

### Journal Pre-proofs

Simultaneous use of combined hot air-infrared methods by various cycles of intermittent infrared during the drying process of carrot slices

Habibeh Nalbandi, Sadegh Seyedlou, Maryam Ranjouri

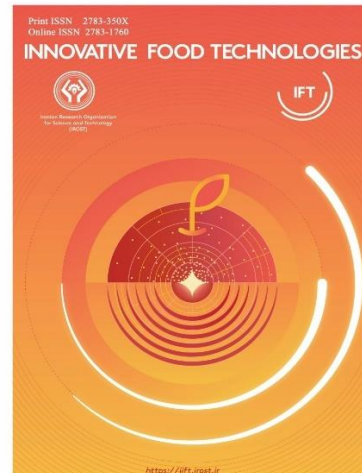
DOI: [https://doi.org/ 10.22104/ift.2026.8217.2292](https://doi.org/10.22104/ift.2026.8217.2292)

To appear in: *Innovative Food Technologies (IFT)*

Received Date: 29 April 2026

Revised Date: 15 June 2026

Accepted Date: 21 June 2026



Please cite this article as: Habibeh Nalbandi, Sadegh Seyedlou, Maryam Ranjouri, Simultaneous use of combined hot air-infrared methods by various cycles of intermittent infrared during the drying process of carrot slices, *Innovative Food Technologies* (2026), doi: [https://doi.org/ 10.22104/ift.2026.8217.2292](https://doi.org/10.22104/ift.2026.8217.2292)

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2026 The Author(s). Published by irost.org.

## کاربرد هم‌زمان روش‌های ترکیبی هوای گرم - مادون قرمز با الگوهای مختلف تناوب مادون قرمز در فرآیند خشک کردن ورقه‌های هویج

حبیبه نعلبندی<sup>۱\*</sup>، صادق سیدلو<sup>۲</sup>، مریم رنجوری<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز (نویسنده مسئول): [h.nalbandi@tabrizu.ac.ir](mailto:h.nalbandi@tabrizu.ac.ir);

[habibehnalbandi@yahoo.com](mailto:habibehnalbandi@yahoo.com)

<sup>۲</sup> استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

### چکیده

خشک کردن محصولات در کوتاه‌ترین زمان و با حداقل مصرف انرژی و با کیفیت بالا، مهم‌ترین هدف حوزه فرآوری محصولات کشاورزی است که برای حصول آن، روش‌های مختلفی مانند خشک‌کن‌های ترکیبی و استفاده از روش تناوب توسعه یافته‌اند. برای بهره‌مندی از اثرات مثبت هر دو روش، در این تحقیق، فرآیند خشک کردن ورقه‌های هویج با استفاده از خشک‌کن ترکیبی هوای گرم مداوم- مادون قرمز تناوب همراه با مطالعه تاثیر الگوهای مختلف تناوب مادون قرمز از نظر مدت زمان روشن و خاموش بودن رادیاتورهای مادون قرمز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل با تیمار شاهد یعنی خشک کردن با هوای گرم مداوم- مادون قرمز مداوم مورد مقایسه قرار گرفت. هم‌چنین خشک کردن نمونه‌ها به روش‌هایی مانند کاربرد هوای گرم منفرد و مادون قرمز منفرد انجام شد و تاثیر روش‌های خشک کردن مذکور روی زمان فرآیند، ضریب نفوذ موثر رطوبت، دانسیته واقعی، چروکیدگی و تغییرات رنگ کلی محصول خشک نهایی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد تیمار هوای گرم مداوم- مادون قرمز تناوب با دوره تناوب ۱۰ دقیقه روشن- ۱۰ دقیقه خاموش، توانست بالاترین خواص کیفی را در محصول موجب شود ضمن اینکه زمان فرآیند برای کاهش رطوبت از ۷/۵ به ۰/۳ گرم آب بر گرم ماده خشک در حد واسط زمان روش‌های خشک کردن ترکیبی بدون تناوب و مادون قرمز منفرد و همرفتی منفرد بود. دانسیته واقعی، چروکیدگی و تغییرات رنگ کلی محصول در این تیمار به ترتیب با مقدار ۱/۰۴۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب، ۸۳/۹۴ درصد و ۷/۴۷ کمترین مقدار را بین تیمارهای مورد مطالعه داشت. با این وجود زمان فرآیند (۲۰۲ دقیقه) در این تیمار ۱۷/۸ درصد نسبت به تیمار هوای گرم مداوم- مادون قرمز مداوم بیشتر بود. در مقابل مصرف انرژی به دلیل ۵۰ درصد زمان خاموشی مادون قرمز، نسبت به روش مداوم کمتر بود. بنابراین می‌توان بیان نمود روش ترکیبی تناوب با دوره تناوب ۱۰ دقیقه روشن- ۱۰ دقیقه خاموش مادون قرمز، موجب حفظ بیشترین کیفیت در محصول خشک- شده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن ترکیبی، مادون قرمز، هوای گرم، خشک کردن تناوب، ویژگی‌های کیفی.

خشک کردن یکی از روش‌های بسیار موثر و پرکاربرد در حفظ و نگهداری محصولات کشاورزی و مواد غذایی است که یک فرآیند انرژی بر نیز محسوب می‌شود. مصرف بالای انرژی در این فرآیند، قیمت نهایی محصولات خشک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین کاهش ارزش غذایی محصول خشک شده نسبت به محصولات تازه، تا حدودی اتفاق می‌افتد. همه این عوامل موجب شده است که روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش زمان فرآیند و در عین حفظ کیفیت محصول نهایی توسعه یابند که شامل استفاده از انواع پیش‌تیمارها، استفاده از منابع گرمایش مختلف (تغییر نوع منبع حرارت‌دهی)، استفاده هم‌زمان از چند منبع گرمایشی (خشک کردن ترکیبی) و یا تغییر در الگوی حرارت‌دهی محصول (مانند خشک کردن متناوب و یا کاربرد روش دما متغیر) می‌باشد.

استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف از قبیل پیش‌تیمارهای شیمیایی و فیزیکی مانند عملیات بلانچینگ، سولفور کردن، پیش-تیمار اولتراسوند، اسمز و یا میکروویو روی محصول، قبل از شروع فرآیند خشک کردن، از طریق تاثیرگذاری روی آنزیم‌های محصول، ایجاد تغییر در بافت محصول، افزایش تخلخل، تشکیل مسیرهای انتقال رطوبت و کاهش مقاومت داخلی و یا سطحی محصول در برابر خروج آب، موجب افزایش آهنگ خشک شدن و به تبع آن کاهش زمان فرآیند و مصرف انرژی می‌شوند. همچنین این پیش‌تیمارها در اغلب موارد موجب حفظ کیفیت محصول خشک شده نیز می‌شوند [۱، ۲]. رستمی با روح و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که با استفاده از اولتراسوند با شدت ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه و کاربرد میکروویو با شدت یک وات بر گرم محصول به مدت ۱۵ دقیقه، زمان خشک شدن ورقه‌های هویج به ترتیب ۱۵/۳ و ۵ درصد کاهش یافت [۳]. نتایج مشابهی نیز در خصوص کاربرد پیش‌تیمار توسط سایر محققین گزارش شده است [۴، ۵، ۶].

نوع منبع حرارتی مورد استفاده در فرآیند خشک کردن نیز روی آهنگ خشک شدن و کیفیت محصول نهایی موثر است. به عنوان مثال خشک کردن با هوای گرم و یا تابش امواج مادون قرمز، دارای ضرایب تبدیل انرژی متفاوتی می‌باشند به طوری که حداکثر ضریب تبدیل انرژی (راندمان حرارتی) در خشک‌کن‌های همرفتی حداکثر ۳۰ درصد و در خشک‌کن‌های مادون قرمز ۶۰ درصد گزارش شده است [۷]. تفاوت در ضریب تبدیل انرژی مستقیماً در میزان مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن موثر می‌باشد. بالا بودن ضریب تبدیل انرژی در منابع حرارتی جدید مانند مادون قرمز و افزایش آهنگ خشک شدن و به تبع آن کاهش زمان فرآیند، در کیفیت محصول نهایی نیز موثر است. نعلبندی و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که زمان خشک شدن ورقه‌های سیر با تابش مادون-قرمز در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، ۱۲۲ دقیقه بود که ۱۰ درصد کمتر از زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن هوای گرم با دمای یکسان به دست آمد. در خشک کردن نمونه‌ها با دمای ۷۰ درجه سلسیوس، استفاده از مادون قرمز موجب کاهش ۳۰ درصدی زمان فرآیند نسبت به خشک کردن نمونه‌ها با هوای گرم گردید [۸].

خشک کردن ترکیبی با استفاده از چند منبع گرمایی مختلف به صورت هم‌زمان نیز یکی دیگر از روش‌های کارآمدی است که تاثیر بسزایی در افزایش آهنگ خشک شدن و کاهش زمان فرآیند دارد. اما علی‌رغم کاهش زمان فرآیند، به دلیل استفاده هم‌زمان از دو منبع گرمایشی، الزاماً به معنای کاهش مصرف انرژی نمی‌باشد. برخی محققین افزایش کیفیت محصول را در این روش‌ها نسبت به روش خشک کردن منفرد گزارش کردند. جیوارادینام و همکاران (۲۰۲۱) تاثیر خشک کردن ترکیبی هوای گرم مداوم-مادون قرمز مداوم را روی کاهش زمان فرآیند و حفظ کیفیت زردچوبه مطالعه نموده و گزارش کردند که زمان خشک شدن محصول در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در خشک کردن ترکیبی در مقایسه با خشک کردن با هوای گرم منفرد و مادون قرمز منفرد، به ترتیب ۳۵/۲۱ درصد و ۲۶/۹۸ درصد کمتر بود [۹]. ژیو و همکاران (۲۰۲۲) فرآیند خشک کردن گیاه دارویی آنوکتوچیلوس<sup>۱</sup> را با استفاده از پرتو مادون قرمز و روش ترکیبی مادون قرمز با هوای گرم مطالعه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از خشک کردن ترکیبی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن محصول را ۳۵/۲ درصد نسبت به مادون قرمز منفرد در همان دما، کاهش داد. بهترین کیفیت

<sup>1</sup> Anoectochilus

محصول در نمونه‌های خشک‌شده به روش ترکیبی هوای گرم مداوم- مادون‌قرمز مداوم در دمای ۶۰ درجه سلسیوس حاصل شد و ترکیبات فرار محصول در این روش بهتر حفظ شدند [۱۰].

