

Research Paper

Comparison of shelled almonds drying process comparison and finding best method by artificial neural networks

Esmaeil Seidi^{*1}, Aydin Salimi Asl², Mikaeel Khatooni¹

¹. Agricultural Department, Payame Noor University, Tehran, Iran. P.O. Box, 19395-4697.

². Engineering Department, Payame Noor University, Tehran, Iran. P.O. Box, 19395-4697.

Article history	Abstract
Submitted: 2026/01/01	To ensure proper drying of agricultural products, it is crucial to carefully select the drying method and equipment used. In this study, the optimal drying of almond kernels was investigated using three continuous dryers: vacuum, infrared, and a combination of these methods with microwave drying. The experiments were conducted at three air temperature levels (45°C, 65°C, and 75°C) for all methods. For the combined dryer, three microwave power levels (650W, 450W, and 250W) and three vacuum pressure levels (65 kPa, 45 kPa, and 25 kPa) were tested. For the infrared dryer, three linear belt speeds (63 cm/min, 39 cm/min, and 15 cm/min) and three radiation power levels (1500W, 1000W, and 500W) were considered. During the drying process, the initial moisture content decreased from 46% to approximately 6% based on dry weight. In the drying kinetics of almond kernels in all three combined dryers, the most significant independent factor influencing the process was the air temperature. The results and statistical data obtained from all three dryers were fitted to several drying models. The best mathematical model, with the lowest root mean square error (RMSE), chi-square (χ^2), and highest R^2 value, was the Midilli model, which showed the highest accuracy in predicting the drying process compared to the other models. In the microwave-vacuum combined dryer, the shrinkage percentage varied from 8.5% to 15%, the overall color change ranged from 2.6 to 14, the activation energy was between 21.2 kJ/mol and 39.7 kJ/mol, the effective diffusion coefficient of moisture ranged from 1.6×10^{-8} m ² /s to 2.1×10^{-8} m ² /s, and the specific energy consumption was between 0.06 to 0.17 GJ/kg.
Revised: 2026/01/05	
Accepted: 2026/01/09	
Published online: 2026/03/21	
Keywords: Amond, dryer vacume infrared microwave	
*Corresponding author email: e_seidi@pnu.ac.ir	
ORCID:  0000-0002-0517-5024	
	

How to cite this paper:

Seidi, E., Salimi Asl, A., and Khatooni, M. (2026). Comparison of shelled almonds drying process comparison and finding best method by artificial neural networks, Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery. 38: 17-30. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14820.747>. (In Persian)



Authors retain the copyright and full publishing rights. Published by [Shahrood University](https://www.shahrooduniversity.ac.ir). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14820.747>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Drying of a variety of food product is carried out to reduce their moisture levels in order to increase the shelf life, reduce the probability of developing fungi and to facilitate further processing to obtain the final product. Drying of almonds exhibit many characteristic features such as non-spherical shape, swelling/ shrinkage as a function of moisture content, uneven drying because of their peculiar shape and proximity to other almond kernels and so on. In recent years, different drying methods have been developed for different types of food materials, including hot air (HA) drying, infrared drying, vacuum drying, etc. For tree nuts, microwave drying, radiofrequency drying, and ultrasound assisted HA drying have also been studied in bench scale. However, HA drying in the deep-bed bin dryers is the most commonly applied technology in the industry, considering its large drying throughputs and relatively low cost.

Material and Methods

The main objective of this research is to dry almond nuts optimally using 3 combined microwave-vacuum, continuous and infrared dryers and finding the best method by artificial neural networks. 3 microwave power levels of 250, 450, 650 watts, 3 levels of vacuum pressure of 25, 45, 65 (kPa), 3 levels of linear speed of 15, 39, 63 cm m^{-1} of belt, and 3 levels of infrared radiation power of 500, 1000, 1500 watts were performed. In during the process of drying almond kernels, its initial moisture content was reduced from about 46% to about 6% based on the weight of dry matter. In order to predict the moisture content of almond kernels, Mathematical Model was selected based on the lowest value of root mean square error (RMSE) and χ^2 and the highest value of coefficient of determination (R^2).

Results and Discussion

Based on the Midili model, in the combined microwave-vacuum dryer, the percentage of

shrinkage is from 8.5 to 15%. General color changes from 2.6 to 14, activation energy from 21.2 to 39.7 (kJ mol^{-1}), effective moisture diffusion coefficient from 1.2×10^{-8} to 6.16×10^{-8} ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), and specific energy consumption from 0.06 to 0.17 (GJ kg^{-1}) was variable. Combined microwave-continuous dryer, shrinkage percentage from 7.1 to 12.1%, color changes from 8.5 to 19, activation energy from 11.75 to 24.7 (kJ mol^{-1}), effective moisture diffusion coefficient from 1.1×10^{-8} to 9.9×10^{-8} ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) and specific energy consumption values were calculated from 0.9 to 10.5 (GJ kg^{-1}). Combined microwave-infrared dryer, fading percentage from 8.7 to 15%, color changes from 7.1 to 22.17, activation energy from 10.95 to 21.05 (kJ mol^{-1}), effective diffusion coefficient humidity from 1.4×10^{-8} to 4.5×10^{-8} ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) and the specific energy consumption was calculated from 0.2 to 0.6 (GJ kg^{-1}).

The optimal point of drying almond kernels of combined microwave-infrared dryer at air temperature of 45°C and power of 446 (W) of microwave and power of 1500 (W) of infrared radiation was obtained by forward backpropagation network and Bayesian adjustment training function. Combined microwave-vacuum dryer, The most optimal point at air temperature of 45°C , microwave power of 650 (W) and vacuum pressure of 25 (kPa) was obtained by the pre-propagation network and Lunberg-Marquat training function. Combined microwave-continuous dryer, the most optimal point at air temperature of 45°C and microwave power of 450 (W) and belt linear speed of 59 (cm/min) was obtained by feed back propagation network with Lunberg-Marquat training function. Optimum brightening of almond kernels in the response surface method of combined microwave-infrared dryer, the most optimal point in shrinkage is 7% and color change is 10.5, and the amount of specific energy consumption is 0.2 (GJ kg^{-1}) and the amount of the effective diffusion coefficient of moisture is 2.5×10^{-8} (m^2/s) at a temperature of 45°C and 417 (W) of microwave power and 1490 (W) of infrared

power were obtained. Combined microwave-vacuum dryer has the most optimal point in shrinkage of 9%, color changes of 8.5 the amount of specific energy consumption of 0.13 (GJ kg⁻¹) and the amount of effective diffusion coefficient of 2.3×10^{-8} (m²/s) at the air temperature of 45 (°C) and the microwave power of 650 watts, the vacuum pressure of 26.5 kilopascals was achieved.

Conclusions

This study demonstrated that the application of combined drying technologies significantly improves the drying performance and quality attributes of almond kernels compared to conventional approaches. Among the evaluated methods, combined microwave–infrared, microwave–vacuum, and microwave–continuous drying systems effectively reduced the moisture content from 46% to approximately 6% (dry basis) while influencing shrinkage, color change, energy consumption, and moisture diffusion behavior. The Midilli model provided the most accurate prediction of drying kinetics for all systems, confirming its suitability for modeling almond drying processes. Artificial neural network analysis successfully identified optimal operating conditions for each dryer configuration, highlighting the critical role of air temperature and microwave power in process efficiency. Overall, the combined microwave–infrared dryer showed superior performance in terms of lower specific energy consumption and favorable quality characteristics, while the microwave–vacuum dryer exhibited competitive results under optimized conditions. These findings indicate that hybrid drying technologies, coupled with intelligent modeling and optimization tools, offer a promising and energy-efficient approach for industrial-scale drying of almond kernels and potentially other tree nuts.

