Research Article

Agricultural Engineering, 48(2) (2025) 283 - 314 ISSN (E): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2025.49132.1771 ISSN (P): 2588-5944

Modeling and optimization of a stepwise strategy with microwave treatment in a vacuum drying system (Analysis of quality indices)

N.H. Jeejo[1], R. Amiri Chayjan[2*], J. Amiri Parian[3] and H. Sarikhani[4]

1. PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
4. Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Received: 2 March 2025 Accepted: 28 April 2025 *Corresponding Author: amirireza@basu.ac.ir

Abstract

Introduction: Beetroot (Beta vulgaris) is a great source of diverse essential nutrients such as dietary fibers, betalains, vitamins and carbohydrates. Drying of fruits and vegetables is considered as an engineering strategy in food industry, pointed at applying a set of operations to enhance shelf life, ensure perennial market supply, reduce packing and transportation costs, and enhance the quality of the final product. Simultaneously this is a massive energy consumption among food industries. Numerous efforts have been made to reduce the cost of drying agricultural products through various methods, including the manufacturing of new equipment and the efficiency maximization of existing systems. In the present work, it was appraised whether by means of new drying technique of step-down mode of stepwise temperature change conditions in a vacuum dryer apparatus, could be a probable proper alternative for manufacturing new devices which tremendously, requires expenditure of time and disbursement.

Materials and methods: In this research the impact of a laboratory infrared-vacuum dryer and a new drying technique of stepwise temperature with the same device were investigated. The new strategy was assisted by a microwave treatment using a home scale Toshiba microwave. The present study was purposed to comprehend the effects of above-mentioned drying methods on the drying behavior of 4 mm red beetroot slices in addition to physical properties including color indices of (ΔL^*, Δa^*, Δb^*) and shrinkage; Chemical properties of vitamin C and antioxidant component; Thermal properties of effective moisture diffusivity and drying kinetics and specific energy consumption as well as environmental aspects of greenhouse gasses (GHG) emissions. Beetroot slices were exposed to three levels of temperature (45, 60 and 75 °C) and absolute pressure (20, 50 and 80 kPa) as normal drying. Also, three levels of microwave power and times (at 150, 300, and 450 W) and (0, 10, and 20s) for stepwise conditions were applied.

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Results and discussion: Results showed that R^2 value of normal and stepwise drying methods were between (92.73 – 99.92%) & (94.34 – 99.92%) respectively. The high values of R^2 indicates that there is a strong relationship between experimental foundlings and predicted proposed model quantities. Furthermore, the CV percentage for them was less than 6.93 and 6.16 for normal and stepwise drying methods correspondingly; that illustrates a good repeatability of related models. All studied variables demonstrate non-significant lack of fit values that exhibit a good prediction ability for dependent variables. Therefore, models offer a good reliability in all dependent variables. Temperature factor had significant effect on all studied parameters in normal vacuum drying at 0.1% level. Absolute vacuum pressure affected significantly at different levels on all variables excluding SECtotal, CO_2 and NO_x for both methods; Unless otherwise the effect of temperature on dependent variables was more considerable comparing to absolute vacuum pressure. Power level and duration of microwave application in stepwise strategy had significant effect at 0.1% level on all dependent variables excluding AA. Interaction effect of temperature and vacuum pressure was more significant in normal vacuum drying. Stepwise method showed more considerable effect of microwave power application time interacting with vacuum pressure and microwave power level. The desirability values were found 0.606 and 0.610 for normal vacuum and stepwise method respectively. The optimization by using the response surface methodology (RSM), was detected at 65 and 20 kPa for normal vacuum drying. Besides that, pressure vacuum of 45 kPa, 360 W of microwave power and 10 s of microwave power application was found as optimum point for stepwise drying method. Compared to normal vacuum drying at optimal conditions, the stepwise method reduced NO_x and CO_2 emissions by 27.91% and 27.80%, respectively, and decreased specific energy consumption by 28.18%. Additionally, improvements in color parameters were observed, with Δa^* and ΔL^* increasing by 18.80% and 9.87%, respectively. However, Δb^* showed a 14% color degradation, and shrinkage increased by 38.62%. Furthermore, reductions in vitamin C loss index and antioxidant activity were recorded at 11.31% and 11.23%, respectively.

Conclusion: Using stepwise drying strategy had a close but lower impact on quality and physical parameters; whereas, showed a great positive difference on greenhouse gasses emission and specific energy consumption. This method also needs less energy to create absolute vacuum pressure (45 kPa compared to 20 kPa for normal method) to gain the mentioned results. Therefore, stepwise strategy is recommended for drying of red beetroot, as it offers a more energy-efficient approach while maintaining product quality and reducing environmental impact. Furthermore, this technique is proposed for new research studies that can be experimented with different agricultural products.

Keywords: Vacuum drying, Stepwise technique, Optimization, Red beetroot.

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی و بهینه‌سازی راهبرد پلکانی با تیمار مایکروویو در خشک‌کن خلاء (تحلیل شاخص‌های کیفی)

نزت حسن جیجو[۱]، رضا امیری چایجان[۲*]، جعفر امیری پریان[۳] و حسن ساریخانی[۴]

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

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

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

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

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸

کلمات کلیدی:

خشک‌کردن،

تکنیک پلکانی،

چغندر قرمز،

بهینه سازی

* عهده دار مکاتبات

Email: amirireza@basu.ac.ir

چکیده

دستگاه خشک کن خلائی مادون قرمز به دلیل حفظ کیفیت محصول به صورت گسترده در صنایع خشک‌کردن محصولات کشاورزی کاربرد دارد. با این حال انرژی بسیار بالایی را در مقایسه با سایر خشک‌کنها مصرف می‌کند و استفاده از آن به صورت پیوسته با توجه به طولانی بودن مدت فرایند، موجب افت برخی از صفات کیفی محصول می‌گردد. همچنین ساخت نمونه‌های جدید آن با صرف وقت و هزینه بسیار همراه است. بنابراین در تحقیق حاضر به عنوان یک راه حل این موضوع بررسی می‌شود که آیا بکارگیری همزمان تکنیک پلکانی دما و تیمار مایکروویو در دستگاه خشک‌کن خلائی مادون قرمز قادراست جایگزین مناسبی برای خشک‌کردن محصول بدون نیاز به ساخت دستگاه جدید باشد به گونه‌ای که بتواند شاخص‌های دستگاه و محصول نهایی را نیز بهبود بخشد. لذا دستگاه خشک‌کن خلائی در دو روش نرمال و تکنیک پلکانی بر روی برش‌های چهار میلیمتری چغندر قرمز که حاوی مواد مغذی گوناگون و رنگدانه‌های باارزش است به عنوان مطالعه موردی بررسی گردید. متغیرهای مستقل جهت فرایند خشک‌کردن عبارت بودند از: سه سطح دمایی (۴۵، ۶۰ و ۷۵) و فشار خلائی (۲۰، ۵۰ و ۸۰ kPa) در روش نرمال و سه سطح قدرت و زمان بکارگیری مایکروویو در (۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ W) و (۰، ۱۰ و ۲۰s) به عنوان پیش‌تیمار در بکارگیری تکنیک پلکانی. روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های حاصله و

بهینه‌سازی فرایند استفاده گردید. متغیرهای وابسته شامل شاخص‌های رنگی (ΔL*، Δa* و Δb*)، درصد چروکیدگی، محتوای ویتامین ث، و آنتی‌اکسیدان، ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی ویژه بودند. هدف از انجام این پژوهش، یافتن نقطه بهینه برای متغیرهای مستقل در هردو روش خشک‌کردن و مقایسه آنها بود. نقاط بهینه برای خشک‌کردن به روش نرمال دمای ٦٥°C و فشار خلائی ۲۰ kPa و برای روش پلکانی فشار خلائی ٤٥ kPa، توان و زمان مایکروو ۳٥۹W و ۱۰s بدست آمد. تأثیر دما بر متغیرهای وابسته نسبت به فشار خلائی بیشتر بود. ضریب پخش مؤثر رطوبت ٤/٨٦E-۱۰ و ۷/٦٨E-۱۰ m^2/s و انرژی مصرفی ویژه ۲۲٦٦/۱۸ و ۱۹۷۰/۲٤ kJ/kg_{water} به ترتیب برای حالت نرمال و تکنیک تناوبی بدست آمد، که نشان‌دهنده برتری بالای تکنیک تناوبی می‌باشد.

مقدمه

مقدار سبزی و میوه مورد نیاز هر فرد جهت داشتن یک زندگی سالم ۴۰۰ گرم در روز است (۱۷). چغندر قرمز (چغندر لبو) یا (Red beetroot (Beta vulgaris L.)، یکی از سبزیهای بسیار مورد علاقه و سنتی می‌باشد که در سراسر دنیا به صورت گسترده ای کشت و مصرف می‌شود. (۵۰) و از نظر علمی از خانواده Chenopodiaceae است. ریشه قرمز آن به عنوان بخش خوراکی، سرشار از ترکیبات فعال مختلف است و به صورت سالاد، ترشی و آب میوه مورد توجه ویژه ورزشکاران است (۲۲).

روند روبه رشد جمعیت جهان منجر به افزایش مصرف مواد غذایی و در نتیجه گسترش صنایع غذایی شده است، و خشک‌کردن محصولات کشاورزی از جمله راهکارهای مهندسی به منظور بالابردن ماندگاری و کیفیت محصول نهایی ، کم‌کردن مخارج تولید و انرژی به کار رفته (۴۹)، کاهش فساد محصولات تازه و در دسترس بودن آنها در طول سال می‌باشد (۱۸). برای خشک‌کردن محصولات کشاورزی انواع بسیار مختلفی از خشک‌کنها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله آنها خشک‌کنهای اسپری، خلائی، بسترسیال، مادون‌قرمز، فرکانس رادیویی و مایکروویو گزارش شده‌اند (۲۵). خشک کردن در خلاء در مقایسه با شرایط اتمسفر باعث می‌شود که تبخیر آب موجود در محصول در دماهای پایین‌تری اتفاق بیفتد. همچنین کاهش اکسیداسیون، تأثیر مثبتی روی کیفیت رنگ، طعم و بافت محصول به جا می‌گذارد. کاهش رطوبت با روش مادون قرمز هم باعث می‌شود که محصول نهایی بدون احتمال سوختگی از کیفیت بالایی برخوردار باشد (۴). استفاده از انرژی تابش مادون‌قرمز یکی از روش‌های نوظهور در خشک‌کردن محصولات غذایی و کشاورزی محسوب می‌شود.(۵۷)، که در آن انرژی حرارتی از منبع مادون قرمز به صورت تشعشع به سطح نمونه منتقل می‌شود. از جمله مزایای مهم آن گرمایش یکنواخت، کوتاه‌کردن زمان فرایند و قابلیت بالای نرخ انتقال انرژی می‌باشند (۶۵). خشک‌کنهای خلائی–مادون قرمز از لامپهای مادون قرمز به عنوان منبع تولید حرارت استفاده میکنند (۲۷). این خشک‌کنها مزایای هردو روش خشک‌کردن خلائی و مادون قرمز را با هم دارند (۱). با اینحال خشک‌کن خلائی- مادون قرمز مقادیر عظیمی از گازهای گلخانه‌ای را منتشر می‌کند (۳). با توجه به این امر و اینکه امروزه تمدن بشریت توسط بحران جهانی تغییرات اقلیمی که

عمدتا توسط خود انسان به وجود آمده است، به چالش کشیده شده‌است (۲۶)، و با روند رو به رشد این تهدیدها، تصمیم گیرندگان در حوزه‌های سیاست و صنعت اقداماتی را جهت کاهش پخش گازهای گلخانه‌ای اتخاذ کرده‌اند (۱۰). با وجود تحقیقات گسترده در کشورهای پیشرفته، این امر در کشورهای درحال توسعه به صورت مطلوب انجام نیافته است (۱۳). بنابراین تدوین شرایط مناسب خشک‌کردن و توسعه راهکارهای نوین جایگزین، حیاتی به نظر می‌رسد تا بتوان زمان فرایند خشک‌کردن، میزان مصرف انرژی و همچنین آلودگی محصول نهایی را کاهش داد (۶۴). خشک‌کن خلائی- مادون قرمز آلایندگی زیادی را ایجاد می‌کند. با اینحال به تازگی، استفاده از این خشک‌کن به صورت ترکیبی با تکنیکهای خشک‌کردن (مادون قرمز، مایکروویو و مافوق صوت) بسیار مورد توجه واقع شده است، زیرا این خشک‌کنها از واکنشهای اکسیداسیون در محصول جلوگیری و از تغییر رنگ و ترکیبات مغذی به خوبی محافظت می‌نمایند (۳). با این وجود این تغییرات اجتناب‌ناپذیر است. برای مثال رنگ که نقش کلیدی در خرید مواد غذایی ایفا می‌کند، در خشک‌کردن برشهای موز با تخریبی به میزان ۴۰٪ و ۲۳٪ به ترتیب برای تکنیکهای پلکانی افزایشی و پلکانی کاهشی برای محدوده دمایی ۲۰ تا ۳۵ درجه سانتیگراد مواجه شد. هردو تکنیک پلکانی افزایش و کاهشی بهبود در تغییر رنگ را در مقایسه با خشک‌کردن پیوسته نشان دادند. مقایسه این دو تکنیک نشان‌داد که تکنیک پلکانی افزایشی در کاهش تغییر رنگ مؤثرتر عمل کرده است، در حالیکه تکنیک پلکانی کاهشی در سینتیک خشک‌کردن بهتر عمل می‌کند (۳۸). این امر به دلیل عملکرد متفاوت تکنیکها و دستگاهها و کارکرد مختلف آنها روی صفات محصول نهایی می‌باشد. چراکه روشهای مختلف خشک‌کردن بر روی محصولات گوناگون می‌توانند در تسریع فرایند، بهبود بازده انرژی و کیفیت نقش داشته باشند. به عنوان مثال مشخصات کیفی محصول خشک‌شده توسط تکنیک خلائی-مایکروویو از روش انجمادی (به عنوان بهترین متد) به طور جزئی پایین‌تر گزارش شده‌است. همچنین استفاده از خشک‌کردن پیوسته با مایکروویو می‌تواند باعث گرمادیدگی بیش از حد و تخریب بخشی از نمونه گردد (۴۷). در خشک‌کردن به روش مایکروویو، انرژی گرمایی از طریق واکنش مولکولها در میدان الکترومغناطیسی مستقیماً به ماده منتقل می‌شود و به این دلیل مایکروویو زمان خشک‌کردن را تا حدود زیادی کاهش می‌دهد (۵۲).

