



Research paper

Using the variable temperature approach to dry garlic slices in an IR dryer, and evaluating its performance parameters and end product quality

H. Nalbandi^{1*}, S. Seiedlou² and R. Hossein Nia³

1- Assoc. Prof., Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.

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

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

Article information

Received: 2024/09/08

Accepted: 2025/01/18

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

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

ORCID: 
0000-0003-4040-8636



Extended Abstract**Introduction**

Preserving the quality of the dried product and minimizing energy consumption are important considerations in the drying process. Drying products at variable temperatures is a new method that has been recently used, in which the drying temperature changes during the process. This method is more suitable for the drying of heat-sensitive products. There is a temperature that causes damage to product quality, known as the critical temperature, which varies across different products. In the variable temperature drying method, the drying process starts at a high temperature. The drying temperature is reduced below the critical temperature when the product's temperature reaches a critical value. It prevents the product temperature from increasing (Nalbandi et al., 2021). Through this technique, product quality loss caused by temperature increases can be prevented, allowing for the benefits of high-temperature drying to be utilized. Higher drying temperatures at the beginning of the process could accelerate the drying process and decrease the drying time. Reducing the temperature at the critical point preserves the product quality, such as the final color and nutritional component of the dried product. The lecture's review showed that this method is not used in infrared drying. Therefore, the aim of this study was to evaluate the effect of various variable temperature patterns in an infrared dryer on the drying time,

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

and energy consumption, and quality properties of garlic slices such as the color changes, shrinkage, density, antioxidant, and polyphenol content. Additionally, the optimal pattern for adjusting the drying temperature must be determined.

Method

The garlic cloves were peeled, sliced to a thickness of 2.5 mm, and placed in a 5% KMS solution for 10 minutes. Then, the slices were dried in an infrared dryer at a consistent temperature of 50, 60, and 70 °C, as well as 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 min before decreasing to 50 °C. Drying time, energy consumption, and qualitative characteristics such as shrinkage, true density, color changes, antioxidants and polyphenols content were evaluated.

Results

The drying time of garlic slices to reach a moisture content of 0.3 g water/g dry matter at drying temperatures of 50, 60, and 70 °C was 122, 101, and 92 min, respectively. Increasing the drying temperature reduced the processing time, which agreed with the results reported by other researchers. The drying times of garlic samples were 119 and 109 minutes at the variable drying temperatures in patterns I and II, respectively. The drying time of garlic slices at constant and variable drying temperatures was analyzed using a randomized complete block design. The analysis of variance indicated that the method and drying temperature significantly affected the drying time at the 1% probability level. The highest and lowest drying times were observed at constant drying temperatures of 50 and 70 °C, respectively. There were no significant differences between the drying times of samples at constant drying temperatures of 50 °C and pattern I. However, the differences in drying time at a constant drying temperature of 50 °C and pattern II were significant. Using the variable drying temperature (pattern II) resulted in a 13-minute decrease in drying time (10.5%). The findings indicated that the drying method significantly affected energy consumption during the process, total color changes, and the antioxidant content of the sample.

The highest and lowest energy consumptions were observed at constant drying temperatures of 50 °C and 70 °C, respectively. Energy consumption was 1.16 kWh in pattern II, which was 25% lower than the value obtained at a constant drying temperature of 50 °C. Therefore, the application of variable drying temperature could reduce energy consumption. It also preserved the sample's color, so that the total color changes of slices in patterns I and II were the same as those observed at a constant temperature of 50 °C. The samples dried at a constant temperature of 60 °C had a higher antioxidant content compared to those dried at 50 °C and 70 °C. The highest antioxidant content was observed in the dried samples by pattern I (4.49 %). It was about 6.63 % in fresh garlic. Shrinkage, true density, and polyphenol content of the sample were not affected by the drying methods, and their mean values were 56 to 63%, 1061 to 1626 kg/m³, and 1.667 to 2.229 mg garlic acid/g dried product.

Conclusions

The results showed that the application of variable drying temperatures in the infrared dryer had a positive effect on reducing drying time and preserving the quality of the samples. Comparison of the drying time, energy consumption, and quality characteristics of dried garlic at variable drying temperatures (pattern II) showed that the quality of dried samples, including shrinkage, true density, color, and polyphenol content, was similar to that of samples dried at a constant temperature of 50 °C. However, the antioxidant content of the sample dried at this treatment (pattern II) was higher, and energy consumption was lower than

that observed at a constant temperature of 50 °C. In addition, the color changes of the sample dried by pattern II was lower than the color of samples dried at the constant temperature of 70 °C. Therefore, the variable drying temperature technique in the drying process of garlic in an infrared dryer could be introduced as a successful method.