اما ذکر این نکته حائز اهمیت است که برخی از منابع گرمایی مانند مادون‌قرمز، علی‌رغم کاهش زمان فرآیند و مصرف انرژی، موجب افت کیفیت در برخی محصولات می‌شوند زیرا مکانیسم انتقال گرما به گونه‌ای است که امواج مادون‌قرمز غالباً روی سطح محصول متمرکز و جذب شده و افزایش بیش از حد دمای سطح محصول موجب تغییرات شدید رنگ آن محصول می‌گردد. سلوی و همکاران (۲۰۲۰) گزارش نمودند که در خشک‌کردن گلبرگ‌های رز به وسیله خشک‌کن مادون‌قرمز، با افزایش دمای خشک‌کردن از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن نمونه‌ها ۱۸ دقیقه کاهش یافت، اما تغییرات معنی‌داری در رنگ و شاخص‌های ظاهری محصول مشاهده گردید به طوری که در دماهای بالاتر تغییر رنگ نمونه‌ها شدیدتر بود [۱۱].

همچنین در خشک‌کن‌های ترکیبی زمانی که از دو منبع گرمایش به صورت هم‌زمان استفاده می‌شود، افزایش شدید دمای محصول صدمات زیادی به کیفیت محصول به خصوص ترکیبات حساس به گرما وارد می‌کند. امید و همکاران (۲۰۲۳) فرآیند خشک‌کردن ترکیبی هوای گرم مداوم- مادون‌قرمز مداوم ورقه‌های هویج را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از هوای گرم و مادون‌قرمز، زمان خشک‌شدن محصول را نسبت به خشک‌کردن همرفتی منفرد ۲۵ الی ۴۰ درصد کاهش داد. با این حال، در سطوح بالاتر شدت تابش مادون‌قرمز، دمای سطح محصول به بیش از ۷۵ درجه سلسیوس افزایش یافت که منجر به افزایش معنی‌دار تغییر رنگ محصول مانند کاهش روشنایی محصول و افزایش شاخص قهوه‌ای شدن گردید. به عبارت دیگر با اعمال هم‌زمان دو منبع گرمایش با شدت بالا، هرچند زمان فرآیند کوتاه‌تر شد اما گرم‌شدن بیش از حد سطح محصول، تخریب رنگدانه‌ها را تشدید نموده و موجب افت کیفیت ظاهری محصول گردید. بدیهی است مصرف انرژی به دلیل استفاده هم‌زمان و دائم از دو منبع گرمایشی به مراتب بالاتر خواهد بود [۱۲].

به منظور جلوگیری از افزایش بیش از حد دمای محصول در فرآیند خشک‌کردن به ویژه در روش‌های ترکیبی و جلوگیری از بروز صدمات حرارتی در محصول و نیز کاهش مصرف انرژی، تغییر الگوی حرارت‌دهی به عنوان یکی از روش‌های موثر مورد استفاده قرار گرفته است که به دو روش خشک‌کردن دما متغیر و یا متناوب انجام می‌شود.

در روش خشک‌کردن با دما متغیر، در ابتدای فرآیند که مقدار رطوبت آزاد محصول بالا می‌باشد، از دمای بالاتری برای خشک‌کردن می‌توان استفاده کرد؛ ولی با کاهش محتوی رطوبت سطحی محصول، به منظور جلوگیری از گرمایش سطح محصول، دمای منبع گرمایی کاهش داده می‌شود که ضمن کاهش مصرف انرژی، در اغلب موارد باعث حفظ بهتر کیفیت محصول می‌شود [۱۳]. حسین‌نیا و همکاران (۲۰۲۵) اثر خشک‌کردن همرفتی به روش کاربرد دمای متغیر را روی فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های سیر مطالعه کردند. نتایج نشان داد زمانی که فرآیند خشک‌کردن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس شروع شده و پس از ۳۰ دقیقه، دمای فرآیند به ۵۰ درجه سلسیوس کاهش داده شد و تا پایان فرآیند حفظ می‌شود، زمان خشک‌شدن ۴۱ دقیقه نسبت به دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس کاهش یافت. ضمن اینکه رنگ و کیفیت محصول نیز مشابه نمونه‌های خشک‌شده در دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس باقی ماند [۱۴]. استفاده از این الگوی حرارت‌دهی در خشک‌کردن مادون‌قرمز ورقه‌های سیر نیز موجب کاهش ۱۰ درصدی (۱۳ دقیقه) زمان خشک‌شدن نمونه‌ها نسبت به دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس گردید [۸].

در خشک‌کردن متناوب (با یک منبع گرمایشی)، منبع گرمایشی به صورت متناوب و در بازه‌های زمانی معینی خاموش و یا دمای آن کاسته می‌شود. به این ترتیب با بهره‌گیری از پتانسیل حرارتی خود ماده (گرمای ذخیره شده در ماده) در دوره خاموشی، تبخیر رطوبت محصول ادامه می‌یابد. در این روش، هرچند زمان فرآیند طولانی‌تر از خشک‌کردن مداوم است ولی کیفیت محصول به دلیل جلوگیری از گرمایش بیش از حد محصول، در بیشتر موارد بهتر حفظ می‌شود. لی و همکاران (۲۰۲۴) گزارش دادند خشک‌کردن ترکیبی هوای گرم مداوم- مادون‌قرمز مداوم زمان خشک‌کردن عنب را نسبت به خشک‌کردن با هوای گرم منفرد ۲۰ الی ۳۰ درصد کاهش داد اما کیفیت محصول تحت تأثیر دمای بالای حاصل از دو منبع گرمایشی قرار گرفت که موجب افزایش تغییرات رنگ محصول و ساختار بافت و ترکیبات حساس به گرما نسبت به خشک‌کردن انفرادی هوای گرم و مادون‌قرمز گردید. اما

در حالت ترکیبی، استفاده از هوای گرم مداوم و مادون قرمز متناوب توانست رنگ محصول و مواد مغذی را در مقایسه با روش ترکیبی مداوم بهتر حفظ کند. هم‌چنین در این روش راندمان حرارتی خشک کردن افزایش و مصرف انرژی کاهش یافت [۱۵]. اما آنچه که عملکرد خشک کردن به روش متناوب را تحت تاثیر قرار می‌دهد دوره تناوب بهینه است. تحقیقات زیادی نشان دادند که تغییر در دوره تناوب موجب تغییر در زمان خشک شدن محصول و یا تغییر در خواص کیفی آن می‌شود. هیونگ و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که در خشک کردن متناوب دانه‌های کاملیا اولیفر با خشک کن میکروویو، افزایش زمان اعمال میکروویو باعث کاهش زمان خشک شدن نمونه‌ها شد به طوری که در تناوب‌های ۲ دقیقه روشن- ۲ دقیقه خاموش، ۳ دقیقه روشن- ۲ دقیقه خاموش و ۴ دقیقه روشن- ۲ دقیقه خاموش میکروویو، زمان خشک شدن نمونه‌ها به ترتیب ۹۶، ۶۰ و ۴۸ دقیقه بود. هم‌چنین در تناوب‌هایی که زمان روشن بودن میکروویو کمتر از زمان خاموشی آن بود، زمان خشک شدن محصول افزایش یافت [۱۶]. بررسی تاثیر دوره‌های تناوبی مختلف روی زمان خشک شدن و خواص کیفی سیب‌زمینی شیرین نیز توسط اونود و همکاران (۲۰۱۹) نیز بررسی شده است. آنان محصول را با ۴ روش مختلف شامل ترکیبی مداوم، ترکیبی متناوب با تناوب ۲ دقیقه مادون-قرمز- ۴ دقیقه هوای گرم، ترکیبی- ترتیبی به صورت استفاده از مادون قرمز منفرد به مدت ۹۰ دقیقه و بعد از آن کاربرد هوای گرم تا انتهای فرآیند و ترکیبی- ترتیبی به صورت استفاده از هوای گرم منفرد به مدت ۹۰ دقیقه و بعد از آن کاربرد مادون قرمز تا انتهای فرآیند، خشک نمودند. نتایج نشان داد کمترین درصد چروکیدگی نمونه‌ها در روش ترکیبی متناوب برابر ۶۸ درصد و ترکیبی مداوم با مقدار ۷۰/۷۱ درصد و کمترین تغییرات کلی رنگ نمونه‌ها در این روش حاصل شد. در روش ترکیبی- ترتیبی ۹۰ دقیقه هوای گرم- مادون قرمز تا انتهای فرآیند، بیشترین چروکیدگی محصول حاصل شد. زمان خشک شدن نمونه‌ها در روش ترکیبی متناوب با ۱۱۳ دقیقه کمتر از روش ترکیبی- ترتیبی (۱۲۵ دقیقه) بود [۱۷].

