روش الگوی ب ارجح است. هم‌چنین محتوی آنتی‌اکسیدان در الگوی ب دما متغیر نیز مناسب تشخیص داده شد. بنابراین کاربرد دما متغیر با الگوی ب نسبت به دما ثابت ارجح است.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان، خشک‌کردن، دما متغیر، رنگ، سیر، مصرف انرژی.

ارجاع: نعلبندی ح، سیدلو س. ص. و حسین‌نیا ر. ۱۴۰۳. کاربرد روش دما متغیر در خشک‌کردن ورقه‌های سیر با گرمایش مادون‌قرمز و بررسی مشخصه‌های عملکردی و خواص کیفی محصول نهایی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۴: ۴۴-۴۴.
<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2025.14918.719>

۱- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۳- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: h.nalbandi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

مقدمه

یکی از روش‌های نوین برای خشک کردن مواد غذایی، خشک کردن با استفاده از امواج مادون قرمز است. در این روش گرما توسط امواج الکترومغناطیس به ماده مرطوب منتقل می‌شود. طول موج امواج تابانده شده بین ۰/۷۶ تا ۴۰۰ نانومتر قرار دارد. این امواج به سطح مواد مرطوب تابیده شده و گرما تولید می‌کند. منبع تولید اشعه مادون قرمز در دماهای بالا معمولاً لامپ‌های کوارتز بوده و برای دماهای پایین‌تر از سایر تابنده‌ها استفاده می‌شود (Midilli et al., 2002). خشک‌کن‌های مادون قرمز به صورت انفرادی و یا در ترکیب با سایر خشک‌کن‌ها مانند خشک‌کن هوای گرم مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل عمق نفوذ کم امواج مادون قرمز، از این روش اغلب برای مواد با ضخامت کم استفاده می‌شود و یکی از مهم‌ترین عوامل در بازدهی این خشک‌کن‌ها ضخامت ماده خشک‌شونده و نیز توان منبع مادون قرمز است. تحقیقات گسترده‌ای نیز در این خصوص انجام شده است. Younis et al. (2018) فرآیند خشک شدن ورقه‌های سیر را با استفاده از خشک‌کن مادون قرمز با توان ۰/۷۵ تا ۰/۳ وات بر سانتی‌مترمربع و سرعت هوای ۰/۷۵ و ۱/۲۵ متر بر ثانیه بررسی کردند. نتایج نشان داد که توان منبع مادون قرمز و سرعت هوا اثر معنی‌داری روی زمان خشک شدن دارند. به طوری که در یک سرعت ثابت هوا (۰/۷۵ متر بر ثانیه) با افزایش توان لامپ‌ها از ۰/۷۵ به ۰/۳ وات بر سانتی‌مترمربع، زمان خشک کردن از ۱۴۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه کاهش یافت. همچنین افزایش سرعت هوا تأثیر عکس روی زمان خشک شدن داشت.

خشک کردن ترکیبی و متناوب از روش‌هایی است که به دلیل افزایش کیفیت ماده نهایی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در خشک کردن ترکیبی، معمولاً از ترکیب دو یا چند روش خشک کردن مانند خشک کردن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز استفاده می‌شود. Onwude et al. (2019) اثر ترکیب خشک‌کن مادون قرمز و هوای گرم را روی خشک کردن سیب‌زمینی شیرین بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیب‌های متفاوت هوای گرم و مادون قرمز در فرآیند خشک کردن، آهنگ و زمان خشک شدن، جذب رطوبت، چروکیدگی، مصرف انرژی و تغییرات رنگ محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. خشک کردن متناوب با هوای گرم و مادون قرمز با داشتن

کم‌ترین زمان خشک شدن (۱۱۳-۱۲۰ دقیقه)، مصرف انرژی (۶۷/۴۴-۲۷/۴۱ کیلووات ساعت بر کیلوگرم) و تغییرات رنگ (۱۵/۴۸-۱۷/۲۶) به عنوان بهترین روش انتخاب شد.

خشک کردن متناوب به روشی اطلاق می‌شود که در آن شرایط خشک کردن با تغییر زمان تغییر می‌کند و به عنوان یکی از فرآیندهای با بازده انرژی بالا مطرح است (Chua et al., 2002, 2003; Kowalski & Pawłowski, 2011). به عنوان نمونه، در خشک‌کن هم‌رفتی تغییر در شرایط خشک کردن شامل تغییر دما و رطوبت هوای گرم در حین خشک کردن یک محصول است (Nalbandi et al., 2021). Lilia et al. (2008) اثر چرخه دمایی را روی فعالیت آنزیم آلیناز، در فرآیند خشک کردن سیر مورد مطالعه قرار دادند. چرخه دمایی اول به صورت ۴۰ درجه سلسیوس به ۶۰ درجه سلسیوس بود که ابتدا خشک کردن با دمای ۴۰ درجه سلسیوس شروع و پس از ۲۰ دقیقه دما به ۶۰ درجه سلسیوس افزایش یافت و مجدد پس از ۲۰ دقیقه، دما به ۴۰ درجه سلسیوس کاهش یافت و این تغییرات دما در فاصله‌های زمانی ۲۰ دقیقه به صورت متناوب انجام گرفت. همچنین آن‌ها چرخه دمایی ۶۰ به ۴۰ درجه سلسیوس را نیز در فاصله‌های زمانی ۲۰ دقیقه آزمایش نموده و نتایج حاصل را با خشک کردن مداوم در دمای ثابت ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس مقایسه کردند. براساس نتایج حاصل در چرخه دمایی ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، ظرفیت تولید آلیناز در حدود ۹۱٪ حفظ شد. درحالی که در خشک کردن با دمای ثابت ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس این مقدار حدود ۹۰٪ و ۷۴٪ بود.

خشک کردن با روش دما متغیر نیز یکی دیگر از روش‌های خشک کردن است که فرآیند خشک کردن با یک دمای مشخص اولیه شروع شده و با پیشرفت فرآیند، زمانی که دمای سطح محصول به دمای مورد نظر یا بحرانی رسید دمای خشک کردن کاهش داده می‌شود تا دمای محصول از حد بحرانی فراتر نرود. دمای بحرانی به دمایی اطلاق می‌گردد که کاهش کیفیت در محصول را موجب شود. با استفاده از این روش می‌توان از افزایش دمای سطح محصول که موجب کاهش کیفیت محصول نهایی می‌شود جلوگیری کرد، در عین حال می‌توان از مزایای دمای بالای خشک کردن نیز استفاده کرد. بالابودن دمای خشک کردن در ابتدای فرآیند باعث افزایش آهنگ

خشک‌شدن و کاهش زمان فرآیند شده و کاهش دما در زمان مورد نظر (بحرانی) موجب حفظ کیفیت محصول به ویژه از نظر رنگ نهایی محصول خشک‌شده می‌گردد (Nalbandi *et al.*, 2021).