بنابر این استفاده از طرح زمانبندی‌شده از آن می‌تواند فرایند را بهبود بخشد (۴۷). که می‌توان در قالب تکنیکهای نوآورانه در استفاده ترکیبی با دستگاههای مختلف از جمله خلائی بکار گرفته شود. با این حال، روش خاصی از خشک‌کردن به شرطی می‌تواند به عنوان یک شیوه نوآورانه یا بهبودیافته طبقه بندی گردد که فرایند نوآوری‌شده بتواند ثابت‌کند که نتایج بهتری را در مقایسه با روشهای دیگر ارائه دهد یا اینکه در موارد کاربردی دیگری به کار آید (۴۶). با دانستن اینکه خشک‌کردن به تنهایی ۲۰ تا ۲۵٪ از انرژی به کار رفته در صنایع غذایی را مصرف می‌کند. لذا تلاشهای زیادی برای یافتن تکنیکهای نوآورانه انجام شده است که قادر به بهبود بازده انرژی باشند. روش پلکانی یکی از راه-حل‌های مورد توجه برای این منظور است که همزمان با افزایش کارایی انرژی، کیفیت محصول را نیز ارتقاء می-دهد، بدون اینکه بر هزینه سرمایه‌گذاری خشک‌کن‌ها بیفزاید (۷). روش پلکانی یک روش نوآورانه جهت کاهش زمان و مصرف انرژی می‌باشد. کاهش ۶ تا ۵۰٪ در زمان مورد نیاز برای خشک‌کردن به همراه یک کاهش ۲۸٪ در مصرف انرژی به روش پلکانی در مقایسه با روش معمولی خشک‌کردن گیاهان دارویی در حرارت ثابت گزارش گردید (۹). همچنین در استفاده از تکنیک

خشک‌کردن پلکانی کاهشی در مقایسه با روش هوای گرم برای گردو تا ۴۰٪ در زمان و ۲۴٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی گزارش شد، در حالی که همان کیفیت محصول و ماندگاری بالاتری حاصل‌گردید (۵). در کنار تکنیکهای نوآورانه برای خشک‌کردن محصولات، استفاده از روشهای مناسب در طرح آزمایشها مانند روش سطح پاسخ می‌تواند کمک شایانی به انجام پژوهشهای مربوطه ارائه دهد.

برای نخستین بار روش سطح پاسخ به منظور بهینه‌سازی فرآیند در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون ارائه‌گردید. این روش دربرگیرنده طراحی آزمایشها، تعیین سطح و بهینه‌سازی پاسخ برمبنای مدل‌های تجربی می‌باشد (۴۲)، که یکی از بهترین راهکارها برای مدل-سازی است؛ زیرا با کاهش تعدادآزمایش‌ها و زمان مورد نیاز برای مدل‌سازی بسیار مقرون به صرفه می‌باشد (۱۴). بنابراین پژوهش حاضر از این روش نیز بهره جسته است. البته پژوهشهای زیادی در زمینه خشک‌کردن مواد غذایی صورت گرفته است. بخصوص تحقیقات فراوانی بر روی دستگاه خشک‌کن خلائی انجام یافته است، از جمله آنها بر روی سبزیجات و میوه‌ها و با بکارگیری خشک‌کن خلائی و مایکروویو (۱۶)، بر روی چغندرقرمز و روشهای مختلف خشک‌کردن ازجمله روش خلائی (۱۵)، بر روی سیب زمینی شیرین به روش خلا و مایکروویو (۶۴) و بر روی اسلایسهای هویج به روش خلا و خلا + مایکروویو (۴۷). اما تنها تحقیقات اندکی در مورد تأثیر روشهای مختلف خشک‌کردن بر روی کیفیت چغندر قرمز انجام شده است (۴۱). از طرفی تحقیقات چندی نیز در بکارگیری تکنیک پلکانی دمایی در خشک‌کنها با جریان هوای گرم بر روی محصولات مختلف انجام شده است از آن جمله بر روی محصول برنج (۷)، برگ شوید (۵۵)، ، هویج (۸)، و جوانه‌های لوبیای مات (۵۵). با این حال هیچ تحقیقی در زمینه بکارگیری تکنیک پلکانی دمایی در خشک‌کنهای خلائی با کمک اشعه مادون قرمز بر روی هیچ محصولی یافت نشد. مضاف بر اینکه در تحقیق حاضر از امواج مایکروویو نیز به صورت نوآورانه‌ای استفاده شد.

هدف از اجرای این تحقیق مقایسه روشهای خشک-کردن با خشک‌کن خلائی- مادون قرمز به روش معمولی و مقایسه آن با کاربرد تکنیک پلکانی و بررسی امکان سودبخش‌بودن روش اخیر برای ارتقاء بهره‌وری از دستگاه مذکور از طریق ارزیابی کیفی و خواص فیزیکی محصول (شاخصهای رنگی ΔL^*, Δa^*, Δb^* و درصد چروکیدگی)، پارامترهای بیوشیمیایی (محتوای ویتامین ث و آنتی اکسیدانت)، خواص ترمودینامیکی (ضریب انتشار مؤثر رطوبت) و ویژگیهای مکانیکی (انرژی مصرفی ویژه) می‌باشد. در این راستا با طراحی تکنیک جدید خشک‌کردن پلکانی کاهشی همزمان با بکارگیری امواج مایکروویو به صورت تناوبی، مطالعه موردی بر روی محصول چغندرقرمز انجام یافت، که در نهایت این امکان را فراهم بسازد که بدون نیاز به صرف هزینه و وقت زیاد برای ساخت دستگاه جدید، با بکارگیری این راهکار از همان دستگاه موجود حداکثر بازدهی را به دست آورد.

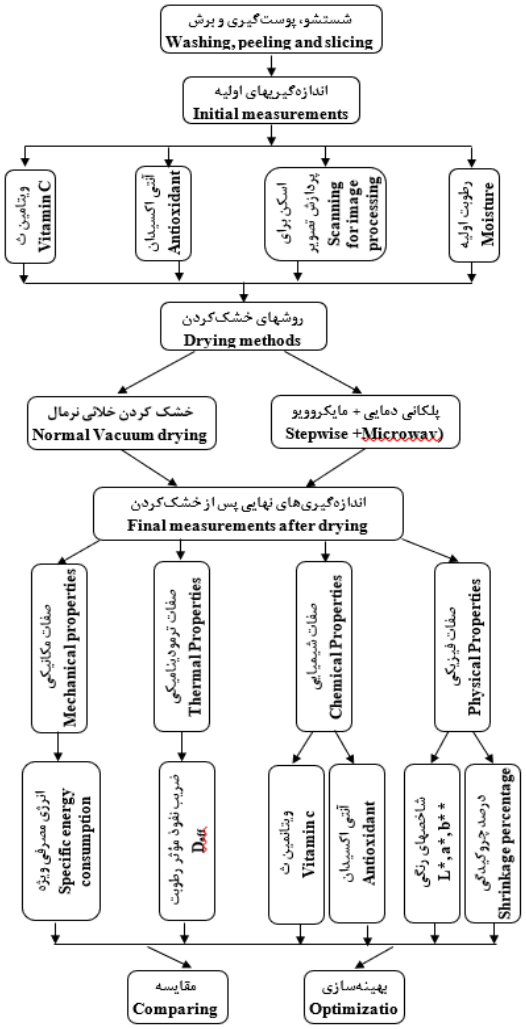
مواد و روش‌ها

روند کلی پژوهش در شکل (۱) به صورت طرحواره نشان داده شده است. در این نمودار، روند کلی مراحل قبل از فرایند خشک‌کردن و بعد از آن به هر دو روش پلکانی و نرمال به همراه ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری دستگاه و محصول برای ارزیابی روش‌ها ارائه شده است.

تهیه،آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌ها

غده‌های چغندر قرمز تازه از میدان عمده فروشی تره‌بار همدان خریداری و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل گردیدند. نمونه‌های مناسب بر اساس رنگ و سایز (مناسب برای ایجاد برشهایی به ابعاد ۶۰×۴۰ میلیمتر) انتخاب شدند (۴۳). سرانجام نمونه‌ها با پارچه نرم و خشک تمیز شده ودر کیسه‌های پلاستیکی سیاه ۵

کیلوگرمی بسته‌بندی (۴)، و تحت دمای □ ۴ در یخچال نگهداری شدند و قبل از انجام آزمایشها غده‌ها از یخچال خارج و در دمای آزمایشگاه یعنی □ ۲۱ قرار داده شدند تا با محیط پیرامون همدما شوند (۵۰). سپس با دستگاه اسلایسر به ضخامت چهار میلی‌متر برش داده شدند (۴۱).



شکل (۱) طرحواره روند کلی پژوهش

Figure (1) Schematic of the overall research process

تعیین رطوبت اولیه و نهایی

برای محاسبه رطوبت اولیه چغندر قرمز، حدود ۱۰ گرم نمونه (به طول ۶۰، عرض ۴۰ و ضخامت ۴ میلیمتر) در دستگاه آو (Memmert, Type: UNE 500، ساخت آلمان)، در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت تا زمان خشک شدن کامل قرار داده شد (۵۰).

پس از رسیدن به وزن ثابت، با روش محتوای رطوبت اولیه، نمونه‌ها با روش توزین محاسبه گردید (۱) .

زمانیکه رطوبت محصول به ۱± ۷٪ می‌رسید آزمایش متوقف می‌گردید. رطوبت نهایی ۶/۸ ٪ برای نگهداری چغندرقند به صورت پودر (۴۴)، رطوبت نهایی ۱۰٪ (۶۰) و رطوبت ٪۶ (۴۱) برای خشک‌کردن نمونه‌ها در آزمایشهای مختلف گزارش شده‌اند.

اسید آسکوربیک

اندازه‌گیری میزان آسکوربیک اسید عصاره با بکارگیری روش کلاین و پری (۱۹۸۲)، (۳۶)، با کمی تغییرات انجام گردید.

درصد مهار رادیکال آزاد (DPPH)

به منظور اندازه‌گیری درصد مهار رادیکال آزاد، یک میلی‌لیتر از محلول متانولی DPPH (با غلظت ۰/۱ میلی‌مولار) به ۳ میلی‌لیتر از عصاره افزوده شد. لوله‌های آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه در محل تاریک قرار گرفتند. بعد از این مدت، جذب نوری محلول در طول موج ۵۱۸ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. درصد مهار رادیکال آزاد DPPH طبق رابطه (۱) محاسبه شد.

$$I\% = (A_{blank} - A_{sample}/A_{blank}) \qquad (۱)$$

در این فرمول A_{sample} و A_{blank} به ترتیب میزان جذب نوری عصاره و کنترل منفی (فاقد عصاره) هستند و I درصد مهار رادیکال آزاد DPPH را نشان می‌دهد (۵۸).

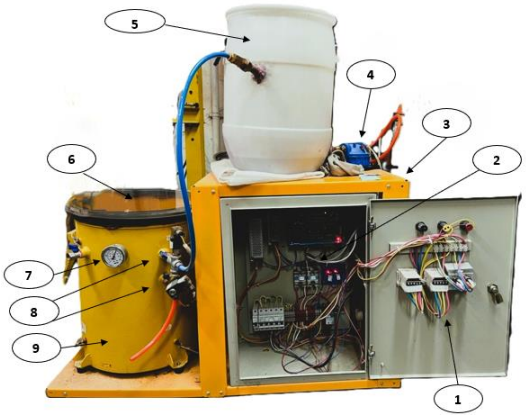
دستگاههای مود استفاده

یک دستگاه خشک‌کن خلائی مادون قرمز که قبلا در آزمایشگاه پس از برداشت دانشکده کشاورزی ساخته شده بود، به‌منظور انجام آزمایش‌های به کار گرفته‌شد. شکل (۲) تصویر حقیقی از دستگاه را نشان می‌دهد.

پمپ خلاء آن از نوع دیافراگمی (CFM60) و سیستم گرم‌کننده آن شامل چهار لامپ مادون قرمز ۵۰۰ واتی

بود، که یک دیمر دیجیتالی برای تنظیم دما داشت و همچنین دارای یک سنسور دمایی و سنسور اندازه‌گیری فشار مطلق از نوع Sensys ساخت کشور کره بود.

همچنین دستگاه مایکروویو Toshiba مدل (MM-EG34P(WH)/(BK)/(SL)) با دامنه توانی صفر تا ۱۵۰۰ وات و ۱۱ توان ورودی به فاصله ۱۰٪ به عنوان پیش‌تیمار مورد استفاده قرار گرفت.

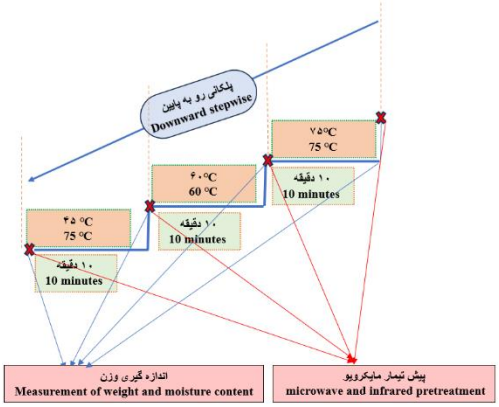


شکل (۲) تصویر خشک‌کن خلائی-مادون قرمز (۱- میکروکنترلر، ۲- تابلو برق، ۳- شاسی، ٤- کندانسور، ٥ - ظرف آب و یخ، ٦ - لامپ مادو ن قرمز، ۷ = گیج فشار، ۸ - سنسور اکسیژن و سنسور دما و رطوب، و ۹- محفظه خشک‌کن.

Figure (2) Image of vacuum-infrared dryer (1- microcontroller, 2- electric board, 3- chassis, 4- condenser, 5- chamber of ice and water, 6- infrared lamp, 7- Pressure gauge, 8- temperature and humidity sensor, and 9- drying chamber).

تکنیک پلکانی

شکل (۳) شماتیک تکنیک پلکانی را نشان می‌دهد. در این تکنیک ابتدا وزن نمونه اندازه‌گیری و پیش‌تیمار مایکروویو با سطح توان وزمان مشخص شده بر طبق طرح آزمایش‌ها اعمال می‌شود. دستگاه نیز در فشار خلائی تعیین‌شده تنظیم و نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۷۵ داخل دستگاه قرار گرفت. سپس نمونه از دستگاه خارج و کارهای انجام شده برای دمای ۶۰ و ۴۵ مانند قدم اول انجام شد. این سیکل به همین صورت تکرار شد تا نمونه خشک‌شده به رطوبت مطلوب (۱±۷) برسد.