Author Contributions

Authorship of this article is limited with substantial contributions.

First Author : 34%

Second Author : 33%

Third Author : 33%

Data Availability Statement

Data can be provided on request.

Ethical Considerations

Authors disclose any meaningful use of generative **artificial intelligence tools** (such as ChatGPT, Claude, Gemini and ...) in the process of producing the article (including drafting text, data analysis, image or code generation, or any other part of the content).

Conflict of Interest

The authors have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Funding Statement

The author(s) received no specific funding for this research.



مقایسه روش‌های خشک کردن مغز بادام درختی و انتخاب روش مطلوب به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی

اسماعیل صیدی^{۱*}، آیدین سلیمی اصل^۲ و میکایل خاتونی^۱

۱. بخش کشاورزی، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵ تهران، ایران.

۲. بخش نی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵ تهران، ایران.

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱	در این پژوهش خشک‌شدن بهینه مغز بادام به وسیله سه خشک‌کن پیوسته، خلاء و فروسرخ و نیز ترکیب هر کدام از آن‌ها با مایکروویو بررسی شد. عملیات در سه سطح دمای هوای (۴۵°C، ۶۵ و ۷۵) برای همه روش‌ها؛ برای خشک‌کن ترکیبی در سه سطح قدرت مایکروویو (۶۵۰ W، ۴۵۰ و ۲۵۰) و سه سطح فشار خلاء (۶۵ kPa، ۴۵ و ۲۵) و برای نوع فروسرخ در سه سرعت خطی تسمه (63 cm min^{-1} و ۳۹ و ۱۵) و سه سطح قدرت تابش (۱۵۰۰ watt، ۱۵۰۰ و ۵۰۰) انجام گرفت. در روند خشک‌شدن رطوبت اولیه از ۴۶٪ به حدود ۶٪ بر پایه وزن ماده خشک کاسته شد. در سنیتیک خشک‌شدن مغز بادام در هر سه خشک‌کن ترکیبی مهم‌ترین عامل مستقل اثرگذار میزان دمای هوا بود. نتایج و اطلاعات مربوط به داده‌های آماری به دست آمده از هر سه خشک‌کن با چندین مدل خشک‌شدن برازش شد. بهترین مدل ریاضی با پایین‌ترین مقادیر (RMSE) ریشه میانگین مربعات خطا، χ^2 و بالاترین مقدار R^2 مدل میدیلی بود که دارای بالاترین دقت در پیش‌بینی روند خشک‌شدن مغز بادام نسبت به سایر مدل‌ها است. در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-خلاء مقدار درصد چروکیدگی از ۸/۵٪ تا ۱۵٪، تغییرات کلی رنگ از ۶/۲ تا ۱۴، انرژی فعال‌سازی از $(21/2-39/7 \text{ kJ mol}^{-1})$ ، ضریب پخش مؤثر رطوبت از $(1/2 \times 10^{-8}-6/16 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ و انرژی ویژه مصرفی از $(0/06-0/17 \text{ GJ kg}^{-1})$ بود. در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-پیوسته درصد چروکیدگی $(0/7/1-1/2/1)$ ، تغییرات رنگ از ۸/۵ تا ۱۹، انرژی فعال‌سازی $(24/7-11/75 \text{ kJ mol}^{-1})$ ، ضریب پخش مؤثر رطوبت از $9/9 \times 10^{-8}-1/1 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و انرژی ویژه مصرفی از $(0/9-10/5 \text{ GJ kg}^{-1})$ بود. در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-فروسرخ درصد چروکیدگی از ۸/۷٪ تا ۱۷/۲۲٪، تغییرات رنگ از ۷/۱ تا ۱۷/۲۲، انرژی فعال‌سازی از $(10/95-21/05 \text{ kJ mol}^{-1})$ ، ضریب پخش مؤثر رطوبت از $21/05 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و انرژی ویژه مصرفی از $(1/4 \times 10^{-8}-4/5 \times 10^{-8} \text{ GJ kg}^{-1})$ محاسبه شد.
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵	
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۹	
انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱	
واژه‌های کلیدی: خشک‌کن پیوسته فروسرخ، مایکروویو، خلاء، بادام	
*پست الکترونیکی نویسنده مستول: e_seidi@pnu.ac.ir	
ORCID:  ۵۰۲۴-۰۵۱۷-۰۰۰۲-۰۰۰۰	
	

نحوه استناد به این مقاله:

صیدی، ا.، سلیمی اصل، آ. و خاتونی، م. (۱۴۰۵). مقایسه روش‌های خشک کردن مغز بادام درختی و انتخاب روش مطلوب به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۳۸: ۱۷-۳۰. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14820.747>

مقدمه

کم کردن آب محصولات تولیدی کشاورزی و نیز مواد غذایی به خاطر کاستن وقوع واکنش‌های شیمیایی مخرب و کم شدن و یا توقف کامل رشد و نمو ریز ارگانیسم‌های فاسد کننده مواد غذایی را فرآیند خشک‌شدن می‌گویند. امروزه روش‌های سنتی خشک کردن رو به فراموشی رفته و از روش‌های صنعتی و نوین به طور گسترده در کارخانجات و مراکز صنعتی تولید مواد غذایی فرآوری شده مورد استفاده قرار گرفته است. که از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به خشک‌شدن با استفاده از مایکروویو^۱، خشک‌شدن بستر سیال^۲، خشک‌شدن خلاء^۳، خشک‌شدن صوتی، خشک‌شدن با استفاده از پرتو فرو سرخ^۴ (مادون قرمز)، خشک‌شدن با نور خورشید و غیره را نام برد (El-Mesery et al. 2022).

در این زمینه کارهای تحقیقاتی بسیاری انجام شده است، مثلاً در پژوهشی تأثیر روش خشک کردن (مایکروویو، مایکروویو- هوای گرم) بر سینتیک خشک‌شدن پسته نشان داد، استفاده از انرژی مایکروویو به عنوان پیش تیمار برای هوای گرم به طور معنی‌داری توانست میانگین محتوای رطوبت و نسبت رطوبت را در مقایسه با روش مایکروویو به تنهایی کاهش دهد و پودری با رطوبت کم‌تر و ماندگاری بیش‌تر تولید کند. (Kermani et al., 2017) همچنین در پژوهشی امکان تولید پودر ماست با استفاده از خشک‌کن مایکروویو - خلاء بررسی شد و نشان داد که فرآیند خشک کردن در فشار ۶۰mbar و توان ۳۵watt بهترین شرایطی است که طی آن ضمن کاهش قابل توجه مدت زمان خشک کردن (بیش از ۸۰٪) ویژگی‌های کیفی پودر حاصل بیش‌ترین تشابه با پودرهای تهیه شده با خشک‌کن انجمادی داشت (Abbasi, 2017).

شرایط بهینه فرآیند خشک کردن پسته به روش سطح پاسخ در خشک‌کن مایکروویو بررسی شده که در سه سطح سرعت هوای ورودی ($1/51 \text{ ms}^{-1}$ ، $3/3$ ، $4/8$) و سه سطح دمای هوا (35°C ، 45 و 55) و سه سطح توان خشک‌کن (220 watt ، 330 ، 440) به کار برده شد، در سطح سرعت هوای ورودی $1/51 \text{ ms}^{-1}$ و توان 440 watt و دمای 39°C بهترین نقطه خشک‌شدن پسته است (Kave et al., 2018).

