

Research Paper

Optimization of a new periodic strategy in vacuum-infrared drying of red beetroot: evaluation of quality and energy indices

Nazat Hasan Jeejo¹, Reza Amiri Chayjan^{2,*}, Hassan Sarikhani³, Jafar Amiri Parian⁴

¹ PhD student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Prof., Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

³ Prof., Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

⁴ Assistant Prof., Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Article information

Extended Abstract

Received: 2025/04/29

Accepted: 2025/09/15

Keywords:

Drying
Periodic strategy
Red beetroot
Optimization

*Corresponding
author:

amirireza@basu.ac.ir

ORCID: 

0000-0001-8634-7352



Introduction

The root part of red beetroot (*Beta vulgaris*) is a widely valued vegetable around the globe, recognized for its rich nutritional composition. It serves as an excellent source of essential nutrients, including dietary fiber, natural pigments such as betalains, various vitamins (A, B₁, B₂, B₆, and C), antioxidants, and carbohydrates. The continuous growth of the world population consequences in the increasing demand for nutritious foods. Therefore, the dehydration (especially vacuum drying method) of fruits and vegetables has emerged as an essential engineering approach within the food industry. This process aims to extend product shelf life, ensure year-round market availability, minimize packaging and transportation costs, and improve the overall quality of the final product. However, drying operations are among the most energy-intensive processes in food production. Consequently, considerable research efforts have been directed toward minimizing energy consumption and reducing production costs while maintaining product quality. These efforts include the development of innovative drying technologies and the optimization of existing systems. In this study, the feasibility of a novel drying approach based on periodic temperature strategy under vacuum conditions was investigated. This tactic was considered as a potential alternative technique for developing advanced drying methods that can substantially decrease

processing time and associated costs for the manufactured apparatus, while the quality attributes of the final product were improved.

Method

In this study, the performance of an infrared–vacuum dryer in normal conditions and a newly developed drying technique involving periodic temperature conditions was examined. The novel approach was further supported by microwave application. The red beetroot samples of 60×40×4 mm in dimension were exposed under periodically applied temperatures (45, 60, and 75 °C), vacuum pressure (20, 50, and 80 kPa), microwave power (150, 300, and 450 W), and microwave exposure times (0, 10, and 20 s). The study investigated the influence of drying methods on response variables, including ΔL^* , Δa^* , Δb^* , shrinkage, vitamin C, antioxidant activity, D_{eff} , and SEC. In the periodic drying method, a fixed temperature was maintained during each run, while microwave power was applied every 10 minutes until the samples reached the target moisture content. Experimental design, data analysis, and process optimization were carried out using the software of Design-Expert 13.0.

Results

The lack of fit (P-value) for all studied variables in periodic technique method was found to be non-significant between 0.09 to 0.94, indicating that the developed RSM models exhibited a strong capability in predicting the variations of the response variables. The coefficient of determination (R^2) values for all proposed models ranged between 95.19 and 99.70, confirming a high degree of correlation between experimental and predicted data. Furthermore, the low coefficients of variation (C.V. < 6.93) for all models demonstrate good reproducibility and reliability of the experiments. The optimal drying conditions were determined to be a temperature of 50 °C, a vacuum pressure of 20 kPa, a microwave power level of 339 W, and a microwave application time of 10 s. The selected desirability value obtained under the optimized drying conditions was 0.816, indicating a good level of optimization. The found results of vitamin C content compared to the fresh sample value of 7.53 mg/ml, indicates relatively good retention of this valuable compound. To compare the response variable values at the optimized points, an additional experiment was conducted using the vacuum dryer under normal drying conditions at 50 °C and 20 kPa, with three replications. The obtained results for vitamin C content (6.09 and 6.30 mg/ml), antioxidant activity (85% and 96%), color change parameters ΔL^* (21.49 and 18.15), Δa^* (6.74 and 5.24), Δb^* (3.38 and 2.62), shrinkage percentage (37.57% and 40.75%), effective moisture diffusivity (2.43×10^{-10} and 3.43×10^{-10} m²/s), and specific energy consumption (2138.48 and 1585.45 MJ/kg_{water}) were obtained for the normal and periodic drying methods, respectively. The comparative analysis of these response variables showed changes of 34.48%, 12.94%, 15.54%, 22.26%, 22.48%, 8.46%, 41.15%, and 25.86%, respectively. Except for shrinkage percentage with 8.46% value, all parameters showed improvement under the periodic drying method. This enhancement can be attributed to the synergistic advantageous effect of microwave and vacuum drying, which combines the efficient energy transfer of microwaves with the gentle drying conditions of vacuum processing. Whereas, conventional vacuum drying is relatively slow due to the absence of convective heat transfer, the incorporation of microwave energy significantly reduces the drying time while simultaneously preserving product quality.

Conclusion

The periodic drying technique in the infrared–vacuum drying process, when combined with specific microwave pre-treatment, demonstrated remarkable superiority over normal vacuum drying method. This periodic technique achieved a great improvement in effective moisture diffusivity and reduction in specific energy consumption, while providing excellent preservation of color parameters (closer to the fresh conditions) and bio–chemical quality attributes. These findings confirm the significant advantages of the periodic infrared–vacuum drying approach assisted by microwave application over the conventional vacuum drying method. The results of present study revealed a great achievement due to simultaneous enhancement in both product properties (physical, biochemical and thermal) and drying device efficiency (SEC). Among these attributes, vitamin C content is particularly significant, as its preservation generally indicates that other quality characteristics of the sample are also maintained. However, the results are specific to red beetroot, and further investigations are required to validate the applicability of this technique to other agricultural products.

Author Contributions

Nazat Hasan Jeejo: PhD student

Reza Amiri Chayjan: Supervisor

Hassan Sarikhani: Advisor

Jafar Amiri Parian: Advisor

Data Availability Statement

All data and results have been presented within the text of the article.

Ethical Considerations

The authors have adhered to ethical principles in conducting and publishing this scientific work, and this has been confirmed by all of them.

Conflict of Interest

There are no contributions of interest in this article, and this has been confirmed by all authors.

How to cite this paper:

Hasan Jeejo, N., Amiri Chayjan, R., Sarikhani, H., and Amiri Parian, J. (2025). Optimization of a new periodic strategy in vacuum-infrared drying of red beetroot: evaluation of quality and energy indices. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*. 36: 39-61. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2025.15186.748>



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 \(CC BY 4.0\)](#)



بهینه‌سازی یک روش تناوبی جدید در خشک کردن چغندرقرمز با خشک‌کن خلأی مادون‌قرمز: بررسی شاخص‌های کیفی و انرژی

نزت حسن جیجو^۱، رضا امیری چایجان^{۲*}، حسن ساریخانی^۳، و جعفر امیری پریان^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- استاد گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۴ - استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

خشک کردن محصولات کشاورزی از جمله چغندرقرمز (به عنوان یک محصول دارای ارزش صنعتی، خوراکی و درمانی بالا) بسیار حائز اهمیت است؛ که توجه اصلی آن دسترسی دائم به مواد غذایی سالم است. امروزه کاربرد دستگاه خشک‌کن خلأی مادون‌قرمز به دلیل کیفیت بالای محصول نهایی گسترش زیادی یافته است. این واقعیت با وجود معضل مصرف انرژی بالای آن و مسائل زیست محیطی حاصل شده قابل تأمل است. به کارگیری روش‌های جدید در استفاده از این دستگاه می‌تواند کمک شایانی در حل مشکلات موجود ارائه دهد. در این راستا تحقیق حاضر یک روش تناوبی نوآورانه جدید هم‌زمان با به کارگیری ویژه امواج مایکروویو در دستگاه خشک‌کن خلأی مادون‌قرمز را معرفی می‌نماید. شاخص‌های محصول نهایی به همراه مصرف انرژی بررسی خواهد شد و در نهایت نقطه بهینه عملکرد آن پیشنهاد می‌شود. بدین منظور برش‌های چهار میلی‌متری چغندرقرمز (به عنوان مطالعه موردی) در فرایند خشک کردن مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای مستقل شامل دماهای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سلسیوس، فشارهای خلأی ۲۰، ۵۰ و ۸۰ کیلوپاسکال، توان‌های اعمالی مایکروویو ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ وات و مدت زمان‌های به کارگیری مایکروویو ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ثانیه انتخاب شدند. روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی جهت تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل شده و بهینه‌سازی فرایند به کار گرفته شد. شاخص‌های فیزیکی، مکانیکی، زیستی - شیمیایی و انرژی به عنوان متغیرهای وابسته مورد بررسی قرار گرفتند. نقاط بهینه برای خشک کردن در دمای ۵۰°C، فشار خلأی ۲۰ kPa، توان ۳۳۹ W و مدت زمان اعمال مایکروویو ۱۰ s به کمک روش سطح پاسخ به دست آمد. در این شرایط بهینه، فعالیت آنتی‌اکسیدانی ۰.۹۶٪، ویتامین ث ۳۰/۱۶ mg، تغییرات رنگی ΔL^* ، Δa^* و Δb^* به ترتیب ۱۸/۱۵، ۵/۲۴ و ۲/۶۲، درصد چروکیدگی ۴۰/۷۵٪ و انرژی مصرفی ویژه ۱۵۸۵/۴۵ MJ/kg_{water} به دست آمد. ارائه نتایج بهتر به استثنای درصد چروکیدگی در مقایسه با روش معمولی خشک کردن، مضاف بر عدم افزایش هزینه سرمایه‌گذاری، نشانه موفقیت این روش است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

واژه‌های کلیدی:

خشک کردن

راهبرد تناوبی

چغندرقرمز

بهینه‌سازی

*پست الکترونیکی نویسنده

مسئول:

amirireza@basu.ac.ir

ORCID: 

۰۰۰۰-۰۰۰۱-۸۶۳۴-۷۳۵۲



مقدمه

ریشه چغندرقرمز یا لبو (Red beetroot (*Beta vulgaris* L.) از سبزی‌های سنتی و محبوب در دنیا است (Pei *et al.*, 2023)، رنگدانه‌های طبیعی آن در صنایع غذایی بسیار پرطرفدار است، دارای خواص ضدویروسی و ضدباکتریایی است (Bunkar *et al.*, 2020) و سرشار از ویتامین‌های A، B₁، B₂، B₆ و C است (Singh & Guar, 2020).

در حال حاضر جهان رشد بی‌سابقه‌ای از جمعیت را تجربه می‌کند که سبب افزایش سریع مصرف خوراک گشته است. صنایع غذایی تلاش می‌کنند راه‌حل‌های مهندسی به منظور پاسخگویی به این تقاضای در حال رشد، کاهش هزینه‌های تولید و انرژی، و ارتقاء کیفیت محصول نهایی ارائه دهند (Parniakov *et al.*, 2021). میوه‌ها و سبزیجات تازه علی‌رغم ایفای نقشی مهم در تغذیه انسان، به علت رطوبت زیاد، قابلیت فسادپذیری بالایی دارند. خشک‌کردن، روشی کارآمد به منظور عرضه دائم آنها در طول سال است (Gaudel *et al.*, 2022). برای رطوبت‌زدایی محصولات کشاورزی، از خشک‌کن‌های خلأ، بسترسیال، مادون قرمز و مایکروویو استفاده می‌شوند (Hii *et al.*, 2021). خشک‌کردن در خلأ به دلیل کاهش اکسیداسیون و دمای تبخیر، باعث بهبود کیفیت رنگ و طعم محصول می‌شود (Amiri Chayjan *et al.*, 2017). و نیز با کاهش رطوبت در شرایط فشار پایین می‌تواند انرژی مصرفی ویژه را کاهش دهد (Jafarizadegan *et al.*, 2020). امواج مادون قرمز نیز با نفوذ به عمق معینی از نمونه باعث تسریع روند خشک‌شدن می‌گردد. در این روش به علت عدم استفاده از دماهای بالا، کیفیت محصول نهایی نیز ارتقاء پیدا می‌کند (Rashidi *et al.*, 2020).

خشک‌کن‌های خلأی - مادون قرمز که از لامپ‌های مادون قرمز به عنوان منبع تولید گرما استفاده می‌کنند (Homayounfar *et al.*, 2024)، مزایای هردو روش خشک‌کردن خلأی و مادون قرمز را هم‌زمان دارا هستند (Abdollahzadeh Delazi *et al.*, 2024). از مزایای عمده آن کاهش زمان فرایند، گرمایش یکنواخت و توانایی بالای نرخ انتقال انرژی است (Zhang *et al.*, 2021). در کنار به کارگیری این دستگاه، در تحقیق حاضر از امواج مایکروویو به عنوان پیش‌ تیمار استفاده شد. هرچند خشک‌کردن پیوسته با مایکروویو می‌تواند باعث گرمادیدگی بیش از حد و تخریب بخشی از نمونه گردد، با این حال استفاده از طرح

زمانبندی شده می‌تواند فرایند را بهبود بخشد (Musielak & Kieca, 2014). به طوری که کاربرد روش خلأی-مایکروویو باعث تسریع فرایند، بهبود کیفیت محصول و بازده انرژی می‌گردد (Figiel and Michalska, 2017). از طرفی انرژی گرمایی از طریق واکنش مولکول‌ها در میدان الکترومغناطیسی مستقیماً به ماده منتقل می‌شود و باعث کاهش چشم‌گیر زمان فرایند می‌شود (Rashidi *et al.*, 2020).

خشک‌کن خلأی- مادون قرمز گازهای گلخانه‌ای فراوانی را تولید می‌کند، ولی امروزه استفاده از آن به صورت ترکیبی با روش‌های خشک‌کردن مادون قرمز و مایکروویو به دلیل محافظت خوب از رنگ و ترکیبات مغذی محصول، بسیار مورد توجه واقع شده است (Alwazeer and Ors, 2019). روشی از خشک‌کردن تحت شرایطی به عنوان یک شیوه نوآورانه تلقی می‌گردد که بتواند نتایج بهتری را در مقایسه با روش‌های دیگر ارائه دهد (Moses *et al.*, 2014). خشک‌کن‌ها دارای بازده نسبتاً پایین (۵۰٪ - ۲۵) هستند (Chua *et al.*, 2019)، و ۲۰ تا ۲۵٪ از کل انرژی کاربردی در صنایع غذایی را مصرف می‌کنند. به این علت تلاش‌های زیادی برای یافتن روش‌های نوآورانه مبذول شده است تا بتوانند هم‌زمان بازده انرژی و کیفیت محصول را بهبود بخشند، بدون اینکه بر هزینه سرمایه‌گذاری خشک‌کن‌ها بیفزایند (Chupawa *et al.*, 2023).

