



Research paper

Evaluation of Lavender Drying Kinetics in Solar Dryer under Vacuum

N. Hajivaise¹, N. Behrooz-Khazaei^{2*}, and H. Samimi Akhijahani³

1- MSc student, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

2,3- Assoc. Prof., Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

Article information	Extended Abstract
Received: 2024/11/10 Accepted: 2024/12/17	Introduction Medicinal plants constitute a cornerstone of both the pharmaceutical and food industries, serving as primary sources of bioactive compounds essential for human health and wellness. The preservation of these valuable botanical resources through appropriate processing techniques is paramount to maintaining their therapeutic efficacy and commercial viability. Among various preservation methods, drying is the most critical post-harvest processing step, directly influencing the quality, shelf life, and retention of bioactive compounds in medicinal plants. Traditional drying methods, including sun drying and shade drying, are cost-effective; however, they often result in prolonged processing times, potential contamination risks, and significant losses of heat-sensitive bioactive compounds. Conventional hot-air drying methods, though faster, frequently expose plant materials to high temperatures that can degrade essential oils, phenolic compounds, and other thermolabile constituents. Consequently, there exists an urgent need for innovative drying technologies that can effectively preserve the quality characteristics of medicinal plants while ensuring efficient moisture removal. Solar drying technology has emerged as a sustainable and energy-efficient alternative, harnessing renewable solar energy while providing controlled drying conditions. When combined with vacuum technology, solar drying offers enhanced advantages, including reduced processing temperatures, accelerated moisture removal, and superior preservation of heat-sensitive compounds. This
Keywords: Drying process, Moisture content, Modeling, Extraction efficiency.	
*Corresponding author: n.behroozi@uok.ac.ir ORCID:  0000-0001-6095-2343 	

integrated approach addresses the dual challenges of energy sustainability and product quality preservation in medicinal plant processing.

Method

Lavender (*Lavandula*) was selected as the model medicinal plant for comprehensive evaluation due to its significant commercial importance and well-documented essential oil composition. Comparative drying experiments were conducted under controlled conditions at a reduced pressure of 30 kilopascals using the developed solar-vacuum system. Parallel experiments included traditional sun drying, shade drying, and conventional oven drying to establish performance benchmarks and quality comparisons.

The experimental protocol involved careful preparation of plant materials, determination of initial moisture content, and systematic monitoring of moisture loss over time. Environmental conditions, including ambient temperature and relative humidity, were continuously recorded to correlate external factors with drying performance.

This comprehensive research focused on the design, implementation, and systematic evaluation of an innovative solar-vacuum drying system specifically engineered for medicinal plant processing. The primary objectives encompassed the development of an efficient drying system, characterization of drying kinetics, mathematical Modeling of the drying process, and comprehensive quality assessment of the dried products.

The experimental drying system consisted of several interconnected components, designed for optimal performance and reliability. The main drying chamber was engineered to accommodate various plant materials while maintaining uniform temperature and pressure distributions. The vacuum pump system enabled precise pressure control, creating sub-atmospheric conditions that facilitated enhanced moisture removal at reduced temperatures. Temperature sensors strategically positioned throughout the system provided real-time monitoring of thermal conditions, while pressure gauges ensured accurate maintenance of the vacuum level.

An Arduino-based control board served as the system's intelligent hub, coordinating various operational parameters and enabling automated control sequences. The condenser system efficiently removed water vapor from the vacuum stream.

Results

The experimental results demonstrated remarkable performance advantages of the solar-vacuum drying system. The most significant finding was the substantial reduction in drying time achieved by the innovative system. The solar-vacuum dryer completed the drying process in just 188 minutes, representing a dramatic improvement over traditional methods. In stark contrast, shade drying required 1,620 minutes (27 hours) to achieve comparable moisture levels, highlighting the exceptional efficiency of the vacuum-assisted solar drying approach.

This impressive time reduction can be attributed to the synergistic effects of solar heating and vacuum application. The reduced-pressure environment lowered the boiling point of water, facilitating rapid moisture evaporation at relatively low temperatures. Meanwhile, solar energy provided the necessary thermal input for sustaining the evaporation process without exposing plant materials to excessive heat.