محققین در پژوهشی مدل‌سازی اجزای محدود خشک

کردن نخود فرنگی در خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-هوای گرم پرداختند. برای این منظور، رابطه حاکم بر انتقال جرم و شرایط اولیه و مرزی آن استخراج شد. به کمک روش اجزای محدود با رویکرد گلرکین، دستگاهی از معادلات دیفرانسیل مرتبه اول به دست آمد. جهت شبیه‌سازی فرآیند خشک‌شدن و حل دستگاه معادلات، یک کد کامپیوتری در نرم افزار MATLAB تدوین شد. شبیه‌سازی در چهار سطح شدت تابش با مقادیر صفر، 2000 watt m^{-2} ، 4000 و 6000 ، سه سطح دمای 30°C ، 40 و 50 و سه سطح سرعت $1/5 \text{ m s}^{-1}$ ، $1/0$ و $0/5$ انجام شد. در نهایت به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، نتایج این مدل‌سازی با نتایج حاصل از خشک‌کن آزمایشگاهی، مادون قرمز- هوای گرم، مقایسه گردید. حداقل، حداکثر و متوسط میانگین خطای نسبی داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با مدل‌سازی به روش اجزای محدود دو بعدی، به ترتیب $2/21\%$ ، $3/77\%$ و $2/50\%$ هستند.

این روش دارای دقت مناسب و کارایی بالا در پیش‌بینی تغییرات رطوبت محصول، طی فرآیند خشک کردن دانه نخودفرنگی، است و اطلاعات بیش‌تری را درمورد انتقال رطوبت، بدون انجام آزمایش می‌دهد که می‌تواند جهت طراحی خشک‌کن‌ها مفید باشد (Zare et al., 2020). پژوهش‌گران دیگر در انتخاب مدل ریاضی برای سینتیک خشک کردن میوه آلبالو در خشک‌کن مایکروویو-خلاء، نتایج نشان داد که توان مایکروویو و میزان خلاء روی سرعت خشک شدن آلبالو اثر مهمی دارند و با افزایش توان و کاهش فشار محفظه، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. همچنین، فرآیند خشک شدن در مرحله نزولی اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، مقایسه مدل‌های مختلف نشان داد که مدل میدلی و همکاران به دلیل دارا بودن بالاترین R^2 و کم‌ترین RMSE و χ^2 می‌تواند مناسب‌ترین مدل باشد (Motavali et al., 2013).

گروهی دیگر در مقایسه تأثیر روش خشک کردن (هوای گرم، مایکروویو، هوای گرم-مایکروویو، مایکروویو-هوای گرم) بر سینتیک خشک‌شدن بروکلی بر اساس کم‌ترین میزان مصرف انرژی، زمان فرآیند، میانگین محتوا و نسبت رطوبت و نیز بیش‌ترین میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت و نرخ خشک‌شدن، روش مایکروویو با میزان مطلوب بودن $0/88$ و پس از آن روش هوای گرم-مایکروویو با میزان مطلوب بودن

4-Convective drying

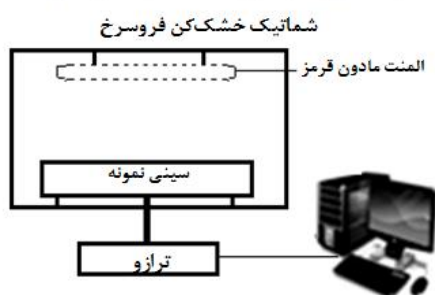
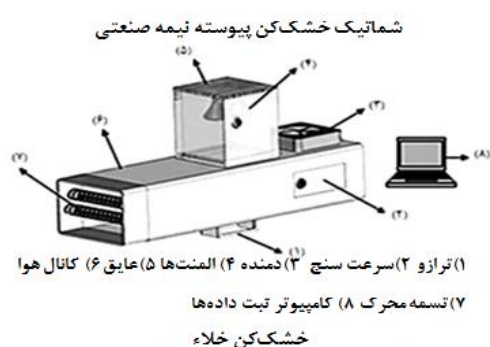
11-Microwave dryer

2-Fluid bad drying

3-Vacuum drying

۵ بسته ۵ گرمی از بادام‌ها را که توسط ترازوی رقمی وزن شدند در داخل یک خشک‌کن که دمای آن حدود 10.5°C است حدود ۶ ساعت و تا زمان تثبیت وزن نمونه‌ها قرار داده شد. برای بررسی روند خشک شدن و نیز عوامل مؤثر بر این فرآیند از روش معرفی شده در اطلس خشک کردن محصولات کشاورزی بهره گرفته شد (Mühlbauer, & Müller, 2020).

در همه آزمایشات از خشک‌کن خلاء، خشک‌کن فرو سرخ و خشک‌کن پیوسته نیمه صنعتی با پیش تیمار مایکروویو استفاده گردید. مایکروویو مورد استفاده از نوع هانپنهر (Hofner) و مدل Ho5004 ساخت کشور ترکیه با حداکثر توان 1600 watt و حداکثر دمای 250°C بود که قابلیت تنظیم توان بین 160 watt - 1600 watt را داشت.



شکل ۱. شماتیک خشک‌کن‌های مورد استفاده

خشک‌کن پیوسته نیمه صنعتی

این خشک‌کن‌ها از واحدهای تولید حرارت، دمنده هوا، حرکت و انتقال و واحد پایش، ساخته شده‌اند. برای تولید گرما از المنت‌های برقی با توان 5kw استفاده شد. دمنده هوا به وسیله یک موتور برقی با توان یک اسب بخار به گردش در می‌آید.

۰/۷ روش بهینه برای خشک کردن بروکلی شناخته شدند (Ataei et al., 2022). تیمی دیگر در خشک شدن به لیمو توسط خشک‌کن پیوسته مجهز به سامانه پیش گرمایش دریافتند که با افزایش قدرت و سرعت تسمه و دمای هوای خشک‌کن مدت زمان خشک شدن به لیمو کاهش یافت (Soodmand-Moghaddam et al., 2020).

هم‌چنین در تحقیق Chayjan et al., 2012 در تعیین شرایط بهینه فرآیند خشک کردن پسته در مایکروویو به این نتایج رسیدند که با اضافه شدن دما تا 50°C و سرعت هوای 16 m s^{-1} و قدرت 440 watt مایکروویو نقطه بهینه خشک کردن پسته است. شرایط عملیاتی بهینه با افزایش دما و سرعت هوای ورودی و توان فروسرخ باعث کاهش تغییر رنگ و مدت زمان خشک شدن قارچ شیتا درخشک‌کن‌های ترکیبی مایکروویو - فروسرخ شد. کاسته شدن از مدت زمان و حفظ کیفیت رنگ در خشک شدن گیاه نعنا نیز توسط Bahmanpour et al., 2017 به دست آمده است.

اهداف کلی این پژوهش عبارت بودند از: الف) بهینه کردن پارامترهای خشک شدن مغز بادام و انتخاب بهترین شرایط خشک شدن به کمک روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی، ب) محاسبه کردن برخی خواص شیمیایی و فیزیکی خشک شدن مغز بادام مانند تغییرات رنگ، تغییرات اندازه، انرژی فعال سازی و انرژی مصرفی در سه خشک‌کن مختلف، ج) مشخص کردن و انتخاب بهترین روش و مدل خشک شدن مغز بادام از میان سه مدل خشک‌کن و ترکیب کردن آن‌ها با مایکروویو.