شکل (۳) شماتیک تکنیک پلکانی اعمال‌شده

Figure (3) Schematic of stepwise technique

تکنیک پردازش تصویر در محاسبه چروکیدگی

با توجه به اینکه نمونه‌ها بعد از خشک‌شدن شکل هندسی خود را از دست می‌دهند، بنابراین محاسبه مساحت آنها امکان‌پذیر نیست، به همین دلیل از روش پردازش تصویر برای محاسبه مساحت استفاده شد (۵۴). تصویربرداری از نمونه برش‌های چغندرقرمز پس از خشک‌شدن در خشک‌کن مادون قرمز- خلأ با کمک اسکنر (ScanJet G4050 ،hp) و تحلیل آن به کمک کتابخانه OpenCV صورت گرفت. از یک اسکنر با وضوح ۱۲۰۰ dpi برای تصویربرداری استفاده شد (۴). در تصاویر محصولات کشاورزی دو بخش اصلی پیش‌زمینه (تصویر خود شئ) و پس‌زمینه وجود داشت؛ برای تفکیک این دو بخش از پردازش قطعه‌بندی استفاده شد. در این روش ابتدا با حذف پیکسلهای پس‌زمینه بر اساس تفاوت رنگی موجود و ایجاد ماسک باینری از تصویر حاصله، با حاصلضرب ماتریس ماسک در تصویر اصلی، پیش‌زمینه مورد نظر که همان محصول بود نمایان شد. سپس به منظور به دست آوردن مساحت محصول، با شمارش تعداد پیکسل‌های باارزش منطقی (۱) در تصویر ماسک، این مقدار محاسبه شد. به این ترتیب مساحت برش‌های چغندرقرمز قبل و بعد از فرایند رطوبت‌زدایی محاسبه گردید (۲۳). سپس برای محاسبه چروکیدگی از رابطه (۲) استفاده شد (۵۴)،

$$\text{Shrinkage} = \left(1 - \frac{A}{A_0}\right) * 100 \quad (۱)$$

A_0 : مساحت اولیه نمونه قبل از خشک کردن (mm^2)، A: مساحت نمونه خشک شده (mm^2) و Shrinkage درصد چروکیدگی (%) می‌باشند.

محاسبات رنگ

رنگ یکی از مهمترین ویژگی‌های سنجش کیفیت مواد خوراکی است که در بیشتر مواقع، اولین معیار خرید مشتری می‌باشد. در مطالعات مختلفی، تغییرات رنگ در خلال فرایند خشک‌کردن به دلیل واکنشهای شیمیایی و بیوشیمیایی گزارش شده است (۴). برای ارزیابی شاخص های رنگ (CI)، نیز از روش پردازش تصویر استفاده شد (۵۳). بدین ترتیب که مقادیر L*، a* و b* تمام پیکسل‌های سطح تصویر آماده‌شده در مرحله قبل، توسط کتابخانه OpenCV در پایتون پردازش گردید. در نهایت، میانگین هر کدام از کانالهای رنگی برای هر یک از تصاویر و سپس اختلاف پارامترهای رنگی برای هر نمونه قبل و بعد از خشک‌کردن محاسبه‌گردید (۲۷).

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

ضریب انتشار مؤثر رطوبت به روش زیر محاسبه می‌شود (۲۷).

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (۳)$$

(۴)

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{2n+1}exp\left\{-\frac{(2n+1)^2\pi^2 D_{eff}t}{4L^2}\right\}$$

که در این معادله L نماینده نصف ضخامت نمونه بر

$$E_p = P \times t \quad (۱۱)$$

حسب (m)، t زمان خشک‌کردن (s)، n یک عدد مثبت، D_{eff} ضریب پخش رطوبت مؤثر (m^2/s)، MR نسبت رطوبت، M_e رطوبت تعادلی، M_0 رطوبت اولیه و M_t محتوای رطوبت در هر لحظه ($g_{water}/g_{dry\ weight}$) می‌باشند.

در معادله (۴) برای زمانهای طولانی می‌توان فقط جمله اول را در نظرگرفت:

$$Ln(MR) = Ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2}{4L^2}D_{eff}.t\right) \quad (۵)$$

همین‌طور می‌توان نمودار Ln (MR) در مقابل زمان را رسم‌کرد که در آن k_1 شیب خط خواهد بود (۳۹).

$$k_1 = \frac{\pi^2}{4L^2}D_{eff} \quad (6)$$

بنابراین با معلوم بودن k_1 داریم:

$$D_{eff} = 4L^2k_1/\pi^2 \quad (۷)$$

انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی مادون قرمز از رابطه (۸) محاسبه شد:

$$E_{IR} = IR \times t \quad (۸)$$

E_{IR} انرژی مصرفی توسط گرمایش مادون قرمز (kWh) و IR توان مصرف شده مادون قرمز (kW) است.

انرژی مصرفی پیش تیمار میکروویو از رابطه (۹) محاسبه شد:

$$E_{MW} = MW \times t \quad (۹)$$

E_{MW} انرژی مصرفی توسط گرمایش مایکروویو (کیلووات ساعت) ، t مجموع زمانهای خشک‌کردن به روش مایکروویو (ثانیه) و MW توان مصرف شده میکروویو (kW) است. همچنین انرژی مصرفی ویژه دستگاه مایکروویو از رابطه (۱۰) به دست آمد:

$$SEC_1 = E_{MW}/m_{v1} \quad (۱۰)$$

که در آن SEC_1 انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن به روش مایکروویو (کیلو ژول بر کیلوگرم) و m_{v1} جرم آب تبخیری از نمونه طی فرایند خشک‌کردن به روش مایکروویو است (۳۲).

انرژی مصرفی پمپ خلاء از رابطه (۱۱) محاسبه شد

$$E_p = P \times t \quad (۱۱)$$

زمان روشن t) و W/s توان پمپ خلاء بر حسب (P که بودن پمپ بر حسب ثانیه می‌باشد.

انرژی مصرفی دستگاه از مجموع انرژی مصرفی پمپ خلاء و لامپ‌های مادون قرمز محاسبه گردید (۱).

$$E_t = E_{IR} + E_p \quad (۱۲)$$

بنابراین انرژی مصرفی ویژه دستگاه خشک‌کن خلائی مادون‌قرمز از این رابطه بدست می‌آید:

$$SEC_2 = E_t/m_{v2} \quad (۱۳)$$

که در آن SEC_2 انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن به روش خشک‌کن خلائی مادون قرمز و m_{v2} جرم آب تبخیری از نمونه طی فرایند خشک‌کردن خلائی مادون قرمز است. در نهایت انرژی مصرفی ویژه کل فرایند خشک‌کردن با این رابطه حساب می‌شود (۱).

$$SEC_t = SEC_1 + SEC_2 \quad (۱۴)$$

بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن چغندر قرمز

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های بدست‌آمده از این مطالعه و بهینه‌سازی خشک‌کردن برش‌های چغندر قرمز، روش سطح پاسخ مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها با کمک نرم افزار دیزاین اکسپرت[1] و در قالب طرح مرکب مرکزی نسخه ۱۳ تعریف شدند که شامل سه نوع نقطه (اصلی، محوری و مرکزی) می‌باشند. تعداد آزمایش‌ها از رابطه (۱۵) به‌دست آمد (۴۸).

$$n = 2^k + 2k + c \quad (۱۵)$$

در این معادله، k نشانگر تعداد پارامترها، 2^k تعداد آزمایش‌های مربوط به نقاط اصلی، 2k تعداد آزمایش‌های مربوط به نقاط محوری و c نماینده تعداد آزمایش‌های تکرار نقطه مرکزی می‌باشند که مربوط به اندازه‌گیری خطا است و تعداد آن بر اساس تعداد متغیرها، توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت محاسبه می‌شود.شکل کلی معادله مرتبه دوم سطوح پاسخ در رابطه زیر نشان داده شده است:

(۱۶)

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^{k} b_j x_j + \sum_{j=1}^{k} b_{jj} x_j^2 + \sum\sum_{i<j}^{k} b_{ij} x_{ij}$$

که در معادلهٔ بالا Y پاسخ‌های پیش‌بینی شده، x_i متغیرهای مستقل کد شده، b_0 ثابت مدل، b_j ضریب متغیرهای مستقل، b_{jj} ضریب پارامتر درجه دوم و b_{ij} ضریب اثرات متقابل متغیرها می‌باشند (۵۳). هدف اصلی از بهینه‌سازی فرایند خشک‌کردن، بدست آوردن یک مجموعه از شرایط مناسب است که قادر باشد اهداف مورد نظر را تأمین کند. مطلوبیت عبارت است از یک شاخص ریاضی برای شرایط بهینه و در واقع درجه نزدیکی مدلی را که توسط نرم‌افزار سطح پاسخ ارائه شده است بیان می‌کند که درعین حال با اهداف مورد نظر برای متغیرهای پاسخ همخوانی داشته باشد (۴۸).

جداول (۱) و (۲) طرح آزمایشها به کمک روش RSM[2] را برای روش نرمال و پلکانی به ترتیب نشان می‌دهند. که (-1, 0, 1) نشانگر سطوح کدبندی شده برای متغیرهای مستقل هستند. در روش پلکانی با توجه به وجود سه فاکتور و سه سطح تعداد آزمایشها در طرح فاکتوریل باید ۲۷ عدد باشد ولی با روش RSM و نظر به معادله (۱۵) به ۲۰ آزمایش مندرج در جداول (۱) کاهش یافته است.

نتایج و بحث

متغیرهای مستقل جهت فرایند خشک‌کردن برش‌های چغندرقرمز شامل دما و فشار خلائی در روش خشک‌کردن نرمال طبق جدول (۲)، و همچنین سطح و مدت زمان بکارگیری توان مایکروویو مطابق جدول (۱) برای تکنیک پلکانی بودند. خواص فیزیکی (شاخص‌های رنگی ΔL^*, Δa^*, Δb^* و درصد چروکیدگی)، خواص بیوشیمیایی (محتوای ویتامین ث و آنتی اکسیدان)، خواص ترمودینامیکی (ضریب انتشار مؤثر رطوبت) و خواص مکانیکی (انرژی مصرفی ویژه) تحت تأثیر این متغیرهای مستقل در هر دو سری

1- Design Expert

2- Response Surface Method

آزمایشها مورد مطالعه قرار گرفتند. روش سطح پاسخ به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های بدست آمده و بهینه‌سازی فرایند خشک‌شدن استفاده گردید.

ضرایب مدل برازش شده معادله رگرسیون حاصل از طرح مرکب مرکزی به روش سطح پاسخ و اطلاعات آماری حاصله برای متغیرهای پاسخ مورد مطالعه جهت خشک‌کردن چغندر قرمز به هر دو روش خلائی و تکنیک پلکانی به ترتیب در جداول شماره (۳) و (۴) آمده است. ضرایب با علامت مثبت در این معادلات نشانگر تأثیر مستقیم یا مثبت متغیر مستقل بر مقدار متغیر پاسخ (در صورتی که بیشینه فرض شود) و ضرایب منفی نشان‌دهنده اثر منفی یا معکوس متغیر مستقل مربوطه بر متغیر وابسته می‌باشد. مقادیر بالای R^2، $Adj\text{-}R^2$ بیانگر ارتباط قوی بین مقادیر آزمایشی و پیش‌بینی شده برای هر پارامتر و همچنین توانایی مدل برای برازش داده‌ها می‌باشد. C.V میزان پراکندگی به ازای یک واحد از میانگین را نشان می‌دهد و از تقسیم Std.Dev (انحراف معیار) بر Mean (میانگین) ضرب در ۱۰۰ به‌دست می‌آید. Std.Dev مناسب‌ترین شاخص برای بررسی پراکندگی داده‌های آزمایشی است و ریشه دوم باقی‌مانده میانگین مربعات است و Mean میانگین کل مقادیر پارامتر می‌باشد. به‌عنوان یک قاعده کلی، مقدار .C.V نباید از ۱۰٪ بیشتر شود. مقدار به نسبت کم .C.V نشانگر دقت و قابلیت اطمینان تست‌های انجام شده است (۲).

جدول (۵) اطلاعات مربوط به کمترین و بیشترین مقادیر متغیرهای پاسخ و ضرایب اهمیت آنها برای بهینه‌سازی فرایند خشک‌کردن را بیان می‌کند که با استفاده از روش سطح پاسخ در فرایند خشک‌کردن خلائی مادون قرمز به روش نرمال و پلکانی به دست آمده‌اند.

با توجه به مقادیر آماری درج شده در جداول (۳) و(۴) مشاهده می‌شود که فاکتور عدم برازش (lack of fit) برای تمامی متغیرهای در دست مطالعه معنی‌دار نشد که بیانگر این امر است که مدل‌های پیشنهاد شده به روش سطح پاسخ از توانایی خوبی برای پیش‌بینی تغییرات متغیرهای وابسته برخوردار هستند (۵۳). مقادیر ضریب تبیین (R^2) برای تمامی مدل‌های ارائه شده در مطالعه بر روی دستگاه خلائی نرمال و تکنیک پلکانی به ترتیب بین ۹۹/۹۲ – ۹۲/۷۳ و ۹۹/۹۲ – ۹۴/۳۴ بدست آمد. همچنین مقادیر قابل قبول ضریب تغییرات (کمتر از ۴/۷۳) و (کمتر از ۶/۱۶) به ترتیب در مطالعه بر روی دستگاه خلائی نرمال و تکنیک پلکانی برای تمامی مدل‌ها نشان‌دهنده تکرارپذیری خوب این مدلها می‌باشد (۱۹).

بهینه‌سازی

جدول (۶) نقاط بهینه انتخاب‌شده در روش سطح پاسخ و مقایسه آنها در خشک‌کردن به روشهای نرمال و پلکانی را ارائه می‌دهد. با توجه به این جدول نقاط بهینه برای خشک‌کردن نرمال دمای ۶۵°C و فشار خلائی ۲۰ kPa و برای روش خشک‌کردن پلکانی فشار خلائی ۴۵ kPa، توان مایکروو**W** ۳۵۹ و زمان اعمال مایکروویو **s**۱۰ توسط روش RSM بدست آمده‌است. استفاده از استراتژی خشک‌کردن پلکانی تأثیری کمتر اما نزدیک بر پارامترهای کیفی و فیزیکی داشت، در حالی که تأثیر مثبت اما قابل توجهی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و انرژی ویژه مصرفی را نشان داد. انرژی مصرفی ویژه را ۲۸/۱۸٪ کاهش دهد، بعلاوه Δa^* و ΔL^* به میزان ۱۸/۸۰ ٪ و ۹/۸۷ ٪ بهبود رنگ را نشان دادند با این حال Δb^* به میزان ۱۴ ٪ تخریب رنگ و نیز چروکیدگی ۳۸/۶۲ ٪ افزایش را نشان می‌دهد. تغییر شاخص افت ویتامین ث و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به مقدار ۱۱/۳۱٪ و ۱۱/۲۳٪ به ترتیب دیده می‌شود. همین‌طور روش پلکانی به انرژی مصرفی کمتری برای ایجاد فشار خلأ نسبی نیاز دارد (۴۵ کیلوپاسکال در مقایسه با ۲۰ کیلوپاسکال در روش معمول) تا به نتایج مورد نظر دست یابد. بنابراین، استراتژی پلکانی برای خشک‌کردن چغندر قرمز توصیه می‌شود.