بنابراین با توجه به اثرات مثبت کاربرد خشک کن ترکیبی و نیز اعمال دوره تناوب روی زمان فرآیند و کیفیت محصول نهایی، در این تحقیق مقایسه هم‌زمان روش‌های تناوبی با همرفتی منفرد و مادون قرمز منفرد در خشک کردن ورقه‌های هویج بررسی شده است که از جمله نوآوری تحقیق حاضر می‌باشد. در این راستا تاثیر همه روش‌ها و موارد مذکور روی فرآیند خشک شدن ورقه‌های هویج و خواص مهندسی و کیفی آن مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تیمارهای مورد مطالعه

در این مطالعه، ۶ روش خشک کردن شامل خشک کردن با هوای گرم منفرد، مادون قرمز منفرد، ترکیبی هوای گرم مداوم- مادون قرمز مداوم و نیز روش ترکیبی هوای گرم مداوم- مادون قرمز متناوب با سه دوره تناوب متفاوت شامل ۱۰ دقیقه روشن- ۱۰ دقیقه خاموش، ۱۰ دقیقه روشن- ۵ دقیقه خاموش و ۵ دقیقه روشن- ۱۰ دقیقه خاموش مادون قرمز مورد مطالعه قرار گرفت که در جدول ۱ خلاصه تیمارها ارائه شده است.

جدول (۱). تیمارهای مورد مطالعه و شرایط آن‌ها

Table 1. Studied treatment and their condition

### ۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌های هویج از یک منطقه در مزرعه‌ای تهیه و تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. ۲ ساعت قبل از هر آزمایش، نمونه‌ها از یخچال خارج و پس از رسیدن به دمای محیط پوست‌گیری شده و به ورقه‌های مدور با ضخامت ۴ میلی‌متر برش داده شدند.

محتوی رطوبت اولیه نمونه‌های هویج بر اساس استاندارد AOAC با استفاده از آون در دمای ۱۰۲ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد [۱۸].

### ۲-۳- مشخصات خشک کن ترکیبی (هوای گرم- مادون قرمز)

برای انجام فرآیند خشک کردن ورقه‌های هویج، از خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز آزمایشگاهی استفاده شد (شکل ۱). این خشک‌کن از سه بخش اصلی شامل ورودی هوا، محفظه خشک‌کن و خروجی هوا تشکیل شده است. قسمت ورودی هوا متشکل از یک کانال به طول ۱۰۰ سانتی‌متر از جنس آهن گالوانیزه است که در ابتدای آن یک دمنده با توان ۴۵ وات و جریان مصرفی ۰/۲ آمپر و یک گرم‌کن الکتریکی برای گرم کردن جریان هوا قرار داده شده است. توان گرم‌کن‌ها به وسیله یک واحد دیمر قابل تنظیم است.

محفظه خشک‌کن از ورقه‌های MDF با ضخامت ۱۵ میلی‌متر و به ابعاد ۶۰×۷۳×۵۵ سانتی‌متر (طول×عرض×ارتفاع) ساخته شده و سطح داخلی آن با ورقه‌های آلومینیومی عایق شده است. برای تابش امواج مادون قرمز، درون محفظه خشک‌کن ۱۲ لامپ کوآرتز مادون قرمز با توان ۵۰۰ وات برای هر کدام و در دو ردیف بالا و پایین سینی‌ها نصب شدند. طول و قطر هر لامپ به ترتیب ۲۵۰ و ۱۵ میلی‌متر می‌باشد که با فاصله افقی ۵۰ میلی‌متر از یکدیگر نصب شده‌اند. لامپ‌ها روی شاسی‌های متحرک قرار دارند تا بتوان فاصله عمودی لامپ‌ها از سطح سینی محصول را تغییر داد. این فاصله عمودی طوری تنظیم شده است که حداکثر یکنواختی در جذب تابش مادون قرمز توسط محصول صورت گیرد [۱۹]. تنظیم دمای خشک کردن از طریق تغییر ولتاژ لامپ‌های مادون قرمز به وسیله یک واحد دیمر صنعتی و تغییر فاصله عمودی لامپ‌ها از سینی محصول انجام می‌شود. برای ایجاد دوره تناوب برای روشن و خاموش شدن لامپ‌های مادون قرمز، یک زمان‌سنج دیجیتال (Micro Max, DT-104) به خشک‌کن متصل بود. این زمان‌سنج دارای دو حالت تاخیر در اتصال و حالت تکرار کنندگی بود که همراه با یک کنتاکتور مورد استفاده قرار گرفت. دوره تناوب مورد نظر روی تایمر تنظیم گردید و کنتاکتور در زمان‌های مورد نظر، لامپ‌های مادون قرمز را روشن و خاموش می‌نمود. برای قرار دادن محصول در داخل خشک‌کن، دو سینی در داخل محفظه خشک‌کن مجاور یکدیگر قرار داده شده‌اند. سینی اول به یک ترازوی دیجیتال (مدل GF 3000، ژاپن) با دقت  $\pm 0.1$  گرم متصل است که آن نیز به وسیله اتصال R232 به رایانه متصل می‌باشد تا در طول فرآیند خشک کردن، تغییرات جرم نمونه‌های هویج را اندازه‌گیری و ثبت نماید. سینی دوم نیز به صورت ثابت داخل محفظه قرار داده می‌شود تا نمونه‌های مورد نیاز برای اندازه‌گیری تغییرات مشخصه‌های کیفی در طول فرآیند خشک شدن، روی آن قرار داده شوند.

شکل (۱). خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز؛ (۱) ورودی هوا، (۲) محفظه خشک‌کن، (۳) خروجی هوا، (۴) ترازو و (۵) رایانه

Fig 1. Combined hot air- infrared dryer; 1) air inlet, 2) drying chamber, 3) air outlet, 4) digital balance and 5) PC

#### ۴-۲- مشخصات خشک‌کن همرفتی

برای خشک کردن هویج به روش همرفتی از خشک‌کن قفسه‌ای آزمایشگاهی استفاده شد که طرح‌واره آن در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۰]. این خشک‌کن به طول ۱۸۰ سانتی‌متر و سطح مقطع ۲۸×۲۸ سانتی‌متر دارای ۳ بخش شامل بخش ورودی هوا، محفظه خشک‌کن و بخش خروجی هوا می‌باشد. بخش ورودی هوا متشکل از یک دمنده محوری با توان ۶۰ وات برای به جریان در آوردن هوا با سرعت مورد نظر و سه عدد گرم‌کن الکتریکی با توان‌های ۵ کیلووات جهت افزایش دمای هوا می‌باشد. دو عدد خطی‌ساز جریان هوا نیز ما بین دمنده و گرم‌کن‌ها در نظر گرفته شده است که جریان هوا را به صورت خطی و یکنواخت در داخل محفظه خشک‌کن پخش می‌کنند. در محفظه خشک‌کن دو عدد سینی آلومینیومی با فاصله عمودی حدود ۱۰۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار دارند. یکی از سینی‌ها به صورت مستقیم به ترازوی دیجیتال (مدل GF 3000، ژاپن) با دقت  $\pm 0.1$  گرم متصل است که ترازو نیز به کامپیوتر متصل بوده و جرم نمونه‌ها را در طول آزمایش‌ها ثبت می‌نماید و سینی دوم به طور مستقل جهت اندازه‌گیری خواص کیفی به فاصله ۱۰۰ میلی‌متر از کف خشک‌کن قرار گرفته است. در داخل محفظه خشک‌کن حسگرهای دما و رطوبت برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوای محفظه خشک‌کن نصب شده‌اند. برای اندازه‌گیری درصد رطوبت نسبی هوا و کنترل مدت زمان عملیات خشک کردن، یک تابلو فرمان روی خشک‌کن تعبیه شده است. برای کنترل دمای هوای داخل خشک‌کن از یک واحد کنترل کننده سه کاناله دما (AZAST – Autonics) استفاده شده است. اندازه‌گیری رطوبت نسبی هوای داخل خشک‌کن توسط رطوبت‌سنج (SAMWAN ENG, TAIWAN) با دقت ۱ درصد انجام و روی تابلو فرمان نشان داده می‌شود. اندازه‌گیری

سرعت هوا در بخش خروجی هوای خشک کن به وسیله سرعت سنج پره‌ای (AM-4202-Lutro) با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه انجام می‌شود.

شکل (۲). طرح‌واره خشک کن هم‌رفتی؛ ۱) ورودی هوا، ۲) فن، ۳) هیتر، ۴) تابلو فرمان یا محفظه کنترل کننده دما و سرعت هوا، ۵) سینی‌های مشبک، ۶) دریچه محفظه خشک کن (۷) ترازوی دیجیتال، ۸) خروجی هوا

Fig 2. Schematic diagram of the convective dryer; 1) air inlet, 2) fan, 3) heater, 4) air temperature and velocity control panel, 5) trays, 6) entrance of drying chamber, 7) digital balance, 8) air outlet

## ۵-۲- روش انجام آزمایش‌ها

همان‌طوری که بیان شد خشک کردن ورقه‌های هویج با ۶ روش متفاوت در خشک کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز انجام شد که قبل از شروع هر آزمایش، ابتدا دمای خشک کن تنظیم شد که در ادامه نحوه تنظیم آن در هریک از روش‌های خشک کردن بیان شده است.

**خشک کردن ترکیبی به روش هوای گرم مداوم- مادون قرمز مداوم:** قبل از شروع هر آزمایش، برای تنظیم دمای خشک کردن، ابتدا یک قطعه آلومینیومی و چوبی روی سینی محصول قرار داده شد و با تغییر ولتاژ لامپ‌ها و فاصله آنها از سینی، دمای سطح قطعه روی ۶۵ درجه سلسیوس تثبیت شد. سپس با روشن نمودن گرم‌کن‌های قسمت هم‌رفتی، دمای هوای ورودی به خشک کن روی ۶۵ درجه سلسیوس تنظیم شد. هم‌چنین سرعت جریان هوای گرم ورودی به محفظه با استفاده از سرعت‌سنج نوع پره‌ای روی ۱ متر بر ثانیه تنظیم شد که سرعت متعارف هوا در خشک‌کن‌های ترکیبی با پایه مادون قرمز می‌باشد. دمای مورد استفاده در آزمایش‌ها بر اساس نتایج گزارش شده توسط رستمی بارج و همکاران (۲۰۱۷) انتخاب شد [۳]. بر اساس نتایج تحقیق ایشان، ورقه‌های هویج خشک شده تحت دمای ۶۵ درجه سلسیوس از بالاترین خواص کیفی و ظاهری برخوردار بودند.