یکی از این روش‌ها روش خشک‌کردن خلأی و مایکروویو متناوب است (Cao *et al.*, 2019). البته تحقیقات فراوانی بر روی دستگاه خشک‌کن خلأی انجام یافته است، از جمله آنها بر روی سبزیجات و میوه‌ها و با بکارگیری خشک‌کن خلأی و مایکروویو (Figiel and Michalska, 2017)، بر روی چغندر قرمز و روش‌های مختلف خشک‌کردن از جمله روش خلأی (Fathabadi *et al.*, 2020)، بر روی سیب زمینی شیرین به روش خلأ و مایکروویو (Zhang *et al.*, 2023) و بر روی برش‌های هویج به روش خلأ و خلأ + مایکروویو (Musielak and Kieca, 2014). اما تحقیقات اندکی در مورد تأثیر روش‌های مختلف خشک‌کردن بر روی کیفیت چغندر قرمز انجام شده است (Liu *et al.*, 2022). طراحی و ساخت دستگاه جدید نیاز به صرف هزینه و وقت زیاد دارد. هم‌چنین بر اساس بررسی منابع ذکر شده تا کنون هیچ تحقیقی به منظور بهره‌برداری بهینه از این دستگاه با راه‌کار ترکیبی تناوبی و مایکروویو بر روی محصول چغندرقرمز

تهیه، آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌ها

چغندرقرمز تازه از میدان عمده‌فروشی تهر بار همدان خریداری شد. غده‌های مناسب برای اجرای آزمایش‌ها بر اساس رنگ و اندازه انتخاب شدند (Mella *et al.*, 2022). سپس با پارچه نرم و خشک پاک‌شده و جهت نگهداری در کیسه‌های پلاستیکی سیاه بسته‌بندی (Amiri Chayjan *et al.*, 2017) و در یخچال در دمای 4°C قرار گرفتند. قبل از انجام هر آزمایش به منظور هم‌دما شدن با محیط پیرامون، غده‌های چغندرقرمز از یخچال خارج و در دمای آزمایشگاه یعنی 21°C قرار داده می‌شدند (Pei *et al.*, 2023). سپس با دستگاه قطعه‌کن به ضخامت چهار میلی‌متر برش داده شدند (Liu *et al.*, 2022).

تعیین رطوبت اولیه و نهایی

حدود ۱۰ گرم نمونه چغندرقرمز، برای محاسبه رطوبت اولیه در دستگاه آون (Mettler, Type: UNE 500) ساخت آلمان، به مدت ۲۴ ساعت یعنی تا زمان خشک شدن کامل در دمای 105°C درجه سلسیوس قرار داده شد (Pei *et al.*, 2023). سپس با استفاده از ترازوی رقمی با دقت 0.01 g توزین و محتوای رطوبت اولیه آنها توسط رابطه ۱ در جدول ۱ محاسبه گردید (Abdollahzadeh Delazi *et al.*, 2024). که در آن $MC_{d.b}$ رطوبت اولیه محصول بر پایه خشک، M_i وزن اولیه و M_f وزن نهایی نمونه بر حسب گرم هستند. نمونه تازه در ابعاد $4 \times 4 \times 6\text{ mm}^3$ طبق طرح آزمایش‌ها خشک می‌شد و زمانی که رطوبت محصول به $1 \pm 0.7\%$ می‌رسید فرایند متوقف می‌گردید (Mitrevski *et al.*, 2023).

اندازه‌گیری اسید آسکوربیک

برای تعیین میزان اسید آسکوربیک، از روش کلاین و پری با اندکی اصلاحات استفاده شد (Klein & Perry, 1982).

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

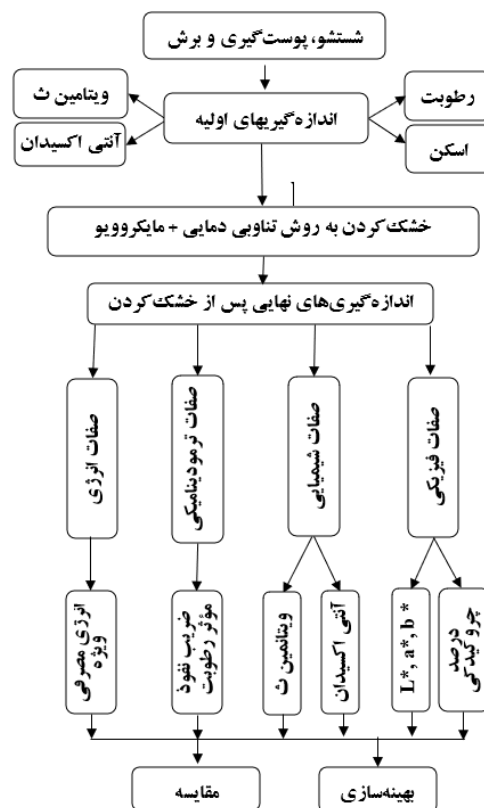
این شاخص به کمک معادله‌های ۷ تا ۱۱ در جدول ۱ محاسبه گردید. که در این معادلات L نماینده نصف ضخامت نمونه بر حسب (m)، t زمان خشک کردن (s)، n یک عدد مثبت، D_{eff} ضریب پخش رطوبت مؤثر (m^2/s)، MR نسبت رطوبت، M_e محتوای رطوبت تعادلی، M_0 رطوبت اولیه و M_t محتوای رطوبت در هر لحظه ($\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry weight}}$) هستند. همین‌طور می‌توان نمودار $\ln(MR)$ در مقابل زمان را رسم کرد که در آن k_1 شیب خط خواهد بود.

صورت نگرفته است. لذا با به‌کارگیری دستگاه خشک کن خلای- مادون قرمز و طراحی روش جدید خشک کردن تناوبی هم‌زمان با به‌کارگیری امواج مایکروویو، مطالعه موردی بر روی محصول چغندرقرمز انجام یافت. هدف از این مطالعه بررسی این امکان بود که بدون صرف هزینه و وقت فراوان برای ساخت دستگاه جدید، با به‌کارگیری این راه کار از همان دستگاه موجود حداکثر بازدهی را به دست آورد.

بدین منظور خواص فیزیکی محصول (شاخص‌های رنگی ΔL^* , Δa^* , Δb^* و درصد چروکیدگی)، عامل‌های زیستی - شیمیایی (محتوای ویتامین ث و آنتی اکسیدان)، خواص ترمودینامیکی (ضریب انتشار مؤثر رطوبت) و انرژی مصرفی ویژه مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای طرح آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها از روش پاسخ استفاده شد. این روش دربرگیرنده طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی پاسخ بر مبنای مدل‌های تجربی است (Long *et al.*, 2019) که به دلیل کاهش تعداد آزمایش‌ها و زمان لازم یکی از بهترین راهکارهای مقرون به صرفه برای مدل‌سازی است (Elkelawy *et al.*, 2022).

مواد و روش‌ها

شکل ۱ طرح‌واره روند پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- روند کلی پژوهش به صورت طرح‌واره

محلول در طول موج ۵۱۸ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر قرائت شد. درصد مهار رادیکال آزاد DPPH طبق رابطه ۲ محاسبه گردید که A_{blank} و A_{sample} به ترتیب میزان جذب نوری عصاره و کنترل منفی (فاقد عصاره) و I درصد مهار رادیکال آزاد DPPH را نشان می‌دهد.

درصد مهار رادیکال آزاد (DPPH)
برای اندازه‌گیری درصد مهار رادیکال آزاد، یک میلی‌لیتر از محلول متانولی DPPH (با غلظت ۰/۱ میلی‌مولار) به ۳ میلی‌لیتر از عصاره نمونه اضافه شد. لوله‌های آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه در محل تاریک نگهداری شدند. سپس جذب نوری

جدول ۱ - معادلات استفاده شده در پژوهش

شماره	معادله	منبع
۱	$MC_{d.b} = \frac{M_i - M_f}{M_f}$	Abdollahzadeh Delazi <i>et al.</i> , (2024)
۲	$I\% = (A_{\text{blank}} - \frac{A_{\text{sample}}}{A_{\text{blank}}})$	Suhanya <i>et al.</i> , (2009)
۳	$\text{Shrinkage} = \left(1 - \frac{A}{A_0}\right) * 100$	Santos <i>et al.</i> , (2021)
۴	$\Delta L^* = L_{\text{Fresh}}^* - L_{\text{Dried}}^* $	Homayounfar <i>et al.</i> , (2024)
۵	$\Delta a^* = a_{\text{Fresh}}^* - a_{\text{Dried}}^* $	
۶	$\Delta b^* = b_{\text{Fresh}}^* - b_{\text{Dried}}^* $	
۷	$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$	Leilayi <i>et al.</i> , (2024)
۸	$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \exp\left\{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right\}$	
۹	$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2}{4L^2} D_{eff} \cdot t\right)$	
۱۰	$k_1 = \frac{\pi^2}{4L^2} D_{eff}$	Kaveh, (2017)
۱۱	$D_{eff} = 4L^2 k_1 / \pi^2$	
۱۲	$E_{IR} = IR \times t$	
۱۳	$E_{MW} = MW \times t$	Abdollahzadeh Delazi <i>et al.</i> , (2024)
۱۴	$SEC_1 = E_{MW} / m_{v1}$	
۱۵	$E_p = P \times t$	
۱۶	$E_t = E_{IR} + E_p$	An <i>et al.</i> (2024)
۱۷	$SEC_2 = E_t / m_{v2}$	
۱۸	$SEC_t = SEC_1 + SEC_2$	
۱۹	$n = 2^k + 2k + c$	Nanvakenari <i>et al.</i> , (2022)
۲۰	$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j}^k \sum_{i < j} b_{ij} x_{ij}$	Ahmadi Ghavidelan & Amiri Chayjan, (2017)

خلأ دیافراگمی (CFM60)، سیستم حرارت‌دهی با لامپ مادون قرمز، دایمر رقمی تنظیم دما، حسگر دما و فشار مطلق از نوع (Sensys، ساخت کره) بود.

دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده
دستگاه میکروویو Toshiba مدل MM-EG34P(WH)/(BK)/(SL) با ۱۱ توان ورودی از صفر تا ۱۵۰۰ وات مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به منظور خشک کردن نمونه‌های چغندرقرمز یک دستگاه خشک‌کن خلأی مادون قرمز آزمایشگاهی به کار گرفته شد. شکل ۲ طرح‌واره دستگاه را نشان می‌دهد. این دستگاه دارای پمپ

روش پردازش تصویر در محاسبه چروکیدگی

نمونه‌ها پس از خشک شدن دچار تغییر شکل هندسی می‌شوند و محاسبه مساحت آنها امکان‌پذیر نیست، بنابراین از روش پردازش تصویر استفاده شد (Santos *et al.*, 2021). با کمک اسکنر (ScanJet G4050, hp)، تصویربرداری از نمونه‌های تازه و خشک شده برش‌های چغندر قرمز و تحلیل آن به کمک کتابخانه OpenCV در Python 3.13.7 انجام یافت. جهت تصویربرداری از یک اسکنر با وضوح ۱۲۰۰ dpi استفاده گردید (Amiri Chayjan, *et al.*, 2017). از پردازش قطعه‌بندی تصویر به دو بخش اصلی پیش‌زمینه (تصویر خود شی) و پس‌زمینه برای تفکیک این دو بخش استفاده شد.

در این روش نمایان‌سازی پیش‌زمینه محصول ابتدا با حذف تصادف‌های پس‌زمینه بر اساس تفاوت رنگی موجود و ایجاد ماسک دودویی از تصویر حاصل شده، با حاصل ضرب ماتریس ماسک در تصویر اصلی انجام یافت. سپس برای به دست آوردن مساحت نمونه، تعداد تصادف‌های با ارزش منطقی ۱ در تصویر ماسک شمارش و این مقدار محاسبه شد. به این ترتیب مساحت برش‌های چغندر قرمز، قبل و بعد از فرایند رطوبت‌زدایی محاسبه گردید (Hafezi *et al.*, 2016). سپس برای محاسبه درصد چروکیدگی (Shrinkage) از رابطه ۲ در جدول ۱ استفاده شد. که در آن A_0 : مساحت اولیه نمونه قبل از خشک کردن (mm^2)، A : مساحت نمونه خشک شده (mm^2) و هستند.

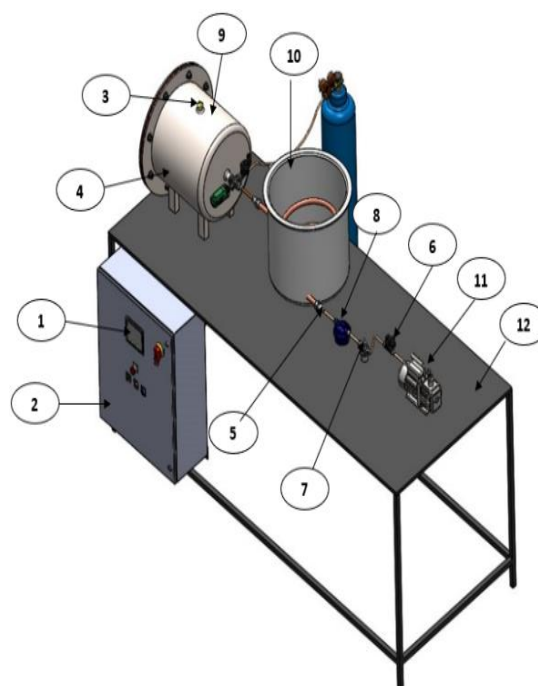
محاسبات رنگ

برای ارزیابی شاخص‌های رنگ (CI)، نیز از روش پردازش تصویر استفاده شد (Rashidi *et al.*, 2020) بدین ترتیب که (L^*, a^*, b^*) تمام تصادف‌های سطح تصویر آماده‌شده در مرحله قبل، توسط کتابخانه OpenCV در Python 3.13.7 پردازش شد. سرانجام، میانگین هر کدام از کانال‌های رنگی برای تک‌تک تصاویر از معادلات ۳ تا ۵ در جدول ۱ محاسبه گردید.