Author Contributions

Habibeh Nalbandi: Project administration; Conceptualization, formal analysis; writing– original draft. **Sadegh Seyedlou:** Conceptualization; writing–review, and editing. **Reza Hossein Nia:** Data curation; formal analysis; investigation; methodology.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author, upon reasonable request.

Ethical Considerations

This study was approved by the University of Tabriz. Research data are not shared. Written informed consent was obtained from all study participants.

How to cite this paper:

Nalbandi, H., Seiedlou, 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 Research in Mechanics of Agricultural Machinery. 34: 49-64. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2025.14918.719>



Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by [Shahrekord University](#). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](#)



مقاله پژوهشی

کاربرد روش دما متغیر در خشک کردن ورقه‌های سیر با گرمایش مادون قرمز و بررسی مشخصه‌های عملکردی و خواص کیفی محصول نهایی

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

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.

چکیده

اطلاعات مقاله

خشک کردن با گرمایش مادون قرمز با روش دما متغیر یکی از روش‌های جدید در خشک کردن 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 خشک کردن مادون قرمز روی خواص کیفی ورقه‌های سیر، زمان عملیات، مصرف انرژی و تعیین بهترین الگوی تغییر دما در طول فرآیند خشک کردن است. نمونه‌ها در خشک کن مادون قرمز 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 خشک کردن ۶۰ درجه سلسیوس شروع شد و پس از رسیدن دمای سطح محصول به ۵۰ درجه سلسیوس، دمای خشک کردن 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 خشک کردن به ۵۰ درجه سلسیوس کاهش داده شد. زمان خشک شدن، میزان مصرف انرژی و شاخص‌های کیفی مانند چروکیدگی، دانسیته واقعی، تغییرات کلی رنگ و محتوی آنتی اکسیدان و پلی فنل در نمونه‌ها اندازه گیری 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 کیلووات ساعت 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 آنتی اکسیدان در الگوی ب دما متغیر نیز مناسب تشخیص داده شد. بنابراین کاربرد دما متغیر با الگوی ب نسبت به دما ثابت ارجح است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

واژه‌های کلیدی: آنتی اکسیدان، خشک کردن، دما متغیر، رنگ، سیر، مصرف انرژی.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

h.nalbandi@tabrizu.ac.ir

ORCID: 

0000-0003-4040-8636



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. به‌طوری‌که 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. درحالی‌که 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. بالا بودن دمای خشک کردن در ابتدای فرآیند باعث افزایش آهنگ

سطح ماده شدیدتر است. شاخص‌ها و معیارهای کیفی مختلف تعیین‌کننده ارزش تجاری و قیمت نهایی محصول خشک است و از محصولی به محصول دیگر متفاوت است. بررسی تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین نشان داد که در خصوص کاربرد دمای متغیر در فرآیند خشک‌کردن محصولات کشاورزی با اشعه مادون‌قرمز به منظور بهینه‌سازی عملیات از نظر مصرف انرژی و حفظ کیفیت محصول تحقیقاتی انجام نشده است.

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 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.

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).