**خشک کردن ترکیبی به روش هوای گرم مداوم- مادون قرمز متناوب:** دمای لامپ‌های مادون قرمز و دما و دبی هوای گرم مشابه روش خشک کردن ترکیبی به روش هوای گرم مداوم- مادون قرمز مداوم تنظیم شد. برای مطالعه تاثیر دوره تناوب روی زمان خشک شدن و خواص کیفی ورقه‌های هویج، سه دوره تناوب مختلف شامل ۱۰ دقیقه روشن- ۱۰ دقیقه خاموش، ۱۰ دقیقه روشن- ۵ دقیقه خاموش و ۵ دقیقه روشن- ۱۰ دقیقه خاموش لامپ‌های مادون قرمز مورد مطالعه قرار گرفت.

**خشک کردن به روش مادون قرمز منفرد:** در این روش با خاموش کردن گرم‌کن‌های هوای گرم، فرآیند خشک کردن ورقه‌های هویج با تابش مادون قرمز با دمای ۶۵ درجه سلسیوس خشک شدند. هم‌چنین هوای محیط با دمای حدود ۲۲ الی ۲۵ درجه - سلسیوس و سرعت ۱ متر بر ثانیه وارد محفظه خشک کن شده و از روی سینی محصول جهت کاهش رطوبت نسبی محیط خشک- کن، عبور داده شد.

**خشک کردن به روش هوای گرم منفرد:** در این روش نیز برای خشک کردن ورقه‌های هویج از خشک کن هم‌رفتی (شکل ۲) با دمای هوای گرم ۶۵ درجه سلسیوس و سرعت ۱ متر بر ثانیه استفاده شد.

پس از تنظیم خشک کن در هر یک از روش‌های خشک کردن مذکور، حدود ۱۰۰ گرم از ورقه‌های هویج آماده شده، روی سینی اول متصل به ترازو چیده شد و تغییرات جرم آنها در فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای اندازه‌گیری و ثبت شد. برای اندازه‌گیری تغییرات خواص کیفی ورقه‌های هویج در طول انجام عملیات خشک کردن، تعدادی نمونه در سینی دوم قرار داده شده بود و خواص کیفی آنها در ابتدا و انتهای هر آزمایش اندازه‌گیری شد که در بخش‌های بعدی به تفصیل بیان شده است. فرآیند خشک کردن ورقه‌های هویج در همه تیمارهای مورد مطالعه تا رسیدن به رطوبت نهایی ۰/۳ گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک معادل ۲۳ درصد (تر پایه)، ادامه یافت.

## ۶-۲- سینتیک خشک شدن ورقه‌های هویج

پس از اتمام فرآیند خشک شدن ورقه‌های هویج و بر اساس تغییرات ثبت شده جرم نمونه‌های هویج توسط ترازو، به صورت تابعی از زمان این مقادیر جرمی به تغییرات محتوی رطوبت خشک‌پایه نمونه‌ها تابعی از زمان خشک شدن تبدیل و سینتیک مربوطه ترسیم شد. هم‌چنین منحنی‌های آهنگ خشک شدن محصول نیز تابعی از محتوی رطوبت خشک پایه، ترسیم گردید.

#### ۲-۷- محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت ورقه‌های هویج

ضریب نفوذ موثر رطوبت ورقه‌های هویج با استفاده از حل تحلیلی قانون دوم فیک در انتشار در حالت تیغه نامحدود، استفاده از جمله اول سری و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید [۲۱].

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4L_0^2}\right) \quad (1)$$

که در این رابطه،  $D_{eff}$  نشان‌دهنده ضریب نفوذ موثر رطوبت (مترمربع بر ثانیه)،  $MR$  نسبت رطوبت (بی‌بعد)،  $L_0$  نصف ضخامت اولیه نمونه‌ها (متر) و  $t$  زمان خشک شدن (ثانیه) می‌باشد.

با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی در هر تیمار، ضریب نفوذ موثر رطوبت با ترسیم  $\ln(MR)$  در برابر زمان خشک شدن ( $t$ ) بر اساس رابطه ۲ و محاسبه شیب خط برازش شده ( $k_1$ ) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4L_0^2}\right) \quad (2)$$

$$k_1 = \frac{-\pi^2 \cdot D_{eff}}{4L_0^2} \quad (3)$$

#### ۲-۸- اندازه‌گیری تغییرات خواص کیفی و مواد مغذی نمونه‌ها

##### ۲-۸-۱- رنگ محصول

به‌منظور ارزیابی تغییرات رنگ کلی ورقه‌های هویج طی فرآیند خشک شدن، از پنج ورقه هویج در ابتدای هر آزمایش تصویربرداری شد. سپس نمونه‌ها به داخل خشک‌کن منتقل شده و روی سینی دوم قرار داده شدند. در انتهای آزمایش نیز از همان نمونه‌ها مجدد تصویربرداری شد. تصویربرداری با استفاده از دوربین دیجیتال در داخل دستگاه رنگ‌سنج، تحت شرایط ثابت تابش نور در محدوده D60 و پس‌زمینه یکنواخت انجام شد.

شاخص‌های رنگ نمونه‌ها شامل  $L$ ،  $a$  و  $b$  که به ترتیب بیانگر مقدار شفافیت، قرمزی-سبزی و نهایتاً زردی-آبی بودن نمونه-هاست در محیط نرم‌افزار فتوشاپ تعیین شد و تغییرات رنگ کلی نمونه‌ها طی فرآیند خشک کردن در هر تیمار با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_i^*)^2 + (a_0^* - a_i^*)^2 + (b_0^* - b_i^*)^2} \quad (4)$$

در این رابطه، زیرنویس‌های ۰ و  $i$  به ترتیب بیانگر شاخص‌های رنگ هویج تازه و نمونه‌های خشک شده و علامت \* بیانگر مشخصه‌های استاندارد شده هستند. با توجه به اینکه رنگ بخش مرکزی هویج با ناحیه محیطی آن تفاوت دارد، اندازه‌گیری شاخص‌های رنگ برای هر دو قسمت به صورت جداگانه انجام شد و تغییرات رنگ این نواحی در طول فرآیند خشک کردن به طور مستقل مورد ارزیابی قرار گرفت.

##### ۲-۸-۲- اندازه‌گیری حجم و دانسیته واقعی نمونه‌ها

برای اندازه‌گیری تغییرات حجم و دانسیته واقعی ورقه‌های هویج، حجم و جرم نمونه‌ها در ابتدا و انتهای فرآیند خشک کردن اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها، از روش جابه‌جایی تولوئن استفاده شد. ابتدا جرم پیکنومتر حاوی تولوئن اندازه‌گیری شد. سپس جرم ۵ اسلایس هویج اندازه‌گیری شده و داخل پیکنومتر قرار داده شدند و بعد از قرارگیری درپوش، تولوئن مازاد

از پیکنومتر خارج شد. با توزین پیکنومتر حاوی تولوئن و نمونه‌ها، حجم تولوئن جابه‌جا شده که همان حجم نمونه‌ها می‌باشد از رابطه ۵ محاسبه شد [۲۲، ۲۳].

$$V_t = \frac{(m_1 + m_2) - m_3}{\rho} \quad (5)$$

که در این رابطه  $V_t$  نشان‌دهنده حجم تولوئن جابه‌جا شده و برابر حجم ورقه‌های هویج (سانتی‌متر مکعب)،  $m_1$  جرم پیکنومتر حاوی تولوئن (گرم)،  $m_2$  جرم ورقه‌های هویج (گرم)،  $m_3$  جرم پیکنومتر حاوی تولوئن و نمونه‌ها (گرم) و  $\rho$  دانسیته تولوئن (گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد.

نمونه‌ها به خشک‌کن و روی سینی دوم منتقل شدند و پس از اتمام آزمایش، جرم و حجم آن‌ها مجدد اندازه‌گیری شد و دانسیته واقعی محصول با تقسیم جرم به حجم نمونه‌ها محاسبه گردید.

### ۳-۸-۲- اندازه‌گیری چروکیدگی ورقه‌های هویج

درصد چروکیدگی ورقه‌های هویج از رابطه ۶ محاسبه شد.

$$Sh (\%) = (1 - \frac{V_t}{V_o}) \times 100 \quad (6)$$

که در این رابطه  $V_o$  و  $V_t$  به ترتیب حجم ورقه‌های هویج در ابتدا و انتهای فرآیند (سانتی‌متر مکعب) و  $Sh$  چروکیدگی محصول (درصد) می‌باشد.

### ۳-۹-۲- تحلیل آماری آزمایش‌ها

تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، در قالب طرح کاملاً تصادفی با شش تیمار مندرج در جدول ۱ در سه تکرار، در محیط نرم‌افزار MSTAT-C انجام شد. متغیرهای وابسته و یا صفات مورد ارزیابی شامل زمان خشک‌شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، دانسیته واقعی، چروکیدگی و تغییرات کلی رنگ نمونه‌ها بود. مقایسه میانگین‌ها با روش دانکن در سطح احتمال ۱ درصد انجام شد.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- سینتیک خشک‌شدن ورقه‌های هویج

فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های هویج تحت تیمارهای مختلف تا رسیدن محتوی رطوبت نمونه‌ها از رطوبت اولیه ۷/۵ گرم آب بر گرم ماده خشک به رطوبت نهایی ۰/۳ گرم آب بر گرم ماده خشک ادامه یافت و سینتیک خشک‌شدن نمونه‌ها به صورت تغییرات رطوبت آنها تابعی از زمان فرآیند ترسیم شد (شکل ۳).