دما و شرایط خشک‌کردن در روش دما متغیر، از شبیه‌سازی انتقال جرم و گرما به منظور تعیین پروفیل‌های دما و رطوبت در محصول استفاده کردند. استفاده از شبیه‌ساز توسعه‌یافته و نیز اندازه‌گیری‌های تجربی به عنوان پیش‌آزمایش نشان داد که خشک‌کردن محصولات با روش دما متغیر دارای حسن‌های زیادی است و ضمن کاهش زمان خشک‌کردن، میزان صدمات حرارتی وارد شده به محصول را نیز کاهش می‌دهد. Hossein Nia *et al.* (2023) از این روش برای خشک‌کردن ورقه‌های سیر استفاده کرد. ایشان نمونه‌های سیر را در دماهای ثابت هوای گرم (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و سه الگوی مختلف دما متغیر هوای گرم شامل ۶۰ درجه سلسیوس ← ۵۰ درجه سلسیوس (الف)، ۷۰ درجه سلسیوس ← ۵۰ درجه سلسیوس (ب) و ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه ← ۵۰ درجه سلسیوس (ج) خشک کردند. بهترین شرایط خشک‌شدن سیر در الگوی ج روش دما متغیر مشاهده شد. در این تیمار زمان خشک‌شدن و افت آنتی‌اکسیدان نسبت به نمونه‌های اولیه به ترتیب با مقادیر ۲۴ و ۴۵ درصد، کم‌تر و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت نیز ۲۴ درصد بیش‌تر از تیمار دما ثابت ۵۰ درجه سلسیوس بود. رنگ نمونه‌ها نیز نسبت به سایر تیمارها تغییرات کم‌تری داشت. آنان هم‌چنین نشان دادند استفاده مداوم از دمای بالا برای خشک‌کردن محصولات منجر به صدمات حرارتی غیرقابل بازگشت و در نهایت افت کیفیت محصول از لحاظ ظاهری و تغذیه‌ای می‌شود.

بنابراین هدف از این تحقیق، مطالعه تأثیر ترکیب‌ها و توالی دماهای مختلف خشک‌کردن در خشک‌کن‌های مادون‌قرمز و با استفاده از روش دما متغیر روی فرآیند خشک‌شدن ورقه‌های سیر است تا ضمن مطالعه اثر آن‌ها روی میزان مصرف انرژی، زمان خشک‌کردن، خواص کیفی ورقه‌های سیر مانند تغییرات رنگ، چروکیدگی و دانسیته واقعی محصول بررسی شود و در نهایت بهترین الگوی برای تغییر دمای خشک‌کردن تعیین گردد.

مواد و روش‌ها

سیر مورد نیاز از بازار محلی آذرشهر در استان آذربایجان شرقی تهیه و در یخچال با دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. دو ساعت قبل از شروع هر آزمایش نمونه‌ها از یخچال خارج شده و پس از هم‌دما شدن با دمای محیط آزمایشگاه، حبه‌های سیر پوست‌گیری شدند. سپس به وسیله قطعه‌کننده دوار به صورت عرضی و به ضخامت ۲/۵ میلی‌متر برش داده شده و به مدت ۱۰ دقیقه در محلول متابی‌سولفیت پتاسیم ۰/۵٪ (KMS) غوطه‌ور شدند (Abano *et al.*, 2011). در نهایت آب سطحی نمونه‌ها گرفته و نمونه‌ها روی سینی‌های مشبک به صورت تک‌لایه چیده شدند تا برای انتقال به خشک‌کن آماده باشند. محتوی رطوبت اولیه نمونه‌ها نیز در سه تکرار اندازه‌گیری شد (AOAC, 2019).

تیمارهای مورد مطالعه

تیمارهای مورد مطالعه در این تحقیق روش و دمای خشک‌کردن که شامل خشک‌کردن ورقه‌های سیر با روش دما ثابت با دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و خشک‌کردن با روش دما متغیر با دو الگوی متفاوت برای تغییر دما در طول خشک‌کردن بود که در بخش‌های بعدی به تفصیل بیان شده‌اند.

دما و شرایط خشک‌کردن در روش دما متغیر، از شبیه‌سازی انتقال جرم و گرما به منظور تعیین پروفیل‌های دما و رطوبت در محصول استفاده کردند. استفاده از شبیه‌ساز توسعه‌یافته و نیز اندازه‌گیری‌های تجربی به عنوان پیش‌آزمایش نشان داد که خشک‌کردن محصولات با روش دما متغیر دارای حسن‌های زیادی است و ضمن کاهش زمان خشک‌کردن، میزان صدمات حرارتی وارد شده به محصول را نیز کاهش می‌دهد. Hossein Nia *et al.* (2023) از این روش برای خشک‌کردن ورقه‌های سیر استفاده کرد. ایشان نمونه‌های سیر را در دماهای ثابت هوای گرم (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و سه الگوی مختلف دما متغیر هوای گرم شامل ۶۰ درجه سلسیوس ← ۵۰ درجه سلسیوس (الف)، ۷۰ درجه سلسیوس ← ۵۰ درجه سلسیوس (ب) و ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه ← ۵۰ درجه سلسیوس (ج) خشک کردند. بهترین شرایط خشک‌شدن سیر در الگوی ج روش دما متغیر مشاهده شد. در این تیمار زمان خشک‌شدن و افت آنتی‌اکسیدان نسبت به نمونه‌های اولیه به ترتیب با مقادیر ۲۴ و ۴۵ درصد، کم‌تر و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت نیز ۲۴ درصد بیش‌تر از تیمار دما ثابت ۵۰ درجه سلسیوس بود. رنگ نمونه‌ها نیز نسبت به سایر تیمارها تغییرات کم‌تری داشت. آنان هم‌چنین نشان دادند استفاده مداوم از دمای بالا برای خشک‌کردن محصولات منجر به صدمات حرارتی غیرقابل بازگشت و در نهایت افت کیفیت محصول از لحاظ ظاهری و تغذیه‌ای می‌شود.

کیفیت محصول خشک‌شده با خشک‌کن‌های مادون‌قرمز تابعی از آهنگ و شرایط خشک‌شدن مانند فاصله لامپ‌ها از یکدیگر و از محصول، شدت تابش امواج، رطوبت و سرعت هوا است. با توجه به اینکه سطح ماده بخش اعظم انرژی امواج مادون‌قرمز را دریافت می‌کند، افزایش دمای سطح ماده بیش‌تر از قسمت‌های داخلی آن است که این امر موجب تغییرات نامطلوب زیادی در مواد و افت شاخص‌های کیفی می‌شود. به عنوان مثال مواد مؤثره حساس به گرما در سطح ماده از بین رفته و تغییرات رنگ