در جدول (۷) سطح احتمال معنی‌دارشدن متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ در روش خلائی نرمال و تکنیک پلکانی آورده شده است. علل هرکدام از تغییرات با ذکر منابع معتبر مربوطه توضیح داده می‌شود.

جدول (۱) طرح آزمایشها برای تکنیک پلکانی

Table (1) Design of experiments for stepwise method

شماره آزمایش Number of experiments	سطوح متغیرهای مستقل (سطوح کدبندی) Levels of independent variables (coded levels) فشار خلائی Vacuum pressure (kPa)	توان مایکروویو Microwave power (W)	زمان اعمال مایکروویو Duration of microwave application (s)
1	50 (0)	300 (0)	10 (0)
2	20 (-1)	150 (-1)	20 (1)
3	80 (1)	150 (-1)	20 (1)
4	50 (0)	300 (0)	10 (0)
5	80 (1)	300 (0)	10 (0)
6	20 (-1)	450 (1)	20 (1)
7	80 (1)	450 (1)	0 (-1)
8	50 (0)	300 (0)	0 (-1)
9	50 (0)	300 (0)	10 (0)
10	80 (1)	150 (-1)	0 (-1)
11	20 (-1)	150 (-1)	0 (-1)
12	20 (-1)	450 (1)	0 (-1)
13	20 (-1)	300 (0)	10 (0)
14	50 (0)	300 (0)	20 (1)
15	50 (0)	300 (0)	10 (0)
16	50 (0)	300 (0)	10 (0)
17	50 (0)	150 (-1)	10 (0)
18	80 (1)	450 (1)	20 (1)
19	50 (0)	450 (1)	10 (0)
20	50 (0)	300 (0)	10 (0)

جدول (۲) طرح آزمایشها برای روش خلائی نرمال

Table (2) Design of experiments for normal vacuum method

شماره آزمایش Number of experiments	سطوح متغیرهای مستقل (سطوح کدبندی) Levels of independent variables (coded levels) دما Temperature (°C)	فشار خلائی Vacuum pressure (kPa)
1	75 (1)	20 (-1)
2	60 (0)	50 (0)
3	45 (-1)	80 (1)
4	45 (-1)	50 (0)
5	60 (0)	20 (-1)
6	60 (0)	80 (1)
7	60 (0)	50 (0)
8	75 (1)	50 (0)
9	75 (1)	80 (1)
10	60 (0)	50 (0)
11	45 (-1)	20 (-1)
12	60 (0)	50 (0)
13	60 (0)	50 (0)

جدول (۳) ضرایب مدل برازش شده به معادله رگرسیونی درجه دوم برای خشک‌کردن چغندر قرمز به روش خلائی معمولی برای متغیرهای پاسخ (X_1 دمای هوا X_2 فشار خلاء)

Table (3) Model coefficients fitted with quadratic regression equation of drying red beetroot using normal vacuum method for response variables (X_1: chamber temperature and X_2: vacuum pressure)

ضرایب مدل Estimated Model Coefficients								منابع تغییرات Source variations
SEC_{total} (MJ/kg_{water})	D_{eff} (m^2/s)	(٪) SKG	Δb^*	Δa^*	ΔL^*	(٪) AC	(mg/ml) AA	
+2074.18	+3.265E-10	+42.43	+1.82	+3.18	+22.05	+85.34	+5.48	عرض از مبدأ Intercept (b_0)
								عبارت خطی Linear terms
-218.29***	+1.581E-10***	+10.27***	-0.1124***	+0.1649***	+6.18***	+5.00***	-0.4833***	(b_1) X_1
-2.68^{ns}	-1.105E-11***	+2.13***	+0.0339***	+0.2491***	+1.41*	-1.50***	-0.2700***	(b_2) X_2
								اثر متقابل Interaction terms
-5.48^{ns}	-5.947E-12^{ns}	+0.0257^{ns}	-0.0086^{ns}	-0.0156^{ns}	+0.3850^{ns}	-0.2500^{ns}	+0.1150**	(b_{12}) X_1X_2
								عبارت درجه دوم Quadratic terms
-40.92*	-4.964E-12^{ns}	+5.99***	-0.0192^{ns}	-0.5236***	+9.27***	+0.7931^{ns}	-0.0576^{ns}	(b_{11}) X_1^2
-15.18^{ns}	-1.002E-11*	-0.7541^{ns}	+0.0093^{ns}	-0.0273^{ns}	-0.8541^{ns}	+0.2931^{ns}	+0.0524^{ns}	(b_{22}) X_2^2
0.1117^{ns}	0.2070^{ns}	0.4826^{ns}	0.7199^{ns}	0.5272^{ns}	0.8898^{ns}	0.6695^{ns}	+0.1958^{ns}	Lack of Fit (P -value)
< 0.0001***	< 0.0001***	< 0.0001***	< 0.0001***	< 0.0001***	< 0.0001***	0.0007***	< 0.0001***	Model (P-value)
0.9900	0.9980	0.9805	0.9604	0.9853	0.9795	0.9273	0.9911	R^2
1.00	2.07	3.29	1.23	1.91	4.73	1.59	0.9038	C.V. %
20.58	6.609E-12	1.47	0.0222	0.0558	1.23	1.37	0.0495	Std .Dev.
No Transform Quadratic	No Transform Quadratic	No ransform Quadratic	Square Root Quadratic	Square Root Quadratic	Power Quadratic	Power Quadratic	Power Quadratic	Transformation type Model

***** نشانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰,۱٪، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، * اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار هستند. (AA محتوای اسکوربیک اسید، AC ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، ΔL^*، Δa^* و Δ^* شاخص‌های تغییر رنگ، SKG درصد چروکیدگی و SEC انرژی مصرفی ویژه می‌باشند)**

***** Significant difference at 0.1% probability level, ** significant difference at 1%, * significant difference at 5%, ns means no significant difference. AA: ascorbic acid content, AC: antioxidant capacity, (ΔL*, Δa*, and Δb*): color change indices, SKG: the percentage of shrinkage, and SEC: specific energy consumption**

جدول (٤) ضرایب مدل برازش شده به معادله رگرسیونی درجه دوم برای خشک‌کردن چغندر قرمز به روش خلائی پلکانی برای متغیرهای پاسخ (X_1فشار خلاء ، X_2 توان مایکروویو و X_3 زمان اعمال توان مایکروویو)

Table (4) Model coefficients fitted with quadratic regression equation of drying red beetroot using stepwise method for response variables (X_1: vacuum pressure, X_2: Microwave application power, and X_3: Microwave application time)

ضرایب مدل Estimated model coefficients								منابع تغییرات Source variations
SEC (MJ/kg_{water})	D_{eff} (m^2/s)	SKG(٪)	Δb^*	Δa^*	ΔL^*	AC (%)	(mg/ml) AA	
+7.33	+0.0000	+61.20	+3.85	+0.3959	+3.00	+0.0123	+2.24	Intercept (b_0) عرض از مبدأ
								عبارت خطی
								Linear terms
-0.0011^{ns}	-1.074E-06***	+1.89***	-0.2185*	-0.0106***	+0.0767^{a}	+0.0001^{ns}	+0.0210**	(b_1) X_1
-0.1290***	+1.992E-06***	+2.38***	-0.7129***	-0.0108***	+0.0923***	+0.0004***	-0.0221**	(b_2) X_2
-0.1869***	+2.742E-06***	+3.19***	-0.8956***	-0.0172***	+0.0077^{ns}	+0.0008***	-0.0064^{ns}	(b_3) X_3
								Interaction terms اثر متقابل
+0.0157^{ns}	+3.064E-07***	-0.0127^{ns}	+0.0191^{ns}	+0.0026^{ns}	+0.0187^{ns}	-0.0002^{ns}	-0.0376***	(b_{12}) X_1X_2
+0.0070^{ns}	-4.540E-07***	+0.7698**	-0.3466**	+0.0058*	+0.0771**	-0.0003*	+0.0603***	(b_{13}) X_1X_3
-0.1048***	+1.322E-06***	+1.69***	-0.7309***	-0.0100**	+0.0704**	+0.0003**	-0.0469***	(b_{23}) X_2X_3
								Quadratic terms عبارت درجه دوم
+0.0080^{ns}	-7.550E-07***	-0.0684^{ns}	+0.1175^{ns}	+0.0271***	-0.0124^{ns}	+0.0001^{ns}	-0.1442***	(b_{11}) X_1^2
-0.0203^{ns}	-7.158E-07***	-6.49***	-0.0160^{ns}	-0.0562***	+0.0658^{ns}	+0.0003^{ns}	+0.0056^{ns}	(b_{22}) X_2^2
0.0519**	-6.151E-09^{ns}	+5.20***	-0.4572**	-0.0151***	+0.1801***	+0.0007***	-0.0055^{ns}	(b_{33}) X_3^2
0.2631^{ns}	0.0908^{ns}	0.9232^{ns}	0.1558^{ns}	0.3753^{ns}	0.3848^{ns}	0.353^{ns}	0.0950^{ns}	Lack of fit (P-value)
< 0.0001 ***	< 0.0001 ***	< 0.0001 ***	< 0.0001 ***	< 0.0001 ***	< 0.0001 ***	< 0.0001***	< 0.0001***	Model (P-value)
0.9883	0.9992	0.9904	0.9746	0.9808	0.9434	0.9582	0.9791	R^2
0.3680	0.5296	0.9823	6.16	1.69	1.71	1.93	0.8843	(%) C.V.
0.0271	1.118E-07	0.5945	0.2262	0.0063	0.0532	0.0002	0.0191	Std.Dev.
Natural log	root Square	No Transform	No Transform	Inverse Square root	Natural log	Inverse	root Square	Transformation
Quadratic	Quadratic	Quadratic	Quadratic	Quadratic	Quadratic	Quadratic	Quadratic	Model type

*** نشانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰,۱٪، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، * اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار هستند. (AA محتوای اسکوربیک اسید، AC ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، ΔL^*، Δa^* و Δb^* شاخص‌های تغییر رنگ، SKG درصد چروکیدگی و SEC انرژی مصرفی ویژه می‌باشند)

*** Significant difference at 0.1% probability level, ** significant difference at 1%, * significant difference at 5%, ns means no significant difference. AA: ascorbic acid content, AC: antioxidant capacity, ΔL*, Δa*, and Δb*: color change indices, SKG: the percentage of shrinkage, and SEC: specific energy consumption.

جدول (۵) کمترین و بیشترین مقادیر متغیرهای پاسخ و ضرایب اهمیت آنها برای بهینه‌سازی فرایند خشک‌کردن با استفاده از متد سطح پاسخ به روش خلائی مادون قرمز نرمال و پلکانی

Table (5) Minimum and maximum values of response variables and their importance coefficients for optimizing the drying process using the response surface methodology for normal infrared vacuum and stepwise drying methods

روش خشک کردن Drying method	اهمیت Importance	وزن بالا Upper weight	وزن پایین Lower weight	حد بالا Upper limit	حد پایین Lower limit	هدف Goal	نام Name
نرمال	3	1	1	75	45	is in range	دما:A Temperature
نرمال و پلکانی	3	1	1	80	20	is in range	فشار خلائی Vacuum pressure
پلکانی	3	1	1	450	150	is in range	توان مایکروویو Microwave power
پلکانی	3	1	1	20	0	is in range	زمان اعمال مایکروویو Time
نرمال	5	1	1	6.35	4.84	maximize	ویتامین ث Vitamin C
پلکانی	5	1	1	5.27	3.95		
نرمال	5	1	1	93	80	maximize	آنتی اکسیدان Antioxidant (%)
پلکانی	5	1	1	83	65		
نرمال	3	1	1	38.92	19.86	minimize	ΔL*
پلکانی	3	1	1	36.74	18.97		
نرمال	3	1	1	11.31	4.836	minimize	Δa*
پلکانی	3	1	1	10.37	5.26		
نرمال	3	1	1	3.83	2.77028	minimize	Δb*
پلکانی	3	1	1	4.58	0.53		
نرمال	3	1	1	60.8579	34.1327	minimize	چروکیدگی SKG
پلکانی	3	1	1	69.8	52.07		
نرمال	1	1	1	4.86339E-10	1.45902E-10	maximize	ضریب پخش مؤثر رطوبت D_{eff}
پلکانی	1	1	1	7.68453E-10	2.54226E-10		
نرمال	1	1	1	2266.18	1786.73	minimize	انرژی مصرفی ویژه SEC_{total}
پلکانی	1	1	1	1970.24	1026.87		

جدول (٦) نقاط بهینه انتخاب شده در روش سطح پاسخ و مقایسه آنها در خشک کردن به روشهای نرمال و پلکانی

Table (6) the selected optimal points in the response surface methodology and their comparison between normal and stepwise drying methods.

روش خشک کردن Drying method	دما T (°C)	فشار خلائی Pv (kPa)	توان مایکروویو MP (W)	زمان T (s)	AA (mg/ml)	AC (%)	شاخصهای رنگی Color indices ΔL*	Δa*	Δb*	چروکیدگی SKG (%)	D_{eff} (m^2/s)	SEC_{total}	مطلوبیت Desirability
نرمال Normal	65	20.000	-	-	5.57	89	23.19	8.40	3.07	44.15	0.000	1977.36	0.606
پلکانی Stepwise	-	45	359	10	4.94	79	20.90	6.82	3.50	61.20	0.000	1420.06	0.610

T: دمای محفظه، Pv: فشار خلائی،MP : توان مایکروویو، T : ، زمان اعمال مایکروویو، AA : محتوای اسکوربیک اسید، AC: ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، (ΔL^*، Δa^* و Δb^*): شاخص‌های تغییر رنگ، SKG: درصد چروکیدگی، Deff: ضریب پخش مؤثر رطوبت و SEC: انرژی مصرفی ویژه می‌باشند

Vacuum pressure, MP: Microwave power, AA: Ascorbic acid content, AC: Antioxidant capacity, ΔL*, Δa*, and Δb*: Color change indices, SKG: The percentage of shrinkage, Deff: Effective moisture diffusivity, and SEC: Specific energy consumption.