شکل (۳). سینتیک خشک‌شدن ورقه‌های هویج در تیمارهای مختلف

Fig 3. Drying kinetic of carrot slices at different treatment

همان‌طوری که انتظار می‌رفت تغییرات محتوی رطوبت نمونه‌ها در تمام تیمارهای مورد مطالعه از روند کاهشی به صورت سیگموئیدی برخوردار بود. فرآیند خشک‌شدن ورقه‌های هویج در تیمارهای مختلف در جدول ۳ آورده شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر روش خشک‌کردن و اعمال تناوب‌های مختلف، روی زمان خشک‌شدن ورقه‌های هویج در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۲). زمان خشک‌شدن در روش IR منفرد (۲۴۲ دقیقه)، تفاوت چندانی با روش HA منفرد (۲۵۷ دقیقه) نداشت و زمان خشک‌شدن در روش ترکیبی HA-IR بدون تناوب نسبت به روش‌های منفرد کوتاه‌تر بود که دلیل آن انتقال جرم و گرمای بیشتر در روش HA-IR بدون تناوب نسبت به سایر روش‌ها است.

کاهش زمان خشک‌شدن در روش ترکیبی نسبت به روش‌های خشک‌کردن منفرد نیز توسط سایر محققین بیان شده است. ویشواندان و همکاران (۲۰۱۰) زمان خشک‌شدن ورقه‌های هویج با ضخامت ۵ میلی‌متر در خشک‌کردن HA، IR و ترکیبی HA-IR

را به ترتیب ۳۴۵، ۲۸۵ و ۱۹۵ دقیقه به دست آوردند. اثر هم‌افزایی HA و IR در طی خشک‌کردن ترکیبی HA-IR زمان فرآیند را در مقایسه با خشک‌کردن با HA، حدود ۴۸٪ کاهش داد [۲۴]. جیوارادینام و همکاران (۲۰۲۱) زمان خشک‌شدن زردچوبه در دمای ۷۰ درجه سلسیوس با روش‌های HA، IR و ترکیبی HA-IR به ترتیب ۷۸۰، ۶۶۰ و ۴۸۰ دقیقه گزارش کردند. زمان خشک‌شدن کمتر زردچوبه در روش HA-IR نسبت به IR و HA منفرد مشاهده شد که دلیل اصلی آن انتقال جرم و گرمای بیشتر در روش خشک‌کردن HA-IR نسبت به سایر روش‌ها عنوان شده است [۹]. تیموری و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش نمودند در خشک‌کردن ورقه‌های سیب به روش HA، با افزایش دمای هوا از ۴۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، زمان خشک‌شدن از ۲۳۰ به ۱۲۰ دقیقه کاهش یافت که به دلیل ایجاد گرادیان حرارتی بالاتر در داخل و خارج محصول می‌باشد. در IR، با افزایش شدت تابش مادون‌قرمز از ۲۵۰ به ۷۵۰ وات بر مترمربع، زمان خشک‌شدن نمونه‌ها از ۳۴۰ به ۱۰۰ دقیقه کاهش یافت. حداکثر زمان خشک‌شدن در روش ترکیبی HA 40-IR 250 با مقدار ۲۶۰ دقیقه و حداقل زمان خشک‌شدن در روش ترکیبی HA 70-IR 750 با ۸۰ دقیقه گزارش شد. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از دو منبع باعث کاهش زمان خشک‌شدن ورقه‌های سیب در مقایسه با استفاده انفرادی از هر دو روش می‌شود. آنان دلیل این امر را افزایش دما در قسمت‌های مختلف نمونه‌های سیب در خشک‌کن عنوان کرده‌اند زیرا با توجه به ضخامت کم نمونه‌ها، امواج مادون‌قرمز به عمق نمونه‌ها نفوذ کرده و دمای قسمت‌های زیرین آن‌ها افزایش می‌یابد. در عین حال، دمای قسمت‌های بیرونی با جریان هوای گرم افزایش یافته و به تدریج، اختلاف دمای بین نمونه‌ها با محیط اطراف افزایش می‌یابد که در نهایت میزان حذف رطوبت محصول را افزایش می‌دهد [۷]. عباسپور و همکاران (۲۰۲۱) زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن میوه زالزالک با روش HA و HA-IR را به ترتیب ۴۵۰ و ۱۷۵ دقیقه گزارش کردند [۲۵].

همان‌طوری که بیان شد در این تحقیق کمترین زمان خشک‌شدن نمونه‌های هویج در تیمار HA-IR حاصل شد اما استفاده از منبع مادون‌قرمز به صورت متناوب موجب شد در این تیمارها زمان فرآیند نسبت به تیمار HA-IR طولانی‌تر شود. بعد از تیمار HA-IR با زمان ۱۶۶ دقیقه، زمان خشک‌شدن روش ترکیبی متناوب HA-IR(I:10-10) با ۲۱۹ دقیقه در مقام دوم قرار داشت (جدول ۳). در بین روش‌های متناوب، تیمار HA-IR(I:5-10) بیشترین زمان خشک‌کردن را به خود اختصاص داده بود. لی و همکاران (۲۰۲۴) نیز گزارش نمودند که خشک‌کردن ترکیبی متناوب محصول عناب، علی‌رغم زمان بیشتر، از نظر کیفیت محصول نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد [۱۵].

ذکر این نکته مهم است که در انتخاب روش مناسب برای خشک‌کردن، علاوه بر زمان خشک‌شدن، بایستی به سایر خواص نهایی محصول توجه شود و صرفاً با اتکاء به زمان خشک‌شدن کوتاه، نمی‌توان مناسب‌ترین روش را انتخاب کرد.

جدول (۲). نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مورد مطالعه روی زمان خشک‌شدن،  $D_{eff}$ ، دانسیته واقعی، چروکیدگی و تغییرات رنگ قسمت مرکزی و محیطی ورقه‌های هویج در روش‌های مختلف خشک‌کردن

**Table 2.** ANOVA for the parameters of drying time,  $D_{eff}$ , true density, shrinkage and  $\Delta Ec$  and  $\Delta Eo$  of carrot slices at various drying methods

جدول (۳). مقایسه میانگین زمان خشک‌شدن،  $D_{eff}$ ، دانسیته واقعی، چروکیدگی و تغییرات رنگ کلی قسمت مرکزی و محیطی ورقه‌های هویج در روش‌های مختلف خشک‌کردن

**Table 3.** Mean of drying time,  $D_{eff}$ , true density, shrinkage and  $\Delta Ec$  and  $\Delta Eo$  of carrot slices at various drying methods

## ۲-۳- تغییرات دانسیته واقعی ورقه‌های هویج

دانسیته واقعی ورقه‌های هویج تازه ۱/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد که مقدار آن در انتهای فرآیند خشک‌کردن به طور معنی‌داری تحت تاثیر روش‌های مختلف خشک‌کردن قرار گرفت (جدول ۲). با شروع عملیات خشک‌کردن دانسیته واقعی نمونه‌ها در همه تیمارها افزایش یافت. طی فرآیند خشک‌شدن، رطوبت و حجم محصول به صورت هم‌زمان کاهش می‌یابد اما کاهش بیشتر حجم نسبت به جرم نمونه‌ها، منجر به تراکم بیشتر محصول و افزایش دانسیته واقعی آن می‌گردد که با یافته‌های رستمی باروج و همکاران (۲۰۱۷) در خشک‌کردن ورقه‌های هویج مطابقت دارد [۳]. نکته حائز اهمیت این است که هر چه دانسیته واقعی نمونه‌ها کمتر باشد چروکیدگی کمتر و بازارپسندی محصول بالاتر خواهد بود. بر اساس نتایج تجزیه واریانس مندرج در جدول ۲

بین تیمار شش‌گانه اختلاف معنی‌داری وجود دارد به طوری که در همه روش‌های متناوب، مقدار دانسیته کمتر از روش‌های خشک-کردن منفرد و ترکیبی بدون تناوب بوده است.

مقدار دانسیته ورقه‌های هویج در تیمار متناوب (HA-IR(I:10-10) برابر با  $1/0.43$  گرم بر سانتی‌مترمکعب به دست آمد و در تیمار HA-IR بدون تناوب که کمترین زمان خشک‌شدن را به خود اختصاص داده بود برابر  $1/0.93$  گرم بر سانتی‌مترمکعب به دست آمد.

تاثیر روش خشک‌کردن روی دانسیته واقعی ورقه‌های هویج توسط بایسال و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش شده است به طوری-که دانسیته نمونه‌های خشک‌شده به روش ماکروویو یا IR کمتر از روش HA بود [۲۶]. حسین‌نیا و همکاران (۲۰۲۵) تغییر غیر-معنی‌دار دانسیته واقعی نمونه‌های سیر را تابعی از روش اعمال حرارت و استفاده از دمای متغیر در طی فرآیند را گزارش کردند به-طوری که تاثیر الگوی حرارت‌دهی متغیر روی دانسیته واقعی نهایی نمونه‌ها معنی‌دار نبود [۱۴].

### ۳-۳- چروکیدگی ورقه‌های هویج

نتایج حاصل از آنالیز واریانس درصد چروکیدگی نهایی ورقه‌های هویج خشک‌شده در روش‌های مختلف خشک‌کردن در جدول ۲ ارائه شده است که نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین درصد چروکیدگی نمونه‌ها در سطح احتمال یک درصد می‌باشد که نتایج مقایسه میانگین درصد چروکیدگی نمونه‌ها نیز در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر کمتر چروکیدگی بیانگر کیفیت بهتر و بازارپسندی بیشتر محصول است. درصد چروکیدگی ورقه‌های هویج خشک‌شده در همه تیمارهای متناوب، کمتر از تیمار ترکیبی و یا منفرد (HA و IR) بود. در این میان کمترین چروکیدگی در بین تیمارهای متناوب، مربوط به تیمار HA-IR (10-10) با مقدار  $83/94$  درصد بود که تفاوت معنی‌داری با تیمار تناوبی HA-IR (10-5) نداشت. هم‌چنین تیمار HA-IR بدون تناوب دارای محصول تولیدی با چروکیدگی کمتر نسبت به دو تیمار منفرد HA و IR بود. با اینکه تیمار بدون تناوب HA-IR دارای زمان فرآیند کمتری بود ولی چروکیدگی نمونه‌ها در آن بیشتر از روش تناوبی HA-IR (10-10) گزارش شد.