که در آن L^* تاریکی (۰) به طرف روشنایی (۱۰۰)، a^* سبزی (۱۲۰-) به طرف قرمزی (۱۲۰+) و b^* رنگ آبی (۱۲۰-) به زردی (۱۲۰+) است.

انرژی مصرفی ویژه

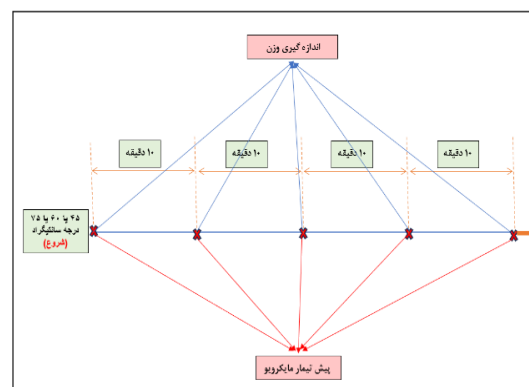
انرژی مصرف‌شده برای مادون قرمز از رابطه ۱۲، پیش‌تیمار میکروویو از رابطه ۱۳، پمپ خلأ از رابطه ۱۵ و انرژی مصرفی دستگاه طبق رابطه ۱۶ در جدول ۱ محاسبه گردید. سپس انرژی مصرفی ویژه برای دستگاه میکروویو از رابطه



شکل ۲- طرح‌واره خشک کن خلأی-مادون قرمز (۱)- میکروکنترلر، ۲- تابلو برق، ۳- حسگر دما و رطوبت اصلی، ۴- محفظه خشک کن، ۵- کندانسور، ۶- شیر برقی برای خلأ، ۷- حسگر اکسیژن، دما و رطوبت ثانویه، ۸- تله آب گیر، ۹- محفظه خشک کن، ۱۰- ظرف آب و یخ، ۱۱- پمپ خلأ، و ۱۲- شاسی

روش تناوبی

مطابق شکل ۳، دمای دستگاه در یکی از دماهای مشخص شده مانند دمای 75°C در نظر گرفته شد. این دما تا پایان آزمایش ثابت می‌ماند. وزن نمونه قبل و بعد از اعمال میکروویو (مطابق طرح آزمایش‌ها) اندازه‌گیری شد. فشار خلأی تعیین‌شده نیز تنظیم و نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در این شرایط دمایی و فشار خلأی رطوبت‌گیری گردید. سپس نمونه از دستگاه خارج و کارهای انجام‌شده در مرحله اول تکرار شد، تا نمونه به رطوبت نهایی مطلوب ($7 \pm 1^\circ\text{C}$) رسید. همین روال برای دماهای دیگر نیز تکرار گردید.



شکل ۳- طرح‌واره روش تناوبی استفاده شده

جدول ۲- طرح آزمایش‌ها برای فرایند خشک کردن به روش تناوبی در روش سطح پاسخ

سطوح متغیرهای مستقل (سطوح شماره‌بندی)					
شماره آزمایش	دما (°C)	فشار خلأی (kPa)	توان میکروویو (W)	زمان اعمال میکروویو (s)	تکرار
۱	۶۰	۵۰	۳۰۰	۱۰	۶
۲	۴۵	۲۰	۴۵۰	۰	۱
۳	۷۵	۲۰	۴۵۰	۰	۱
۴	۷۵	۲۰	۴۵۰	۲۰	۱
۵	۷۵	۸۰	۴۵۰	۰	۱
۶	۶۰	۸۰	۳۰۰	۱۰	۱
۷	۷۵	۸۰	۱۵۰	۲۰	۱
۸	۴۵	۵۰	۳۰۰	۱۰	۱
۹	۴۵	۸۰	۴۵۰	۰	۱
۱۰	۶۰	۵۰	۳۰۰	۰	۱
۱۱	۷۵	۸۰	۴۵۰	۲۰	۱
۱۲	۷۵	۵۰	۳۰۰	۱۰	۱
۱۳	۷۵	۲۰	۱۵۰	۲۰	۱
۱۴	۴۵	۸۰	۴۵۰	۲۰	۱
۱۵	۴۵	۲۰	۱۵۰	۲۰	۱
۱۶	۶۰	۵۰	۳۰۰	۲۰	۱
۱۷	۶۰	۲۰	۳۰۰	۱۰	۱
۱۸	۴۵	۲۰	۴۵۰	۲۰	۱
۱۹	۶۰	۵۰	۴۵۰	۱۰	۱
۲۰	۷۵	۸۰	۱۵۰	۰	۱
۲۱	۷۵	۲۰	۱۵۰	۰	۱
۲۲	۴۵	۲۰	۱۵۰	۰	۱
۲۳	۴۵	۸۰	۱۵۰	۰	۱
۲۴	۴۵	۸۰	۱۵۰	۲۰	۱

جدول ۳- سطوح کدبندی شده متغیرهای مستقل

سطوح کدبندی شده متغیرها			
متغیرهای مستقل	نماد	+۱	-۱
دمای هوا (°C)	X_1	۷۵	۴۵
فشار خلأی (kPa)	X_2	۸۰	۲۰
توان میکروویو (W)	X_3	۴۵۰	۱۵۰
زمان اعمال میکروویو (s)	X_4	۲۰	۰

۱۴، دستگاه خشک‌کن خلأی مادون قرمز از رابطه ۱۷ و برای کل فرایند از رابطه ۱۸ در جدول ۱ محاسبه شد. که در این معادلات E_p و E_{MW} ، E_{IR} به ترتیب انرژی مصرفی توسط گرمایش مادون قرمز، میکروویو پمپ خلأ (کیلووات ساعت)، IR، MW و p به ترتیب توان مصرفی مادون قرمز، میکروویو و پمپ خلأ (وات بر ثانیه)، SEC_1 ، SEC_2 و SEC_t انرژی ویژه مصرفی خشک کردن به ترتیب برای روش میکروویو، روش خشک‌کن خلأی مادون قرمز و انرژی مصرفی ویژه کل (کیلو ژول بر کیلوگرم)، m_{v1} و m_{v2} به ترتیب جرم آب تبخیری به روش میکروویو و کل نمونه، t زمان روشن بودن پمپ هستند.

بهینه‌سازی فرایند خشک کردن

در این مطالعه روش سطح پاسخ به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده و بهینه‌سازی خشک کردن برش‌های چغندرقرمز مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها با استفاده از نرم افزار Design expert نسخه ۱۳ و در قالب طرح مرکب مرکزی تعریف شدند. تعداد آزمایش‌ها از رابطه ۱۹ در جدول ۱ به دست آمد. در این معادله، k نشان‌گر تعداد عامل‌ها، 2^k و $2k$ به ترتیب تعداد آزمایش‌های مربوط به نقاط اصلی و محوری و c نماینده تعداد آزمایش‌های تکرار نقطه مرکزی هستند. شکل کلی معادله مرتبه دوم سطوح پاسخ به صورت رابطه ۲۰ در جدول ۱ است.

که در آن Y پاسخ‌های پیش‌بینی شده، X_i متغیرهای مستقل کد شده، b_0 ثابت مدل، b_j ضریب متغیرهای مستقل، b_{ij} ضریب عامل درجه دوم و b_{ij} ضریب اثرات متقابل متغیرها هستند.

در جدول ۲ طرح آزمایش‌های فرایند خشک کردن با روش تناوبی به روش سطح پاسخ ارائه شده است. در این جدول مقادیر متغیرهای مستقل و تعداد تکرارها در مقابل شماره هر آزمایش آورده شده است. تعداد ۳۰ آزمایش طراحی شد. با دخالت متغیرهای مستقل با سطوح شماره-بندی شده و متغیرهای پاسخ، نرم‌افزار Design Expert 13 قادر است که آزمایش‌ها را طراحی کند و اطلاعات تحلیلی مورد نیاز را ارائه دهد.

جدول ۳ فهرست متغیرهای مستقل به همراه نمادها، سطوح شماره‌بندی شده و مقادیر آنها را ارائه می‌دهد که در طرح آزمایش‌ها در روش سطح پاسخ مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۴- ضرایب مدل برازش شده به معادله رگرسیونی درجه دوم جهت خشک کردن چغندر قرمز به روش خلای تناوبی برای متغیرهای پاسخ (X_1 دمای هوا، X_2 فشار خلأ، X_3 توان مایکروویو و X_4 زمان اعمال مایکروویو)

SEC (MJ/kg _{water})	D_{eff} (m ² /s)	SKG (%)	Δb^*	Δa^*	ΔL^*	AC (%)	AA (ml/mg)	منابع تغییرات
+۱۶۰۵/۹۲	-۹/۳۲	+۴۹/۱۵	+۱/۷۰	+۲/۴۳	+۴/۳۲	+۹/۳۷	+۲/۳۴	عرض از مبدأ
-۷۸/۴۸***	+۰/۲۲***	+۱۰/۵۲***	-۰/۸۹***	+۰/۱۸***	+۰/۳۶***	+۰/۰۳ ^{ns}	-۰/۰۵***	(b ₁) X_1
-۱۷/۹۶ ^{ns}	-۰/۰۱*	+۰/۶۶**	+۰/۰۱ ^{ns}	+۰/۰۲ ^{ns}	+۰/۰۵ ^{ns}	-۰/۰۹***	-۰/۰۳***	(b ₂) X_2
-۱۶۱/۸۸***	+۰/۰۷***	+۱/۹۰***	-۰/۴۰***	+۰/۰۵***	+۰/۱۳**	-۰/۰۷**	-۰/۰۱***	(b ₃) X_3
-۱۹۱/۱۷***	+۰/۰۸***	+۱/۶۰***	-۰/۴۳***	-۰/۰۴**	-۰/۲۴***	-۰/۰۸***	-۰/۰۹***	(b ₄) X_4
+۱۲/۴۴ ^{ns}	+۰/۰۳ ^{ns}	-۰/۱۶ ^{ns}	-۰/۰۹ ^{ns}	-۰/۰۲ ^{ns}	-۰/۰۲ ^{ns}	-۰/۰۲ ^{ns}	+۰/۰۳***	(b ₁₂) X_1X_2
+۳۸/۷۵ ^{ns}	-۰/۰۰۲ ^{ns}	+۰/۰۸ ^{ns}	-۰/۰۸ ^{ns}	+۰/۰۱ ^{ns}	+۰/۰۰۴ ^{ns}	+۰/۰۲ ^{ns}	-۰/۰۱ ^{ns}	(b ₁₃) X_1X_3
+۹۸/۶۱***	-۰/۰۲***	-۰/۲۵ ^{ns}	+۰/۲۹***	-۰/۱۵***	-۰/۲۵***	-۰/۰۳ ^{ns}	+۰/۰۳***	(b ₁₄) X_1X_4
+۸/۶۴ ^{ns}	-۰/۰۰۰۳ ^{ns}	+۰/۰۱ ^{ns}	+۰/۰۲ ^{ns}	+۰/۰۱ ^{ns}	+۰/۰۰۴ ^{ns}	+۰/۰۰۲ ^{ns}	-۰/۰۰۱ ^{ns}	(b ₂₃) X_2X_3
-۴/۸۸ ^{ns}	+۰/۰۰۰۵ ^{ns}	+۰/۰۷ ^{ns}	-۰/۰۰۰۷ ^{ns}	+۰/۰۱ ^{ns}	-۰/۰۰۰۶ ^{ns}	+۰/۰۲ ^{ns}	+۰/۰۰۱ ^{ns}	(b ₂₄) X_2X_4
-۱۳۸/۱۰***	+۰/۰۶***	+۰/۵۰*	-۰/۳۶***	+۰/۰۳ ^{ns}	+۰/۱۹***	-۰/۰۸**	-۰/۰۱***	(b ₃₄) X_3X_4
-۳۴/۱۲ ^{ns}	-۰/۱۰***	-۳/۰۱***	+۱/۲۷***	-۰/۰۵ ^{ns}	+۰/۲۰ ^{ns}	+۰/۴۶***	-۰/۱۱***	(b ₁₁) X_1^2
-۲۷/۵۶ ^{ns}	+۰/۰۰۷ ^{ns}	+۰/۰۶ ^{ns}	-۰/۰۰۰۳ ^{ns}	-۰/۰۲ ^{ns}	+۰/۰۸ ^{ns}	+۰/۲۰**	-۰/۱۳***	(b ₂₂) X_2^2
+۱۰۹/۱۹*	-۰/۰۵***	-۱/۱۱*	+۰/۰۶ ^{ns}	+۰/۰۱ ^{ns}	+۰/۵۲***	+۰/۱۰ ^{ns}	-۰/۰۱ ^{ns}	(b ₃₃) X_3^2
+۱۰۲/۳۵ ^{ns}	-۰/۰۳**	+۲/۲۳***	+۰/۵۶***	+۰/۰۹*	+۰/۰۹ ^{ns}	-۰/۷۴***	-۰/۰۸***	(b ₄₄) X_4^2
۰/۱۰ ^{ns}	۰/۱۵ ^{ns}	۰/۹۴ ^{ns}	۰/۰۹ ^{ns}	۰/۵۱ ^{ns}	۰/۲۷ ^{ns}	۰/۴۲ ^{ns}	۰/۱۱ ^{ns}	Lack of fit (P-value)
۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	Model (P-value)
۰/۹۵۱۹	۰/۹۹۷۰	۰/۹۹۶۳	۰/۹۸۷۸	۰/۹۵۹۲	۰/۹۶۴۸	۰/۹۴۴۵	۰/۹۹۰۰	R ²
۴/۷۲	۰/۱۷۸۵	۱/۵۲	۶/۹۳	۲/۲۷	۳/۲۳	۰/۸۶۵۴	۰/۵۴	(%) C.V.
۸۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۷۳	۰/۲۰	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۰۱	Std.Dev.
No Transform Quadratic	Base log Quadratic	No Transform Quadratic	No Transform Quadratic	Square root Quadratic	Square root Quadratic	Square root Quadratic	Square root Quadratic	Transformation Model type

*** نشانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰.۰۱٪، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰.۰۱٪، * اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰.۰۵٪ و ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار هستند. (AA محتوای اسکوربیک اسید، AC ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، Δa^* ، ΔL^* و Δb^* شاخص‌های تغییر رنگ، SKG درصد چروکیدگی و SEC انرژی مصرفی ویژه هستند).