The drying kinetics were successfully characterized through mathematical modeling approaches. Multiple established thin-layer drying models were evaluated for their ability to predict moisture loss patterns during the solar-vacuum drying process. The modified Henderson and Pabis model emerged as the most accurate predictor of drying behavior, demonstrating exceptional statistical performance with correlation coefficients (R^2) exceeding 0.96 and root mean square error (RMSE) values of less than 0.05. This high-fidelity

mathematical model provides valuable insights into the underlying mass transfer mechanisms and enables the prediction of drying times under various operational conditions. The model's accuracy facilitates process optimization and scale-up considerations for commercial applications.

Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis provided comprehensive characterization of essential oil composition across different drying treatments. The analysis revealed that eucalyptol and borneol represented the predominant compounds in lavender essential oil, consistent with literature reports for this species.

Quantitative analysis showed treatment-specific variations in compound concentrations. Sun drying yielded the highest eucalyptol concentration at 30.9%, while shade drying produced the maximum borneol content at 24.6%. The solar-vacuum drying treatment achieved balanced preservation of both major compounds, suggesting effective retention of essential oil quality while providing superior drying efficiency.

Conclusions

This research successfully demonstrated the technical feasibility and performance advantages of solar-vacuum drying technology for medicinal plant processing. The developed system achieved remarkable efficiency improvements while maintaining product quality, positioning it as a promising sustainable alternative to conventional drying methods. The comprehensive mathematical Modeling provides a foundation for process optimization and commercial scale-up, while the quality analysis confirms the system's ability to preserve valuable bioactive compounds.

The findings contribute significantly to the advancement of sustainable processing technologies for the medicinal plant industry, offering potential solutions for improved product quality, reduced processing costs, and enhanced environmental sustainability.

Author Contributions

N. Hajivaise: Methodology and Writing; N. Behrooz-Khazaei: Conceptualization and Supervision; H. Samimi Akhijahani: Conceptualization and Co-supervision.

Data Availability Statement

Data is "Not applicable"

Acknowledgements

This research was conducted with the support of the University of Kurdistan as part of a Master's thesis. Therefore, we hereby express our sincere gratitude and appreciation to the University of Kurdistan for their financial support.

How to cite this paper:

Hajivaise, N., Behrooz-Khazaei, N., and Samimi Akhijahani, H. (2025). Evaluation of Lavender Drying Kinetics in Solar Dryer under Vacuum, Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery. 34: 105-120. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.15006.733>



Authors retain the copyright and full publishing rights.

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



مقاله پژوهشی

بررسی سینتیک خشک کردن و اسانس استخراجی اسطوخودوس در خشک‌کن خورشیدی تحت خلاء

نگین حاجی‌ویسه^۱، ناصر بهروزی خزاعی^{۲*} و هادی صمیمی اخيجهانی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج.

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج.

۳- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

در این پژوهش با توجه به اهمیت گیاهان دارویی در صنایع غذایی و دارویی و نقش غیرقابل انکار فرآیند خشک‌کردن در فرآوری آن‌ها، یک سامانه خشک‌کن خورشیدی-خلائی برای خشک‌کردن گیاهان دارویی پیاده‌سازی و ارزیابی شد. دستگاه شامل یک محفظه خشک‌کن، محفظه آب سرد، پمپ خلأ، حسگرهای دما، فشارسنج، مدار پایشی آردوینو، پمپ آب، چگالنده و شیرهای پایشی است. به منظور ارزیابی خشک‌کن و سینتیک خشک‌کردن، آزمایش‌ها بر روی محصول اسطوخودوس در فشار ۳۰ کیلو پاسکال در خشک‌کن خورشیدی-خلائی و خشک‌کردن در مقابل خورشید، سایه و آون انجام شد. نتایج بررسی سینتیک خشک‌کردن نشان داد که کم‌ترین و بیش‌ترین زمان خشک شدن به ترتیب مربوط به خشک‌کن خورشیدی-خلائی با ۱۸۸ دقیقه و سایه با ۱۶۲۰ دقیقه بود. سینتیک خشک‌کردن در خشک‌کن توسعه داده شده مدل‌سازی شد. مدل اصلاح یافته هندرسون و پاییس با مقادیر R^2 بیش‌تر از ۰/۹۶ و مقدار خطای RMSE کم‌تر از ۰/۰۵ به عنوان مدل با بهترین عملکرد انتخاب شد. از اسپکترومتر جرمی (GC-MS) جهت ارزیابی کیفیت اسانس خشک شده در آزمایش‌های مختلف استفاده شد. ترکیب‌های اصلی اوکالیپتول و بورنئول بیش‌ترین مقادیر را داشتند، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار اوکالیپتول برای تیمار خشک‌کردن در مقابل خورشید ۳۰/۹ درصد و بیش‌ترین مقدار بورنئول مربوط به تیمار سایه ۲۴/۶ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، بازده اسانس، محتوای رطوبتی، مدل‌سازی ریاضی.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