اونود و همکاران (۲۰۱۹) نیز نتایج مشابهی در خصوص چروکیدگی ورقه‌های سیب‌زمینی گزارش نمودند به طوری که نمونه‌های خشک‌شده به روش ترکیبی متناوب (HA-IR (2-4) از چروکیدگی کمتری (۶۸ درصد) نسبت به نمونه‌های خشک‌شده به روش ترکیبی HA-IR (۷۱/۷۰ درصد) برخوردار بودند [۱۷]. عباسپور و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش نمودند که چروکیدگی زالزالک در روش HA با مقدار  $66/75$  درصد، بیشتر از نمونه‌های خشک‌شده به روش ترکیبی HA-IR (۵۰ درصد) بود [۲۵].

### ۳-۴- تغییرات رنگ کلی ورقه‌های هویج

رنگ محصول خشک‌شده شاید یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفی و معیار قیمت‌گذاری محصول خشک می‌باشد. تغییر رنگ محصول می‌تواند ناشی از زمان طولانی خشک‌کردن یا بالا بودن دمای فرآیند باشد که تغییرات زیاد رنگ نسبت به رنگ اولیه مطلوب نمی‌باشد. تغییرات رنگ کلی ( $\Delta E$ ) ورقه‌های هویج برای نواحی محیطی ( $\Delta E_e$ ) و مرکزی ( $\Delta E_c$ ) آن به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شد که نتایج آن در ادامه ارائه شده‌اند.

#### ۳-۴-۱- تغییرات رنگ کلی ناحیه مرکزی نمونه‌ها

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس، تاثیر روش خشک‌کردن روی تغییرات کلی رنگ قسمت مرکزی نمونه‌های خشک‌شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). به عبارت دیگر اعمال حرارت در طی فرآیند تغییرات معنی‌داری در همه تیمارها روی رنگ قسمت مرکزی هویج موجب شده است. کمترین تغییر رنگ کلی در تیمار HA-IR(10-10) و بیشترین مقدار آن در تیمار HA به ترتیب با مقادیر  $6/44$  و  $14/45$  مشاهده شد (جدول ۳ و شکل ۴). به‌طورکلی خشک‌کردن به روش تناوبی نسبت به روش‌های منفرد و ترکیبی بدون تناوب موجب تغییرات رنگ کمتر شده است و مجدداً در بین روش‌های تناوبی، روش HA-IR(10-10) بهترین انتخاب می‌باشد. هم‌چنین تغییر رنگ محصول در روش ترکیبی HA-IR کمتر از روش‌های HA و IR بود. طولانی‌تر بودن زمان فرآیند در تیمار HA عامل اصلی تغییر رنگ کلی بیشتر محصول بوده است که در اغلب موارد زمانی که محصول به‌طور طولانی در معرض حرارت قرار می‌گیرد، تغییر رنگ در آن بیشتر اتفاق می‌افتد. دلیل اصلی این پدیده در اغلب

تحقیقات چنین عنوان شده است زمانی که رنگ دانه‌های کارتنوئید در معرض حرارت قرار می‌گیرند آماده فروپاشی و اکسایش می‌شوند.

### ۲-۴-۳- تغییرات رنگ کلی ناحیه محیطی نمونه‌ها

همانند تغییر رنگ ناحیه مرکزی ورقه‌های هویج، روش خشک‌کردن روی تغییرات رنگ کلی قسمت محیطی نیز اثر معنی‌داری داشت (جدول ۲) و کمترین تغییرات کلی رنگ قسمت محیطی نمونه‌ها در تیمارهای متناوب مشاهده شد و مجدداً تیمار HA-IR (10-10) کمترین مقدار تغییرات رنگ کلی را با مقدار  $7/473$  به خود اختصاص داد (جدول ۳ و شکل ۴). بیشترین تغییر رنگ در ناحیه محیطی ورقه‌های هویج در تیمار HA با میانگین  $15/3$  مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار IR نداشت. نمونه‌های خشک شده تحت تیمار HA-IR غیرتناوبی نسبت به تیمارهای متناوب متحمل تغییرات رنگ کلی بیشتری شدند. طولانی‌بودن زمان تابش مادون‌قرمز و ایجاد تنش حرارتی دلیل تغییر رنگ شدید ناحیه محیطی هویج می‌باشد.

مطالعات پیشین نیز تاثیر روش خشک‌کردن بر تغییرات رنگ محصولات مختلف را تأیید می‌کنند. ویشواندان و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که شاخص قهوه‌ای شدن در نمونه‌های هویج خشک‌شده به روش ترکیبی هوای گرم-مادون‌قرمز، ۶ درصد کمتر از نمونه‌های خشک‌شده با هوای گرم منفرد بود [۲۴]. آنان تغییر رنگ محصول در خشک‌کردن با هوای گرم را ناشی از طولانی بودن زمان خشک‌شدن و سخت‌شدن سطح بیرونی محصول دانستند. اونود و همکاران (۲۰۱۹) میزان تغییرات رنگ کلی ورقه‌های سیب‌زمینی را در روش خشک‌کردن متناوب HA-IR (2-4) و HA-IR به ترتیب  $17/515$  و  $41/46$  گزارش کردند که مقدار تغییرات رنگ کلی در روش متناوب کمتر از روش ترکیبی بدون تناوب بود که نتایج آن‌ها با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد [۱۷].

شکل (۴). تغییرات رنگ کلی قسمت مرکزی و محیطی ورقه‌های هویج در روش‌های مختلف خشک‌کردن

Fig 4.  $\Delta E_c$  and  $\Delta E_o$  of carrot slices at various drying methods

### ۵-۳- ضریب نفوذ موثر رطوبت ورقه‌های هویج

$D_{eff}$  به‌عنوان شاخصی مهم در ارزیابی قابلیت انتقال رطوبت از داخل محصول به طرف سطح آن مطرح می‌شود که آهنگ خشک‌شدن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مقادیر بالاتر  $D_{eff}$  نشان‌دهنده انتقال بیشتر آب از ماتریکس جامد به بیرون محصول است. میزان انتشار رطوبت نه تنها به ویژگی‌های ساختاری محصول و گرادیان رطوبت داخلی و سطح محصول، بلکه به شرایط خشک‌کردن مانند دما و روش اعمال گرما وابسته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین مقدار  $D_{eff}$  در تیمار HA-IR با مقدار  $9/226 \times 10^{-11}$  مترمربع بر ثانیه و پس از آن روش متناوب HA-IR(I:10-10) با مقدار  $8/745 \times 10^{-11}$  مترمربع بر ثانیه در مقام دوم قرار دارد. تاثیر تیمارهای مختلف روی  $D_{eff}$  در جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) و مقایسه میانگین  $D_{eff}$  در تیمارهای مختلف در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طوری‌که مشاهده می‌شود در خشک‌کردن به روش ترکیبی بدون تناوب مقدار  $D_{eff}$  بیشتر از خشک‌کردن منفرد و نیز بیشتر از همه الگوهای تناوبی می‌باشد. در بین روش‌های متناوب با دوره‌های تناوب مختلف نیز بیشترین  $D_{eff}$  در تیمار HA-IR(I:10-10) و کمترین آن مربوط به تیمار HA-IR(I:5-10) می‌باشد. چنانکه مشاهده می‌شود تاثیر تیمارهای مختلف روی  $D_{eff}$  مشابه اثر آن‌ها روی زمان خشک‌شدن ورقه‌های هویج است به بیان دیگر سریع در خروج رطوبت و افزایش آهنگ خشک‌شدن موجب کاهش زمان فرآیند شده است. مقادیر به‌دست‌آمده برای ضریب نفوذ موثر رطوبت ورقه‌های هویج در این پژوهش، در محدوده گزارش‌شده توسط پانجیوتیو و همکاران (۲۰۰۴) ( $2/20 \times 10^{-12}$  الی  $7/49 \times 10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه در محدوده دمایی ۲۰ الی ۱۰۰ درجه سلسیوس) می‌باشد [۲۷].

### ۶-۳- انتخاب بهترین تیمار برای خشک‌کردن ورقه‌های هویج

انتخاب بهترین روش و شرایط خشک‌کردن صرفاً بر اساس یک شاخص امکان‌پذیر نیست و باید شاخص‌های مختلف شامل زمان فرآیند و نیز خواص کیفی محصول به طور هم‌زمان مدنظر قرار بگیرند. نتایج نشان داد که همه خواص مهندسی و کیفی

محصول تحت تأثیر روش خشک کردن و الگوی حرارت دهی به محصول قرار دارند. به طور کلی، ورقه‌های هویج خشک شده تحت تیمار تناوبی HA-IR(10-10) از نظر جمیع جهات کیفی مانند دانسیته، چروکیدگی و تغییرات رنگ کلی کمتر نسبت به نمونه‌های خشک شده تحت سایر تیمارها ارجحیت دارد. همچنین فرآیند خشک شدن در این تیمار در مدت زمان مناسبی انجام گرفته است (۲۰۲ دقیقه). در مقابل با اینکه در تیمار HA-IR غیرتناوبی کمترین زمان فرآیند حاصل شد (۱۶۶ دقیقه)، اما خواص کیفی آن نسبت به تیمار HA-IR(10-10) پایین تر بود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در تیمار تناوبی HA-IR(10-10) در ۵۰ درصد زمان عملیات ۲۰۲ دقیقه‌ای لامپ‌های مادون قرمز بخش IR خاموش بوده و موجب صرفه جویی بسیار زیادی در مصرف انرژی شده است. بنابراین بر اساس اهداف و نیازهای کاربر، بایستی بهترین تیمار انتخاب و در فرآیند خشک کردن هویج استفاده شود.