مواد و روش‌ها

جهت انجام این تحقیق از رقم بادام درختی ایرانی آذر که پیوند خورده نژاد ایرانی و ایتالیایی است استفاده شد. این رقم یکی از بهترین ارقام بادام‌های ایران است و در مناطق کوهستانی و سردسیر کاشته می‌شود. عملکرد این رقم بادام نسبت به بقیه ارقام بالاتر است و معمولاً در اواخر تابستان برداشت می‌شود. در این پژوهش پس از برداشت و جمع آوری بادام‌ها آن‌ها را در پلاستیک بسته‌بندی شدند و برای جلوگیری از تغییرات فیزیولوژیکی و شیمیایی، بادام‌ها در یخچال با دمای 4°C تا قبل از انجام آزمایشات نگهداری شدند.

برای اندازه‌گیری میزان رطوبت اولیه مغز بادام به طور تصادفی چند نمونه از بادام‌ها را از پلاستیک‌های درون یخچال خارج نموده و سریعاً پوست‌گیری شدند و وزن آن‌ها ثبت شد. سپس

۱۰۰۰ و ۱۵۰۰) و سه سطح دمایی (45°C ، ۶۵ و ۸۵) و سه سطح توان مایکروویو (۲۵۰ watt، ۴۵۰ و ۶۵۰) اعمال گردید. سرعت هوایی که به خشک‌کن وارد می‌شد در همه آزمایشات ثابت در نظر گرفته شد (1 m s^{-1}).

روش شبکه عصبی مصنوعی

در این تحقیق از شبکه پیش‌خور پس انتشار^۱ (FFBP) و پیش‌رو پس انتشار^۲ (CFBP) از شبکه‌های عصبی مصنوعی که بیش‌تر در حل مسائل محاسباتی و مهندسی کاربرد دارند استفاده شد. برای بهینه کردن شبکه‌ها لازم است که داده‌های به دست آمده از آزمایشات را ابتدا نرمال کرده و پس از انتخاب ضریب وزنی، عامل بهینه‌یاب از میان متغیرهای پاسخ برگزیده شود. از میان آزمایشات صورت گرفته توسط هر خشک‌کن با توجه به اهمیت و ضروری بودن آن‌ها دو عامل را انتخاب و پس از نرمال‌سازی و ارزش‌گذاری یکسان داده‌ها، آن‌ها در شبکه‌های عصبی مصنوعی قرار گرفت.

شبکه‌های عصبی مصنوعی در اجزا مختلف ساختار خود از الگوریتم‌ها و توابع مختلفی سود می‌برند. از میان توابع آموزشی الگوریتم، لونیگ - مارکوارت که روشی برای یافتن کمینه یک تابع غیر خطی چند متغیره که به یک روش استاندارد درآمده است، استفاده گردید. برای مشخص نمودن ساختار مطلوب آزمایشات از شبکه پرسپترون چند لایه استفاده شده است. در لایه‌های ورودی بر روی داده پردازشی انجام نمی‌گیرد، ولی در لایه‌های بعدی که به لایه‌های پنهان معروف هستند، کار پردازش را انجام داده و در لایه آخر شاخص بهینه استخراج می‌شود.

عامل بهینه‌یاب (SUM)

در خشک‌کن‌ها با استفاده از متغیرهای پاسخ چروکیدگی، تغییر رنگ، ضریب رطوبت مؤثر و انرژی مصرفی و همچنین ضرایب توزین، این عامل محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها:

تغییرات درصد چروکیدگی: مقدار چروکیدگی (S) که به صورت درصد است برای هر سه روش خشک‌کن به دست آمد. بیش‌ترین درصد چروکیدگی در هر سه خشک‌کن ترکیبی در

هوای دمیده شده از روی المنت‌های برقی عبور کرده و پس از گرم شدن از طریق کانال هوا وارد محفظه خشک‌کن می‌گردد. محصول خشک شونده بر روی تسمه نقاله‌ای که توسط یک محرک برقی با سرعت متغیر، قرار گرفته به انتهای خشک‌کن منتقل می‌گردد. یک سری کلید، نمایش‌گر، اینورتر و ترموستات، کار پایش خشک‌کن را به عهده دارند.

سطوح و روش انجام آزمایشات توسط خشک‌کن

پیوسته نیمه صنعتی

در این تحقیق، آزمایشات را در سه سطح توان خشک‌کن شامل (250 ، 450 ، 650 watt) و سه سطح سرعت رایج تسمه نقاله شامل (13 ، 39 ، 63 cm min^{-1}) و سه سطح دمای هوای ورودی (45 و 65 ، 85°C) اعمال گردید. سرعت هوای ورودی برای تمام آزمایشات ثابت در نظر گرفته شد.

خشک‌کن خلاء

خشک‌کن خلاء از یک استوانه تو خالی تفلونی که دارای شیر ورودی هوا و حسگرهای پایش کننده فشار هوا و دما و هم‌چنین سه واحد ایجاد خلاء، تولید حرارت و سیستم پایش، تشکیل شده است. در این خشک‌کن یک پمپ خلاء که به وسیله یک لوله به بدنه استوانه وصل شده خلاء لازم را به وجود می‌آورد. دمای مورد نیاز توسط یک المنت تأمین می‌شود و به وسیله یک حسگر با میزان دقت یک دهم درجه سلسیوس پایش می‌شود. میزان فشار داخل محفظه توسط یک حسگر فشار با دقت یک پاسکال پایش می‌گردد. این حسگر با خاموش و روشن کردن پمپ خلاء فشار مورد نظر را تأمین می‌کند.

خشک‌کن فروسرخ (مادون قرمز)

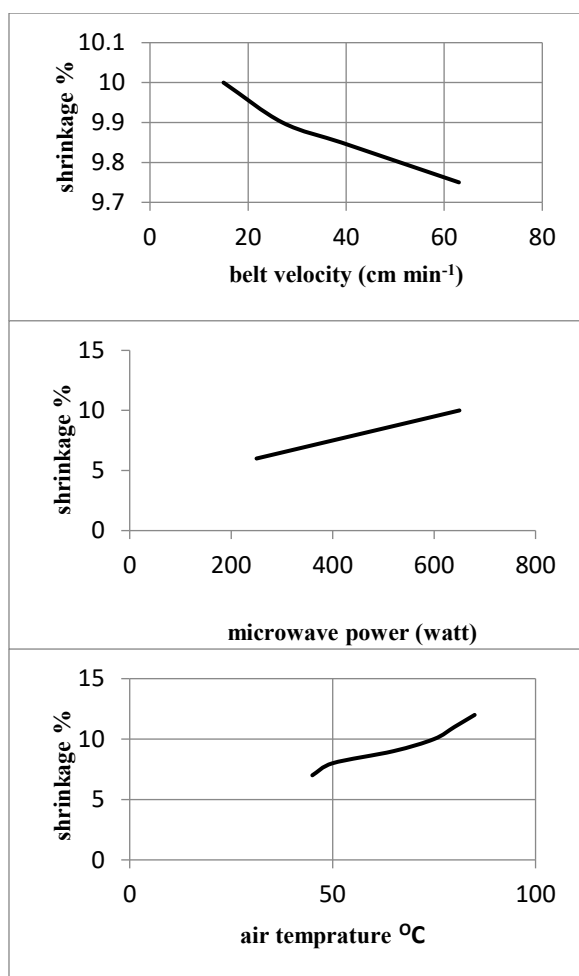
این خشک‌کن تشکیل از یک بدنه فولادی با پوشش رنگ الکترو استاتیک با عایق کاری توسط مواد عایق حرارت، پنل‌های داخلی از جنس آلومینیوم و پنکه مکنده دور بالا شده است. ولتاژ کاری دستگاه 220 V با جریان کاری متغیر از A ۱-۱۰ برای هر لامپ، صفحه نمایش پایش دما (ترموستات)، ترموکوپل و منابع حرارتی لامپ‌های مادون قرمز تابشی 500 watt و 100 و اینورتر پایش سرعت هوا ورودی است. سطوح آزمایشات در خشک‌کن فروسرخ و روش انجام آزمایش: این مطالعه در سه سطح قدرت فرو سرخ شامل (500 watt)

² . Cascade forward back propagation

¹ . feed forward back propagation

خشک شدن کم‌تر می‌شد و درصد چروکیدگی نیز کاهش یافت (شکل ۳).