خشک کردن نمونه‌های سیر با روش دما ثابت

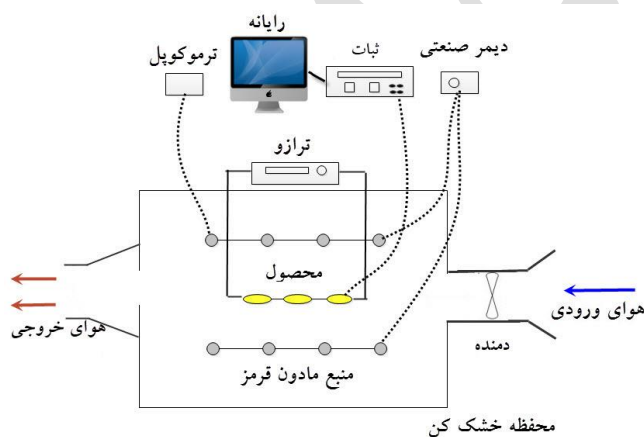
در این تحقیق از یک خشک‌کن مادون قرمز طراحی شده توسط Seiedlou *et al.* (2020) استفاده شد. در این خشک‌کن جهت عایق کاری بدنه داخلی خشک‌کن از ورقه‌های آلومینیومی استفاده شده است و برای تابش امواج مادون قرمز، شش عدد لامپ مادون قرمز در دو ردیف در بالا و پایین سینی محصول تعبیه شدند که روی شاسی‌های متحرک قرار دارند تا بتوان فاصله لامپ‌های مادون قرمز از سینی محصول را تغییر داد (شکل ۱). سینی محصول توسط شاسی مخصوص به ترازوی واقع در خارج از خشک‌کن متصل است. قبل از شروع هر آزمایش، تنظیم دمای خشک‌کردن از طریق ولتاژ لامپ‌های مادون قرمز و فاصله آنها از سینی محصول انجام شد. دمای خشک‌کردن در واقع دمای سطح محصول بود که در ابتدای هر فرآیند توسط ترموکوپل K اندازه‌گیری شد. تنظیمات دما از طریق جابه‌جا کردن لامپ‌های مادون قرمز و تنظیم ولتاژ لامپ‌های مادون قرمز توسط دیمر صنعتی انجام شد (Seiedlou *et al.*, 2020). دمای خشک‌کردن ۷۰ و ۶۰ درجه سلسیوس با دمای لامپ‌های مادون قرمز ۱۹۷ درجه سلسیوس و به ترتیب در فاصله‌های ۶ و ۱۵ سانتی‌متری لامپ‌ها از سینی محصول به دست آمد. در

نهایت دمای ۵۰ درجه سلسیوس در فاصله ۲۰ سانتی‌متری لامپ‌ها از سینی محصول و با دمای لامپ ۱۳۵ درجه سلسیوس تثبیت و تنظیم شد. هم چنین برای جلوگیری از اشباع محیط خشک‌کن، از جریان هوای محیط آزمایشگاه با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه روی سینی محصول استفاده شد. پس از رسیدن دمای خشک‌کن به حالت پایدار، نمونه‌های آماده‌شده سیر روی یک عدد سینی مشبک چیده شدند. ۱۰۰ گرم نمونه روی سینی قرار داده شد و جرم نمونه‌ها در فواصل زمانی ۱ دقیقه با استفاده از یک دستگاه ترازوی دیجیتال (AND، مدل GF 3000، ژاپن) با دقت $\pm 0/1$ که با یک اتصال RS232 به یک واحد رایانه متصل بود، اندازه‌گیری و ثبت شد. خصوصیات کیفی ورقه‌های سیر در ابتدا و انتهای فرآیند خشک‌کردن با استفاده از نمونه‌های موجود روی این سینی اندازه‌گیری شد. خشک‌کردن نمونه‌ها با دماهای ثابت خشک‌کردن ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به محتوی رطوبت ۰/۳ (گرم آب بر گرم ماده خشک، معادل ۲۳ درصد تر پایه) انجام گرفت. مصرف انرژی در طول فرآیند خشک‌کردن توسط دستگاه تحلیل توان با ثبت داده‌های میزان مصرف انرژی در هر ۱۰ دقیقه انجام گرفت.

(الف)



(ب)



شکل ۱- خشک‌کن مادون قرمز الف: ۱- دمنده ۲- درب خشک‌کن ۳- بدنه خشک‌کن ۴- دریچه خروجی هوا ۵- ترازو ۶- ثابت ۷- رایانه ۸- دیمر؛ ب: شکل و نمای خشک‌کن

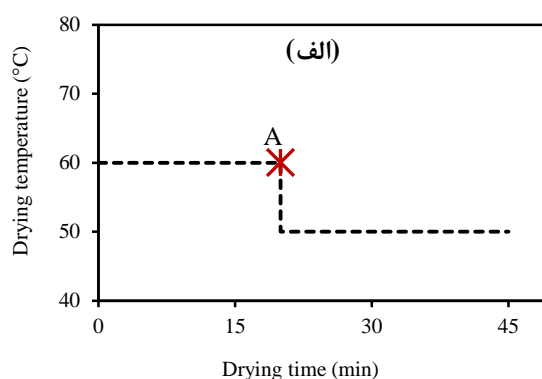
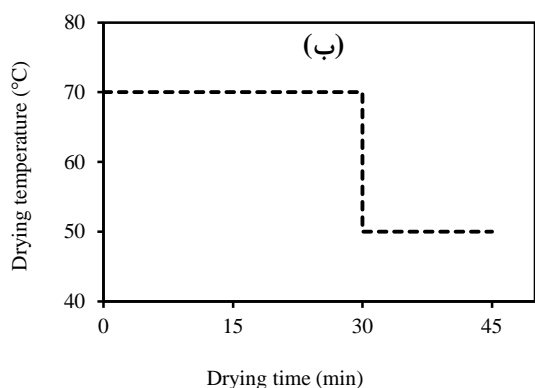
خشک کردن نمونه‌های سیر با روش دما متغیر

در خشک‌کردن نمونه‌های سیر با روش دما متغیر، فرآیند خشک‌کردن نمونه‌ها و اعمال حرارت به محصول با دو الگوی زیر صورت گرفت که در هر دو الگو از سرعت هوای

۰/۵ متر بر ثانیه استفاده شد و دمای هوای عبوری از داخل خشک‌کن برابر با دمای محیط و در حدود ۲۵ درجه سلسیوس بود. الگوهای تغییر دما شامل دو الگوی زیر بودند:

خشک کردن با تغییر فاصله لامپ‌های مادون قرمز از سینی محصول و تغییر دمای لامپ‌های مادون قرمز، از ۶۰ به ۵۰ درجه سلسیوس کاهش داده شد و ادامه فرآیند با دمای ۵۰ درجه سلسیوس ادامه یافت (شکل ۲-الف). با توجه به این‌که از نظر تخصصی، اکثر محصولات و مواد کشاورزی قدرت تحمل دمای بالا برای مدت کوتاه را دارند و افت کیفی محصول اندک است (Holdsworth & Simpson, 2015)، بنابراین الگوی ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه ← ۵۰ درجه سلسیوس نیز به تیمارها اضافه شد. در این الگو، فرآیند با دمای ۷۰ درجه سلسیوس شروع شد و به مدت ۳۰ دقیقه ادامه یافت و پس از آن، بدون توجه به دمای سطح نمونه‌ها، دمای خشک کردن با افزایش فاصله لامپ‌های مادون قرمز از سینی محصول و کاهش دمای لامپ‌های مادون قرمز، به ۵۰ درجه سلسیوس کاهش داده شد و فرآیند با دمای ۵۰ درجه سلسیوس ادامه یافت (شکل ۲-ب).