نتایج و بحث

جدول ۴، ضرایب مدل‌های برازش‌شده معادله رگرسیون حاصل از روش سطح پاسخ برای متغیرهای وابسته در فرایند خشک‌کردن چغندر قرمز به روش روش تناوبی را ارائه می‌دهد. علامت مثبت یا منفی این ضرایب در معادلات بیان‌گر تأثیر مثبت یا منفی متغیر مستقل بر مقدار متغیر پاسخ هستند. با توجه به جدول، عامل عدم برازش (lack of fit) برای تمامی متغیرهای مورد مطالعه معنی‌دار نشده است (کم‌تر از ۰/۹۴)، که بیان‌گر این امر است که مدل‌های ارائه شده (RSM)، دارای قابلیت بالایی در پیش‌بینی تغییرات متغیرهای پاسخ هستند (Rashidi *et al.*, 2020). مقادیر ضریب تبیین (R^2) برای تمامی مدل‌های ارائه شده بین (۹۹/۷۰ - ۹۵/۱۹) حاصل شد. همچنین مقادیر پایین ضریب تغییرات (کم‌تر از ۶/۹۳) برای تمامی مدل‌ها به عنوان شاخص تکرارپذیری خوب این مدل‌ها به شمار می‌رود (Ghasemi & Amiri Chayjan, 2018). مقادیر کم C.V. نشان‌گر دقت و قابلیت اطمینان آزمایش‌های انجام یافته است. مقادیر بالای R^2 برای هر عامل نیز ارتباط خوب بین مقادیر حاصل و پیش‌بینی شده و قابلیت مدل برای برازش داده‌ها است (Ahmadi Ghavidelan & Amiri Chayjan, 2022).

محتوای ویتامین ث

در شکل ۴ تأثیرپذیری ویتامین ث از متغیرهای مستقل دمای محفظه خشک‌کن، فشار خلأی، مدت زمان و سطح توان اعمالی مایکروویو نشان داده شده است. مقادیر کمینه و بیشینه ویتامین ث ۴/۴۱ و ۶/۳۲ ml/mg پس از خشک‌شدن هستند. شکل (a) ۴ بیانگر این است که افزایش فشار خلأی از ۲۰ تا ۵۰ (kPa) در ابتدا محتوای ویتامین ث را کاهش و در فشار بالاتر آنرا بهبود بخشید. بعلاوه شکل (b) ۴ و (c) ۴ نشان می‌دهند که دما و مدت زمان اعمال مایکروویو اثر معکوس روی این شاخص دارند و اثر دما بیش‌تر از اثر زمان و توان اعمالی مایکروویو است. زیرا افزایش دما منجر به واکنش شیمیایی تخریب ویتامین ث می‌گردد.

از آنجایی که ویتامین ث یک ویتامین محلول در آب است، با کاهش محتوای رطوبت نمونه در حین فرایند خشک‌کردن، نرخ تخریب آن نیز بالا می‌رود (Ghasemi & Amiri Chayjan, 2019). اسید اسکوربیک (ویتامین ث) یک شاخص مهم و مؤثر کیفیت در میوه‌ها است که

محافظت مناسب از آن ارتباط مستقیمی با حفظ سایر ترکیبات مغذی محصول نیز دارد (Kumar *et al.*, 2022). اکسیژن و حرارت در فرایند خشک‌کردن باعث تخریب سریع اسید اسکوربیک می‌شوند. استفاده از مایکروویو با کاهش زمان، به حفظ این ماده ارزشمند کمک می‌کند. مقدار اسید اسکوربیک برش‌های موز تازه ۹/۶۹ mg در ۱۰۰ g بود که پس از فرایند، تا میزان ۸۰/۲٪ کاهش یافت (Jiang *et al.*, 2014). نتایج حاصل از این مطالعه با پژوهش‌های ذکر شده و مطالعات دیگر هم‌خوانی دارد (Ghasemi & Amiri Chayjan, 2019). در خشک‌کردن خلأ، ویتامین C به دلیل کاهش میزان اکسیژن در مقایسه با شرایط فشار جوی، تخریب کم‌تری را تجربه می‌کند. بر اساس یافته‌ها، شرایط بهینه برای حفظ کیفیت برش‌های موز شامل دمای ۵۰°C و فشار خلأی ۸۰ kPa است (Sujindaa *et al.*, 2024). که در مطالعه حاضر هم همین دما، ولی فشار ۲۰ kPa به دست آمد.

آنتی‌اکسیدان

در شکل ۵ تأثیرپذیری فعالیت آنتی‌اکسیدان از متغیرهای مستقل نشان داده شده است. شکل (a) ۵ و شکل (b) ۵ بیانگر این هستند که افزایش دما و فشار خلأی ابتدا درصد آنتی-اکسیدان را کاهش و در مرحله بعدی آن‌را را افزایش دادند. همچنین شکل (c) ۵ نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر متقابل زمان و توان اعمالی مایکروویو بر روی این شاخص است. افزایش زمان از ۰ تا ۱۰ ثانیه در ابتدا اثر افزایشی و سپس کاهش داشت. همچنین اثر زمان اعمال مایکروویو بیش‌تر از اثر توان بود. مقادیر کمینه و بیشینه فعالیت آنتی-اکسیدانی نمونه‌های خشک‌شده در این تحقیق به ترتیب ۷۲ و ۹۶٪ به دست آمد. در حالی‌که برای نمونه‌های نخودسبز خشک‌شده بین ۵۸/۵۸ و ۸۶/۸۶ گزارش شد. این شاخص با افزایش دما و توان مایکروویو زیاد می‌شد (Kaveh & Abbaspour-Gilandeh, 2022).

(2019). همچنین پیوستگی مثبتی میان محتوای بتاسیانین ($r = 0.795$) و بتاگزانتین ($r = 0.716$) و ظرفیت آنتی-اکسیدانی وجود دارد (Mella *et al.*, 2022). واکنش میلاردی و کاهش رطوبت در فرایند خشک‌کردن به عنوان یک تنش غیرآلی باعث شکل‌گیری و تجمع ترکیبات فنولی و در نتیجه افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Chua *et al.*, 2019).

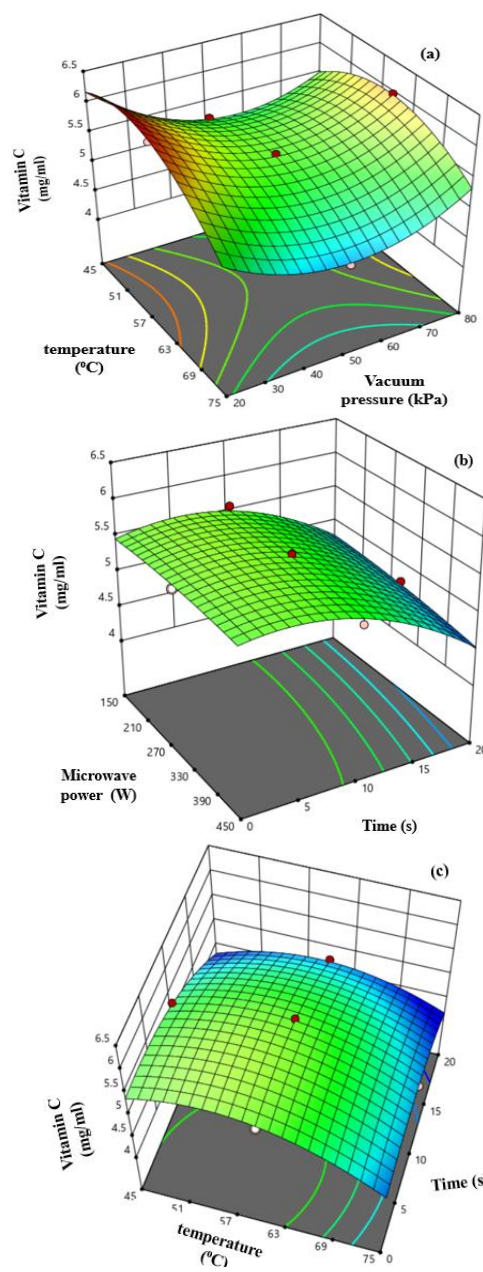
البته چغندر قرمز به دلیل محتوای بالای ترکیبات فنلی از ظرفیت آنتی‌اکسیدانی قابل توجهی برخوردار است. کاهش محتوای فنل کل ممکن است به دلیل آنزیم PPO باشد که مسئول اکسیداسیون انتخابی فنل‌ها است و می‌تواند در دمای ۴۰ درجه سلسیوس بسیار فعال گردد و در نهایت باعث کاهش جدی در محتوای فنل کلی در این دما شود (Tan *et al.*, 2020)، که مشابه نتایجی است که در نمودار (a) ارائه شده است.

شاخص‌های رنگی ΔL^* , Δa^* , Δb^*

رنگ، شاخص تازگی محصول محسوب می‌شود (Chua *et al.*, 2019). تغییر رنگ میوه‌ها و سبزیجات در طول فرایند خشک‌کردن به دلیل تبخیر آب، واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیرآنزیمی، کاراملی و تأثیر دما بر روی ترکیبات حساس به دما مانند ویتامین‌ها است (Ahmadi Ghavidelan & Amiri Chayjan, 2017).

تغییرات شاخص رنگ ΔL^*

شکل ۶ اثر متغیرهای مستقل بر شاخص رنگ ΔL^* را نشان می‌دهد. نمودار (a) ۶ اثر متقابل دما و زمان اعمال مایکروویو را نشان می‌دهد و بیان‌گر این امر است که افزایش دما بر خلاف زمان اثر مستقیم روی این شاخص دارد. همچنین نمودار (b) ۶ اثر متقابل زمان و توان اعمال مایکروویو را نشان می‌دهد که بیان‌گر این امر است که افزایش زمان اعمال مایکروویو موجب کاهش شاخص ΔL^* گردید. اثر عامل دما بر این شاخص از اثر سایر عامل‌ها مشهودتر است. مقادیر کمینه و بیشینه شاخص رنگ ΔL^* نمونه‌های خشک‌شده به ترتیب ۱۶/۸۵ و ۳۸/۹۲ به دست آمد. این شاخص برای محصول بامیه از ۴۲/۶۹ در حالت تازه به ۴۴/۷۱ تا ۵۱/۳۵ بعد از خشک‌کردن به روش‌های خورشیدی، مادون قرمز، مایکروویو، خلای و هوای گرم افزایش یافت (Ismail *et al.*, 2019).

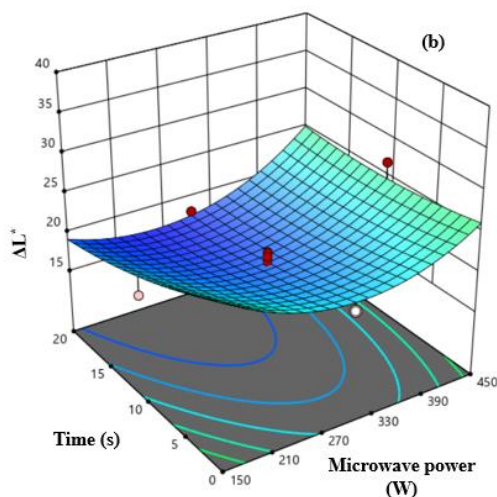
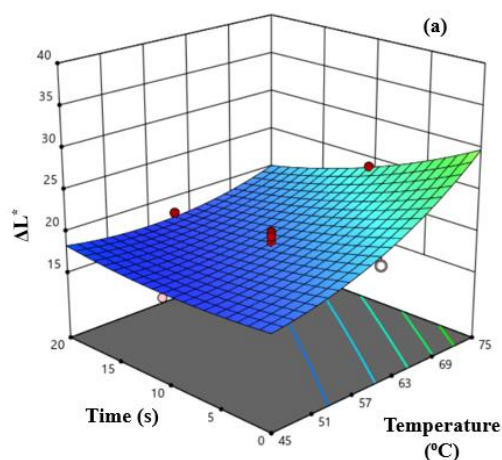


شکل ۴- تأثیرپذیری ویتامین ث از اثر متقابل (a) دمای محفظه خشک‌کن و فشار خلای؛ (b) زمان و توان اعمال مایکروویو و (c) دمای محفظه و مدت زمان اعمال مایکروویو

همچنین افزایش سطح توان مایکروویو و خلأ با کاهش زمان فرایند و در نتیجه کاهش واکنش اکسیدشدن روی ترکیبات فنلی منجر به بهبود صفات آنتی‌اکسیدانی می‌گردد (Khanlari *et al.*, 2020).