در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-فروسرخ حداکثر درصد چروکیدگی مغز بادام حدود ۱۴٪ در قدرت ۱۵۰۰ watt تابیدن لامپ‌های فرو سرخ اتفاق افتاد، و حداقل درصد چروکیدگی مغز بادام حدود ۷/۵٪ در قدرت ۵۰۰ watt تابیدن لامپ‌های فرو سرخ اتفاق افتاد. با توجه به بالا رفتن قدرت تابیدن لامپ‌های فرو سرخ، تبخیر آب درون سلول‌های مغز بادام شدت بیش‌تری گرفته و درصد چروکیدگی بیش‌تری اتفاق می‌افتد. این نتایج در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است.

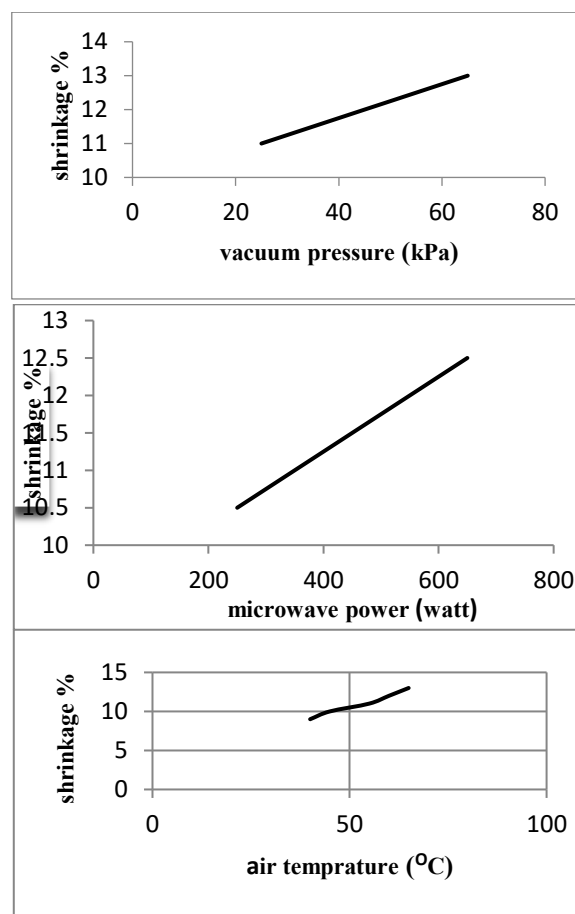


شکل ۳. تغییرات درصد چروکیدگی در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-پیوسته

دمای هوا مهم‌ترین عاملی است که بر میزان درصد چروکیدگی در آزمایشات همه خشک‌کن‌ها تأثیر بسزایی دارد. با توجه به اضافه شدن قدرت مایکروویو و دمای هوا درصد چروکیدگی نیز اضافه شد. همچنین با کم شدن فشار خلاء، اختلاف فشار جو در داخل و خارج خشک‌کن زیاد می‌شود و

میزان دمای هوای ۸۵°C درجه و قدرت ۶۵۰ watt مایکروویو اتفاق افتاد.

در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-خلاء بالاترین درصد چروکیدگی ۱۵٪ در میزان فشار خلاء ۶۵kPa و کم‌ترین درصد چروکیدگی ۹٪ در فشار ۲۵kPa اتفاق افتاد زیرا در این فشار مدت زمان روشن بودن پمپ خلاء زیاد است و مدت زمان خشک شدن مغز بادام کم است، لذا میزان درصد چروکیدگی مغز بادام کاهش یافت (شکل ۲).

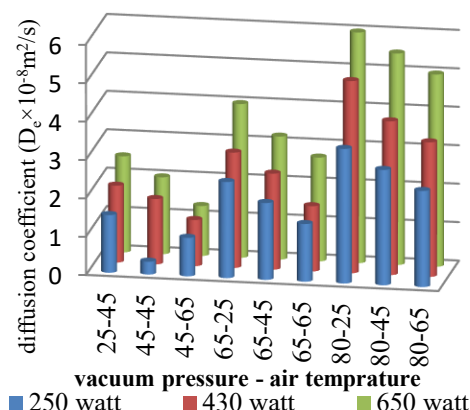


شکل ۲. تغییرات درصد چروکیدگی در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-خلاء

در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-پیوسته حداقل درصد چروکیدگی حدود ۷٪ با سرعت تسمه ۶۳ cm min⁻¹ و حداکثر درصد چروکیدگی نیز در حدود ۱۲٪ با سرعت تسمه ۱۵ cm min⁻¹ اتفاق افتاد.

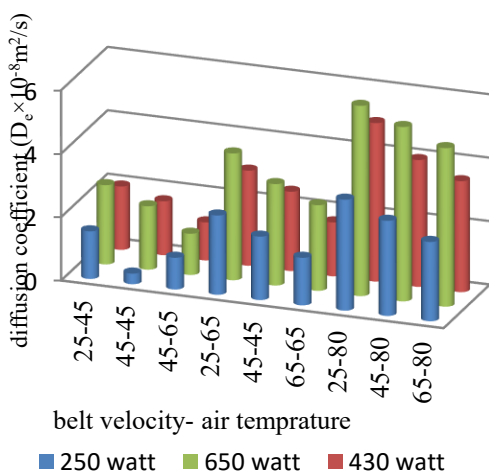
با توجه به ثابت نگهداشتن مدت زمان خشک شدن، هرچه سرعت تسمه بیش‌تر باشد، هر بار سیر کامل بادام در تونل زودتر تمام می‌شود و مغز بادام به تعداد دفعات بیش‌تری در داخل دستگاه مایکروویو قرار گرفت و مدت زمان

پخش مؤثر رطوبت در فشار خلاء ۶۵ kPa و دمای ۴۵°C و سرعت $10^{-1} \times 1/2 \text{ m s}^{-1}$ حاصل شد.



شکل ۴. ضریب پخش رطوبت مؤثر در خشک‌کن خلاء در شرایط مختلف دمایی و فشارهای خلاء

هرچه مدت زمان روشن بودن پمپ خلاء زیاد باشد، باعث می‌شود آب بین سلولی و میان بافتی مرکز مغز بادام با سرعت بیش‌تری به قسمت خارج سطح منتقل شده و در نتیجه ضریب پخش مؤثر رطوبت مغز بادام زیاد می‌گردد.