الف: شروع با دمای ۶۰ درجه سلسیوس و ادامه با دمای ۵۰ درجه سلسیوس (۶۰ درجه سلسیوس ← ۵۰ درجه سلسیوس)
 ب: شروع با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه و ادامه با دمای ۵۰ درجه سلسیوس (۷۰ درجه سلسیوس ← ۵۰ درجه سلسیوس) به مدت ۳۰ دقیقه
 خشک کردن نمونه‌ها در هر دو حالت الف و ب تا رسیدن محتوی رطوبت محصول به ۰/۳ گرم آب بر گرم ماده خشک (۲۳ درصد تر پایه) انجام شد. معیار انتخاب دمای ۵۰ درجه سلسیوس این بود که بر اساس آزمایش‌های قبلی روی محصول سیر، بالاترین کیفیت محصول خشک تولیدی زمانی حاصل شد که دمای سطح محصول به بالاتر از ۵۰ درجه سلسیوس نرسید. بنابراین در الگوی الف هم‌زمان با پیشرفت فرآیند خشک شدن، دمای سطح نمونه‌های سیر اندازه‌گیری شد. زمانی که دمای سطح نمونه‌ها به ۵۰ درجه سلسیوس رسید، دمای



شکل ۲- نحوه کاهش دمای خشک کردن در تیمارهای الف و ب

اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی رنگ محصول در هر کدام از تیمارها و تکرارهای مربوط به خشک کردن در دماهای مختلف، شاخص رنگ در ابتدا و انتهای آزمایش اندازه‌گیری شد. به این صورت که قبل از شروع هر آزمایش سه قطعه در داخل دستگاه رنگ‌سنج قرار گرفته و توسط دوربین عکس‌برداری از آن‌ها صورت گرفت و در خشک‌کن در کنار سایر نمونه‌ها قرار داده شد. پس از اتمام آزمایش دوباره از همان نمونه‌ها تصویربرداری شد. شاخص‌های رنگ نمونه‌ها شامل L ، a و b که به ترتیب بیان‌گر مقدار شفافیت، قرمزی - سبزی و نهایتاً زردی - آبی بودن نمونه‌ها است، در محیط نرم‌افزار Adobe Photoshop (v24.4.5) تعیین شد. تفاوت رنگ نمونه‌های خشک شده با نمونه‌های تازه، به عنوان معیاری برای تعیین تغییر کلی رنگ (ΔE) در طی خشک کردن استفاده شد و با معادله (۱) محاسبه گردید که در آن زیرنویس ۰ و i به ترتیب بیان‌گر مشخصه‌های رنگ سیر تازه و سیر خشک شده و علامت * بیانگر مشخصه‌های استاندارد شده هستند (Yaldiz et al., 2001).

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_i^*)^2 + (a_0^* - a_i^*)^2 + (b_0^* - b_i^*)^2} \quad (1)$$

چروکیدگی و دانسیته واقعی محصول

برای محاسبه مقدار چروکیدگی و دانسیته واقعی نمونه‌ها، حجم ورقه‌های سیر در ابتدا و انتهای فرآیند خشک کردن

اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی

رنگ محصول

در هر کدام از تیمارها و تکرارهای مربوط به خشک کردن در دماهای مختلف، شاخص رنگ در ابتدا و انتهای آزمایش اندازه‌گیری شد. به این صورت که قبل از شروع هر آزمایش سه قطعه در داخل دستگاه رنگ‌سنج قرار گرفته و توسط دوربین عکس‌برداری از آن‌ها صورت گرفت و در خشک‌کن در کنار سایر نمونه‌ها قرار داده شد. پس از اتمام آزمایش دوباره از همان نمونه‌ها تصویربرداری شد. شاخص‌های رنگ نمونه‌ها شامل L ، a و b که به ترتیب بیان‌گر مقدار شفافیت، قرمزی - سبزی و نهایتاً زردی - آبی بودن نمونه‌ها است، در محیط نرم‌افزار Adobe

شدند و پس از آن محلول داخل کوط ریخته شده و مقدار پلی فنل در محلول در طول موج‌های ۷۲۰ و ۶۹۰ نانومتر قرائت گردید. برای استفاده از منحنی استاندارد اسید گالیک فرض می‌شود که فنل موجود در عصاره نمونه‌ها از جنس اسید گالیک است. بنابراین پس از اتمام آزمایش‌ها با استفاده از معادله خط حاصل از منحنی این استاندارد، میزان پلی فنل در طول موج ۶۹۰ نانومتر محاسبه شد (Hossein Nia *et al.*, 2023).

طرح آماری آزمایش‌ها

در این مطالعه اثر روش و دمای خشک کردن روی زمان خشک شدن، مصرف انرژی و خواص کیفی ورقه‌های سیر در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در محیط نرم‌افزار MSTATC تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها نیز به روش دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

سینتیک خشک شدن ورقه‌های سیر

پس از حصول داده‌های مربوط به خشک کردن ورقه‌های سیر در خشک کن مادون قرمز، سینتیک خشک شدن نمونه‌ها به صورت تغییرات محتوی رطوبت در مقابل زمان در دماهای مختلف خشک کردن ترسیم شد (شکل ۴). زمان لازم برای کاهش رطوبت نمونه‌ها از ۲/۴ به ۰/۳ گرم آب بر گرم ماده خشک (از ۷۰/۵ به ۲۳ درصد تر پایه) در دماهای ثابت ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۲۲، ۱۰۱ و ۹۲ دقیقه بود (شکل ۴-الف) که نشان می‌دهد افزایش دمای خشک کردن موجب کاهش زمان فرآیند شده است که با نتایج گزارش شده توسط Younis *et al.* (2018) مطابقت دارد. آنان زمان خشک شدن ورقه‌های سیر با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر را در توان‌های مادون قرمز ۰/۷۵، ۰/۱۵، ۰/۲۲۵ و ۰/۳ وات بر سانتی‌متر مربع و سرعت هوای ۰/۷۵ متر بر ثانیه را به ترتیب ۱۳۵، ۷۰، ۴۵ و ۳۰ دقیقه گزارش کردند. هم‌چنین در سرعت هوای ۱/۲۵ متر بر ثانیه نیز زمان خشک شدن در توان‌های مذکور به ترتیب ۲۴۰، ۱۲۰، ۶۰ و ۴۰ دقیقه گزارش شد. دلایل تفاوت بین زمان خشک شدن سیر در مطالعه آنان با نتایج حاصل از این تحقیق، تفاوت توان لامپ‌های مادون قرمز و سرعت هوا است.