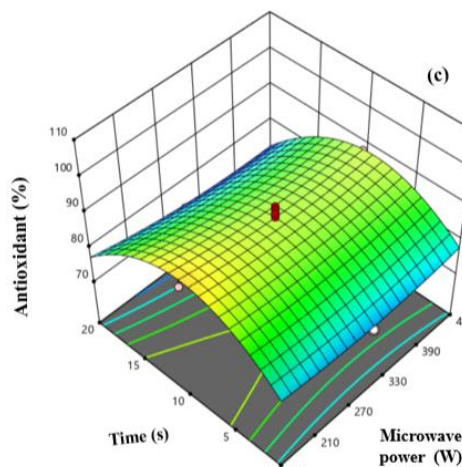
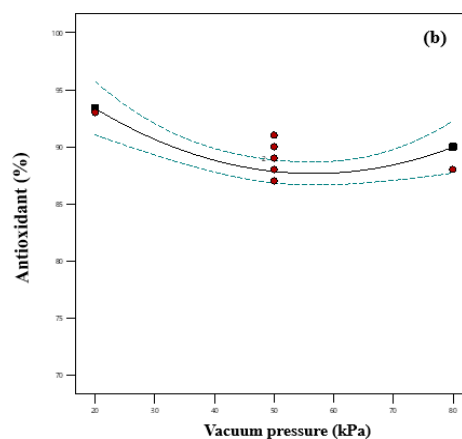
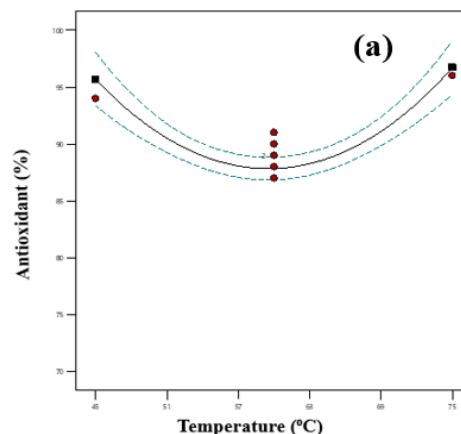
به صورت کلی تغییر در صفات آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها از تغییرات در محتوای فنل کلی تبعیت می‌کند. یک پیوستگی قوی ($r = 0.894$) بین آنها مشاهده شده است، زیرا ترکیبات فنلی گروه هیدروکسیلی دارند که پروتون‌ها را به آسانی به رادیکال‌های آزاد می‌دهند (Vallespir *et al.*,

بیش‌ترین اثر را بر میزان این ترکیب دارد؛ زیرا که رنگی‌های حساس به دمای بتالاین، در پی افزایش حرارت با سرعت بالایی تخریب می‌شود (Fathabadi *et al.*, 2020).



شکل ۶- تأثیرپذیری ΔL^* از اثر متقابل (a) دمای محفظه و مدت زمان اعمال میکروویو؛ (b) زمان و توان اعمالی میکروویو در خشک کردن چغندرقرمز

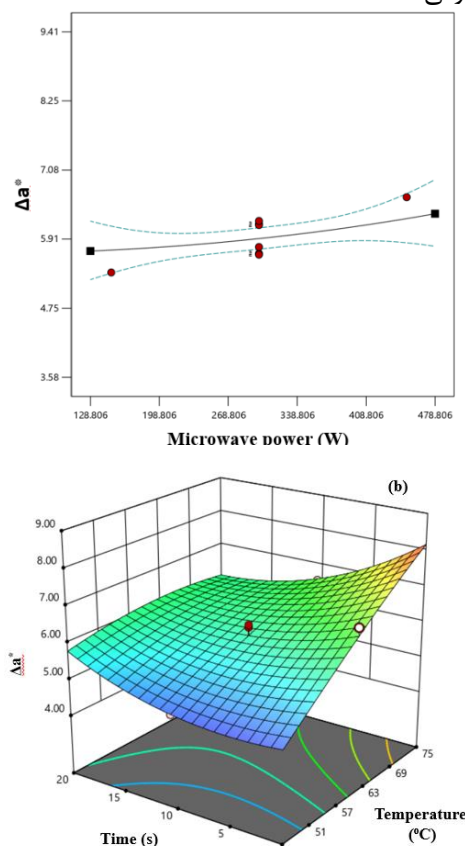
البته نتایج پژوهش خشک کردن ترکیبی نخود سبز توسط استوانه چرخنده، میکروویو و هوای گرم، نشان داد که با افزایش توان میکروویو و دما روشنایی محصول خشک شده کاهش می‌یابد (Kaveh & Abbaspour-Gilandeh, 2022). که برعکس نتایج مطالعه حاضر است؛ زیرا تغییر رنگ بستگی به مشخصات ماده در خلأ خشک شدن نیز دارد (Kaveh *et al.*, 2021)؛ همچنین الگوی تغییر رنگ برای محصولات مختلف متفاوت است. به عنوان مثال شاخص روشنایی در خشک کردن سیب‌زمینی و گواوا به طور چشم‌گیری تغییر داشت در حالی که شاخص زردی تأثیر عمده در تغییر رنگ موز ایفا کرد. تغییر رنگ



شکل ۵- تأثیرپذیری محتوای آنتی‌اکسیدان از اثر (a) دمای محفظه خشک‌کن؛ (b) فشار خلأ و (c) اثر متقابل توان و زمان اعمال میکروویو

هم‌چنین نتایج به دست آمده از تغییرات روشنایی در فرایند خشک کردن چغندر قرمز نشان‌گر آن است که روند تغییرات روشنایی به صورت صعودی بود. که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. یکی از مهم‌ترین علل ازدیاد روشنایی، تغییرات روی داده در ماده قرمز رنگ بتالاین است که در فرایند رطوبت‌زدایی تابع عامل‌های متغیر مختلفی مانند رطوبت، pH، حرارت، اکسیژن و نور است. که حرارت

لیکوپن محصول گشته و در نهایت موجب تغییر در شاخص رنگ ΔL^* و Δa^* می‌گردد (Rashidi et al., 2021). نتایج تحقیق حاضر با نتایج ذکر شده در تحقیقات بالا هم‌خوانی داشت.



شکل ۷- تأثیرپذیری Δa^* از اثر (a) توان مایکروویو؛ (b) اثر متقابل دمای محفظه خشک‌کن و زمان اعمال توان مایکروویو در خشک‌کردن چغندرقرمز

تغییرات شاخص رنگ Δb^*

شکل ۸ اثر متغیرهای مستقل را بر متغیر وابسته Δb^* نشان می‌دهد. نمودار (a) اثر متقابل دما و زمان اعمال مایکروویو را نشان می‌دهد و بیان‌گر این امر است که افزایش دما بر خلاف زمان اعمال مایکروویو موجب کاهش شاخص Δb^* گردید. همچنین نمودار (b) اثر متقابل توان و زمان اعمال مایکروویو را نشان می‌دهد و مبین این امر است که افزایش هردو عامل موجب کاهش شاخص Δb^* گردید. مقادیر کمینه و بیشینه شاخص رنگ Δa^* نمونه‌های خشک‌شده به ترتیب ۱/۲۸ و ۸/۳۱ به دست آمد. نتایج پژوهش‌هایی که در زیر آمده است با نتایج حاصل از مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد. برای مثال، Rashidi et al. (2019) در تولید قرص گوجه‌فرنگی گزارش دادند که افزایش دما سبب کاهش

سیب‌زمینی در مقایسه با موز و گواوا، به دلیل محتوای پایین قند و رطوبت بالا و در نتیجه کاهش واکنش میلاردی، کم‌تر است (Kumar et al., 2022). عدم وجود هوا در محفظه خلأ با جلوگیری از اکسیداسیون، از تغییر رنگ و محتوای ماده خشک‌شده تا حدود زیادی جلوگیری می‌کند (Amiri Chayjan et al., 2017).

تغییرات شاخص رنگ Δa^*

شکل ۷ اثر متغیرهای مستقل را بر متغیر پاسخ Δa^* نشان می‌دهد. نمودار (a) بیانگر این امر است که افزایش سطح توان مایکروویو، اثر مستقیم روی این شاخص دارد. همچنین نمودار (b) اثر متقابل دما و زمان اعمال مایکروویو را نشان می‌دهد و مبین این امر است که افزایش دما بر خلاف زمان اعمال مایکروویو موجب افزایش شاخص Δa^* گردید. زیرا کلروفیل‌ها ناپایدار هستند و گرمادهی در فرایند خشک‌کردن موجب پارگی مکانیکی در پرده سیتوپلاسمی و آزادسازی اسیدهای سلولی و تبدیل کلروفیل به فیتوسیتتیس (عمده‌ترین تغییر در کلروفیل) می‌گردد. شرایط خشک کردن خلأی-مایکروویو تحت تأثیر عوامل کاهش اکسیژن، دمای جوش، فشار و دوره فرایند در حفظ رنگ محصول نهایی تأثیر دارد. زمان طولانی خشک‌کردن و در معرض اکسیژن بودن از عوامل تجزیه کلروفیل هستند (Chua et al., 2019). مقادیر کمینه و بیشینه شاخص رنگ Δa^* نمونه‌های خشک‌شده به ترتیب ۴/۶۶ و ۸/۳۱ به دست آمد که نسبتاً کم است و مقادیر کم‌تر این شاخص بر خلاف شاخص‌های L^* و b^* و نشان‌گر کیفیت بالاتر محصول خشک‌شده است (Ghasemi et al., 2019).

برای نمونه در خشک‌کردن نمونه‌های میوه کیوی، مشاهده شد که با افزایش دما مقدار شاخص رنگی Δa^* به طور میانگین از ۱۹- به ۱۳- در تمامی تیمارها زیاد شد (Khakbaz Heshmati & Seifi Moghaddam, 2017). با حفظ بیش‌تر کلروفیل در بافت نمونه رنگ آن تمایل کم‌تری به قرمزی پیدا می‌کند. مقدار لیکوپن بالاتر باعث قرمزی بیش‌تر محصول است. افزایش دمای خشک‌کردن، باعث تسریع واکنش‌های ایزومریزاسیون و تخریب ماده

ممکن است به دلیل تخریب کم‌تر رنگدانه‌ها از جمله کلروفیل باشد که در زمان کم‌تری در معرض انرژی میکروویو و حرارت بوده‌اند (Pu & sun, 2017). شاخص زردی (b^*) در خشک‌کردن ترکیبی نخود سبز نیز با افزایش دما و توان میکروویو افت را نشان داد (Kaveh & Abbaspour-Gilandeh, 2022).

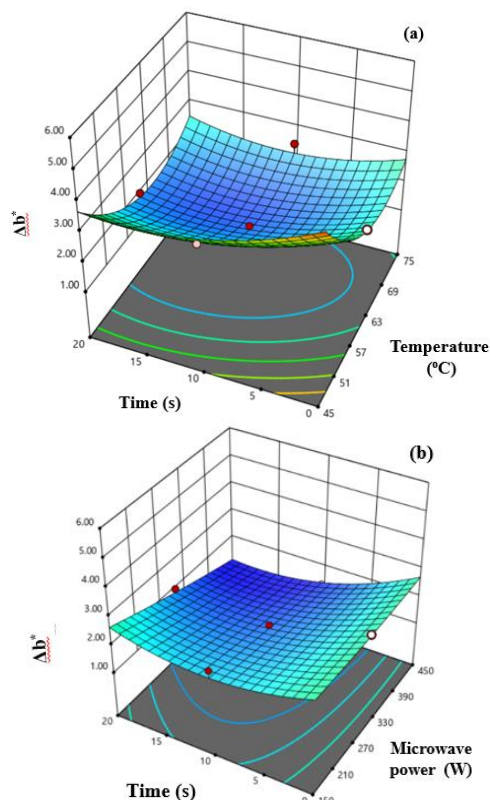
درصد چروکیدگی

نمودارهای شکل ۹ تأثیرپذیری درصد چروکیدگی از اثر (a) فشار خلأی؛ (b) دمای محفظه خشک‌کن؛ (c) ۹ توان اعمالی میکروویو و (d) ۹ زمان اعمال توان میکروویو در خشک‌کردن چغندر قرمز را نشان می‌دهد. نمودارها نشان گر این هستند که افزایش هر چهار متغیر مستقل موجب افزایش متغیر پاسخ درصد چروکیدگی می‌گردند. مقادیر کمینه و بیشینه درصد چروکیدگی نمونه‌های خشک‌شده به ترتیب ۳۳/۲۱ و ۶۲/۱۱ به دست آمد، که در محدوده نتایج تحقیقات دیگر است. از جمله ضریب چروکیدگی در خشک کردن کدو ۸۴/۹۲٪ - ۷۹/۹۱٪ به روش تناوبی با دستگاه خشک‌کن خلأی مادون قرمز (Amiri Chayjan *et al.*, 2017)، برش‌های هلو به روش خلأ ۴۶/۳٪ تا ۶۱/۲٪ (Amiri Chayjan & Alaei, 2016)، برای توت‌فرنگی از ۳۶/۲۱ تا ۷۳/۷۵٪ (Bórquez *et al.*, 2017)، دانه‌های انار ۶۷ تا ۷۴٪ و میوه‌ها و سبزیجات بین ۷۰ تا ۹۰٪ (Alaei & Chayjan, 2015) گزارش شد. چروکیدگی نمونه‌های کدو به علت دارا بودن محتوای رطوبتی بیش‌تر نسبت به محصولات دیگر است. علت آن تغییرات در توزیع اجزاء مختلف کلوروپلاست در نمونه توسط گرما است (Amiri Chayjan *et al.*, 2017).

نتایج پژوهش‌های زیر با داده‌های تحقیق حاضر هم خوانی دارد. با افزایش توان میکروویو از صفر به ۳۶۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ وات، چروکیدگی به ترتیب به میزان ۳/۸، ۴/۳ و ۵ درصد کاهش یافت (Dehghananya *et al.*, 2018b). زیرا با افزایش سطح توان میکروویو و در نتیجه رسیدن به دماهای بالا، زمان فرایند خشک‌شدن کوتاه‌تر می‌شود و این امر موجب کاهش چروکیدگی می‌گردد (Dehghananya *et al.*, 2021).