شکل ۵. ضریب پخش رطوبت مؤثر در خشک‌کن پیوسته در شرایط دمایی و سرعت‌های مختلف تسمه

در تحقیقات مشابهی محققین در ارتباط با ضریب پخش مؤثر رطوبت ورقه‌های زردآلو در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- فراصوت دریافتند که ازدیاد دمای هوا و سرعت در زمان خشک کردن ضریب پخش مؤثر رطوبت ورقه‌های زردآلو از $2/58 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $2/99 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ متغیر است (Sakooei-Vayghan et al., 2020). هم‌چنین در بررسی خشک‌شدن فندق در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-فروسرخ

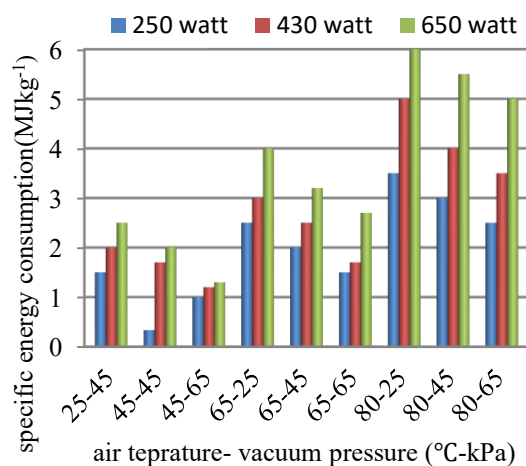
این اختلاف باعث خارج شدن رطوبت میان بافتی محصول می‌شود که به کم شدن مدت زمان خشک‌شدن مغز بادام کمک کرد و درصد چروکیدگی نیز به طور چشمگیری کاهش یافت. با زیاد شدن سرعت خطی تسمه در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- پیوسته، مدت زمان خشک‌شدن کاسته شد، که منجر به کاسته شدن درصد چروکیدگی گردید. در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- فروسرخ در شرایطی که قدرت فرو سرخ و مایکروویو و هم‌چنین دمای هوا افزایش یابد، مغز بادام آب میان بافتی خود را در اثر تبخیر، سریعاً از دست می‌دهد که با از دست رفتن رطوبت درون بافت محصول، توانایی حفظ ساختار و شبکه ساختمانی سلول‌ها کم شده و در نتیجه کاهش حجم مغز بادام باعث چروکیدگی آن‌ها می‌گردد.

در تحقیقات مشابهی پژوهش‌گران در بررسی تغییرات چروکیدگی در طی فرآیند خشک کردن سیر گزارش نموده اند که با تبخیر زیادتر آب محصول سیر درصد چروکیدگی حبه‌های آن افزایش می‌یابد. (Rasouli et al., 2011). در تحقیقی دیگر در خشک‌شدن گوجه فرنگی به این نتیجه رسیدند که زیاد شدن مدت زمان و افزایش دمای خشک‌شدن باعث افزایش درصد چروکیدگی برش‌ها می‌گردد (Taghinezhad et al., 2020). در خشک‌شدن برنج نیم جوش در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- فرو سرخ، مایکروویو و خشک‌کن خلاء بیان داشت که با کاستن از قدرت فرو سرخ و کاهش فشار خلاء از درصد چروکیدگی کاسته می‌شود (Cheenkachom, 2007).

هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که در همه خشک‌کن‌ها با اضافه شدن دما و قدرت مایکروویو میزان ضریب پخش مؤثر رطوبت بادام نیز اضافه می‌شود. چون وقتی دما و قدرت مایکروویو اضافه می‌شود مقدار بیش‌تری، رطوبت مغز بادام از قسمت درون به قسمت سطح و منتقل می‌گردد. با توجه به مقادیر به دست آمده از هر سه خشک‌کن مشخص شد که بالاترین مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت در دمای هوای ۸۵°C و قدرت ۶۵۰ watt مایکروویو اتفاق می‌افتد (شکل‌های ۶، ۵، ۴).

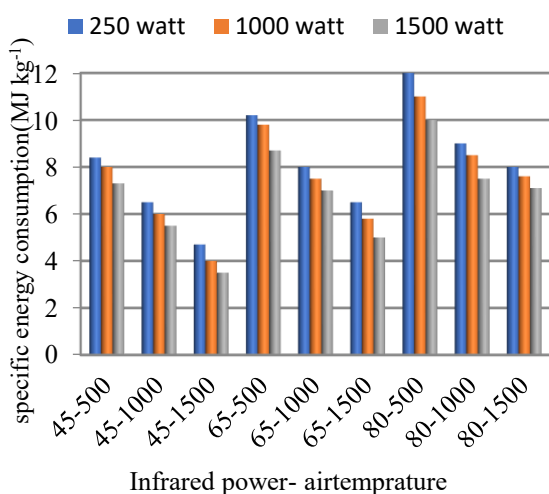
هم‌چنین پایین‌ترین مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت در دمای ۴۵°C و قدرت ۲۵۰ watt مایکروویو رخ می‌دهد. با توجه به مقادیر به دست آمده از ضریب پخش مؤثر رطوبت معلوم شد که در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-خلاء بالاترین مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت در فشار خلاء ۲۵kPa و دمای ۸۵°C و سرعت $10^{-1} \times 6/16 \text{ m s}^{-1}$ و پایین‌ترین میزان ضریب

آب داخل محصول در سطح و نزدیک به پوسته آن باشد، مقدار انرژی که برای شروع فعالیت تبخیر آب محصول لازم است کم خواهد بود. در نتیجه انرژی فعال‌سازی آن نیز کم است.



شکل ۷. تأثیرات دمای هوا، قدرت مایکروویو و قدرت خلاء بر انرژی ویژه مصرفی در خشک‌کن مایکروویو- خلاء

با توجه به ساختار و ساختمان شیمیایی مغز بادام، رطوبت آن در سطح بیش‌تر از درون آن است. پس مقدار انرژی فعال‌سازی و انرژی که برای شروع تبخیر رطوبت محصول لازم است خیلی کم‌تر از بقیه محصولات و مواد کشاورزی است (Wongso, 2021).



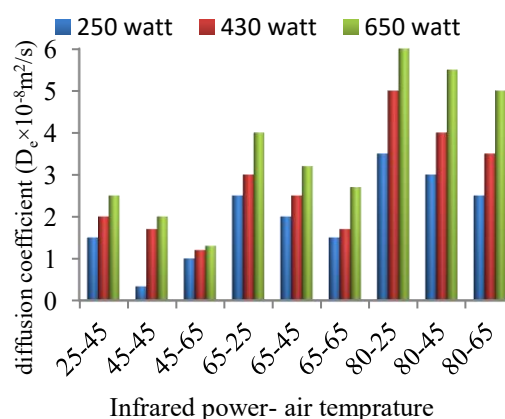
شکل ۸. تأثیرات دمای هوا، قدرت مایکروویو و سرعت تسمه در انرژی ویژه مصرفی در خشک‌کن مایکروویو- پیوسته

همیشه آغاز تبخیر محصولات رابطه مستقیم با میزان حرارت خواهد داشت. چون در خشک‌کن‌های ترکیبی

دریافتند که با ازدیاد قدرت تابش فروسرخ مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت نیز افزایش می‌یابد (Kaviani et al., 2021). در بررسی خشک کردن مغز گردو در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- پیوسته دریافتند که افزایش دمای خشک‌کن باعث افزایش ضریب پخش مؤثر رطوبت از $3/54 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $9/92 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ می‌شود (Jafarifar et al., 2017).

انرژی فعال‌سازی: همان انرژی است که لازم است تا یک کیلوگرم آب از مواد خشک‌شدنی خارج شود. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایشات مقدار انرژی فعال‌سازی در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- خلاء از $21/10 \text{ kJ kg}^{-1}$ تا $39/56 \text{ kJ kg}^{-1}$ متغیر است. برای خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- پیوسته از $11/41 \text{ kJ kg}^{-1}$ تا $24/61 \text{ kJ kg}^{-1}$ متغیر است و همچنین برای خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-فروسرخ از $11/55 \text{ kJ kg}^{-1}$ تا $20/70 \text{ kJ kg}^{-1}$ متغیر است.

بر اساس بررسی‌های به عمل آمده از دیگر پژوهش‌های مشابه محققین صاحب نظر، نتیجه‌ها تقریباً با این تحقیق مشابه است مانند: (Jafarifar et al., 2017). در پژوهش خشک کردن مغز گردو در خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار مایکروویو مقدار انرژی فعال‌سازی از $10/52 \text{ kJ kg}^{-1}$ تا $10/52 \text{ kJ kg}^{-1}$ به دست آورده است. ایشان در پژوهش خشک‌کردن برش‌های سیب‌زمینی در خشک‌کن جریان پیوسته با پیش تیمار مایکروویو، مقدار انرژی فعال‌سازی را از $39/50 \text{ kJ kg}^{-1}$ تا $43/35 \text{ kJ kg}^{-1}$ بیان کرده‌اند.