جدول (۷) سطح احتمال معنی‌دار شدن متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ در روش خلائی نرمال و تکنیک پلکانی

Table (7) The significance level of independent variables on response variables in the normal vacuum and stepwise technique drying

معنی‌دا رشدن در سطح احتمال Statistical Significance Level						
5%		1%		0.1%		
پلکانی Stepwise	نرمال Normal	پلکانی Stepwise	نرمال Normal	پلکانی Stepwise	نرمال Normal	متغیرها Variables
-	-	-	-	-	AA, AC, ΔL*, Δa*, Δb*, SKG, Deff, SECtotal	X_1
Δb*	AC, ΔL*,	AA	-	ΔL*, Δa*, SKG, Deff,	AA, Δa*, Δb*, SKG, Deff	X_2
-	-	AA	-	AC, Δa*, Δb*, SKG, Deff, SECtotal	-	X_3
-	-	-	-	AC, Δa*, Δb*, SKG, Deff, SECtotal	-	X_4
-	SECtotal,	-	-	-	ΔL*, Δa*, SKG,	X_1X_2
	-		-	-	-	X_1X_3
-	-	-	-	-	-	X_1X_4
	-		-	AA, Deff	-	X_2X_3
AC, Δa*	-	ΔL*, Δb*, SKG,	-	AA, Deff	-	X_2X_4
-	-	AC, ΔL*, Δa*	-	AA, Δb*, SKG, Deff, SECtotal,	-	X_3X_4
-	SECtotal,	-	-	-	ΔL*, Δa*, SKG	X_1^2
-	Deff	-	-	AA, Δa*, Deff,	-	X_2^2
	-	-	-	Δa*, SKG, Deff	-	X_3^2
-	-	Δb*, SECtotal	-	AC, ΔL*, Δa*, SKG	-	X_4^2

X_1، X_2، X_3 و X_4 به ترتیب متغیرهای مستقل دما، فشار خلائی ، توان مایکروویو و مدت زمان اعمال توان مایکروویو هستند. متغیرهای وابسته شامل AA (mg/ml): (ویتامین ث)، AC (%): (ظرفیت آنتی اکسیدانی)، (ΔL* ، Δa* و Δb*) تغییرات رنگ)، SKG (%): (چروکیدگی)، Deff (m^2/s): (ضریب انتشار مؤثر رطوبت) وSEC_{total} (MJ/kg_{water}): (انرژی مصرفی ویژه) می‌باشند.

X1, X2, X3, and X4 represent the independent variables: temperature, vacuum pressure, microwave power, and microwave power application time, respectively. The dependent variables include: AA: (mg/ml) (Vitamin C content), AC (%): (Antioxidant capacity), (ΔL*, Δa*, and Δb*): Color changes, SKG (%): (Shrinkage), D_{eff} (m^2/s): (Effective moisture diffusion coefficient), SECtotal (MJ/kg water): Specific energy consumption.

محتوای ویتامین ث

شکل (۴) تأثیرپذیری ویتامین ث را از متغیرهای مستقل دما، فشار خلائی، مدت زمان و توان اعمال مایکروویو در هردو روش نرمال و پلکانی نشان می‌دهد.

ویتامین ث یکی از مهمترین ویژگیهای کیفی محصولات کشاورزی است که اگر به خوبی محافظت شود سایر ترکیبات هم حفظ می‌شوند. بنابراین ویتامین ث می‌تواند به عنوان یک شاخص برای کیفیت غذایی محصولات در نظر گرفته‌شود که بسیار مورد علاقه خریداران می‌باشد (۳۸).

اسید اسکوربیک به آسانی توسط اکسیژن و حرارت تخریب می‌شود. خشک‌کردن می‌تواند از دلایل عمده غیرفعال‌سازی این ماده باشد. مقدار کاهش اسید اسکوربیک اندازه‌گیری شده در آزمایش خشک‌کردن برشهای موز تا میزان ۸۰/۲٪ گزارش شد. در صورت استفاده از مایکروویو می‌توان با کاهش زمان فرایند به حفظ این ماده ارزشمند کمک کرد. تغییرات دما در خشک‌کردن به روش خلائی-مایکروویو می‌تواند هم از لحاظ توزیع میدان الکترومغناطیسی در درون محفظه و هم از نظر صفات دی‌الکتریکی نمونه‌ها تأثیرپذیر باشد. ثابت دی‌الکتریک به عنوان توانایی ماده برای ذخیره انرژی در زمانی که تحت تأثیر یک میدان الکتریکی قرار می‌گیرد قابل تعریف است و بر روی توزیع میدان الکتریکی و فاز امواج گذرنده از ماده مؤثر است (۳۰).

به محض افزایش دما که توسط اشعه مادون قرمز انجام می‌شد محتوای ویتامین ث برش‌های چغندرقرمز کاهش پیدا کرد. علت آن را می‌توان به افزایش انرژی نسبت داد که به واکنش شیمیایی تخریب ویتامین ث منجر می‌شود. همچنین ویتامین ث یک ویتامین محلول در آب است که آهنگ واکنش تخریبی آن با کاهش محتوای رطوبی محصول در حین خشک کردن افزایش می‌یابد (۲۱). نتایج این پژوهش با تحقیق حاضر و همچنین پژوهش‌های انجام شده دیگر هم‌خوانی دارد (۲۰). ویتامین ث در شرایط خشک‌کردن خلائی برش‌های موز به دلیل کم بودن غلظت اکسیژن در این حالت در مقایسه با خشک‌کردن در فشار اتمسفری تخریب کمتری را نشان‌داد ولی این تغییرات در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌داری را نشان نمی‌دهد بر خلاف دما که نشانگر اختلاف معنی‌داری در این سطح می‌باشد و بهترین شرایط حفظ برش‌های موز دمای ۵۰ و فشار خلائی ۸۰ kPa بود (۵۹). که در تحقیق حاضر دمای ۶۵ و فشار خلائی ۲۰ kPa در روش نرمال به دست آمد. این اختلاف را می‌توان به تفاوت در رفتار محصولات مختلف نسبت داد.

آنتی‌اکسیدان

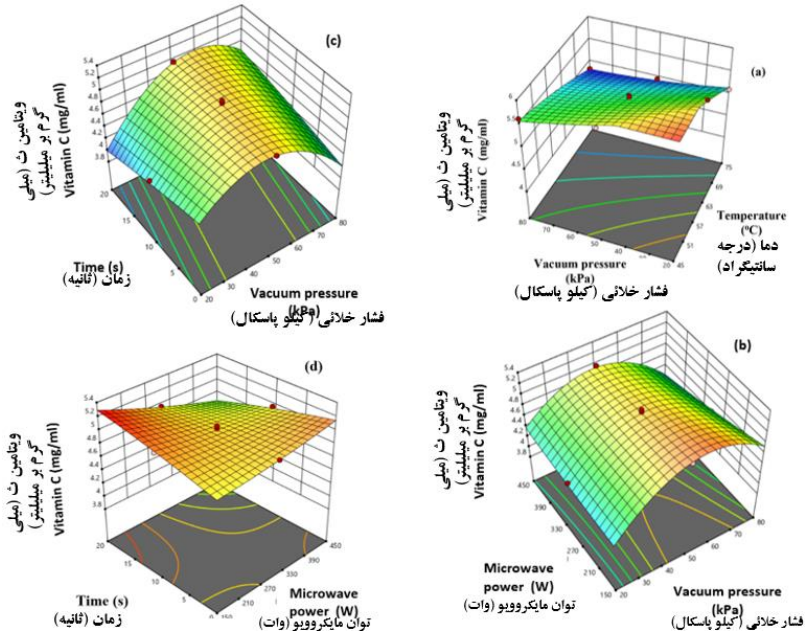
شکل (۵) تأثیر متغیرهای مستقل دما، فشار خلائی، زمان و سطح توان مایکروویو را بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها در هردو روش نرمال و پلکانی نشان می‌دهد.

به صورت کلی تغییر در صفات آنتی اکسیدانی نمونه‌ها از تغییرات در محتوای فنل کلی تبعیت می کند. پیوستگی قوی ($r = 0.894$) چرا که ترکیبات فنلی گروه هیدروکسیلی دارند که پروتونها را به راحتی به رادیکال‌های آزاد می‌دهند (۶۲). همچنین نتایج پژوهشی دیگر آشکار می‌سازند که پیوستگی مثبتی میان ظرفیت آنتی اکسیدانی و محتوای بتاسیانین ($r = 0.795$) همچنین بتاگزانتین ($r = 0.716$) وجود دارد (۴۳). مدل برازش شده به داده‌های آزمایش اثر مثبت دما و فشار خلاء بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی قرص‌های گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که کمترین نرخ تخریب فعالیت آنتی اکسیدانی در شرایط خشک‌کردن در دمای ۸۰°C و فشار خلاء ۴۰ kPa به دست آمد که به مقدار ۲۲٪ افزایش را نشان‌داد (۵۲). این نتایج مشابه نتایج پژوهش

حاضر است، با این تفاوت که در برخی موارد فشار خلائی تأثیری مثبت اما غیر معنی‌داری بر آن داشت. در پژوهش دیگری مشاهده شد که با افزایش سطح توان مایکروویو و خلا، به دلیل کوتاه‌تر شدن زمان خشک‌کردن، صفات آنتی اکسیدانی به دلیل کاهش - واکنش اکسیداز روی ترکیبات فنلی افزایش یافت (۲۴). خشک‌کردن خلائی و مایکروویو اثر اکسیداسیون را به علت فشار کمتر در محفظه خشک‌کن به طرز مؤثری محدود می‌کند (۱۶). همچنین فعالیت آنتی‌اکسیدانی با افزایش توان مایکروویو افزایش می‌یابد (۲۴). خشک‌کردن موجب کاهش ترکیبات بیواکتیو می‌شوند ولی با انتخاب درست پارامترها می‌توان آن را محدود کرد. بکارگیری گرما در این فرایندها معمولا روی ریزمغذیها تأثیرگذار است (۳۵). در کار تحقیقی دیگری محتوای آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های نخودسبز خشک شده بین ۵۸/۵۸ و ۸۶/۸۶ گزارش شد که این تغییرات با افزایش دما و توان مایکروویو افزایش چشمگیری را نشان می‌داد (۳۳). چغندر قرمز حاوی مقادیر بالایی از ترکیبات فنلی می‌باشد که ظرفیت آنتی اکسیدانی قابل توجهی دارند. از دست رفتن محتوای کلی فنل دلایل زیادی دارد ازجمله انها آنزیم پلی فنل اکسیداز (PPO) که مسئول اکسیداسیون انتخابی فنل‌ها می‌باشد و می‌تواند در دمای ۴۰ بسیار فعال باشد و در نهایت باعث کاهش جدی در محتوای فنل کلی در این دما شود (۶۱).

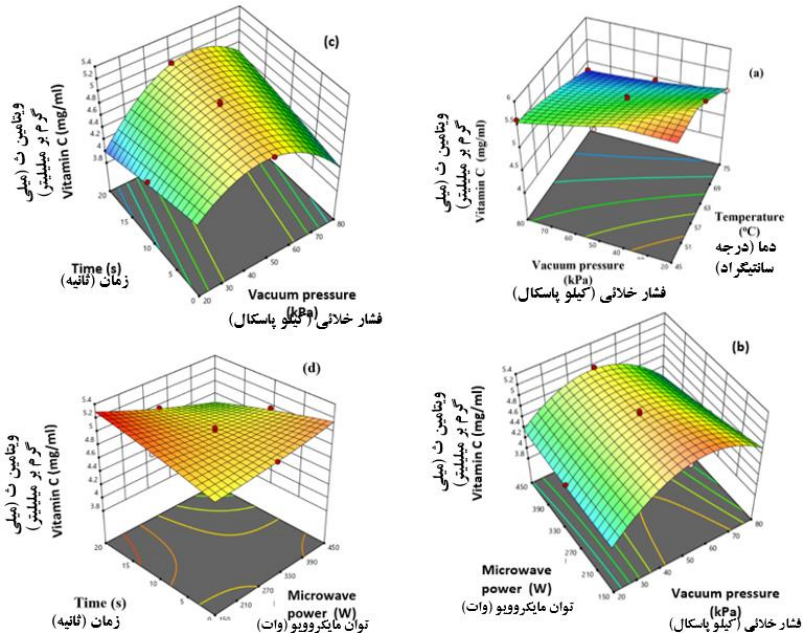
شاخص‌های رنگی $\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$

الگوی تغییر رنگ برای محصولات مختلف متفاوت است. مثلا شاخص روشنایی در خشک کردن سیب‌زمینی و گواوا تغییر چشمگیری داشت در حالیکه شاخص زردی دلیل عمده در تغییر رنگ موز بود. سیب‌زمینی به دلیل محتوای پایین قند و رطوبت بالا و در نتیجه واکنش میلارد پایین در مقایسه با موز و گواوا کمتر در معرض تغییر رنگ قرار می‌گیرد (۳۸). مقادیر بیشتر برای L^* و b^* و مقادیر کمتر برای شاخص a^* ، نشانگر کیفیت بهتر محصول نهایی است (۲۱).



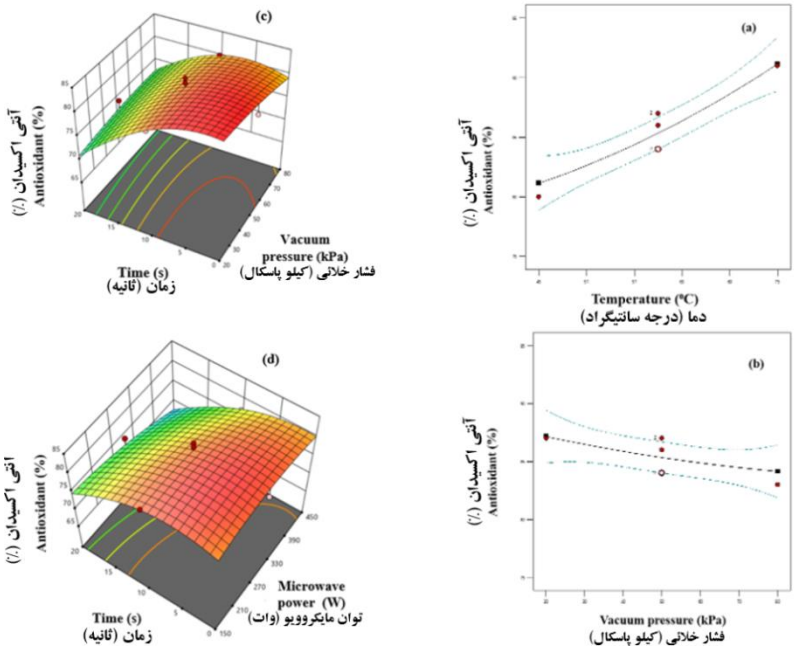
شکل (٤) تأثیر پذیری ویتامین ث از اثر متقابل (a) دما و فشار خلائی در روش نرمال؛ و [(b) فشار خلائی و توان مایکروویو، (c) فشار خلائی و زمان اعمال مایکروویو و (d) توان و مدت زمان اعمال مایکروویو] در روش پلکانی.