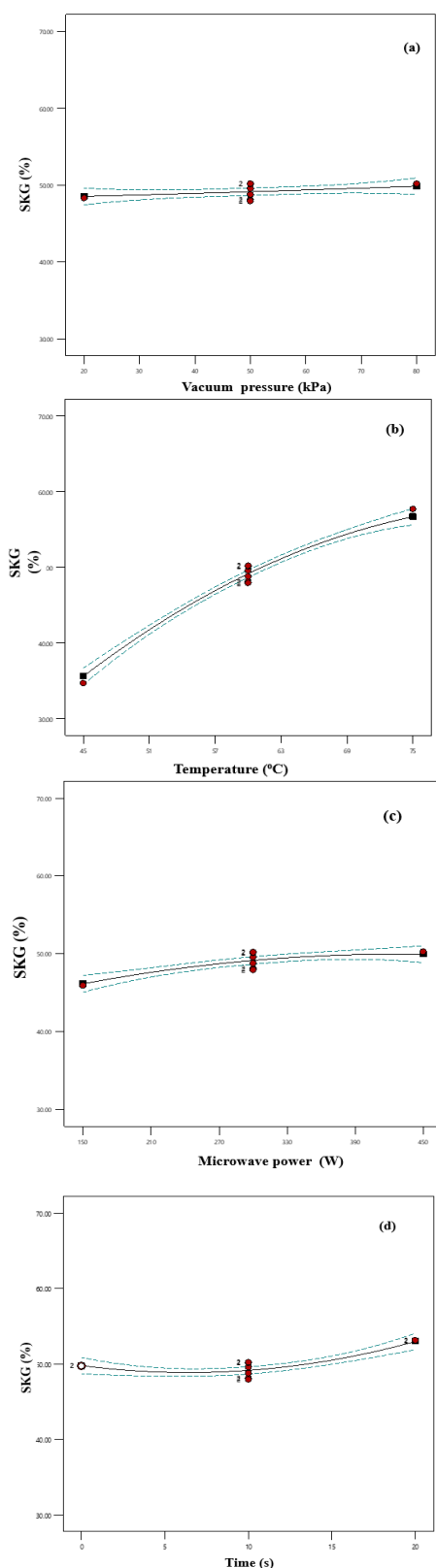
مواد زیستی مایع درون سلولی دارند که فشار ترکی (Turgor pressure) را بر دیواره سلول اعمال می‌کند. در طی فرایند رطوبت‌زدایی آب از سلول خارج و این فشار کم می‌شود و در نتیجه سبب چروکیدگی ماده می‌شود

شاخص رنگ Δb^* بین نمونه تازه و قرص به علت واکنش‌های مایلارد گردید. همین نتیجه در خشک‌کردن برگه‌های کیوی (Khakbaz Heshmati & Seifi Moghaddam, 2017) و خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی (Ghasemi *et al.*, 2019) به دست آمد. در مورد آخر، دلیل آن به تجزیه رنگدانه‌ها توسط واکنش‌های شیمیایی ارتباط داده‌شد.



شکل ۸- تأثیرپذیری Δb^* از اثر متقابل (a) دمای محفظه خشک‌کن و زمان اعمال توان میکروویو؛ (b) زمان و توان اعمالی میکروویو در خشک‌کردن چغندر قرمز

نتایج بررسی‌ها بیان گر این است که رنگ‌دانه‌های زرد موجود در چغندر قرمز پایدارتر از رنگ‌دانه‌های قرمز (بتالائین‌ها) هستند و این ویژگی موجب غلظت بالاتر رنگ دانه‌های زرد در سطح محصول خشک‌شده در مقایسه با نمونه تازه می‌شود. نتایج بررسی Δb^* در رطوبت‌زدایی نمونه‌های چغندر قرمز در شرایط خلأ نشان داد که افزایش دما سبب کاهش این عامل شد، زیرا در دماهای بالاتر نمونه مدت زمان کم‌تری در معرض گرما قرار می‌گیرد و در نتیجه تعداد کم‌تری از رنگدانه‌های قرمز رنگ بتالائین به رنگ زرد تغییر پیدا می‌کنند (Fathabadi *et al.*, 2020). نمونه‌هایی مورینگا که در سطوح بالاتر میکروویو و فشار خلأی خشک‌شدند، دارای شاخص سبزی بالاتری بودند، و این



شکل ۹- تأثیرپذیری درصد چروکیدگی از اثر (a) فشار خلای؛ (b) دمای محفظه خشک‌کن؛ (c) توان اعمالی مایکروویو و (d) زمان اعمال توان مایکروویو در خشک کردن چغندرقرمز ضریب انتشار مؤثر رطوبت

(Ahmadi Ghavidelan & Amiri Chayjan, 2017; Rashidi *et al.*, 2020). دماهای پایین منجر به چروکیدگی بیش‌تر می‌شود و چروکیدگی پدیده‌های انتقال را محدود می‌سازد. استفاده از منابع انرژی کمکی مانند امواج مایکروویو و مادون قرمز به صورت ترکیبی می‌تواند این محدودیت‌ها را برطرف نماید (Dehghannya *et al.*, 2018a). ترکیب مایکروویو و خلأ، ساختمان متخلخل بزرگ‌تری را در محصول خشک‌شده ایجاد می‌کند. زیرا به-کارگیری مایکروویو باعث ایجاد گرادیان حرارتی سریع و به-کارگیری روش خلأ باعث ایجاد گرادیان فشاری بیش‌تر و اثر پافینگ در ساختار نمونه می‌گردد (Monteiro *et al.*, 2021). افزایش هم‌زمان دمای هوا و توان مایکروویو بر مقدار چروکیدگی نمونه می‌افزاید (Ahmadi Ghavidelan & Amiri Chayjan, 2017).

در فرایند خشک کردن بنه با افزایش توان مایکروویو، دما و از دست دادن رطوبت، چروکیدگی محصول نیز افزایش یافت (Kaveh *et al.*, 2021).

شکل ۱۰ تأثیرپذیری ضریب انتشار مؤثر رطوبت از اثر متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. نمودار (a) ۱۰ بیانگر این امر است که افزایش فشار خلأی در سطح ۵٪ و به صورت غیر مستقیم بر این شاخص اثر می‌گذارد. نمودار (b) ۱۰ نشان می‌دهد که اثر متقابل دمای محفظه خشک‌کن و مدت زمان اعمال مایکروویو باعث افزایش این شاخص می‌شوند. که در تحقیق دیگری نیز این امر مشاهده شد (Liu *et al.*, 2019). زیرا افزایش هم‌زمان دما و زمان خشک کردن با کاهش فشار مطلق، انرژی گرمایی و در نتیجه جنبش مولکول‌های آب را بالا برده و سرانجام پخش رطوبت را افزایش می‌دهد. افزایش خلأ در محفظه نیز با ایجاد گرادیان شدید فشار بخار بین سطح و داخل نمونه، آهنگ انتقال رطوبت را افزایش می‌دهد (Amiri Chayjan *et al.*, 2017).

نمودار (c) ۱۰ بیانگر اثر متقابل مدت زمان و توان اعمال مایکروویو است و نشان می‌دهد که این عامل‌ها اثر مستقیم روی متغیر پاسخ دارند. در تحقیق دیگری نیز این موضوع اثبات شد که افزایش دما، توان و زمان اعمال مایکروویو این ویژگی را افزایش می‌دهند (Dehghannya *et al.*, 2018a).

(Sedani *et al.*, 2021). همین‌طور با کاهش محتوای رطوبت ضریب مؤثر رطوبت نیز به دلیل انقباض لوله‌های مؤین، افزایش تنش سطحی و تخریب ریزساختاری کاهش می‌یابد.

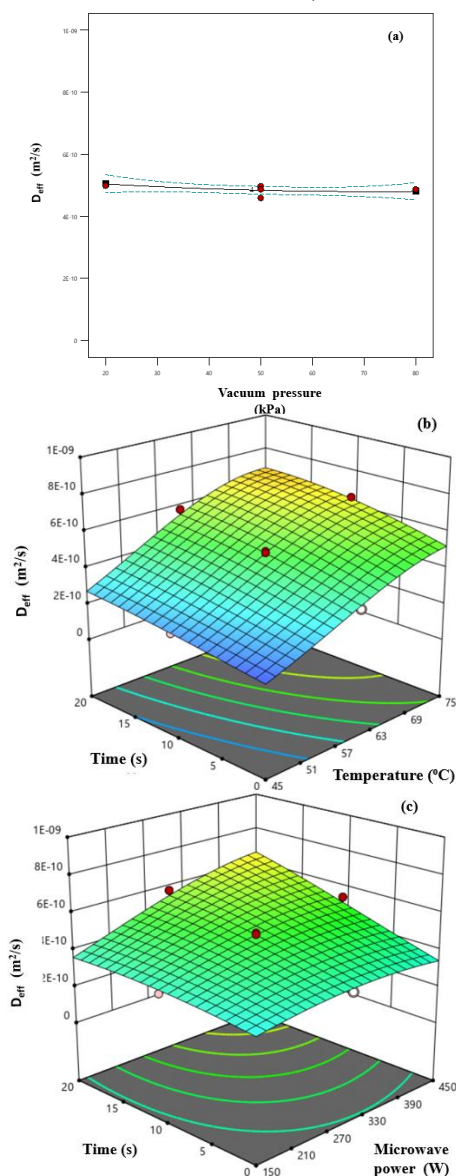
رفتار غیر خطی لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان می‌تواند به دلیل چروکیدگی و توزیع نابرابر رطوبت باشد (Dehghannya *et al.*, 2018b). بنابراین افزایش توان مایکروویو اعمال شده باعث افزایش نرخ خشک‌شدن می‌گردد (Golpour *et al.*, 2020). محدوده تغییرات ضریب انتشار مؤثر رطوبت از $1/43 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $8/22 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ بود که نزدیک به نتایج خشک‌کردن کدو است که از $5/41 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $1/75 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ به روش تناوبی با دستگاه خشک‌کن خلأی مادون قرمز گزارش شد (Amiri Chayjan *et al.*, 2017).

انرژی مصرفی ویژه

شکل ۱۱ تأثیرپذیری انرژی مصرفی ویژه از اثر متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. نمودار (a) ۱۱ بیانگر اثر متقابل دما و مدت زمان اعمال مایکروویو بر این شاخص است و نشان می‌دهد که افزایش مدت زمان اعمال مایکروویو بر خلاف افزایش دما، اثر کاهشی بر این شاخص دارد. این امر به دلیل آن است که انرژی ویژه مصرفی با افزایش دما به سبب ازدیاد گرادیان انتقال حرارت بین نمونه و هوای داخل محفظه، حالت نزولی به خود می‌گیرد (Jha *et al.*, 2021). انرژی مصرفی به عنوان یک عامل مهم به شدت تحت تأثیر زمان خشک‌کردن، از دست‌دادن رطوبت در طول فرایند، سایر خصوصیات مواد غذایی (نظیر اندازه و محتوای رطوبتی) و همین‌طور شرایط خشک‌کردن مانند دما قرار دارد (Dehghannya *et al.*, 2018b).

نمودار (b) ۱۱ نشانگر اثر متقابل توان و مدت زمان اعمال مایکروویو است و بیانگر این امر است که افزایش هردو عامل، اثر کاهشی بر روی انرژی مصرفی ویژه دارد. زیرا افزایش توان مایکروویو، با ایجاد دماهای بالاتر در نمونه موجب افزایش فشار داخلی و گرادیان غلظت می‌گردد، بنابراین زمان خشک‌کردن به دلیل افزایش انتقال جرم کاهش پیدا می‌کند و موجب کم‌شدن انرژی مصرفی ویژه می‌گردد (Zhang *et al.*, 2024; Kaveh *et al.*, 2021). برای نمونه افزایش توان مایکروویو از ۳۶۰ به ۹۰۰ وات انرژی مصرفی ویژه را به میزان ۳۸/۱٪ کاهش داد (Dehghannya *et al.*, 2021). همچنین مواد غذایی عایق‌های خیلی ضعیفی

به‌علاوه، در مقادیر بالای توان مایکروویو، به دلیل پلاریزاسیون دوقطبی مولکول‌های آب ضریب مؤثر پخش رطوبت بالاست. کاهش فشار خلأی در مقایسه با توان مایکروویو در افزایش آن کم‌تر تأثیرگذار است. (Hameeda *et al.*, 2023). اگرچه اثر دما بیش‌تر از سایر عوامل در افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت سهیم است. زیرا دماهای بالاتر با افزایش انرژی در دسترس، باعث افزایش شیب فشار رطوبت و در نتیجه بالا رفتن آهنگ انتقال جرم می‌شود (Darvishi *et al.*, 2016).



شکل ۱۰- تأثیرپذیری ضریب مؤثر رطوبت از اثر (a) فشار محفظه خشک‌کن، (b) اثر متقابل دمای محفظه و زمان اعمال توان مایکروویو و (c) اثر متقابل زمان و توان اعمالی مایکروویو با کاهش محتوای رطوبت، آهنگ خشک‌شدن به دلیل از دست دادن ثابت دی‌الکتریک و در نتیجه کاهش جذب انرژی مایکروویو توسط نمونه‌ها کندتر می‌شود.

خشک‌کن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. (Abdollahzadeh Delazi et al., 2024)

امروزه مهم‌ترین هدف در صنایع مختلف افزایش سوددهی، کاهش هزینه‌ها و ارتقاء کیفیت نهایی محصول است. استفاده از روش‌های مختلف از جمله بکارگیری مؤثر امواج مایکروویو در فرایند خشک‌کردن که منجر به کاهش مصرف انرژی می‌گردد راه حل مناسبی برای رسیدن به این هدف است (Jindarat et al., 2015).

بهینه‌سازی

داده‌های جدول ۵ بیشینه و کمینه متغیرهای پاسخ و وزن یا ضریب اهمیت آنها به منظور بهینه‌سازی فرایند خشک‌کردن برش‌های چغندرقرمز به روش سطح پاسخ را ارائه می‌دهد. در این مطالعه با توجه به اهمیت کیفیت در فرایند خشک‌کردن چغندرقرمز، ضریب اهمیت ۵ برای متغیرهای پاسخ ویتامین ث و فعالیت آنتی‌اکسیدانی، ۳ برای شاخص‌های رنگی و ۱ برای چروکیدگی، ضریب پخش مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی ویژه در نظر گرفته شد.