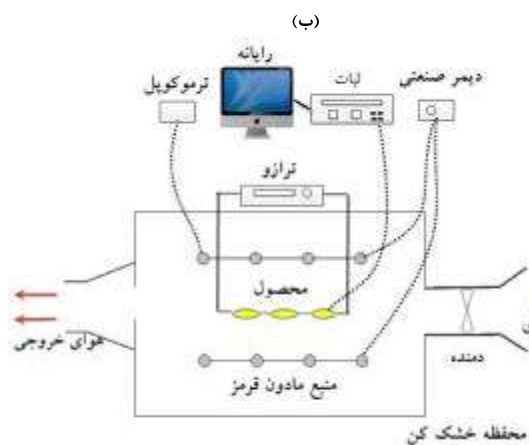
Nalbandi *et al.* (2021) جهت تعیین زمان تغییر دما و شرایط خشک‌کردن در روش دما متغیر، از شبیه‌سازی انتقال جرم و گرما به منظور تعیین پروفیل‌های دما و رطوبت در محصول استفاده کردند. استفاده از شبیه‌ساز توسعه‌یافته و نیز اندازه‌گیری‌های تجربی به عنوان پیش‌آزمایش نشان داد که خشک‌کردن محصولات با روش دما متغیر 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 (Seiiedlou *et al.*, 2020) استفاده شد. در این خشک‌کن جهت عایق‌کاری 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 خشک کردن از طریق تغییر ولتاژ لامپ‌های مادون قرمز و فاصله آنها از سینی محصول انجام شد. دمای خشک کردن 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 (Seiiedlou *et al.*, 2020). دمای خشک کردن 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 خشک کردن با استفاده از نمونه‌های موجود روی این سینی اندازه‌گیری شد. خشک کردن نمونه‌ها با دماهای ثابت خشک کردن ۵۰، ۶۰ و ۷۰ 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 خشک کردن توسط دستگاه تحلیل توان با ثبت داده‌های میزان مصرف انرژی در هر ۱۰ دقیقه انجام گرفت.



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

خشک کردن نمونه‌های سیر با روش دما متغیر

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

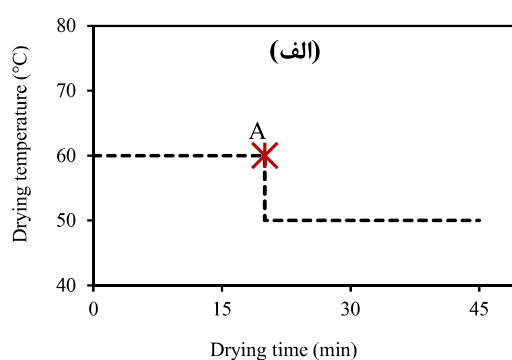
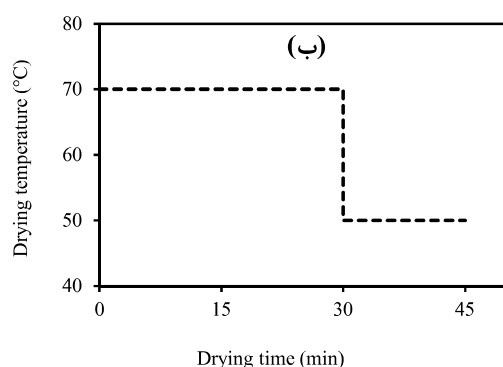
۰/۵ متر بر ثانیه استفاده شد و دمای هوای عبوری از داخل خشک‌کن برابر با دمای محیط و در حدود ۲۵ درجه سلسیوس بود. الگوهای تغییر دما شامل دو الگوی زیر بودند:

خشک‌کردن با تغییر فاصله لامپ‌های مادون‌قرمز از سینی محصول و تغییر دمای لامپ‌های مادون‌قرمز، 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 خشک‌کردن با افزایش فاصله لامپ‌های مادون‌قرمز از سینی محصول و کاهش دمای لامپ‌های مادون‌قرمز، 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)

خشک‌کردن 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 خشک‌شدن، دمای سطح نمونه‌های سیر اندازه‌گیری شد. زمانی که دمای سطح نمونه‌ها به ۵۰ درجه سلسیوس رسید، دمای



شکل ۲- نحوه کاهش دمای خشک‌کردن در تیمارهای الف و ب

Photoshop (v24.4.5) تعیین شد. تفاوت رنگ نمونه‌های خشک‌شده با نمونه‌های تازه، به عنوان معیاری برای تعیین تغییر کلی رنگ (ΔE) در طی خشک‌کردن استفاده شد و با معادله (۱) محاسبه گردید که در آن زیرنویس ۰ و i به ترتیب بیان‌گر مشخصه‌های رنگ سیر تازه و سیر خشک‌شده 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 خشک‌کردن

اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی

رنگ محصول

در هر کدام از تیمارها و تکرارهای مربوط به خشک‌کردن 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 کوت ریخته شده و مقدار پلی‌فنل 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 پلی‌فنل 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 نرم افزار 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.