Figure (4) The responsiveness of vitamin C to the interaction effects of (a) temperature and vacuum pressure in the normal method; [(b) vacuum pressure and microwave power, (c) vacuum pressure and microwave application time, and (d) microwave power and application time] in the stepwise method.



شکل (٤) تأثیر پذیری ویتامین ث از اثر متقابل (a) دما و فشار خلائی در روش نرمال؛ و [(b) فشار خلائی و توان مایکروویو، (c) فشار خلائی و زمان اعمال مایکروویو و (d) توان و مدت زمان اعمال مایکروویو] در روش پلکانی.

Figure (4) The responsiveness of vitamin C to the interaction effects of (a) temperature and vacuum pressure in the normal method; [(b) vacuum pressure and microwave power, (c) vacuum pressure and microwave application time, and (d) microwave power and application time] in the stepwise method.

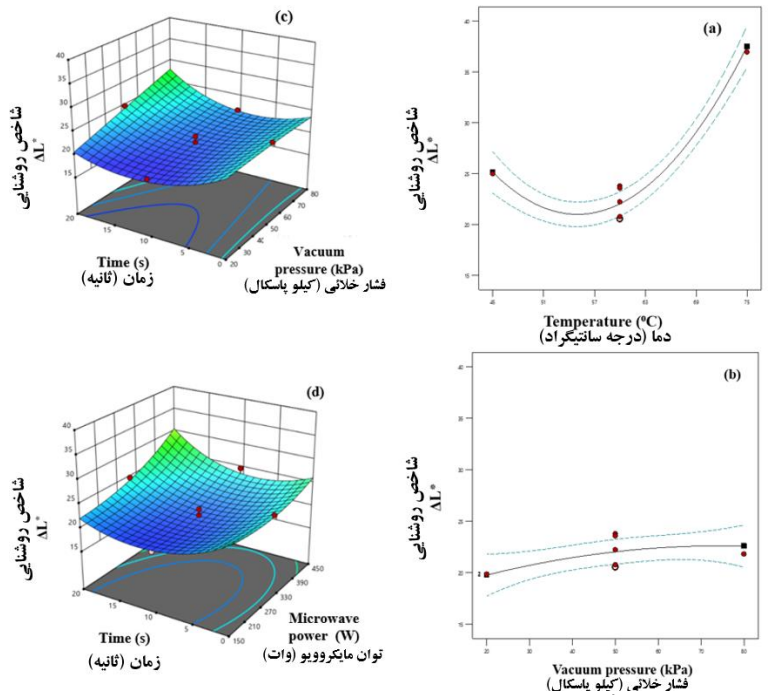


شکل (٥) تأثیر پذیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی از اثر دما (a)، فشار خلائی (b) در روش نرمال؛ و اثر متقابل فشار خلائی و مدت زمان اعمال مایکروویو (c) و توان و مدت زمان اعمال (d) در روش پلکانی

Figure (5) The responsiveness of Antioxidant activity to the effect of (a) temperature and (b) vacuum pressure in the normal method; and the interaction effects of (c) vacuum pressure and microwave application time, and (d) microwave time and power application in the stepwise method.

تغییرات شاخص رنگ ΔL^*

میزان روشنایی بامیه از ۴۲/۶۹ در حالت تازه به ۴۴/۷۱ تا ۵۱/۳۵ بعد از خشک‌کردن به روشهای گوناگون افزایش یافت (۲۸). در توان مایکروویو بالا، فشار کمتر و توان مادون قرمز بالاتر رنگ روشنتری برای قارچ خشک‌شده بدست آمد. کاهش زمان خشک‌کردن و فشار خلائی همزمان با افزایش توان مایکروویو، نتایج رنگی بهتری را ارائه می‌دهد. زیرا توان مادون قرمز بالا با افزایش دمای سطحی نمونه باعث غیرفعال‌کردن سریع‌تر آنزیم‌ها می‌شود. بهترین نتایج رنگ در خشک‌کردن به روش خلائی-مایکروویو قارچ در توان مایکروویو ۲۶۷W و فشار خلائی ۱۸/۶۶ kPa حادث شد. زیرا اختلاف فشار بین نمونه و محفظه باعث انتقال سریع رطوبت و در نتیجه مانع فروپاشی و انبساط بافت قارچ می‌شود (۳۱). اثر فاکتور دما از اثر فاکتور فشار خلائی خیلی بیشتر است. نتایج بدست آمده از فرایند رطوبت‌گیری چغندر قرمز نشانگر آن است که روند تغییرات روشنایی همه تیمارها در روشهای مختلف رطوبت‌گیری، به صورت صعودی بود. علت عمده آن تغییرات روی داده در ماده بتالائین می‌باشد که در فرآیند خشک‌کردن تابع فاکتورهای مختلفی مانند رطوبت، pH، حرارت، اکسیژن و نور است که تقریبا همه این فاکتورها در طول فرآیند متغیر بوده و حرارت بیشترین اثر را بر آن دارد؛ زیرا که رنگیزه‌های بتالائین، حساس به دما هستند و در پی افزایش حرارت با سرعت بالایی تخریب می‌شود (۱۵). در پژوهشی دیگر که بر روی گوجه‌فرنگی انجام شد دما بر تمامی شاخص‌های رنگی محصول خشک‌شده اثر معنی‌داری($P<0.001$) داشت، برش‌های گوجه‌فرنگی خشک‌شده در دمای ۷۵ دارای کمترین کیفیت و بیشترین تغییر رنگ بودند (۲۱)، که با نتایج بدست آمده در این پژوهش و نتایج سایر پژوهشگران در خشک‌کردن چغندر قرمز مطابقت دارد(۱۵).



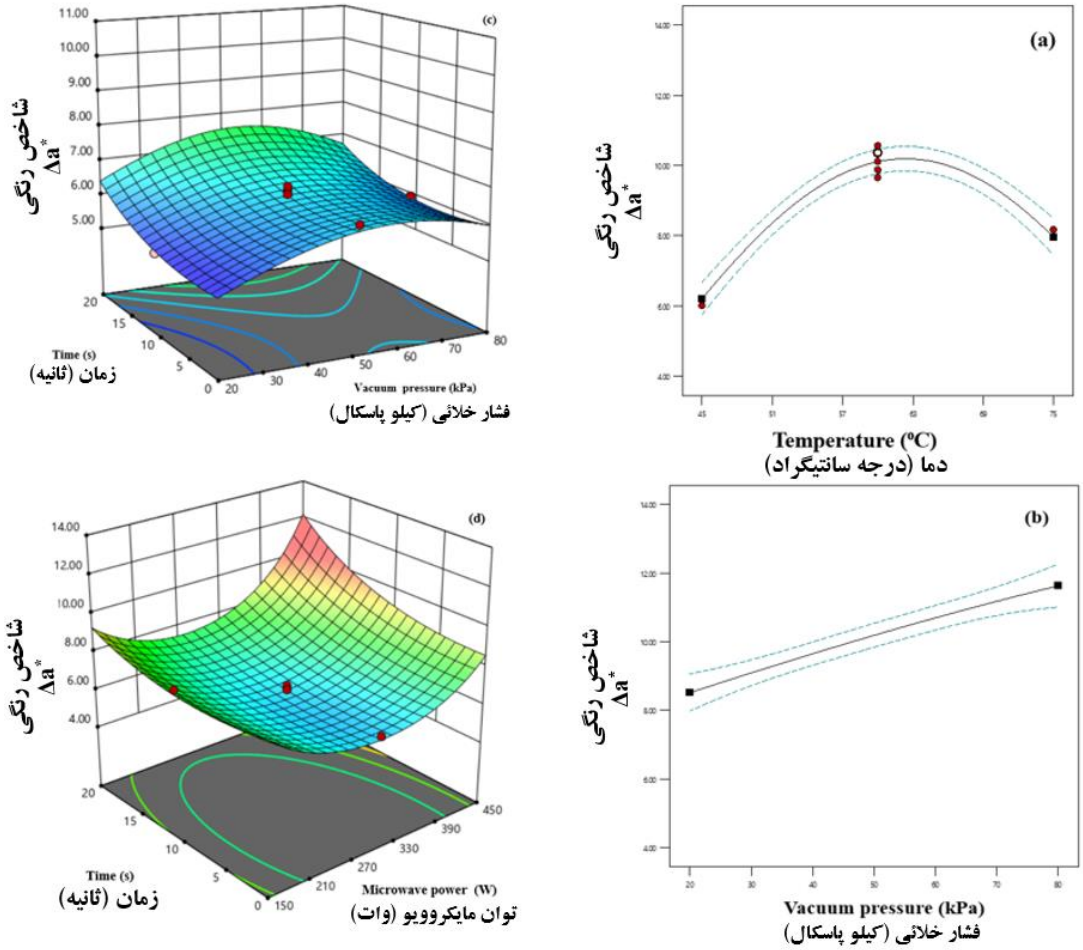
شکل (٦) تأثیر پذیری شاخص رنگی ΔL^* از اثر دما (a)، فشار خلائی (b) در روش نرمال؛ و اثر متقابل فشار خلائی و مدت زمان اعمال مایکروویو (c) و مدت زمان و توان اعمال مایکروویو (d) در روش پلکانی

Figure (6) The responsiveness of the color index ΔL* to the effect of (a) temperature and (b) vacuum pressure in the normal method; and the interaction effects of (c) vacuum pressure and microwave application time, and (d) microwave power and application time in the stepwise method.

تغییرات شاخص رنگ Δa^*

نمودارهای شکل(۷) بیانگر آن هستند که با افزایش دمای محفظه، تغییر رنگ Δa^* ابتدا صعودی و سپس نزولی می‌باشد و نیز با کاهش فشار خلائی تغییر رنگ Δa^* روند کاهشی را نشان می‌دهد.

افزایش دما سبب تشکیل رنگدانه‌های قهوه‌ای از طریق واکنش مایلارد می‌شود. تغییر رنگ سبز به میزان بالایی به مقدار تغییر کلروفیل گیاه بستگی دارد به گونه‌ای که با حفظ بیشتر کلروفیل در بافت نمونه، رنگ آن تمایل کمتری به سمت قرمزی خواهد داشت. مقدار لیکوپن بالاتر باعث قرمزی زیادتر محصول است. همچنین افزایش دمای خشک‌کردن، باعث تسریع واکنشهای ایزومریزاسیون و تخریب ماده لیکوپن محصول گشته و در نهایت موجب تغییر در شاخص رنگ ΔL^* و Δa^* می‌گردد (۵۳).

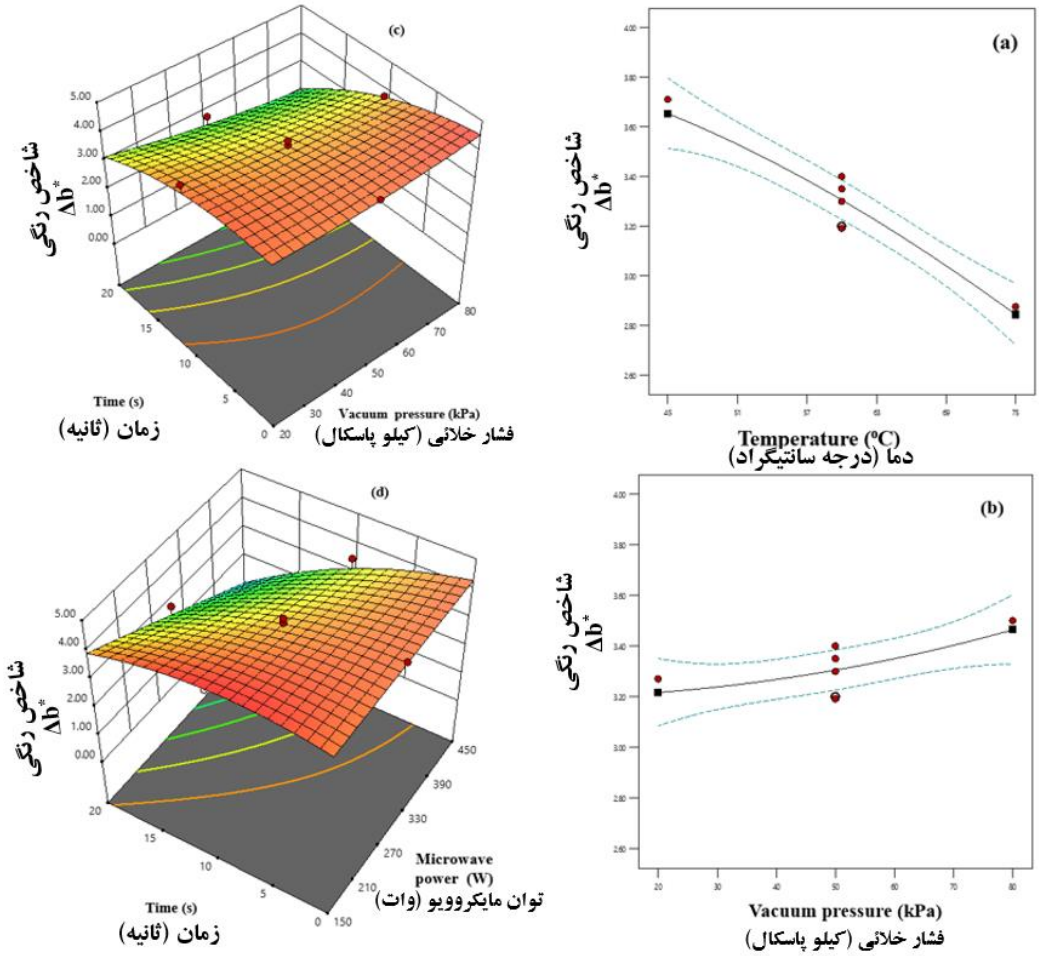


شکل (۷) تأثیر پذیری شاخص رنگی Δa^* از اثر دما (a)، فشار خلائی (b) در روش نرمال؛ و اثر متقابل فشار خلائی و مدت زمان اعمال مایکروویو (c) و مدت زمان و توان اعمال مایکروویو (d) در روش پلکانی

Figure (7) The responsiveness of the color index Δa* to the effect of (a) temperature and (b) vacuum pressure in the normal method; and the interaction effects of (c) vacuum pressure and microwave application time, and (d) microwave power and application time in the stepwise method.