#### ۴- نتیجه گیری

خواص کیفی محصولات خشک شده تحت تأثیر روش و شرایط خشک کردن قرار دارند. در این تحقیق فرآیند خشک شدن ورقه‌های هویج با استفاده از روش ترکیبی هوای گرم مداوم- مادون قرمز متناوب با دوره‌های تناوب مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. در بین الگوهای مختلف تناوبی، تیمار خشک کردن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز با دوره تناوب ۱۰ دقیقه‌ای موجب حصول محصول هویج خشک با بالاترین شاخص‌های کیفی شد ضمن اینکه زمان فرآیند نسبت به روش ترکیبی غیرتناوبی قابل قبول بود. بر اساس نتایج حاصل و به منظور جهت حفظ کیفیت و صرفه جویی در زمان و مصرف انرژی، توصیه می‌شود روش‌های تناوبی در خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده شود و برای هر محصول دوره تناوب مناسب بررسی و انتخاب شود.

#### ۵- تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

#### ۶- تشکر و قدردانی

از مسئول آزمایشگاه مهندسی پس از برداشت و فرآوری محصولات کشاورزی بابت مساعدت در انجام آزمون‌ها تشکر می‌نماید.

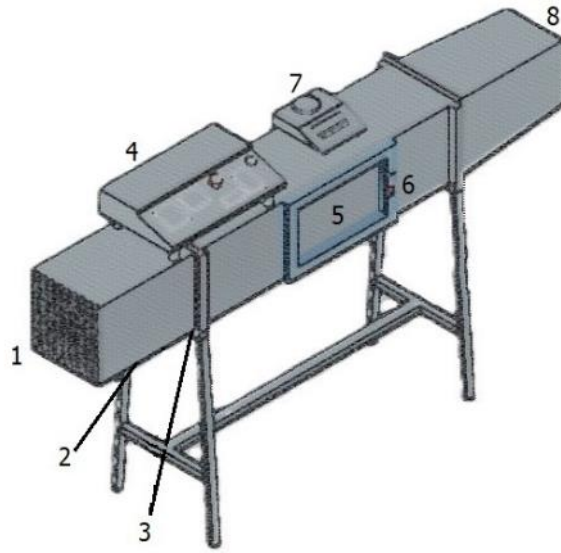
#### منابع

- [1] Carcel, J. A., García-Pérez, J. V., Benedito, J., & Mulet, A. (2012). Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *J Food Eng.*, 110(2), 200-207.
- [2] Lewicki, P. P. (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends Food Sci. Technol.*, 174, 153-163.
- [3] Rostami-Baroji, R., Seiedlou Heris, S., & Dehghanny, J. (2017). Mathematical simulation of heat and mass transfer in convective drying of carrot, pretreated by ultrasound and microwave. *J Agric. Mach.*, 7(1), 97-113.
- [4] Kowalski, S. J., & Szadzinska, J. (2014). Convective-intermittent drying of cherries assisted preceded by ultrasonic osmotic dehydration. *Chem. Eng. Process.: Process Intensif.*, 82, 65-70.
- [5] Ghorbani, R., Dehghannia, J., Seiedlou, S., & Ghanbarzadeh, B. (2015). Kinetics investigation of thin layer plums drying simultaneously pre-treated with ultrasound and osmotic dehydration. *Res. Innov. Food Sci. Technol.*, 4(1), 35-52. [in Persian].
- [6] Cheng, X., Wang, S., Iqbal, M. S., Pan, L., & Hong, L. (2023). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration on the drying kinetics, water state, and physicochemical properties of microwave vacuum-dried potato slices. *Ultrason. Sonochemistry*, 99, 106557.
- [7] Teymori, M. O., Askari Asli-Ardeh, E., Taghinezhad, E., Motevali, A., Szumny, A., & Nowacka, M. (2023). Enhancing Energy Efficiency and Retention of Bioactive Compounds in Apple Drying: Comparative Analysis of Combined Hot Air-Infrared Drying Strategies. *Appl. Sci.*, 13(13), 7612.
- [8] Nalbandi, H., Seyedlou, S., & Hossein Nia, R. (2025). Using of the variable temperature method for drying garlic slices with IR, along with assessing performance characteristics and the quality of the final product. *J Res. Mechanics Agric. Mach.*, 14(1), 49-64 [In Persian].
- [9] Jeevarathinam, G., Pandiselvam, R., Pandiarajan, T., Preetha, P., Balakrishnan, M., Thirupathi, V., & Kothakota, A. (2021). Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices: Effect on drying rate and quality parameters. *LWT-Food Sci. Technol.*, 144, 111258.
- [10] Xu, W., Pei, Y., Zhu, G., Han, C., Wu, M., et al., (2022). Effect of far infrared and far infrared combined with hot air drying on the drying kinetics, bioactives, aromas, physicochemical qualities of *Anoectochilus roxburghii* Wall. Lindl. *LWT-Food Sci. Technol.*, 162, 113452.

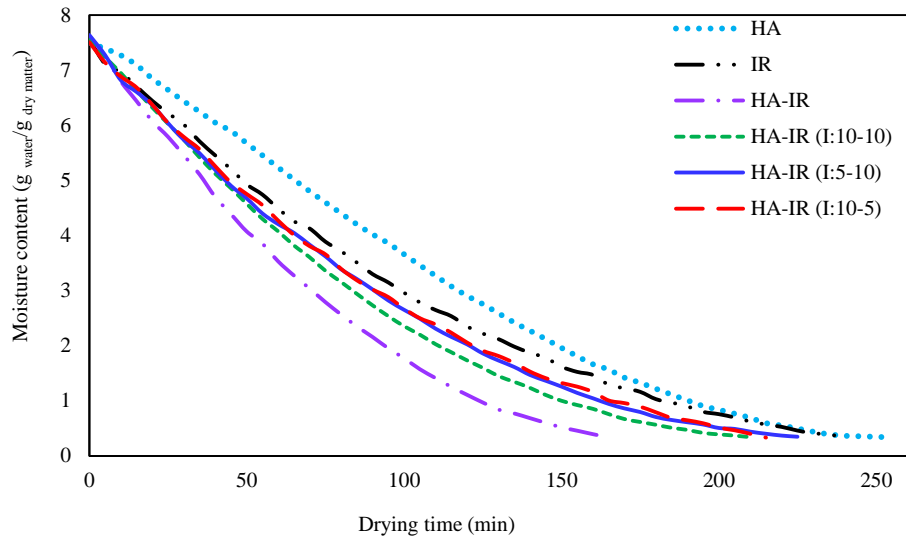
- [11] Selvi, K. C., Kabutey, A., Gurdil, G. A. K., Herak, D., Kurhan, S., & Kloucek, P. (2020). The effect of infrared drying on color, projected area, drying time, and total phenolic content of rose (Rose electron) petals. *Plants*, 9(2), 236.
- [12] Omid M., Raeisi, M., & Kaveh, M. (2023). Characteristics and multi-objective optimization of carrot dehydration in a hybrid infrared/ hot air dryer. *LWT-Food Sci. Technol.*, 172, 114229.
- [13] Nalbandi, H., Seiedlou, S., & Alizadeh, B. (2021). Application of non-isothermal simulation in optimization of food drying process. *J Food Sci. Technol.*, 58(6): 2325-2336.
- [14] Hossein Nia, R., Nalbandi, H., Seyedlou, S., & Alizadeh Salteh, S. (2025). Utility of heating pattern with variable air temperature in drying; effects on drying time, energy consumption, and product quality. *Food Sci. Technol. Int.*, 31(4), 320–330.
- [15] Li, M., Li, M., Zhang, X., Zhang, Q., & Yang, X. (2024). Effect of Infrared-Combined Hot Air Intermittent Drying of Jujube *Zizyphus jujuba* Miller Slices: Drying Characteristics, Quality, and Energy Consumption Dimensions. *Agric.*, 214, 1-14. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020214>
- [16] Huang, D., Men, K., Tang, X., Li, W., & Sherif, S. (2021). Microwave intermittent drying characteristics of camellia oleifera seeds. *J Food Process Eng.*, 44(1), e13608.
- [17] 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. *J Food Eng.*, 241, 75-87.
- [18] AOAC International. (2023). Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (22nd ed.).
- [19] Seiedlou, S., Nalbandi, H., & Bodaghi, A. (2019). Determination of performance parameters of infrared dryer to increase drying performance and uniformity of heat distribution. *Innov. Food Technol.*, 7(2): 326-313 [In Persian].
- [20] Seyedlou, S., Ghassemzadeh, H. R., Hamdami, N., Talati, F., & Moghaddam Vahed, M. (2010). Convective drying of apple: Mathematical modeling and determination of some quality parameters. *Int. J Agric. Biology*, 12, 171-178 .
- [21] Crank, J. (1979). The mathematics of diffusion. Oxford university press.
- [22] Chakraverty, A., & Poul, S. R. (2001). Postharvest Technology: Cereals, Pulses and Vegetables. India: Science Publishers. Inc, 183–188.
- [23] Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J., & Oliveira, F. A. (2008). Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *J Food Eng.*, 84(3), 430-440.
- [24] Vishwanathan, K. H., Hebbar, H. U., & Raghavarao, K. S. M. S. (2010). Hot air assisted infrared drying of vegetables and its quality. *Food Sci. Technol. Res.*, 165, 381-388.
- [25] Abbaspour-Gilandeh, Y., Kaveh, M., Fatemi, H., & Aziz, M. (2021). Combined hot air, microwave, and infrared drying of hawthorn fruit: Effects of ultrasonic pretreatment on drying time, energy, qualitative, and bioactive compounds' properties. *Foods*, 10(5), 1006.
- [26] Baysal, T., Icier, F., Ersus, S., & Yildiz, H. (2003). Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *Eur. Food Res. Technol.*, 218, 68-73.
- [27] Panagiotou, N. M., Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. D. (2004). Moisture diffusivity: literature data compilation for foodstuffs. *Int. J Food Prop.*, 72, 273-299.