اندازه‌گیری شد. در ابتدا و انتهای هر آزمایش جرم ۱۵ ورقه سیر اندازه‌گیری و سپس حجم آن‌ها به روش جابه‌جایی تولون اندازه‌گیری شد (Chacraverty & Poul, 2001). دانسیته واقعی محصول با تقسیم جرم به حجم نمونه‌ها در ابتدا و انتهای فرآیند محاسبه شد. مقدار چروکیدگی نمونه‌ها نیز با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد که در این رابطه V_t حجم نمونه خشک شده در زمان مورد نظر (سانتی‌متر مکعب)، V_0 حجم اولیه (سانتی‌متر مکعب) و Sh درصد چروکیدگی نمونه‌ها است.

$$Sh = \left(1 - \frac{V_t}{V_0}\right) \times 100 \quad (2)$$

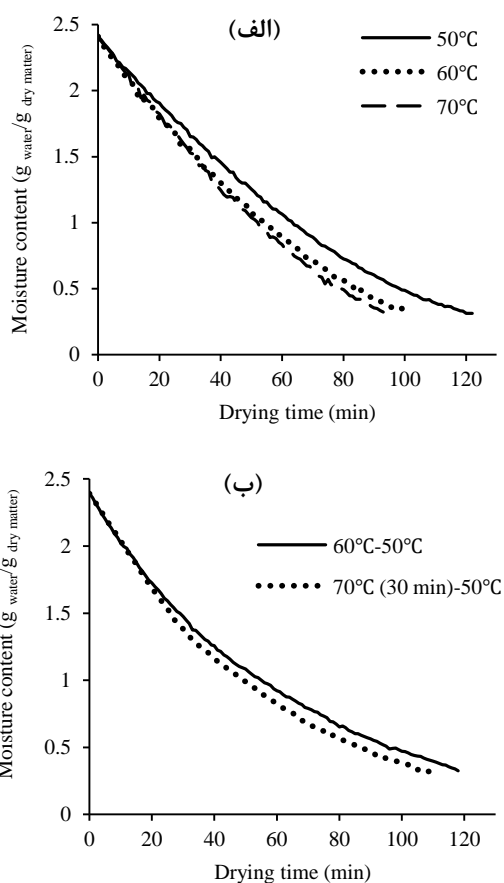
اندازه‌گیری محتوی آنتی‌اکسیدان و پلی فنل

برای اندازه‌گیری محتوی آنتی‌اکسیدان و پلی فنل نمونه‌های سیر در فرآیند خشک شدن، از نمونه‌های خشک شده هر تیمار عصاره‌گیری شد و محلول‌های Dpph، اسید گالیک، Na_2CO_3 و فولین سیدکالتو تهیه گردید. در اندازه‌گیری آنتی‌اکسیدان، دستگاه اسپکتوفوتومتر (Shimadzu UV-VIS Spectrophotometer) روی طول موج ۵۱۷ نانومتر تنظیم گردید. در مرحله اول ۱۹۵۰ میکرولیتر Dpph داخل کوط ریخته شده و جذب آن در طول موج ۵۱۷ نانومتر قرائت گردید. سپس ۵۰ میکرولیتر از عصاره سیر رقیق شده داخل میکروتیوپ حاوی محلول Dpph اضافه شد. پس از ۱۵ دقیقه نگهداری در مکان تاریک، محلول نمونه و داخل کوط ریخته شده و میزان جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر قرائت گردید و درصد آنتی‌اکسیدان با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد. در این رابطه Dpph مقدار جذب این محلول در طول موج ۵۱۷ نانومتر و material+ Dpph مقدار جذب محلول و عصاره نمونه در طول موج ۵۱۷ نانومتر است (Hossein Nia *et al.*, 2023).

$$\%Antioxidant = \frac{Dpph - (material + Dpph)}{Dpph} \times 100 \quad (3)$$

در اندازه‌گیری محتوی پلی فنل ابتدا ۸۰ میکرولیتر متانول به عنوان نمونه شاهد در کوط ریخته و درون دستگاه اسپکتوفوتومتر قرار داده شد. سپس ۱۶۰۰ میکرولیتر محلول Na_2CO_3 داخل ۵۰ میکرولیتر عصاره اضافه شد. پس از دو دقیقه ۸۰ میکرولیتر محلول F.C.K به میکروتیوپ حاوی عصاره و محلول Na_2CO_3 اضافه گردید. به دلیل حساسیت محلول F.C.K به تابش نور، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در یک محل تاریک نگهداری

متناب که با چرخه‌های دمایی ۳۰ دقیقه حرارت‌دهی با دمای ۶۰ درجه سلسیوس ← ۵ دقیقه استراحت و ۴۰ دقیقه حرارت‌دهی با دمای ۶۰ درجه سلسیوس ← ۱۰ دقیقه استراحت انجام شد، زمان خشک‌شدن به ۳۹۵ و ۴۲۳ دقیقه کاهش یافت. نتایج مشابهی نیز توسط Szadzinska (2014) در مورد خشک‌کردن فلفل سبز گزارش شده است. وی نشان داد که زمان خشک‌شدن فلفل با هوای گرم با دمای ثابت ۷۰ درجه سلسیوس، ۱۸۸ دقیقه است که استفاده از خشک‌کردن متناب با چرخه‌های دمایی ۳۰ دقیقه حرارت‌دهی با دمای ۷۰ درجه سلسیوس ← ۵ دقیقه استراحت و ۳۰ دقیقه حرارت‌دهی با دمای ۷۰ درجه سلسیوس ← ۱۰ دقیقه استراحت، منجر به کاهش زمان خشک‌شدن از ۱۸۸ دقیقه به ترتیب به ۱۳۴ و ۱۴۰ دقیقه شد.



شکل ۴- منحنی خشک‌شدن ورقه‌های سیر، الف: دمای ثابت و ب: دمای متغیر

زمان خشک‌کردن نمونه‌های سیر در روش دما متغیر مورد مطالعه در الگوی الف و ب به ترتیب برابر ۱۱۹ و ۱۰۹ دقیقه بود (شکل ۴-ب). منحنی خشک‌شدن در الگوی ب از شیب تندتری نسبت به الگوی الف برخوردار بود و زمان خشک‌شدن نیز نسبت به الگوی مذکور، ۸ درصد کاهش یافته بود.

نتایج تجزیه واریانس اثر روش و دمای خشک‌کردن روی زمان خشک‌کردن سیر با خشک‌کن مادون‌قرمز در جدول ۱ آورده شده است. روش و دمای خشک‌کردن در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری روی زمان خشک‌شدن نمونه‌ها داشت. ملاحظه می‌شود بین زمان خشک‌شدن در الگوی الف و دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌داری وجود ندارد ولی بین دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس و الگوی ب، تفاوت معنی‌دار است (جدول ۲) به‌طوری‌که با اعمال الگوی ب زمان خشک‌شدن نسبت به ۵۰ درجه سلسیوس، حدود ۱۰/۵ درصد کاهش یافته است. این در حالی است که در خشک‌کن همرفتی (Nalbandi *et al.*, 2021) با روش دما متغیر با الگوی ب، زمان خشک‌شدن نسبت به دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس حدود ۲۴ درصد کاهش یافته بود که نشان می‌دهد در خشک‌کردن همرفتی اعمال روش دما متغیر تأثیر بیشتری روی کاهش زمان خشک‌کردن داشته است. با وجود اینکه تحقیقات زیادی در خصوص خشک‌کردن با روش دما متغیر انجام نشده است ولی تأثیر تغییر دمای خشک‌کردن روی کاهش زمان فرآیند در خشک‌کردن متناب نیز گزارش شده است. Lopez-Ortiz *et al.* (2018) اثر چرخه دمایی با موج دوزنقه‌ای را روی سینتیک خشک‌کردن سیر مطالعه کردند. آنان نشان دادند فرآیند خشک‌کردن با شروع افزایشی (از دمای ۴۰ به دمای ۶۰ درجه سلسیوس، AC) از آهنگ خشک‌کردن بالایی نسبت به چرخه دمایی با شروع کاهش (از دمای ۶۰ به دمای ۴۰ درجه سلسیوس، DC) برخوردار است. Kowalski & Pawlowski (2011) گزارش کردند که در فرآیند خشک‌کردن همرفتی گیلان با دمای هوای گرم ۶۰ درجه سلسیوس، استفاده از چرخه‌های زمانی برای اعمال گرما به محصول، منجر به کاهش زمان فرآیند شد. در خشک‌کردن پیوسته با هوای گرم با دمای ۶۰ درجه سلسیوس، زمان فرآیند ۴۵۳ دقیقه بود. در خشک‌کردن