تغییرات شاخص رنگ Δb^*

نمودارهای شکل(۸) نشان می‌دهند که با افزایش دما شاخص Δb^* کاهش می‌یابد و با کاهش فشار خلائی، این تغییر روندی کاهشی با شیبی ملایم را نشان می‌دهد. نتیجه مشابهی در خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی نیزگزارش گردید (۲۱). که این امر به وقوع واکنشهای مایلارد در خلال فرآیند نسبت داده‌شد (۵۲). نتایج مشابه در خشک‌کردن نمونه‌های چغندر قرمز در خلا حاصل شد زیرا نمونه زمان کمتری درمعرض هوای گرم قرار می‌گیرد ودر نتیجه تعداد کمتری از رنگدانه‌های قرمز بتالائین به رنگ زرد تغییر پیدا می‌کنند. بعلاوه به علت خلأ نسبی موجود و کمبود اکسیژن واکنش‌های شیمیایی کاهش می‌یابند و باعث محدود کردن فعالیت آنزیمهای فنولاز می‌شوند (۱۵). نمونه‌های مورینگا که در سطوح بالاتر مایکروویو و فشار خلائی خشک‌شدند شاخص سبزی بالاتری را نشان‌دادند و این امر به تخریب کمتر پیگمانهای رنگی از جمله کلروفیل مرتبط دانسته‌شد (۵۱)، تغییر رنگ در خلال خشک‌شدن بستگی به مشخصات ماده نیز دارد (۳۴).



شکل (۸) تأثیر پذیری شاخص رنگی Δb^* از اثر دما (a)، فشار خلائی (b) در روش نرمال؛ و اثر متقابل فشار خلائی و مدت زمان اعمال مایکروویو (c) و مدت زمان و توان اعمال مایکروویو (d) در روش پلکانی

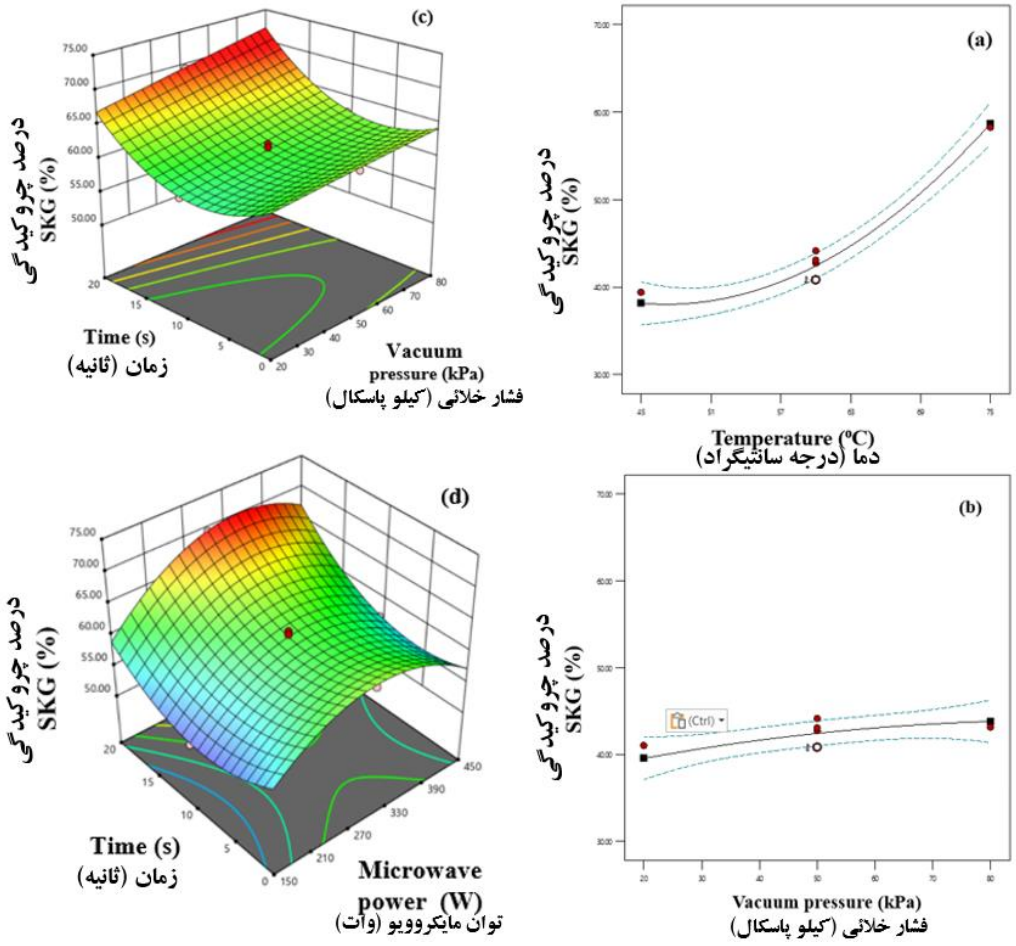
Figure (8) The responsiveness of the color index Δb* to the effect of (a) temperature and (b) vacuum pressure in the normal method; and the interaction effects of (c) vacuum pressure and microwave application time, and (d) microwave power and application time in the stepwise method.

درصد چروکیدگی

نمودارهای شکل(۹) بیانگر آن هستند که با افزایش دمای و فشار خلائی مقدار چروکیدگی افزایشی می‌یابد همچنین اثر فاکتور دما خیلی بیشتر از اثر فشار خلائی است.

چروکیدگی نمونه‌های کدو در محدوده ۷۹/۹۱ تا ۸۴/۹۲٪ به دلیل خروج گاز بین سلولی گزارش گردید (۴). که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر مطابقت دارد. علت وجود این بازه تغییرات به توزیع غیریکنواخت ماده خشک و آب و همچنین ساختمان سلولی متفاوت ارجاع شد (۱۶). استفاده از منابع انرژی کمکی مانند امواج مایکروویو و مادون‌قرمز به صورت ترکیبی می‌تواند محدودیت چروکیدگی در دماهای پایین را برطرف نماید (۱۱). ترکیب مایکروویو و خلا با ایجاد گرادیان حرارتی سریع ساختمان متخلخل بزرگتری را ایجاد می‌کند (۴۵). لذا چروکیدگی نمونه‌های سیب با افزایش توان مایکروویو به دلیل کاهش زمان فرایند کاهش یافت (۱۲).

در روش پلکانی کاهشی، چروکیدگی قابل قبول ۴۵/۲۲٪ گزارش شد (۶). افزایش توان مایکروویو و دما در خشک‌کردن بنه چروکیدگی نمونه‌ها را افزایش داد (۳۲).



شکل (۹) تأثیر پذیری شاخص چروکیدگی از اثر دما (a)، فشار خلائی (b) در روش نرمال؛ و اثر متقابل فشار خلائی و مدت زمان اعمال مایکروویو (c) و مدت زمان و توان اعمال مایکروویو (d) در روش پلکانی

Figure (9) The responsiveness of the shrinkage index to the effect of (a) temperature and (b) vacuum pressure in the normal method; and the interaction effects of (c) vacuum pressure and microwave application time, and (d) microwave power and application time in the stepwise method.

ضریب پخش مؤثررطوبت

نمودارهای شکل(۱۰) نشان می‌دهند که افزایش دمای محفظه، مدت زمان و توان اعمال مایکروویو به صورت مستقیم بر ضریب پخش مؤثر رطوبت اثر می‌گذارند.

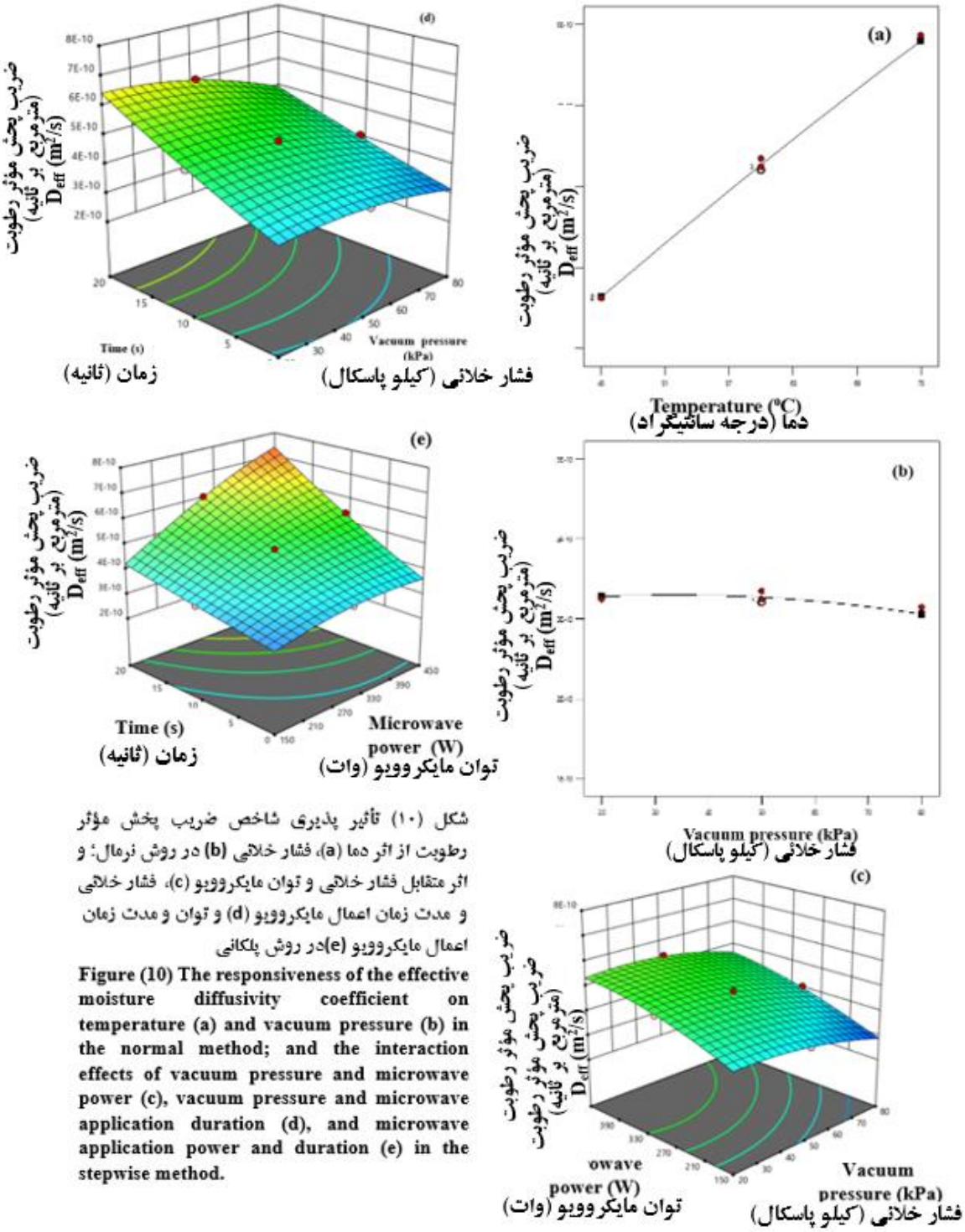
این شاخص یکی از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی در فرایند تولید غذا و مبنای تحلیل‌های مهندسی برای فرایندهایی مثل خشک‌کردن محسوب می‌شود، و مکانیسم انتقال رطوبت در داخل ماده غذایی را تشریح می‌کند، که شامل پخش رطوبت، پخش بخار، انتشار سطحی، جریان موئینی و جریان ویسکوزی می‌باشند. افزایش دما و توان مایکروویو این ویژگی را افزایش می‌دهند. همچنین سطح و مدت زمان اعمال توان مایکروویو به صورت مستقیم روی آن تأثیرگذار است (۱۱). بنابراین آهنگ خشک‌شدن بستگی به انرژی مایکروویو جذب شده در تمام مراحل فرایند دارد (۵۵). افزایش توان اعمال‌شده مایکروویو باعث افزایش نرخ خشک‌شدن می‌گردد (۵۵). زیرا با ازدیاد توان مایکروویو، دمای محصول نیز بالا رفته و شیب فشار بخار بین داخل و خارج نمونه افزایش می‌یابد و در نتیجه گرمای بیشتری صرف پخش و انتقال رطوبت می‌شود (۴۰). کاهش فشار خلائی نیز در افزایش آهنگ تبخیر مؤثر می‌باشد. ضریب مؤثر پخش رطوبت از توان مایکروویو در مقایسه با فشار خلائی کمتر تأثیرپذیر است (۲۴).

جذب سریع انرژی مایکروویو در سطوح بالاتر باعث ایجاد گرادیان بیشتر فشار در داخل نمونه می‌گردد و سرانجام ساختمان متخلخل آنرا پاره می‌کند و منجر به خروج رطوبت می‌شود (۶۳). همچنین خشک‌کردن نمونه‌ها با دمای بالا باعث ازدیاد فعالیت مولکول‌های آب و در نتیجه افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت می‌گردد. اشعه مادون قرمز نیز قادر به نفوذ به داخل نمونه و گرمایش داخل آن می‌باشد. نفوذ اشعه الکترومغناطیس مادون قرمز به درون بافت نمونه‌ها با نوسان مولکول‌های آب منجر به افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت می‌گردد (۲).

انرژی مصرفی ویژه

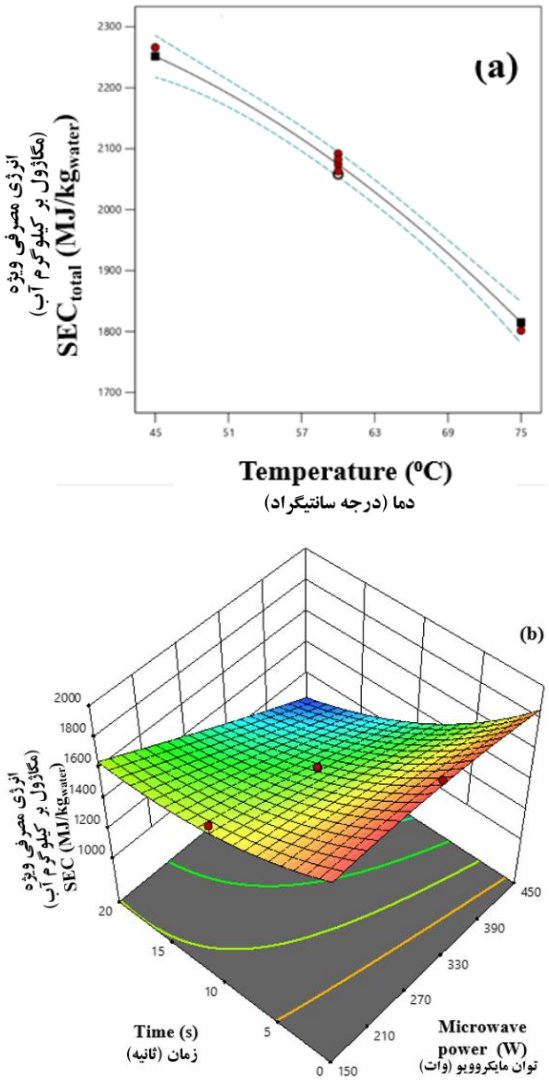
نمودارهای شکل (۱۱) نشان می‌دهند که افزایش دمای محفظه، مدت زمان و توان اعمال مایکروویو بر انرژی مصرفی ویژه اثر می‌گذارند.