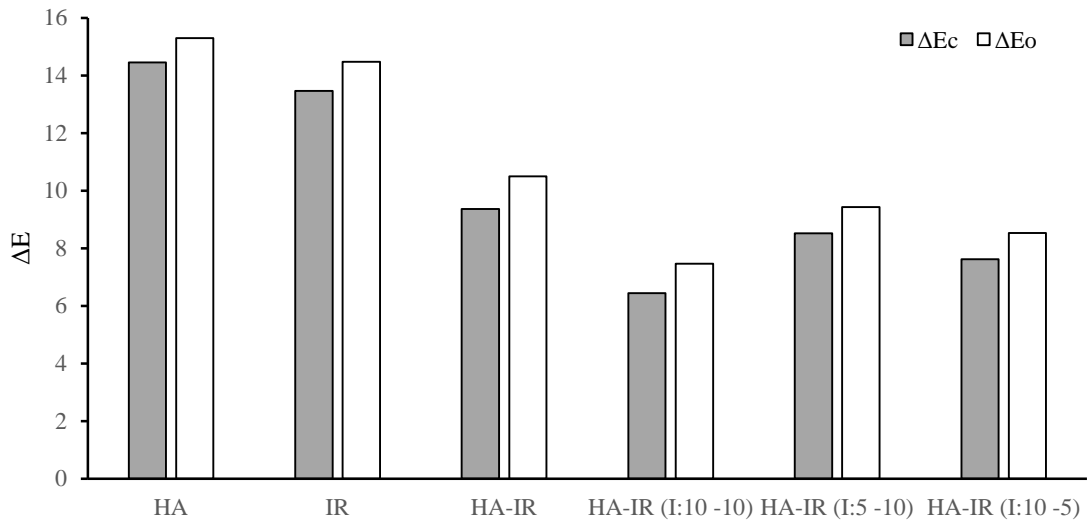
شکل (۱)



شکل (۲)



شکل (۳)



شکل (۴)

جدول (١)

Treatment	Nomenclature
Hot air drying	HA
Infrared drying	IR
Continues hot air and continues infrared drying	HA-IR
Continues hot air and intermittent infrared drying (10 min on-10 min off)	HA-IR (I:10 - 10)
Continues hot air and intermittent infrared drying (5 min on-10 min off)	HA-IR (I:5 - 10)
Continues hot air and intermittent infrared drying (10 min on-5 min off)	HA-IR (I:10 - 5)

جدول (٢)

S.V.	df	MS					
		Drying time	True Density	Shrinkage	$\Delta E_o$	$\Delta E_c$	$D_{eff}$
Drying Methods	5	3083.7**	242551.03**	13.926**	31.0	31.6	$3.79 \times 10^{-22}$
Error	1	12.01	1142.86	0.049	0.14	0.09	$0.17 \times 10^{-22}$
	2				3	9	

\*\* indicates a significant effect at 1% probability.

جدول (٣)

Drying Methods	Drying Time (min)	True Density ( $g/cm^3$ )	Shrinkage (%)	$\Delta E_o$	$\Delta E_c$	$D_{eff}$ ( $m^2/s$ )
HA	257 <sup>A</sup>	1.115 <sup>A</sup>	89.14 <sup>A</sup>	15.30 <sup>A</sup>	14.45 <sup>A</sup>	$6.227 \times 10^{-11}$ <sup>E</sup>
IR	242 <sup>B</sup>	1.101 <sup>B</sup>	87.94 <sup>B</sup>	14.47 <sup>A</sup>	13.46 <sup>B</sup>	$6.865 \times 10^{-11}$ <sup>D</sup>
HA-IR	166 <sup>E</sup>	1.093 <sup>B</sup>	85.96 <sup>C</sup>	10.50 <sup>B</sup>	9.37 <sup>C</sup>	$9.226 \times 10^{-11}$ <sup>A</sup>
HA-IR (I:10 - 10)	202 <sup>D</sup>	1.043 <sup>E</sup>	83.94 <sup>E</sup>	7.47 <sup>D</sup>	6.44 <sup>F</sup>	$8.745 \times 10^{-11}$ <sup>B</sup>
HA-IR (I:5 - 10)	227 <sup>C</sup>	1.065 <sup>C</sup>	84.79 <sup>D</sup>	9.43 <sup>C</sup>	8.52 <sup>D</sup>	$7.635 \times 10^{-11}$ <sup>C</sup>
HA-IR (I:10 - 5)	219 <sup>C</sup>	1.055 <sup>D</sup>	84.02 <sup>E</sup>	8.53 <sup>C</sup>	7.62 <sup>E</sup>	$7.936 \times 10^{-11}$ <sup>C</sup>

Different letters indicate a significant effect at 1% probability.

## Simultaneous use of combined hot air-infrared methods by various cycles of intermittent infrared during the drying process of carrot slices

Habibeh Nalbandi<sup>1\*</sup>, Sadegh Seyedlou<sup>2</sup>, Maryam Ranjouri<sup>3</sup>

1. Associate professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz
  2. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz
  3. MS student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz
- \* Corresponding Author: Email: [h.nalbandi@tabrizu.ac.ir](mailto:h.nalbandi@tabrizu.ac.ir); [habibehnalbandi@yahoo.com](mailto:habibehnalbandi@yahoo.com)

**Introduction:** Drying is an important and effective method to preserve foodstuffs and agricultural products. Energy consumption is very high in this process, which leads to an increase in processing costs. On the other hand, most dried products have lower quality compared to fresh ones. Convective drying is the most common drying method. In this method, the drying time is long and the products suffer quality losses such as color changes. Combining this method with other drying methods such as infrared drying can reduce the process time. However, the continuous use of infrared also leads to quality loss and thermal damage to the product due to excessive increase in product temperature. Intermittent drying techniques are new methods that have been developed recently in which the heating source is turned off at certain cycles. Despite their positive effect on preserving product quality, these methods may increase the total drying time. By using this method in combined hot air-infrared drying, it is possible to benefit from the positive effects of both methods simultaneously. It is worth mentioning that selecting the optimum time for turning off and on the heat source (optimum cycle) is an important parameter in intermittent drying techniques. Therefore, in this research, the effect of the intermittent drying method and its cycles on the drying time, effective moisture diffusivity, and qualitative characteristics of carrot slices was studied.

**Materials and methods:** The drying process of carrot slices was studied using a combined hot air-infrared dryer, in which hot air was used continuously and infrared was applied intermittently. Three different cycles were investigated. In the first cycle, the infrared source was turned on for 5 min and then turned off for 10 min (HA-IR (I:5-10)). In the second cycle, the infrared source was turned on for 10 min and then turned off for 10 min (HA-IR (I:10-10)). In the last cycle, the infrared source was turned on for 10 min and then turned off for 5 min (HA-IR (I:10-5)). In these treatments, the hot air temperature and velocity were maintained at 65°C and 0.5 m/s, respectively. By adjusting the infrared power, a drying temperature of 65°C was applied to the product. To compare the results, the drying process was also studied using continuous hot air-infrared drying (HA-IR) at the same air and infrared source temperatures. In addition, hot air drying (HA) of samples at an air temperature and velocity of 65°C and 0.5 m/s, and infrared drying (IR) at 65°C were also conducted. In the IR drying, ambient air with a temperature of 20–30°C and a velocity of 0.5 m/s was used.

The carrot was cut into slices with a thickness of 4 mm. Then, the slices were dried in a combined hot air-infrared dryer to a final moisture content of 0.3 g water/g dry matter. Drying time, effective moisture diffusivity, and qualitative characteristics such as true density, shrinkage, and total color changes of the peripheral and central parts of the carrot samples were measured. The data were analyzed based on a completely randomized design with three replications using MSTAT-C software, and mean comparison was conducted by Duncan's method at the 1% probability level.

**Results and discussion:** The results showed that the drying time of carrot slices using HA, IR, HA-IR, HA-IR (I:5-10), HA-IR (I:10-5), and HA-IR (I:10-10) drying methods was 257, 242, 166, 227, 219, and 203 min, respectively. The drying method had a significant effect on the drying time of the samples ( $P < 1\%$ ). The effective moisture diffusivity of carrot slices was in the range of  $6.227 \times 10^{-11}$  to  $9.226 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. True density, shrinkage, and total color change of the samples were also affected by the drying method ( $P < 1\%$ ). The lowest values of true density and shrinkage were observed in the samples dried by the intermittent treatment HA-IR (I:10-10), with values of 1.043 g/cm<sup>3</sup> and 83.94%, respectively. Their highest values were obtained under the HA drying method (1.115 g/cm<sup>3</sup> and 89.14%). The color change of the peripheral and central parts of the samples dried by HA-IR (I:10-10) was the lowest, with values of 7.47 and 6.43, respectively. However, the drying time of the samples under this treatment was 17.8% longer than that of the samples dried by the HA-IR treatment.

**Conclusion:** Intermittent hot air–infrared drying with a cycle of 10 min on and 10 min off of the infrared source, HA-IR (I:10-10), helped preserve the quality of the dried samples. However, the drying time of the samples was the second longest. Therefore, the HA-IR (I:10-10) treatment could be considered the best choice for drying carrot slices with acceptable quality.

**Keywords:** *Carrot, Combined Dryer, Hot air, Infrared, Intermittent Drying, Qualitative Properties*

Journal Pre-proofs