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر روش و دمای خشک کردن روی زمان خشک شدن سیر، شاخص‌های کیفی و مصرف انرژی

منابع تغییر	دما (درجه سلسیوس)	زمان (دقیقه)	مصرف انرژی (kWh)	تغییرات کلی رنگ	میانگین مربعات		
					پلی فنل	آنتی‌اکسیدان	تغییرات کلی رنگ
تکرار	۲	۸۲/۶۷ ^{xx}	۰/۰۰۲	۱/۴۷	۰/۰۹۴	۰/۰۶۹ ^x	
روش و دمای خشک کردن	۴	۱۰۲۷/۱۷ ^{xx}	۰/۲۴ ^x	۵۳/۵۲ ^{xx}	۰/۱۱ ^{ns}	۱/۲۹۶ ^{xx}	
خطا	۸	۲۱/۵۳	۰/۰۶	۰/۴۸	۰/۱۲۷	۰/۱۱۴	
کل	۱۴						

^{xx} و ^{ns} به ترتیب بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و غیر معنی‌داری است.

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر روش و دمای خشک کردن روی زمان خشک شدن سیر، شاخص‌های کیفی و مصرف انرژی

دما (درجه سلسیوس)	زمان (دقیقه)	مصرف انرژی (kWh)	تغییرات رنگ	محتوی آنتی‌اکسیدان (%)
۵۰	۱۲۲ ^a	۱/۵۶۷ ^a	۳/۸۷۹ ^c	۲/۴۹۸ ^c
۶۰	۱۰۱ ^c	۱/۰۳۳ ^{bc}	۶/۳۵۹ ^b	۳/۹۳۴ ^{ab}
۷۰	۹۲ ^d	۰/۷۶۶ ^c	۱۴/۲۲ ^a	۳/۴۲۵ ^b
۵۰°C ← ۶۰°C	۱۱۹ ^a	۱ ^{bc}	۴/۷۶ ^{bc}	۴/۴۹۶ ^a
۷۰°C به مدت ۳۰ دقیقه ← ۵۰°C	۱۰۹ ^b	۱/۱۶۷ ^{abc}	۴/۹۲ ^{bc}	۳/۵۹۰ ^{ab}

حروف متفاوت بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

مصرف انرژی

پس از انجام آزمایش‌ها میزان مصرف انرژی در تیمارهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر روش و دمای خشک کردن روی میزان مصرف انرژی در خشک‌کن مادون قرمز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است (جدول ۱). بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۲) مشخص شد که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان انرژی مصرف شده به ترتیب مربوط به دمای ثابت ۵۰ و ۷۰ درجه سلسیوس است. همان‌طوری‌که زمان خشک کردن در الگوی ب کمتر از دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس بود، میزان مصرف انرژی نیز در این تیمار حدود ۲۵ درصد کمتر از دمای ۵۰ درجه سلسیوس است. میزان مصرف انرژی در دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس و الگوی ب به ترتیب برابر ۱/۵۶۷ و ۱/۱۶۷ کیلووات ساعت بود. بنابراین ملاحظه می‌شود که روش دما متغیر توانسته است میزان مصرف انرژی را به طور قابل توجهی کاهش دهد.

Lechtanska *et al.* (2015) فرآیند خشک کردن فلفل سبز را با استفاده از ترکیب خشک‌کن‌های هم‌رفتی، مایکروویو و مادون قرمز مطالعه کردند. آن‌ها برش‌های فلفل سبز با طول ۳ و عرض ۲ سانتی‌متر را با سرعت هوای ۱/۸ متر بر ثانیه، دمای هوای ۶۵ درجه سلسیوس،

توان مایکروویو ۱۰۰ وات و توان مادون قرمز در حدود ۲۴۰ وات خشک نمودند. نتایج نشان داد که میزان مصرف انرژی در این روش خشک کردن در محدوده ۳/۳ تا ۶/۹ کیلووات ساعت قرار دارد. (Kaveh *et al.* (2018) در فرآیند خشک کردن نمونه‌های سیر با استفاده از خشک‌کن هم‌رفتی با دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس میزان مصرف انرژی را بین $۱.۰۵ \times ۴/۵۲$ الی $۱.۰۵ \times ۸/۰۴$ کیلووات بر کیلوگرم به دست آوردند. نتایج مشابه دیگری توسط سایر محققان گزارش شده است (Lucky *et al.*, 2018; Lakshimi *et al.*, 2018).

تغییرات کلی رنگ

مطابق نتایج تجزیه واریانس اثر دما و روش خشک کردن روی میزان تغییرات کلی رنگ نمونه‌ها در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۱). مطابق نتایج مقایسه میانگین (جدول ۲)، بیش‌ترین و کم‌ترین تغییرات کلی رنگ به ترتیب مربوط به دمای ثابت ۷۰ درجه سلسیوس (۱۴/۲۲) و ۵۰ درجه سلسیوس به دست آمد. تغییر رنگ نمونه‌ها در الگوهای الف و ب تفاوت معنی‌داری با دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس نداشت. رنگ ورقه‌های سیر زمانی مطلوب است که نمونه خشک شده دارای بیش‌ترین

مقدار شفافیت و کم‌ترین مقدار قرمزی باشد (Chua *et al.*, 2003; Rasolui *et al.*, 2011) بر این اساس می‌توان گفت که در این خشک‌کن الگوهای الف، ب و دما ثابت ۵۰ درجه سلسیوس، دارای بهترین رنگ هستند. Nalbandi *et al.* (2021) نیز نتایج مشابهی در خشک‌کردن ورقه‌های سیر با روش دما متغیر هوای گرم گزارش کردند.