جدول ۵- محدوده متغیرهای پاسخ و ضریب اهمیت آنها به منظور بهینه‌سازی فرایند خشک‌کردن برش‌های چغندرقرمز به روش سطح پاسخ

متغیرهای پاسخ	هدف	کم‌ترین مقدار	بیش‌ترین مقدار	ضریب اهمیت
ویتامین ث (mg/ml)	بیشینه	۴/۴۱	۶/۳۲	۵
آنتی‌اکسیدان (٪)	بیشینه	۷۲	۹۶	۵
ΔL^*	کمینه	۱۶/۸۵	۳۸/۹۲	۳
Δa^*	کمینه	۴/۶۶	۸/۳۱	۳
Δb^*	کمینه	۱/۲۸	۵/۳۹	۳
درصد چروکیدگی	کمینه	۳۳/۲۱	۶۲/۱۱	۱
D^{eff} (m^2/s)	بیشینه	$1/43E^{-10}$	$8/22E^{-10}$	۱
SEC_{total} (MJ/kg _{water})	کمینه	۱۱۴۹/۴۲	۲۱۷۶/۸	۱

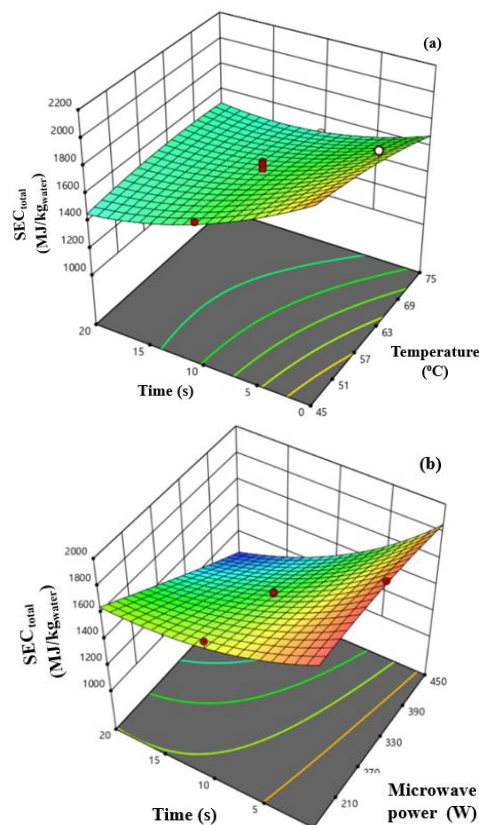
ΔL^* ، Δa^* و Δb^* : شاخص‌های تغییر رنگ،

D^{eff} : ضریب پخش مؤثر رطوبت

SEC: انرژی مصرفی ویژه

جدول ۶ نقطه بهینه انتخاب‌شده به روش سطح پاسخ در خشک‌کردن چغندرقرمز را نشان می‌دهد. فرایند رطوبت‌زدایی بر روی صفات فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی، و

هستند، و با جذب امواج توسط مواد دی الکتریک موجود، انرژی بالایی را جذب می‌کنند، که منجر به گرمایش سریع می‌شود. در دماهای بالا، مقدار توان‌ها و انرژی به کار رفته بالا هستند، اما انرژی مصرفی کل به علت کاهش زمان فرایند کاهش می‌یابد. دلیل آن افزایش گرادیان غلظت است که موجب افزایش جریان مایع در داخل ماده غذایی می‌شود. اگر کاهش زمان فرایند به افزایش آهنگ تولید و کیفیت محصول بیانجامد، اهمیت بیش‌تری دارد. (Ahmadi Ghavidelan & Amiri Chayjan, 2017)



شکل ۱۱- تأثیرپذیری انرژی مصرفی ویژه از اثر متقابل (a) دمای محفظه خشک‌کن و زمان اعمال توان مایکروویو و (b) زمان و توان اعمال مایکروویو در خشک‌کردن چغندر قرمز در این مطالعه، محدوده تغییرات شاخص انرژی مصرفی ویژه $2176/8 - 1149/42$ (MJ/kg_{water}) به دست آمد. در حالی که بالاترین و پایین‌ترین مقدار آن برای تفاله سیب $5471/82$ و $1943/06$ (kWh/kg_{water}) به ترتیب در شرایط $45^\circ C$ ، فشار خلای 60 kPa و $80^\circ C$ ، فشار خلای 60 kPa کیلو پاسکال گزارش شد (Abdollahzadeh Delazi et al., 2024) انرژی از شاخص‌های مهم در خشک‌کن‌های محصولات کشاورزی و ارزیابی بازده صنعتی برشمرده می‌شود (Kumar et al., 2022; Singh and Guar 2020). بنابراین تجزیه و تحلیل شاخص انرژی مصرفی ویژه در

۱۲/۹۴، ۱۵/۵۴، ۲۲/۲۶، ۲۲/۴۸، ۸/۴۶، ۴۱/۱۵، ۲۵/۸۶ تغییر را نشان می‌دهند که به غیر از درصد چروکیدگی، همگی در جهت بهبود نتایج هستند، زیرا خشک کردن با میکروویو تحت شرایط خلأ، مزایای انتقال انرژی میکروویو را با شرایط ملایم خشک کردن خلأ ترکیب می‌کند. در حالی که خشک کردن خلأ به روش نرمال به دلیل نبود انتقال حرارت هم‌رفتی، نسبتاً کند است، انرژی میکروویو به‌طور چشم‌گیری زمان فرایند را کاسته و هم‌زمان کیفیت محصول را حفظ می‌کند (Li et al., 2024).

نتیجه‌گیری

روش تناوبی در فرایند خشک کردن خلأی – مادون قرمز با به‌کارگیری امواج میکروویو به عنوان پیش‌تیمار و به شکل مرحله‌ای در مقایسه با سایر روش‌های دیگر از جمله خشک کردن خلأی پیوسته، با دستیابی به بهبود ۴۱/۱۵٪ در ضریب مؤثر پخش رطوبت، ۲۵/۸۶٪ در کاهش انرژی مصرفی ویژه و محافظت بسیار خوب از شاخص‌های رنگی و صفات زیستی – شیمیایی برتری چشم‌گیری نسبت به روش نرمال را اثبات کرد. یافته‌ها به‌طور خاص برای چغندرقرمز است و برای سایر محصولات نیاز به تحقیقات جدید است.

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 مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نزت حسن جیجو: دانشجوی دکتری

رضا امیری چایجان: استاد راهنما

حسن ساریخانی: استاد مشاور

جعفر امیری پریان: استاد مشاور

اصول اخلاقی

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

ترمودینامیکی تأثیرگذار بود. با توجه به این جدول، نقاط بهینه برای خشک کردن در دمای ۵۰°C، فشار خلأی ۲۰ kPa، توان ۳۳۹ W و مدت زمان اعمال میکروویو ۱۰ s به کمک روش RSM به دست آمد، درجه مطلوبیت مقدار ۰/۸۱۶ حاصل شد. محتوای ویتامین ث مقدار ۶/۳۰ mg/ml به دست آمد که در مقایسه با مقدار حالت تازه ۷/۵۳ mg/ml، نشان از محافظت نسبتاً خوب از این ماده با ارزش است.

جدول ۶- نقطه بهینه انتخاب‌شده در روش سطح پاسخ در خشک کردن چغندرقرمز با روش تناوبی

متغیرها	واحد	مقدار
متغیرهای مستقل		
دما	(°C)	۵۱
فشار خلأی	(kPa)	۲۰
توان میکروویو	(W)	۳۳۹
دما	(s)	۱۰
متغیرهای وابسته		
ویتامین ث	(mg/ml)	۶/۳۲
فعالیت آنتی اکسیدانی	(%)	۹۵/۲۵
ΔL^*	-	۱۸/۲۳
Δa^*	-	۵/۳۲
Δb^*	-	۲/۴۳
چروکیدگی	(%)	۴۱/۸۸
ضریب پخش مؤثر رطوبت	(m ² /s)	۳/۴۳×۱۰ ^{-۱۰}
انرژی مصرفی ویژه	(MJ/kg _{water})	۱۵۸۲/۰۲
مطلوبیت	-	۰/۸۲۳

به منظور مقایسه مقادیر متغیرهای پاسخ در نقاط بهینه، آزمایش دیگری بر روی دستگاه خشک‌کن خلأی به روش نرمال در دمای ۵۰°C، فشار خلأی ۲۰ kPa، طرح‌ریزی و در سه تکرار انجام شد. مقادیر ویتامین ث (۶/۳۰ و ۶/۰۹ mg/ml)، فعالیت آنتی اکسیدانی (۸۵٪ و ۹۶٪)، تغییرات رنگی ΔL^* (۲۱/۴۹ و ۱۸/۱۵)، Δa^* (۶/۷۴ و ۵/۲۴)، Δb^* (۳/۳۸ و ۲/۶۲)، درصد چروکیدگی (۳۷٪/۵۷ و ۴۰/۷۵)، ضریب مؤثر پخش رطوبت (۳/۴۳×۱۰^{-۱۰} و ۲/۴۳×۱۰^{-۱۰} m²/s)، انرژی مصرفی ویژه (۲۱۳۸/۴۸ و ۱۵۸۵/۴۵ MJ/kg_{water})، به ترتیب برای روش‌های (نرمال و تناوبی) به دست آمد. نتایج حاصل شده برای متغیرهای پاسخ اشاره شده به ترتیب (۳۴/۴۸٪)،

منابع

- (2019). Antioxidant Activity, and Volatile and Phytosterol Contents of *Strobilanthes crispus* Dehydrated Using Conventional and Vacuum Microwave Drying Methods. *Molecules*, 24(7): 1397. <https://doi.org/10.3390/molecules24071397>
- Chupawa, P., Inghuen, S., Jaisut, D., Ronsse, F., and Duangkhamchan, W. (2023). Effects of Stepwise Microwave Heating and Expanded Bed Height Control on the Performance of Combined Fluidized Bed/Microwave Drying for Preparing Instant Brown Rice. *Food and Bioprocess Technology*, 16: 199–215. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02933-x>.
- Darvishi, H., Zarein, M., and Farhudi, Z. (2016). Energetic and exergetic performance analysis and modeling of drying kinetics of kiwi slices. *Journal of Food Science Technology*, 53 2317–2333. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2199-7>.
- Dehghannya, J., Bozorgchi, S. & Heshmati, M.K. (2018a). Low temperature hot air drying of potato cubes subjected to osmotic dehydration and intermittent microwave: drying kinetics, energy consumption and product quality indexes. *Heat Mass Transfer*, 54: 929–954. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2202-5>.
- Dehghannya, J., Farshad, P., & Khakbaz Heshmati, M. (2018b). Three-stage hybrid osmotic–intermittent microwave–convective drying of apple at low temperature and short time. *Drying Technology*, 36(16): 1982–2005. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1432642>.
- Dehghannya, J., Seyed-Tabatabaei, SR., Khakbaz Heshmati, M. *et al.* (2021). Influence of three stage ultrasounds—intermittent microwave—hot air drying of carrot on physical properties and energy consumption. *Heat Mass Transfer*, 57, 1893–1907. <https://doi.org/10.1007/s00231-021-03074-1>.
- Elkelawy, M., El Shenawy, E. A., Bastawissi, H. A. E., Shams, M. M., & Panchal, H. (2022). A comprehensive review on the effects of diesel/biofuel blends with nanofluid additives on compression ignition engine by response surface methodology. *Energy Conversion and Management*: X, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100177>.
- Fathabadi, M., Tabatabaekoloor, and R., Motevali A. (2020). Modeling and comparison of color changes and shrinkage of thin layer drying of red beetroot in different dryers. *Journal of food science and technology*, 93(16): 127–142. <https://sid.ir/paper/72023/en> (in persian).
- Figiel, A., and Michalska, A. (2017). Overall Quality of Fruits and Vegetables Products Affected by the Drying Processes with the Assistance of Vacuum-Microwave. *International Journal of Molecular Sciences*, 71: 1–18. [doi: 10.3390/ijms18010071](https://doi.org/10.3390/ijms18010071).
- Gaudel, N., Gaiani, C., Harshe, Y. M., Kammerhofer, J., Pouzot, M., Desobry, S., & Burgain, J. (2022). Reconstitution of fruit
- Abdollahzadeh Delazi, M., Amiri Chayjan, R. & Kaveh, M. (2024). Optimizing the GHG emissions and energy consumption of power plants in the industry of vacuum drying using a controlled atmosphere method (case study: apple pulp). *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26: 2899–2918. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02778-2>.
- Ahmadi Ghavidelan, M., & Amiri Chayjan, R. (2017). Modeling engineering characteristics of hazelnut kernel during infrared fluidized bed drying. *Food Measure*, 11: 460–478. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9414-0>
- Alaei, B. & Chayjan, R. Study on thin layer drying parameters of pomegranate arils in a solar-vacuum dryer. (2015). *Journal of food science and technology (Iran)*, 48 (12): 27–36. (in persian).
- Alwazeer, D., and Ors, B. (2019). Reducing atmosphere drying as a novel drying technique for preserving the sensorial and nutritional notes of foods. *Journal of Food Science and Technology - Mysore-*, 56(8): 3790–3800. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03850-2>.
- An, J., Xie, H., Yan, J., Wei, H., Wu, Y., & Liao, X. (2024). A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology. *Energy Reports*, 12, 5482–5506. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.11.037>
- Amiri Chayjan, R., & Alaei, B. (2016). Comparison of short and medium infrared radiation on drying parameters of peach slices under vacuum conditions. *Journal of food science and technology*, 58(13). 107–116 (In persian).
- Amiri Chayjan, R., Dibagar, N., & Alaei, B. (2017). Drying characteristics of zucchini slices under periodic infrared-microwave vacuum conditions. *Heat Mass Transfer*. 53:3473–3485. [DOI 10.1007/s00231-017-2081-9](https://doi.org/10.1007/s00231-017-2081-9)
- Bórquez, R., Melo, D., and Saavedra, C. (2017). Microwave–vacuum drying of strawberries with automatic temperature control. *Food Bioprocess Technol*, 8(2): 266–276. [Doi: 10.1007/s11947-014-1400-0](https://doi.org/10.1007/s11947-014-1400-0)
- Bunkar, D.S., Anand, A., Meena K.K., Goyal, S.K., and Paswan, V.K. (2020). Development of production technology for preparation of beetroot powder using different drying methods. *Annals of Phytomedicine*, 9(2): 293–301. [doi: 10.21276/ap.2020.9.2.29](https://doi.org/10.21276/ap.2020.9.2.29).
- Cao, X., Chen, J., Islam, N., Xu, W., and Zhong, S. (2019). Effect of Intermittent Microwave Volumetric Heating on Dehydration, Energy Consumption, Antioxidant Substances, and Sensory Qualities of Litchi Fruit during Vacuum Drying. *Molecules*, 24(23), 1–11. <https://doi.org/10.3390/molecules24234291>.
- Chua, L. Y. W., Chua, B. L., Figiel, A., Chong, C. H., Wojdyło, A., Szumny, A., & Choong, T. S. Y.