شکل ۹. ضریب پخش رطوبت مؤثر در خشک‌کن فروسرخ در شرایط دمایی و قدرت‌های مختلف فروسرخ

مقدار انرژی فعال‌سازی به عواملی مانند رطوبت اولیه، ماده خشک‌شدنی، ساختار و ساختمان شیمیایی محصول و همچنین شرایط و روش خشک‌شدن محصول وابسته است. اگر

بهینه‌یابی با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی

جهت جمع‌آوری داده‌های آزمایشات در خشک‌کن‌های ترکیبی از شبکه پس انتشار پیش‌خور^۱ (FFBP) با تابع آموزش دهنده لونیگ-مارکوات^۲ (L.M) و تابع محرک تانژانت سیگموئید (tan sig) و آرایش متناسب با هر کدام از خشک‌کن‌ها استفاده گردید. داده‌های به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است.

پس از آنکه شبکه عصبی مصنوعی با چرخه مناسب انتخاب گردید برای پیدا کردن نقاط بهینه از عامل بهینه یاب سام (SUM) استفاده شد (رابطه ۱۳). عامل بهینه یاب که به وسیله چهار متغیر وابسته، درصد چروکیدگی، تغییرات رنگ، ضریب پخش مؤثر رطوبت و انرژی ویژه مصرفی بیان می‌شود. برای یافتن نقاط بهینه با توجه به اهمیت عامل سام کم‌ترین مقدار برای این عامل در نظر گرفته می‌شود. در هر خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-خلاء کم‌ترین، مقدار چروکیدگی ۸/۸٪، تغییرات رنگ ۸/۵، ضریب پخش مؤثر رطوبت $10 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و انرژی مصرفی ویژه 0.14 GJ kg^{-1} در هوای 45°C و قدرت مایکروویو 650 watt و فشار خلاء 25 kPa است. در هر خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-پیوسته کم‌ترین مقدار چروکیدگی ۷٪، تغییرات رنگ ۱۱/۵، ضریب پخش مؤثر رطوبت $3/9 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بر ثانیه و انرژی مصرفی ویژه $1/1 \text{ GJ kg}^{-1}$ در هوای 45°C و قدرت مایکروویو 401 watt و سرعت تسمه 60 cm min^{-1} است.

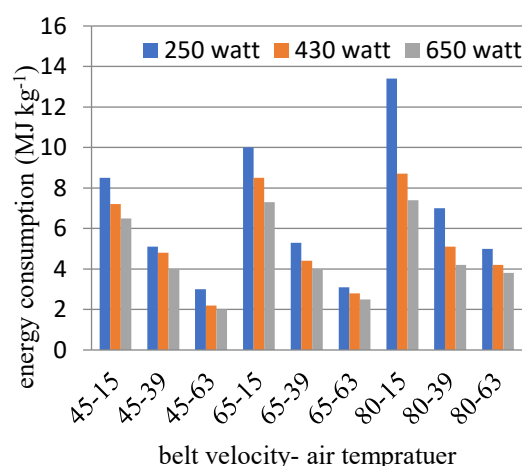
در هر خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-پیوسته کم‌ترین مقدار چروکیدگی ۷٪، تغییرات رنگ ۱۰/۲، ضریب پخش مؤثر رطوبت $2/43 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و انرژی مصرفی ویژه 0.2 GJ kg^{-1} در هوای 45°C و قدرت مایکروویو 401 watt و قدرت تابش فروسرخ 1500 watt است.

نتیجه‌گیری

در هر سه خشک‌کن ترکیبی مایکروویو با خشک‌کن‌های خلاء، پیوسته و فروسرخ، با اضافه شدن قدرت مایکروویو و میزان دمای هوا ازمدة زمان خشک‌شدن مغز بادام کاسته شد. در سنیتیک خشک‌شدن مغز بادام در هر سه خشک‌کن ترکیبی مهم‌ترین عامل مستقل اثرگذار میزان دمای هوا است. نتایج و اطلاعات مربوط به داده‌های آماری به دست آمده از هر سه خشک‌کن با چندین مدل خشک‌شدن برازش شد. بهترین مدل ریاضی با پایین‌ترین مقادیر (RMSE) ریشه میانگین

مایکروویو- خلاء، به جای استفاده بیش‌تر از حرارت در خشک‌شدن از اختلاف فشاری که توسط پمپ خلاء ایجاد می‌شود استفاده می‌گردد، بنابراین مقدار انرژی فعال‌سازی در این خشک‌کن‌ها بیش‌تر از خشک‌کن‌های فروسرخ و پیوسته با ترکیب مایکروویو است. نتایج نشان می‌دهد که در هر سه تیمار آزمایش با اضافه شدن قدرت مایکروویو، میزان انرژی ویژه مصرفی کم می‌شود.

با توجه به یافته‌های پژوهش در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- خلاء حداکثر مقدار انرژی ویژه مصرفی در قدرت 250 watt مایکروویو و دمای هوای 45°C و مقدار فشار خلاء 25 kPa حدود 0.17 GJ kg^{-1} است و حداقل میزان انرژی ویژه مصرفی در قدرت مایکروویو 650 watt و دمای هوای 85°C و مقدار فشار خلاء 65 kPa حدود 0.60 GJ kg^{-1} است و هم‌چنین در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو - پیوسته حداکثر میزان انرژی ویژه مصرفی در دمای هوای 85°C و در سرعت خطی تسمه 15 cm min^{-1} و قدرت مایکروویو 250 watt حدود $1.0/5^\circ \text{C}$ است.



شکل ۹. تأثیرات دمای هوا، قدرت مایکروویو و قدرت فروسرخ بر انرژی ویژه مصرفی در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- فروسرخ

این در حالی است که حداقل میزان انرژی مصرفی ویژه در آن خشک‌کن در دمای هوای 45°C ، سرعت خطی تسمه 63 cm min^{-1} و قدرت مایکروویو 650 watt اتفاق می‌افتد و حدود 0.09 GJ kg^{-1} است. پس نتیجه حاصل شده آن است که با اضافه شدن به سرعت تسمه، ازمدة زمان خشک‌شدن کاسته شده و بالطبع انرژی ویژه مصرفی نیز کاسته می‌شود.

² . Levenberg-Marquardt algorithm

¹ . feed forward back propagation

صورت زیر است:

- نویسنده اول: ۳۴٪
- نویسنده دوم: ۳۳٪
- نویسنده سوم: ۳۳٪

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها در صورت درخواست، در اختیار قرار خواهند گرفت.

اصول اخلاقی

نویسندگان در فرآیند تولید مقاله هیچگونه استفاده معناداری از ابزارهای هوش مصنوعی مولد (مانند Claude، ChatGPT، Gemini و موارد دیگر) نکرده‌اند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته‌شده‌ای که ممکن است بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد، ندارند.

حمایت مالی

نویسنده(ها) هیچ حمایت مالی خاصی برای انجام این پژوهش دریافت نکرده‌اند.