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

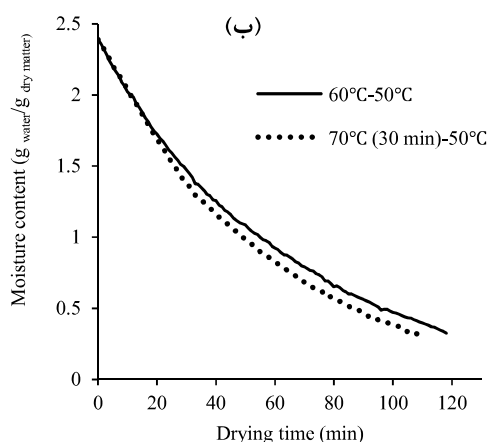
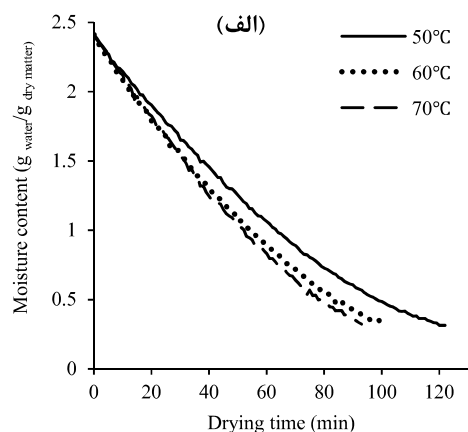
اندازه‌گیری محتوی آنتی‌اکسیدان و پلی‌فنل

برای اندازه‌گیری محتوی آنتی‌اکسیدان و پلی‌فنل 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 کوت 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 کوت 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 پلی‌فنل ابتدا ۸۰ میکرولیتر متانول به عنوان نمونه شاهد در کوت 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

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 متناوب 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 (Nalbanti *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 متناوب 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 کاهشی (از دمای ۶۰ به دمای ۴۰ درجه سلسیوس، DC) برخوردار است. Kowalski & Pawłowski (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 متناوب که با چرخه‌های دمایی ۳۰ دقیقه حرارت‌دهی با

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

منابع تغییر	$\frac{D^2}{L^2}$	میانگین مربعات					
		زمان	مصرف انرژی	چروکیدگی	دانسیته واقعی	تغییرات کلی رنگ	آنتی اکسیدان پلی فنل
تکرار	۲	۸۲/۶۷ ^{xx}	۰/۰۰۲	۲۴/۴۷ ^{ns}	۰/۰۱	۱/۴۷	۰/۰۹۴
روش و دمای خشک کردن	۴	۱۰۲۷/۱۷ ^{xx}	۰/۲۴ ^x	۱۳/۲۵ ^{ns}	۰/۱۱ ^{ns}	۵۳/۵۲ ^{xx}	۱/۲۹۶ ^{xx}
خطا	۸	۲۱/۵۳	۰/۰۶	۳۸/۶۹ ^{ns}	۰/۰۴	۰/۴۸	۰/۱۲۷
کل	۱۴						

^{xx}، ^x 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 آنتی اکسیدان (%)
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}	۴/۹۷ ^{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 مصرف‌شده 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، میکروویو 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 میکروویو 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 ۱/۵۲ تا ۴/۵۲ الی ۸/۰۴ کیلوژول 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 خشک‌شده دارای بیش‌ترین

کیلوگرم بر مترمکعب قرار داشت. دانسیته واقعی اولیه ورقه‌های سیر ۱۰۲۳ کیلوگرم بر متر مکعب بود که نتایج حاکی از آن است که در طول فرآیند خشک‌کردن، دانسیته واقعی نمونه‌ها افزایش یافته است. Ahmadi *et al.* (2020) در فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های موز با استفاده از خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز نتایج مشابهی به دست آوردند. ایشان در مطالعه خود بیان کردند که مقادیر دانسیته 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 دانسیته 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 دانسیته 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 مادون قرمز

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.

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 ۶۳٪-۵۶٪ قرار داشت. با توجه به نتایج به دست آمده در این خشک‌کن می‌توان گفت که تغییر دمای خشک‌کردن در فرآیند خشک‌کردن با مادون قرمز، 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 ۸۵٪-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 ۷۱٪-۶۷٪ گزارش کرد. Yang *et al.* (2018) نیز عدم تأثیر تابش فراصوت و دمای خشک‌کردن روی درصد چروکیدگی را گزارش کرده‌اند.

دانسیته واقعی

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

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.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

حبیبه نعلبندی: مدیریت پروژه، ایده‌پردازی، نگارش نسخه اولیه.

صادق سیدلو: ایده‌پردازی، ویرایش نگارش نسخه نهایی.