چروکیدگی

کیفیت محصولات خشک‌شده با فاکتورهای مختلف از جمله مقدار چروکیدگی آن در پایان فرآیند خشک‌شدن ارزیابی می‌شود. با اندازه‌گیری تغییرات حجم و محاسبه درصد چروکیدگی ورقه‌های سیر انتهای فرآیند مشخص شد که روش و دمای خشک‌کردن تأثیر معنی‌داری روی میزان چروکیدگی ورقه‌های سیر نداشت. بنابراین درصد چروکیدگی نهایی در پایان فرآیند خشک‌کردن در همه دماهای مورد مطالعه تقریباً به هم نزدیک بود و در محدوده ۰.۶۳-۰.۵۶٪ قرار داشت. با توجه به نتایج به دست آمده در این خشک‌کن می‌توان گفت که تغییر دمای خشک‌کردن در فرآیند خشک‌کردن با مادون‌قرمز، تأثیری بر مقدار چروکیدگی محصول ندارد. Ahmadi *et al.* (2020) در فرآیند خشک‌کردن نمونه‌های موز نشان دادند که تأثیر دما و ضخامت ورقه‌های موز روی درصد چروکیدگی نمونه‌ها معنی‌دار نیستند. چروکیدگی ورقه‌های موز به صورت تابعی از محتوی رطوبت محصول طی فرآیند خشک‌کردن تغییر می‌کند. ایشان درصد چروکیدگی ورقه‌های سیر را در محدوده ۰.۸۵-۰.۸۱٪ گزارش کردند. عدم تأثیر دمای خشک‌کردن روی درصد چروکیدگی ورقه‌های سیر توسط Rasolui *et al.* (2011) نیز گزارش شده است. ایشان درصد چروکیدگی ورقه‌های سیر را در محدوده ۰.۷۱-۰.۶۷٪ گزارش کرد. Yang *et al.* (2018) نیز عدم تأثیر تابش فراصوت و دمای خشک‌کردن روی درصد چروکیدگی را گزارش کرده‌اند.

دانسیتته واقعی

تغییرات دانسیتته واقعی ورقه‌های سیر در طول فرآیند خشک‌کردن با توجه به تغییرات حجم نمونه‌ها محاسبه شد. روش و دمای خشک‌کردن روی دانسیتته واقعی نمونه‌ها اثر معنی‌داری نداشت. دانسیتته واقعی ورقه‌های سیر در خشک‌کن مادون‌قرمز بین ۱۰۶۱ تا ۱۶۲۶

کیلوگرم بر مترمکعب قرار داشت. دانسیتته واقعی اولیه ورقه‌های سیر ۱۰۲۳ کیلوگرم بر متر مکعب بود که نتایج حاکی از آن است که در طول فرآیند خشک‌کردن، دانسیتته واقعی نمونه‌ها افزایش یافته است. Ahmadi *et al.* (2020) در فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های موز با استفاده از خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-مادون‌قرمز نتایج مشابهی به دست آوردند. ایشان در مطالعه خود بیان کردند که مقادیر دانسیتته واقعی طی فرآیند خشک‌شدن افزایش یافته است ولی دما و ضخامت نمونه‌ها اثر معنی‌داری روی این شاخص نداشته و تغییرات آن فقط تابع محتوی رطوبت نمونه‌ها است. Rasolui *et al.* (2011) گزارش کرد که مقدار دانسیتته واقعی ورقه‌های سیر با کاهش محتوی رطوبت آن‌ها به مقدار جزئی افزایش پیدا می‌کند و این افزایش مقدار جزئی به خاطر کاهش حجم در مراحل پایانی است. ایشان بیشترین مقدار دانسیتته واقعی نهایی ورقه‌های سیر را در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۳ و ۴ میلی‌متر به ترتیب ۱۳۲۹/۴ تا ۱۴۱۲/۸ کیلوگرم بر مترمربع گزارش کرد.

محتوی آنتی‌اکسیدان و پلی‌فنل نمونه‌های سیر در فرآیند خشک‌کردن با مادون‌قرمز

مقدار اولیه آنتی‌اکسیدان در نمونه‌های سیر تازه پس از پیش تیمار حدود ۶/۶۳ درصد بود که مقدار آن در پایان فرآیند تحت تأثیر روش و دمای خشک‌کردن قرار گرفت (جدول ۱). بیش‌ترین میزان آنتی‌اکسیدان با مقدار ۴/۴۹ درصد در نمونه‌های خشک‌شده در الگوی الف به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با تیمار دما ثابت ۶۰ درجه سلسیوس و الگوی ب نداشت. در دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس کمترین میزان آنتی‌اکسیدان مشاهده شد (جدول ۲). طولانی بودن زمان فرآیند در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، منجر به تخریب بیشتر ساختارهای آنتی‌اکسیدان گردید (Hwang *et al.*, 2012). براین اساس افزایش دمای خشک‌کردن از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس توانست آنتی‌اکسیدان بیشتری در نمونه‌ها حفظ کند ولی افزایش بیشتر دما از ۶۰ به ۷۰ درجه سلسیوس محتوی آنتی‌اکسیدان را کاهش داد. هم‌چنین استفاده از روش دما متغیر نیز توانست آنتی‌اکسیدان بیشتری را نسبت به دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس حفظ کند.

متغیر از نظر مصرف انرژی هم نسبت به زمان کاربرد دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس نیز به مراتب بهتر بود ضمن اینکه دارای تغییرات رنگ کمتری نسبت به دما ثابت ۷۰ درجه سلسیوس بود. بنابراین اعمال روش دما متغیر در کاهش میزان مصرف انرژی و حفظ خواص کیفی موفقیت‌آمیز بود.

منابع

- Abano, E. E., Ma, H., Qu, W. & Teye, E. (2011). Modeling pre-treatments effect on drying kinetics of garlic (*Allium sativum* L) slices in a convective hot air dryer. *Food Science*, 5(7), 425-435.
- Ahmadi, P., Seiiedlou, S. & Nalbandi, H. (2020). Development, assessment and evaluation of a combined infrared and hot-air dryer to determine its performance characteristics during banana slice drying. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 15(5), 623-634 (In Persian).
- AOAC. (2019). Official Method of Analysis, 21st edn. Association of Official Analytical Chemists (No. 934.06), Arlington.
- Chakraverty, A. & Poul, S. R. (2001). *Postharvest Technology: Cereals, Pulses and Vegetables*. India: Science Publishers. Inc, 183-188.
- Chua, K. J., Chou, S. K., Hawlader, M. N. A., Mujumdar, A. S. & Ho, J. C. (2002). Modelling the moisture and temperature distribution within an agricultural product undergoing time- varying drying schemes. *Biosystems Engineering*, 81(1), 99-111.
- Chua, K. J., Mujumdar, A. S. & Chou, S. K. (2003). Intermittent drying of bioproducts – an overview. *Bioresource Technology*, 90(3), 285-295.
- Hossein Nia, H., Nalbandi, H., Seiiedlou, S. & Alizadeh Salteh, S. (2023). Utility of heating pattern with variable air temperature in drying; effects on drying time, energy consumption, and product quality. *Food Science and Technology International*. Published Online.
- Holdsworth, S. D. & Simpson, R. (2015). *Thermal Processing of Packaged Foods*. Springer.
- Hwang, I. G., Shin Y. J., Lee, S., Lee, J. & Yoo S. M. (2012). Effects of Different Cooking Methods on the Antioxidant Properties of Red Pepper (*Capsicum annum* L.). *Preventive Nutrition and Food Science*, 14, 286-292.
- Kaveh, M., Rasooli Sharabiani, V., Amiri Chayjan, R., Taghinezhad, E., Abbaspour-

بر خلاف محتوی آنتی‌اکسیدان، محتوی پلی‌فنل نمونه‌ها تحت تأثیر روش و دمای خشک کردن قرار نگرفت (جدول ۱) و میزان پلی‌فنل باقی‌مانده در نمونه‌ها پس از خشک شدن در محدوده ۱/۶۶۷ تا ۲/۲۲۹ میلی‌گرم گالیک اسید در هر گرم جرم ماده خشک ماده بود. میزان آنزیم پلی‌فنل باقی‌مانده در محدوده ۱/۵۹۵ تا ۱/۹۱۳ میلی‌گرم گالیک اسید در هر گرم جرم خشک ماده بود که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار آنزیم پلی‌فنل به ترتیب مربوط به تیمار دما ثابت ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس است.