انرژی از شاخص‌های مهم در خشک‌کن‌های محصولات کشاورزی و همینطور ارزیابی بازده صنعتی برشمرده می‌شود (۳۷، ۵۶). بنابراین تجزیه وتحلیل شاخص انرژی مصرفی ویژه در خشک‌کن‌ها از جمله در نوع خلائی ضروری به نظر می‌رسد (۱). انرژی مصرفی به عنوان یک فاکتور مهم به شدت تحت تأثیر زمان خشک‌کردن، از دست دادن رطوبت در طول فرایند، سایر خصوصیات مواد غذایی (نظیر اندازه و محتوای رطوبتی) و همینطور شرایط خشک‌کردن مانند دما قراردارد. بازده انرژی در شروع خشک کردن با مایکروویو به دلیل محتوای رطوبتی بالا، قابلیت جذب بالای امواج و انتقال مؤثر انرژی گرمایی افزایش می‌یابد در حالیکه به مرور زمان به دلیل تبخیر آب و کاهش جذب امواج کاهش پیدا می‌کند (۱۲). انرژی ویژه مصرفی با افزایش دما حالت نزولی به خود می‌گیرد و این امر به سبب ازدیاد گرادیان انتقال حرارت بین نمونه و هوای داخل محفظه می‌شود (۲۹). این شاخص وابسته به دما و فشار داخل محفظه خشک‌کن می‌باشد. بالاترین و پایینترین مقدار این شاخص در خشک‌کردن تفاله سیب ۱۵۱۹/۹۵ و ۵۳۹/۷۴ (kWh/kg_{water}) به ترتیب در شرایط (۴۵□ و فشار خلائی ۶۰ kPa) و و (۸۰□ درجه سانتیگراد و فشار خلائی ۶۰kPa) بدست آمد (۱). افزایش توان مایکروویو، زمان خشک‌کردن را کاهش و موجب کم‌شدن انرژی مصرفی ویژه و ضریب مؤثر پخش رطوبت می‌گردد (۶۶). زیرا در سطوح بالای توان مایکروویو، نمونه در معرض دمای بالاتری قرار می‌گیرد. بنابراین، آب آزاد موجود در محصول به علت افزایش فشار داخلی و درنهایت افزایش انتقال جرم، سریعتر تبخیر می‌گردد و زمان فرایند و در نتیجه انرژی مصرفی ویژه به طرز چشمگیری کاهش پیدا می‌کند (۳۴).



شکل (۱۰) تأثیر پذیری شاخص ضریب پخش مؤثر رطوبت از اثر دما (a)، فشار خلائی (b) در روش نرمال؛ و اثر متقابل فشار خلائی و توان مایکروویو (c)، فشار خلائی و مدت زمان اعمال مایکروویو (d) و توان و مدت زمان اعمال مایکروویو (e)در روش پلکانی

Figure (10) The responsiveness of the effective moisture diffusivity coefficient on temperature (a) and vacuum pressure (b) in the normal method; and the interaction effects of vacuum pressure and microwave power (c), vacuum pressure and microwave application duration (d), and microwave application power and duration (e) in the stepwise method.



شکل (۱۱) تأثیر پذیری شاخص انرژی مصرفی ویژه از اثر دما (a) در روش نرمال؛ و اثر متقابل توان و مدت زمان اعمال مایکروویو (b) در روش پلکانی

Figure (11) The responsiveness of the specific energy consumption of temperature (a) in the normal method; and the interaction effect of microwave application power and Time (b) in the stepwise method.

نتیجه‌گیری

مقادیر بالای R^2 نشان‌دهنده‌ی وجود رابطه‌ی قوی بین داده‌های آزمایشی و مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل‌های پیشنهادی توسط RSM است. علاوه بر این، درصد ضریب تغییرات (CV) در این دو روش به‌ترتیب کمتر از ۶/۹۳٪ و ۶/۱۶٪ بود که این امر تکرارپذیری خوب مدل‌های مربوطه را نشان می‌دهد. عامل دما در روش خشک‌کردن خلائی معمولی، در سطح ۰/۱٪ بر تمامی پارامترهای مورد مطالعه اثر معنی‌دار داشت. سطح توان و مدت زمان اعمال توان مایکروویو در روش پلکانی نیز در سطح ۰/۱٪ بر تمام متغیرهای وابسته به‌جز (AA) اثر معنی‌دار داشت. همچنین فشار خلائی در سطوح مختلف، تأثیر معنی‌داری بر تمامی متغیرها به‌جز SECtotal در هر دو روش داشت. با این حال، تأثیر دما بر متغیرهای وابسته نسبت به فشار خلائی بیشتر قابل توجه بود. مقدار مطلوبیت برای روش‌های خشک‌کردن معمولی و پلکانی به ترتیب برابر با ۰/۶۰۶ و ۰/۶۱۰ بود. در مقایسه با روش معمولی در شرایط بهینه، روش پلکانی ۲۸/۱۸٪ کاهش مصرف انرژی ویژه را نشان داد. علاوه بر این، بهبودهایی در پارامترهای رنگ مشاهده شد، به‌طوری‌که Δa^* و ΔL^* به ترتیب ۱۸/۸۰٪ و ۹/۸۷٪ افزایش یافتند. با این حال، Δb^* کاهش ۱۴ درصدی در رنگ را نشان داد. میزان چروکیدگی نیز ۳۸/۶۲٪ افزایش داشت. بعلاوه، کاهش در شاخص از دست‌رفتن ویتامین C و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به ترتیب برابر با ۱۱/۳۱٪ و ۱۱/۲۳٪ ثبت شد. راهبرد پلکانی، تأثیری تا حدودی ضعیف‌تر اما نزدیک بر بعضی از ویژگی‌های فیزیکی محصول نسبت به روش معمول داشت؛ با این حال، این روش تفوق بسیار بالاتری را در مصرف انرژی ویژه از خود نشان داد. بنابراین تکنیک پلکانی برای خشک‌کردن چغندرقرمز و نیز انجام تحقیقات جدید بر روی محصولات مختلف دیگر پیشنهاد می‌گردد.

References

1. Abdollahzadeh Delazi, M., Amiri Chayjan, R. and 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.

2. Ahmadi Ghavidelan, M., and Amiri Chayjan, R. 2017 .Modeling engineering characteristics of hazelnut kernel during infrared fluidized bed drying. Food Measure, 11: 460–478. DOI 10.1007/s11694-016-9414-0.

3. Alwazeer, D., and Tan, 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.

4. Amiri Chayjan, R., Dibagar, N., and 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.

5. Chen, C., Venkitasamy, C., Zhang, W., Deng, L., Meng, X., and Pan, Z. 2020. Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts. Journal of Food Engineering, (under press) https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110105.

6. Chupawa, P., Gaewsondee, T., and Duangkhamchan, W. 2021. Drying characteristics and quality attributes affected by a fluidized-bed drying assisted with swirling compressed-air for preparing instant red jasmine rice. Processes, 9(10): 1738. https://doi.org/10.3390/pr9101738.

7. Chupawa, P., Inchuen, 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

8. Chupawa, P., Suksamran, W., Jaisut, D., Ronsse, F., and Duangkhamchan, W. (2022). Combined Heat and Mass Transfer Associated with Kinetics Models for Analyzing Convective Stepwise Drying of Carrot Cubes. Foods, 11(24), 4045. https://doi.org/10.3390/foods11244045.

9. Cuervo-Andrade, S. P. and Hensel, O. 2016. Stepwise drying of medicinal plants as alternative to reduce time and energy processing. Materials Science and Engineering, 138, 012014 doi:10.1088/1757-899X/138/1/012014.

10. Degen, F. and Schutte, M. 2022. Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production. Journal of Cleaner Production,330,129798. https:// doi. org/ 10.1016/j. jclep ro. 2021. 129798.

11. Dehghannya, J., Bozorghi, S. and 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.

12. Dehghannya, J., Farshad, P., and 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.

13. El Hathat Z, Sreedharan VR, Venkatesh VG, Zouadi T, and Arunmozhi MSY. 2023. Modelling and analyzing the GHG emissions in the VUCA world: Evidence from tomato production in Morocco. Journal of Cleaner Production, 382,134862. https:// doi. org/ 10. 1016/j. jclep ro. 2022. 134862.

14. Elkelawy, M., El Shenawy, E. A., Bastawissi, H. A. E., Shams, M. M., and 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, 14, 100177. https:// doi. org/ 10. 1016/j. ecmx. 2021. 100177.

15. 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. (in persian).

16. 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.

17. Freshfel Europe's (2024) Consumption data. Retrieved from https://fresh fel. org/ what- we-do/consumption-monitor/. Last seen: 16 Jan 2025.

18. Gaudel, N., Gaiani, C., Harshe, Y. M., Kammerhofer, J., Pouzot, M., Desobry, S., and Burgain, J. 2022. Reconstitution of fruit powders: A processstructure function approach. Journal of Food Engineering, 315. 110800. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110800.

19. Ghasemi, A., and Chayjan, R. A. 2018. Optimization of Pelleting and Infrared-Convection Drying Processes of Foodand Agricultural Waste Using Response Surface Methodology (RSM). Waste and Biomass Valorization, 10(6): 1711-1729. DOI 10.1007/s12649-017-0178-5.

20. Ghasemi, A., and 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

21. Ghasemi, A., Amiri Chayjan, R., and Azizi Tabriz zad, 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).

22. Hadipour E, Taleghani A, Tayarani-Najaran N, and Tayarani-Najaran Z. 2020. Biological effects of red beetroot and betalains: A review. Phytotherapy Research. 34(8): 1847-67. doi: 10.1002/ptr.6653.

23. Hafezi, N., Sheikhe Davoodi, M. J., and Sajjadieh, 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. (In persian).

24. Hameeda, A., Maana, A.A., Khana, M. K. I., Khanc, Imran, M., Niazic, S., Iqbald, M. W., Riazd, T., Manzoore, M. F., and 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.

25. 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.

26. Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Guillen Bolanos, T., Bindi, M., Brown, S., and Zhou, G. 2019. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5 °C. Science, 365(6459): eaaw6974. https:// doi. org/ 10. 1126/ scien ce. aaw69 74.

27. Homayounfar, H. and 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. DOI:10.30492/ijcce.2023.1999762.5955.

28. 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 Rehydration. Athens Journal of Sciences, 6(3): 155-168. https://doi.org/10.30958/ajs.6-3-1.

29. Jha, P., Meghwal, M., and 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.

30. Jiang, H., Zhang, M., S Mujumdar, A., and Limd. R. X. 2014. Comparison of drying characteristic and uniformity of banana cubes dried by pulse-spoutedmicrowave vacuum drying, freeze drying and microwave freeze drying. Journal of Science Food Agriculture. 94: 1827–1834. DOI: 10.1002/jsfa.6501.

31. Kantrong, H., Tansakul, A., and Mittal, GS. 2014. Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. Journal of Food Science and Technology, 51(12): 3594-608. doi: 10.1007/s13197-012-0888-4.

32. 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).

33. Kaveh, M., and 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.

34. Kaveh, M., Abbaspour, Y., and 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.

35. Khanlari, A., Gu¨ ler, H.€ O., Tuncer, A. D., S, irin, 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.

36. 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.

37. 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.

38. Kumar, C., Karim, M. A., and Joardder, M. U. 2014. Intermittent drying of food products: A critical review. Journal of Food Engineering, 12: 48-57. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014.

39. Leilayi, M., arabhosseini, A., Akhijahani, H.S., Kaveh, M., nezamlou, N., and 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.

40. Liu, S., Zhu, W., Bai, X., You, T., and 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. https://doi.org/10.1007/s11694-018-9969-z.

41. Liu, Y., Sabadash, S., Duan, Z., and 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. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.

42. Long, X., Cai, L., and 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.

43. Mella, C., Vega-Gálvez, A., Uribe, E., Pasten, A., Mejias, N., Quispe- Fuentes, I. 2022. Impact of vacuum dryingon drying characteristics and functional properties of beetroot (Beta vulgaris), Applied Food Research, 2: 100 -120. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100120.

44. Mitrevski, J., Panteli´c, N.Đ., Dodevska, M.S., Koji´c, J.S., Vuli´c, J.J., Zlatanovi´c, S., Gorjanovi´c, S., Lali˘ci´c-Petronijevi´c, J., Marjanovi´c, S., and Anti´c, 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.

45. Monteiro, R. L., Garcia, A. H., Tribuzi, G., Mattar Carciofi, B. A., and Laurindo, J. B. 2021. 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.

46. 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.

47. Musielak, G. and 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.

48. Nanvakenari, S., Movagharnejad, 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.

49. 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.

50. 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.

51. Pu, Y.Y., and 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.

52. Rashidi, M., Amiri Chayjan R., and Ghasemi A. 2020. Optimization of tomato compressed tablet production based on physical, mechanical and thermal properties in a hot air condition with microwave pretreatment. Iranian Food Science and Technology. 16(1): 29-42. DOI: 10.22067/ifstrj. v16i2.78894.

53. Rashidi, M., Amiri Chayjan, R., Ghasemi, A., and 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. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2021.06.003.

54. Santos, K.C., Guedes, J.S., Rojas, M.L., Carvalho, G.R., and 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.

55. Sedani, S. R., Pardeshi, I. L., and 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.

56. Singh, P., and 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):1-21. DOI:10.1080/15567036.2020.1806951.

57. Sossa, JWZ., Orozco, GL., Murillo, LMG., Osorio MP., Suarez NS. 2021. Infrared drying trends applied to fruit. Front Sustainable Food System., https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.650690.

58. 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 Mitragyna speciosa (Rubiaceae family) leaves. Molecules, 14: 3964-3974. doi:10.3390/molecules14103964.

59. Sujindaa, N., Saengsuwanb, T., and 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.

60. Székely, D., Vidák, K., Furulyás, D., Ribárszki, Á., and Stéger-Máté, M. 2019. Effect of drying methods on physicochemical parameters of different red beetroots (Beta vulgaris L.) species. Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 63(3): 485–490. https://doi.org/10.3311/PPch.13104.

61. Tan, S., Wang, Z., Xiang, Y., Deng, T., Zhao, X., Shi, S., Zheng, Q., Gao, X., and 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.

62. Vallespir, F., Rodríguez, O., Eim, V. S., Rosselló, C., and 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.

63. Yilmaz, P., Demirhan, E., and Özbek, B. 2021. Microwave drying effect on drying characteristic and energy consumption of Ficus carica Linn leaves. Journal of Food Process Engineering, 44(10): 1–21. Doi: 10.1111/jfpe.13831.

64. 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. DOI https://doi.org/10.47836/ifrj.30.3.07.

65. 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/ foods 10050 992.

66. Zhang, Z., Chen, Y., Peng, J., Huang, S., and 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.