رضا حسین‌نیا: داده‌برداری، تحلیل داده‌ها.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها است.

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., Seiedlou, 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). doi.org/10.22067/ifstrj.v16i1.76330
- AOAC. (2019). Official Method of Analysis, 21st edn. Association of Official Analytical Chemists (No. 934.06), Arlington.

بر خلاف محتوی آنتی‌اکسیدان، محتوی پلی‌فنل نمونه‌ها تحت تأثیر روش و دمای خشک‌کردن قرار نگرفت (جدول ۱) و میزان پلی‌فنل باقی‌مانده در نمونه‌ها پس از خشک‌شدن 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 خشک‌کردن سیر مورد مطالعه قرار دادند و نتایج حاصل را با خشک‌کردن 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 آلیناز در حدود ۹۱٪ حفظ شد. درحالی که در خشک‌کردن 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 (Lakshmi et al., 2018).

نتیجه‌گیری

دستیابی به یک الگوی جدید برای خشک‌کردن محصولات حساس به گرما با حفظ کیفیت محصول و همزمان با کاهش زمان خشک‌شدن و کاهش انرژی مصرفی و نیز جلوگیری از تخریب مواد مؤثر محصول هدف اصلی این تحقیق بود. فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های سیر به دو روش خشک‌کردن با دما ثابت و نیز کاربرد الگوهای مختلف دما متغیر در خشک‌کن مادون قرمز مورد آزمایش قرار گرفتند. مقایسه خصوصیات کیفی، زمان خشک‌شدن 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 خشک‌کردن با دمای ۵۰ درجه، در اغلب مشخصات کیفی محصول سیر خشک تولیدی، مانند تغییرات کلی رنگ، چروکیدگی، دانسیته واقعی و محتوی پلی‌فنل هم‌تراز نمونه‌های خشک‌شده 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

- Engineering and Processing*, 98, 155-164. doi.org/10.1016/j.ccep.2015.10.001
- Lilia, L., Mendez, L. & Franchois, C. (2008). Effect of temperature cycling on allinase activity in garlic. *Food Chemistry*, 111, 56–60. doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.035
- 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 Bioprocesses Processing*, 111, 83-92. doi.org/10.1016/j.fbp.2018.06.005
- 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. doi.org/10.1016/j.dib.2018.10.132
- Midilli, A., Kucuk, H. & Yapar, Z. 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20, 1503-1513. doi.org/10.1081/DRT-120005864
- 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. doi.org/10.1007/s13197-020-04743-5
- 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. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.008
- 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 drying performance and uniformity of heat distribution. *Innovative Food Technologies*, 7(2), 313-326 (In Persian). [doi: 10.22104/jift.2019.3700.1883](https://doi.org/10.22104/jift.2019.3700.1883).
- 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. [doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00018-4).
- Yang, T., Jinglin, Z., Sirui, J., Yiqun, X., Pau-Loke, S., Yongbin, H., Xiaosong, Y. & Mingru, Y. (2018). Contacting ultrasound 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. doi.org/10.1006/bioe.2001.0026
- Chua, K. J., Mujumdar, A. S. & Chou, S. K. (2003). Intermittent drying of bioproducts – an overview. *Bioresource Technology*, 90(3), 285–295. [doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00133-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00133-0)
- Hossein Nia, H., Nalbandi, H., Seiedlou, 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*, 31(4): 320-330. [doi: 10.1177/10820132231206435](https://doi.org/10.1177/10820132231206435)
- 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*, 17 (4), 286-292. [10.3746/pnf.2012.17.4.286](https://doi.org/10.3746/pnf.2012.17.4.286)
- Kaveh, M., Rasouli Sharabiani, V., Amiri Chayjan, R., Taghinezhad, E., Abbaspour-Gilande, 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. doi.org/10.1016/j.inpa.2018.05.003
- Kowalski, S. J. & Pawlowski, A. (2011). Energy consumption and quality aspect by intermittent drying. *Chemical Engineering and Processing*, 50(4), 384-390. doi.org/10.1016/j.ccep.2011.02.01
- Lakshmi, 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. doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.053
- Lechtanska, J. M., Szadzinska, J. & Kowalski, S. J. (2015). Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper Quality and energy considerations. *Chemical*

enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation. *Journal of Food Engineering*, 235, 79-88.
doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.028.

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.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.06.011>.