منابع

- Abbasi, S. (2017). Yoghurt powder production using microwave-vacuum drier: Drying kinetics, mathematical modeling, and characteristics. *Journal of Food Science & Technology*, 2(2). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v6i3.9104>
- Ataei, A. S. M., Sadeghi, M., Beheshti, B., Minaei, S., & Hamdami, N. (2015). Vibro-fluidized bed heat pump drying of mint leaves with respect to phenolic content, antioxidant activity, and color indices. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 21(2), 239-247.
- Ataei, M., Khakbaz Heshmati, M., Dehghan Nia, J., & Dadashi, S. (2022). Comparison of the effects of drying methods (hot air, microwave, hot air-microwave, and microwave-hot air) on the drying kinetics of broccoli foam. *Journal of Food Research*, 32(2), 73-87. <https://doi.org/10.22034/FR.2022.45628.1791>
- Bahmanpour, H., Sajadiye, S. M., Sheikhdavoodi, M. J., & Zolfaghari, M. (2017). The effect of temperature and drying method on drying time and color quality of mint. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(2), 415-426. <https://doi.org/10.22067/jam.v7i2.51268>
- Chayjan, R. A., Salari, K., & Barikloo, H. (2012). Modelling moisture diffusivity of pomegranate seed

مربعات خطا، X^2 و بالاترین مقدار R^2 مدل میدیلی است که دارای بالاترین دقت در پیش بینی روند خشک شدن مغز بادام نسبت به سایر مدل‌ها است.

حداکثر و حداقل میزان تغییرات کلی رنگ در مغز بادام در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-خلاء ۱۴ و ۶/۲ و در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-فروسرخ ۱۷/۲۲ و ۷/۱ و در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-پیوسته ۱۹ و ۸/۵ است. در همه خشک‌کن‌ها با اضافه شدن دما و قدرت مایکروویو، میزان تغییرات کلی رنگ اضافه می‌شود.

حداکثر و حداقل مقدار درصد چروکیدگی مغز بادام در خشک‌کن‌های ترکیبی مایکروویو با خشک‌کن‌های خلاء، ۱۵ و ۸/۵ درصد، مایکروویو با پیوسته ۱۲/۱ و ۷/۱ درصد، و مایکروویو با فروسرخ ۱۵ و ۸/۷ درصد به دست آمده که با اضافه شدن میزان قدرت مکرروویو و دما، میزان درصد چروکیدگی نیز اضافه شد. مقادیر ضریب پخش مؤثر رطوبت در تمام حالات با اضافه نمودن دمای هوا و قدرت خشک‌کن‌ها افزایش یافت.

در بهینه‌سازی خشک‌شدن مغز بادام در روش شبکه‌های عصبی مصنوعی در هر سه خشک‌کن ترکیبی، نقاط بهینه توسط عامل بهینه‌یاب (سام) در رابطه چهار متغیره شامل: درصد چروکیدگی، تغییرات کلی رنگ، انرژی ویژه مصرفی و ضریب پخش مؤثر رطوبت، مقدار سام حدود ۱۳۳۵ برای هر خشک‌کن محاسبه شد. همچنین نقاط بهینه خشک‌شدن مغز بادام در هر سه خشک‌کن ترکیبی در این روش به شرح زیر به دست آمد:

(الف) درخشک‌کن ترکیبی مایکروویو-فروسرخ نقطه بهینه در دمای ۴۵°C هوا و قدرت ۴۲۶watt مایکروویو و قدرت ۱۵۰۰watt تابش فرو سرخ به وسیله شبکه پس انتشار پیشرو و تابع آموزش تنظیم بیزی حاصل شد.

(ب) درخشک‌کن ترکیبی مایکروویو- خلاء، نقطه بهینه در دمای ۴۵°C هوا و قدرت ۶۵۰watt مایکروویو و فشار ۲۵kPa خلاء توسط شبکه پس انتشار پیش خور و تابع آموزش لونبرگ-مارکوات به دست آمد

(ج) درخشک‌کن ترکیبی مایکروویو-پیوسته، نقطه بهینه در دمای ۴۵°C هوا و قدرت ۴۳۰watt مایکروویو و سرعت خطی 59 cm min^{-1} تسمه به وسیله شبکه پس انتشار پیش‌خور با تابع آموزش لونبرگ - مارکوات حاصل شد.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به

- Soodmand-Moghaddam, S., Sharifi, M., Zareiforoush, H., & Mobli, H. (2020). Mathematical modelling of lemon verbena leaves drying in a continuous flow dryer equipped with a solar pre-heating system. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 12(1), 57-66. DOI: <https://doi.org/10.15586/QAS2019.658>
- Taghinezhad, E., Szumny, A., Kaveh, M., Rasooli Sharabiani, V., Kumar, A., & Shimizu, N. (2020). Parboiled paddy drying with different dryers: Thermodynamic and quality properties, mathematical modeling using ANNs assessment. *Foods*, 9(1), 86. <https://doi.org/10.3390/foods9010086>
- Wongso, I. (2021). Drying and quality characteristics of almonds and walnuts with different drying conditions. University of California, Davis.
- Zare, D., Akbarzadeh, S., Nematollahi, M. A., & Loghavi, M. (2020). Simulation of hot air infrared-assisted green peas drying using finite element method. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), e13500. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13500>
- cultivars under fixed, semi fluidized and fluidized bed using mathematical and neural network methods. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 11(2), 131-148. https://www.food.actapol.net/volume11/issue2/4_2_2012.pdf
- Cheenkachorn, K. (2007, September). Drying of rice paddy using a microwave-vacuum dryer. In *Proceedings of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6)* (pp. 16-20). <https://doi.org/10.22101/JRIFST.2018.02.12.644>
- El-Mesery, H. S., El-Seesy, A. I., Hu, Z., & Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112070. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>
- Jafarifar, M., Chayjan, R. A., Dibagar, N., & Alaei, B. (2017). Modelling some engineering properties of walnut kernel undergoing different drying methods with microwave pre-treatment. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 9(4), 463-478. DOI:10.3920/QAS2017.1071
- Kermani, A. M., Khashehchi, M., Kouravand, S., & Sadeghi, A. (2017). Effects of intermittent microwave drying on quality characteristics of pistachio nuts. *Drying Technology*, 35(9), 1108-1116. DOI:10.1080/07373937.2016.1232270
- Kaveh, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., Chayjan, R. A., Taghinezhad, E., & Mohammadigol, R. (2018). Mass transfer, physical, and mechanical characteristics of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under convective infrared microwave drying. *Heat and Mass Transfer*, 54, 1879-1899. DOI: 10.1007/s00231-018-2287-5
- Kaviani, B., Hashemabadi, D., Khayyati Babaei, S., & Yousefi, Z. (2021). Influence of Drying Conditions and Temperature on Hazelnuts (*Corylus avellana*) Fruit Quality. *Journal of Quality and Durability of Agricultural Products and Food Stuffs*, 1(2), 33-44. DOI:10.30495/qafj.2021.1943058.1012
- Motavali, A., Najafi, G. H., Abbasi, S., Minaei, S., & Ghaderi, A. (2013). Microwave-vacuum drying of sour cherry: comparison of mathematical models and artificial neural networks. *Journal of food science and technology*, 50, 714-722. DOI: 10.1007/s13197-011-0393-1
- Mühlbauer, W., & Müller, J. (2020). *Drying Atlas*. Drying Atlas.
- Rasouli, M., Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H. R., & Nalbandi, H. (2011). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity and energy of activation during the hot air drying of garlic. *Australian Journal of Agricultural Engineering*, 2(4), 96-101.
- Sakooei-Vayghan, R., Peighambaroust, S. H., Hesari, J., Soltanzadeh, M., & Peressini, D. (2020). Properties of dried apricots pretreated by ultrasound-assisted osmotic dehydration and application of active coatings. *Food technology and biotechnology*, 58(3), 249-259. DOI: 10.17113/ftb.58.03.20.6471