- Rehydration. *Athens Journal of Sciences*, 6(3): 155-168. <https://doi.org/10.30958/ajs.6-3-1>.
- Jafarizadegan, M., Amiri Chayjan, R., & Karamian, R. (2020). Optimization of a combination dryer (Vacuum-Infrared) operation in production process of edible button mushroom powder. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 43(2), 141-161. <https://doi.org/10.22055/agen.2020.31903.1528>.
- Jha, P., Meghwal, M., Prabhakar, PK. (2021). Microwave drying of banana blossoms (*Musa acuminata*): mathematical modeling and drying energetics. *Journal of Food Process Preserv*, 45(9): e15717. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15717>.
- Jiang, H., Zhang, M., S Mujumdar, A., and Limd. R. X. (2014). Comparison of drying characteristic and uniformity of banana cubes dried by pulse-spouted microwave vacuum drying, freeze drying and microwave freeze drying. *Journal of Science Food Agric*. 94: 1827-1834. DOI [10.1002/jsfa.6501](https://doi.org/10.1002/jsfa.6501).
- Jindarat W, Sungsoontorn S, Rattanadecho, P. (2015). Analysis of energy consumption in a combined microwave-hot air spouted bed drying of biomaterial: coffee beans. *Experimental heat-mass transfer*, 28: 107-124. DOI: [10.1080/08916152.2013.821544](https://doi.org/10.1080/08916152.2013.821544)
- Kaveh, M. (2017). Using artificial neural networks (ANNs) method in investigation and estimation of some drying characteristics of eggplant and turnip in a combined microwave – convective dryer. *Journal of Food Science and Technology*, 70(14): 27-46. (In Persian).
- Kaveh, M., & Abbaspour-Gilandeh, Y. 2022. Drying Characteristics, Specific Energy Consumption, Qualitative Properties, Total Phenol Compounds, and Antioxidant Activity During Hybrid Hot Air-Microwave-Rotary Drum Drying of Green Pea. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 41(2): 652-669. doi: [10.30492/ijcce.2020.127111.4114](https://doi.org/10.30492/ijcce.2020.127111.4114)
- Kaveh, M., Abbaspour, Y., & Nowacka, M. (2021). Optimisation of microwave-rotary drying process and quality parameters of terebinth. *Biosystems Engineering*, 20(8): 113-130. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2021.05.013](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.05.013).
- Khakbaz Heshmati, M., & Seifi Moghaddam, A. (2017). Application of intermittent microwave – convective hot air technique on quality and nutritional characteristics of dried kiwi slices. *Food research journal*. 27(1): 111-126. (in persian).
- Khanlari, A., Güler, H.Ö., Tuncer, A. D., Şirin, C., Bilge, Y. C., Yılmaz, Y., et al. (2020). Experimental and numerical study of the effect of integrating plus-shaped perforated baffles to solar air collector in drying application. *Renewable Energy*, 145: 1677-1692. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.076>.
- powders: A process structure function approach. *Journal of Food Engineering*, 315: 110800. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110800>.
- Ghasemi, A., & Amiri Chayjan, R. A. (2018). Optimization of Pelleting and Infrared-Convection Drying Processes of Food and Agricultural Waste Using Response Surface Methodology (RSM). *Waste and Biomass Valorization*, 10, 1711-1729. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0178-5>
- Ghasemi, A., & Amiri Chayjan, R. A. (2019). Numerical simulation of vitamin C degradation during dehydration process of fresh tomatoes. *Journal of Food Process Engineering*, 42(6). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13189>.
- Ghasemi, A., Amiri Chayjan, R., and Azizi Tabrizi, M. H. (2019). Study on Drying, Powdering and Compression Processes to produce Healthy Tablet from Fresh Tomatoes. *Journal of food science and technology (Iran)*, 90(16): 201-216. (in persian).
- Golpour, I., Kaveh, M., Chayjan, R. A., and Guiné, R. P. F. (2020). Optimization of Infrared-convective Drying of White Mulberry Fruit Using Response Surface Methodology and Development of a Predictive Model through Artificial Neural Network. *International Journal of fruit science*, 20(2): 1015-1035. <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1774474>
- Hafezi, N., Sheikhe Davoodi, M. J., & Sajjadih, S. M. (2016). A Study of Drying Rate of Sliced Potatoes during Radiation-Vacuum Drying Process using Regression and Artificial Neural Network Models. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(2): 279-289. doi: [10.22059/ijbse.2016.58777](https://doi.org/10.22059/ijbse.2016.58777). (In persian).
- Hameeda, A., Maana, A.A., Khana, M. K. I., Khanc, Imran, M., Niazi, S., Iqbal, M. W., Riaz, T., Manzoore, M. F., & Abdallac, M. (2023). Evaporation kinetics and quality attributes of grape juice concentrate as affected by microwave and vacuum processing. *International journal of food properties*, 26(1): 1596-1611. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2218062>.
- Hii, C.L., Ong, S.P., Yap, J.Y., Putranto, A., and Mangindaan, D. (2021). Hybrid drying of food and bioproducts: a review. *Drying Technology*, 39(11): 1524-1576. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1914078>.
- Homayounfar, H. & Amiri- Chayjan, R. (2024). Improving Orange Pomace Dehydration Process through a New Controlled Atmosphere Dryer under Vacuum Conditions: A Bioactive Compound Investigation and Optimization. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 43(3): 1252-1266. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2023.1999762.5955>
- Ismail, O., Seyhun Kipcak, A. S., and Doymaz, I. (2019). Drying of Okra by Different Drying Methods: Comparison of Drying time, Product Color Quality, Energy Consumption and

- Microwave vacuum drying of *Pereskia aculeata* Miller leaves: Powder production and characterization. *Journal of Food Process Engineering*, 44(2): 1–12. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13612>.
- Moses, J. A., Norton, T., Alagusundaram, K., and Tiwari, B. K. (2014). Novel Drying Techniques for the Food Industry. *Food Engineering Reviews*, 6(3): 43-55. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9078-7>.
- Musielak, G. & Kieca, A. (2014). Influence of Varying Microwave Power during Microwave–Vacuum Drying on the Drying Time and Quality of Beetroot and Carrot Slices. *Drying Technology: An International Journal*, 32:11, 1326-1333, DOI: [10.1080/07373937.2014.924135](https://doi.org/10.1080/07373937.2014.924135).
- Nanvakenari, S., Movagharnajad, K., Latifi, A. (2022). Modelling and experimental analysis of rice drying in new fluidized bed assisted hybrid infrared-microwave dryer. *Food Research International*, 159, 111617. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111617>.
- Parniakov, O., Mikhrovska, M., Wiktor, A., Alles, M., Ristic, D., Bogusz, R., Nowacka, M., Devahastin, S., Mujumdar, A., Heinz, V., and Smeta, S. 2021. Insect processing for food and feed: A review of drying methods. *Drying Technology*, 40(8): 1500-1513. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1962905>.
- Pei, Y. P., Sun, B-H., Vidyarthi, S. K., Zhu, Z-Q., Yan, S-K., Zhang, Y., Wang, J., and Wei Xiao, H. (2023). Pulsed pressure enhances osmotic dehydration and subsequent hot air-drying kinetics and quality attributes of red beetroot. *Drying Technology*, 41(2): 262-276. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2031209>.
- Pu, Y.Y., & Sun, D.W. (2017). Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution. *Biosystems Engineering*, 156: 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.006>.
- Rashidi, M., Amiri Chayjan, R., Ershadi, A., & Ghasemi, A. (2020). Modeling and optimization of vacuum-infrared dryer performance in the production process of compressed tomato tablets: chemical properties. *Biosystem Engineering of Iran*, 51(3): 571-584. (In Persian). doi: [10.22059/ijbse.2020.292861.665245](https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.292861.665245)
- Rashidi, M., Amiri Chayjan, R., Ghasemi, A., & Ershadi, A. (2021). Tomato tablet drying enhancement by intervention of infrared - A response surface strategy for experimental design and optimization. *Biosystems Engineering*, 208: 199-212. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.06.003>.
- Klein, BP., and Perry, AK. (1982). Ascorbic acid and vitamin A activity in selected vegetables from different geographical areas of the United States. *Journal of Food Science*, 47: 941-945. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb12750.x>
- Kumar, A., Kandasamy, P., Chakraborty, I., and Hangshing, L. (2022). Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer. *Biosystems Engineering*, 219: 85–102. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.026>
- Leilayi, M., arabhosseini, A., Akhijahani, H.S., Kaveh, M., nezamlou, N., & Aghaei, M. (2024). Energy and exergy efficiencies of batch paddy rice drying with liquefied petroleum gas dehumidification: A comprehensive analysis using adaptive neuro-fuzzy inference system and artificial neural networks approaches. *Energy Conversion and Management*. (under press). doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100826>.
- Li, J., Huang, Y., Gao, M., Tie, J., & Wang, G. (2024). Shrinkage properties of porous materials during drying: A review. *Frontiers in Materials*, 11, 1330599. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1330599>
- Liu, S., Zhu, W., Bai, X., You, T., & Yan, J. (2019). Effect of ultrasonic energy density on moisture transfer during ultrasound enhanced vacuum drying of honey. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(1): 559-570.
- Liu, Y., Sabadash, S., Duan, Z., Deng, C. (2022). The influence of different drying methods on the quality attributes of beetroots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (11 (117)): 60–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022>.
- Long, X., Cai, L., & Li, W. (2019). RSM-based assessment of pavement concrete mechanical properties under joint action of corrosion, fatigue, and fiber content. *Construction and Building Materials*, 197: 406-420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.157>.
- Mella, C., Vega-Gálvez, A., Uribe, E., Pasten, A., Mejias, N., Quispe- Fuentes, I. (2022). Impact of vacuum drying on drying characteristics and functional properties of beetroot (*Beta vulgaris*). *Applied Food Research*, 2: 100 -120. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100120>.
- Mitrevski, J., Pantelić, N.Đ., Dodevska, M.S., Kojić, J.S., Vulić, J.J., Zlatanović, S., Gorjanović, S., Lalić-Petronijević, J., Marjanović, S., and Antić, V.V. (2023). Effect of Beetroot Powder Incorporation on Functional Properties and Shelf Life of Biscuits. *Foods*, 12, 322. <https://doi.org/10.3390/foods12020322>.
- Monteiro, R. L., Garcia, A. H., Tribuzi, G., Mattar Carciofi, B. A., & Laurindo, J. B. (2021).

- Tan, S., Wang, Z., Xiang, Y., Deng, T., Zhao, X., Shi, S., Zheng, Q., Gao, X., & Li, W. (2020). The effects of drying methods on chemical profiles and antioxidant activities of two cultivars of Psidium guajava fruits. *LWT - Food Science and Technology*, 118, Article 108723. (In press). doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108723>.
- Vallespir, F., Rodríguez, O., Eim, V. S., Rosselló, C., & Simal, S. (2019). Effects of freezing treatments before convective drying on quality parameters: Vegetables with different microstructures. *Journal of Food Engineering*, 249: 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.01.006>.
- Zhang, F. J., Wang, X., Xin, L. D., Li, L. X., Dai, J. W. and Zhou, J. (2023). Moisture diffusion modelling and effect of microwave vacuum drying on drying kinetics and quality of yam. *International Food Research Journal*, 30(3): 626 – 639. <https://doi.org/10.47836/ifrj.30.3.07>.
- Zhang, W., Chen, C., Pan, Z., and Zheng, Z. (2021). Vacuum and infraredassisted hot air impingement drying for improving the processing performance and quality of Poria cocos (Schw.) Wolf Cubes. *Foods* 10(5) :345. <https://doi.org/10.3390/foods10050992>.
- Zhang, Z., Chen, Y., Peng, J., Huang, S., & Wu, H. (2024). Study on drying characteristics of combined microwave-hot air drying of paddy. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64. 105539. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105539>.
- Santos, K.C., Guedes, J.S., Rojas, M.L., Carvalho, G.R., Augusto, P.E.D. (2021). Enhancing carrot convective drying by combining ethanol and ultrasound as pre-treatments: Effect on product structure, quality, energy consumption, drying and rehydration kinetics. *Ultrasonics Sonochemistry*. (under press). doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105304>.
- Sedani, S. R., Pardeshi, I. L., & Dorkar, A. R. (2021). Study on the effect of stepwise decreasing microwave power drying (SDMPD) of moth bean sprouts on its quality. *Legume Science*, 3(4), e84. <https://doi.org/10.1002/leg3.84>.
- Singh, P., & Gaur, M. K. (2020). Review on development, recent advancement and applications of various types of solar dryers. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 14471–14491. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1806951>.
- Suhanya, P., Juzaili, B., Azizi, R., Ismail, S., Sasidharan, S., and Mahsufi, M. (2009). Evaluation of antioxidant and antibacterial activities of aqueous, methanolic and alkaloid extracts from Mitragnyna speciosa (Rubiaceae family) leaves. *Molecules*, 14: 3964-3974. [doi:10.3390/molecules14103964](https://doi.org/10.3390/molecules14103964).
- Sujindaa, N., Saengsuwanb, T., & Chaichana, N. (2024). Study on drying characteristics, color, and vitamin c preservation of green banana slices using a vacuum heat pump system. *Agricultural Engineering*. 28(1): 167-184. DOI: [10.2478/agriceng-2024-0011](https://doi.org/10.2478/agriceng-2024-0011).