Lilia et al. (2008) اثر چرخه دمایی ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس و ۶۰ به ۴۰ درجه سلسیوس را روی فعالیت آنزیم آلیناز در فرآیند خشک کردن سیر مورد مطالعه قرار دادند و نتایج حاصل را با خشک کردن مداوم در دمای ثابت ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس مقایسه کردند. بر اساس نتایج حاصل در چرخه دمایی ۶۰ به ۴۰ درجه سلسیوس، ظرفیت تولید آلیسین در حدود ۹۱٪ حفظ شد. درحالی که در خشک کردن با دمای ثابت ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس این مقدار حدود ۹۰٪ و ۷۴٪ بود. نتایج مشابهی در این زمینه توسط سایر محققین گزارش شده است (Lakshimi et al., 2018).

نتیجه‌گیری

دستیابی به یک الگوی جدید برای خشک کردن محصولات حساس به گرما با حفظ کیفیت محصول و همزمان با کاهش زمان خشک شدن و کاهش انرژی مصرفی و نیز جلوگیری از تخریب مواد مؤثر محصول هدف اصلی این تحقیق بود. فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیر به دو روش خشک کردن با دما ثابت و نیز کاربرد الگوهای مختلف دما متغیر در خشک‌کن مادون‌قرمز مورد آزمایش قرار گرفتند. مقایسه خصوصیات کیفی، زمان خشک شدن و میزان مصرف انرژی در تیمارهای مورد مطالعه نشان داد که استفاده از دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه و سپس ادامه فرآیند خشک کردن با دمای ۵۰ درجه، در اغلب مشخصات کیفی محصول سیر خشک تولیدی، مانند تغییرات کلی رنگ، چروکیدگی، دانسیته واقعی و محتوی پلی‌فنل هم‌تراز نمونه‌های خشک شده با دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس بود. با این وجود، درصد آنتی‌اکسیدان باقی‌مانده در ورقه‌های سیر در این الگو بیشتر از دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس بود. همچنین این روش دما

- drying performance and uniformity of heat distribution. *Innovative Food Technologies*, 7(2), 313-326 (In Persian)
- Szadzinska J. (2014). Influence of convective-intermittent drying on the kinetics, energy consumption and quality of green pepper. A research project (in Persian).
- Yaldiz, O., Ertekin, C. & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.
- Yang, T., Jinglin, Z., Sirui, J., Yiqun, X., Pau-Loke, S., Yongbin, H., Xiaosong, Y. & Mingru, Y. (2018). Contacting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation. *Journal of Food Engineering*, 235, 79-88.
- Younis, M., Abdelkarim, D. & Zein El-Abdein, A. (2018). Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25, 332-338.
- Gilandeh, Y. & Golpour, I. (2018). ANFIS and ANNs model for prediction of moisture diffusivity and specific energy consumption potato, garlic and cantaloupe drying under convective hot air dryer. *Information Processing in Agriculture*, 5, 372-387.
- Kowalski, S. J. & Pawłowski, A. (2011). Energy consumption and quality aspect by intermittent drying. *Chemical Engineering and Processing*, 50(4), 384-390.
- Lakshimi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A. & Nayak, P. K. (2018). Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renewable Energy*, 120, 23-34.
- Lechtanska, J. M., Szadzinska, J. & Kowalski, S. J. (2015). Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper Quality and energy considerations. *Chemical Engineering and Processing*, 98, 155-164
- Lilia, L., Mendez, L. & Franchois, C. (2008). Effect of temperature cycling on allinase activity in garlic. *Food Chemistry*, 111, 56-60.
- Lopez-Ortiz, A., Rodriguez-Ramirez, J., Mendez-Lagunasc, L. L., Martynenkod, A. & Pilatowsky-Figueroa, I. (2018). Non-isothermal drying of garlic slices (*Allium sativum*, L.): Wave period and initial temperature of the heating/cooling effect. *Food and Bioproducts Processing*, 111, 83-92.
- Lucky, A. P. A. & Adewale, F. J. (2018). Data on Exergy and Exergy Analyses of Drying Process of Onion in a Batch Dryer. *Chemical Engineering*, 21, 1784-1793.
- Midilli, A., Kucuk, H. & Yapar, Z. 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20, 1503-1513.
- Nalbandi, H., Seiedlou, S. & Alizadeh, B. (2021). Application of non-isothermal simulation in optimization of food drying process. *Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 2325-2336.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R. & Chen, G. (2019). The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. *Journal of Food Engineering*, 241, 75-87.
- Rasouli, M., Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H. R. & Nalbandi, H. (2011). Convective drying of garlic (*Allium sativum* L.): Part I: Drying kinetics, mathematical modeling and change in color. *Australian Journal of Crop Science*, 5(13), 1707-1714.
- Seiedlou, S., Nalbandi, H. & Bidaghi, A. (2020). Determination of performance parameters of infrared dryer to increase

Research paper

Utility of the variable temperature method for drying garlic slices with IR, along with assessing performance characteristics and the quality of the final product

H. Nalbandi^{1*}, S. Seyedlou² and R. Hossein Nia³

Abstract

The utilization of infrared light at a variable temperature for drying agricultural products is a novel technique that has been introduced to enhance energy efficiency and maintain the quality of the final product. The aim of this study was to evaluate the effect of various variable temperature patterns in infrared dryer on the quality properties of garlic slices, drying time, and energy consumption. Also, the best pattern for changing the drying temperature must be determined. Therefore, the garlic slices were dried in an infrared dryer at a consistent temperature of 50, 60, and 70 °C and at varying temperatures with two different patterns. In the first pattern (I), drying began at 60 °C and was lowered to 50 °C once the sample's surface temperature reached 50 °C. In pattern II, drying started at 70 °C and lasted 30 minutes before decreasing to 50 °C. Drying time, energy consumption, and qualitative characteristics such as shrinkage, true density, color changes, and antioxidants and polyphenols content were evaluated. The findings indicated that the energy consumption for pattern II in the variable drying method was 1.16 kWh, whereas at a constant temperature of 70 °C it was 0.76 kWh. Given that pattern II resulted in fewer color changes (4.92) compared to 14.22 at a constant temperature of 70 °C, it is preferable to use pattern II in the variable drying method. In addition, the samples dried with method II showed appropriate levels of antioxidants. Hence, the variable drying method in pattern II is preferred over constant temperature.

Keywords: Antioxidant, Color, Drying, Energy consumption, Garlic, Polyphenol, Variable temperature.

Citation: Nalbandi H. Seyedlou S. and Hossein Nia R. 2025. Utility of the variable temperature method for drying garlic slices with IR, along with assessing performance characteristics and the quality of the final product. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*. 31: ??-??. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2025.14918.719>

1- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- M.Sc. student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* **Corresponding Author:** h.nalbandi@tabrizu.ac.ir

Received: 2024/09/08 Accepted: 2025/01/18

<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2025.14918.719>