n.behroozi@uok.ac.ir

ORCID: 

0000-0001-6095-2343



مقدمه

گیاهان دارویی به گروهی از گیاهان گفته می‌شود که در درمان بیماری‌ها و یا در پیشگیری از بروز آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند و به صورت بوته، درخت و درختچه در طبیعت وجود دارند. گیاهان دارویی و معطر غالباً به صورت گیاه تازه، خشک شده، کنسرو شده و یا به صورت اسانس مورد استفاده قرار می‌گیرند (Bakhtiarizade & Souri, 2019).

اسطوخودوس (*Lavandula stoechas* L) از گروه گیاهان دارویی، دسته گیاهان گل‌دار و از خانواده‌ی نعنائیان است. تمامی بخش‌های این گیاه مخصوصاً شاخه‌های برگ‌دار، معطر و دارای بوی قوی و مطبوع است. قسمت مورد استفاده این گیاه سرشاخه‌های برگ‌دار و گل‌دار آن است که علاوه بر مصرف درمانی مثل بیماری‌های دستگاه گوارش و روماتیسم، اسانس‌گیری از آن به عمل می‌آید که این اسانس برای اهداف آرایشی و بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Chograni *et al.*, 2021). اسانس اسطوخودوس به طور گسترده در صنعت لوازم آرایشی و بهداشتی از جمله صابون، ادکلن، عطر، لوسیون پوست مورد استفاده قرار می‌گیرد، همچنین در صنعت غذا، روغن اسانس اسطوخودوس به عنوان طعم دهنده در نوشیدنی‌ها، بستنی، آبنبات، محصولات پخته شده و آدامس استفاده می‌شود (Ezzoubi *et al.*, 2020). اسانس اسطوخودوس دارای بیش از چهل نوع ترکیب مختلف است.

خشک کردن یکی از روش‌های فرآوری و افزایش ماندگاری گیاهان دارویی است. گیاهان دارای مقدار زیادی آب در داخل بافت‌های خود هستند که با خشک کردن محصولات، فعالیت آبی آن کاهش و پایداری آن افزایش پیدا می‌کند؛ به صورتی که موجب کاهش فساد ریز زیستی و به دنبال آن کاهش ضایعات می‌شود (Pacífico *et al.*, 2022). با توجه به تأثیر فرآیند خشک کردن بر روی ساختار و اندام‌های گیاهی، انتخاب روش مناسب خشک کردن حائز اهمیت است (Seiiedlou *et al.*, 2020). فرآیند خشک کردن منجر به ایجاد تغییراتی در بافت، عطر و طعم، ارزش تغذیه‌ای و رنگ محصول می‌شود که تأثیر زیادی بر روی کیفیت محصول نهایی می‌گذارد (Calín-Sánchez *et al.*, 2020). از این رو برای خشک کردن محصولات انواع مختلفی از خشک‌کن‌ها مانند خشک‌کن

خورشیدی، خشک‌کن مایکروویو، خشک‌کن انجمادی، خشک‌کن بستر سیال، خشک‌کن جریان هوای گرم و ... توسعه پیدا کرده است.

خشک کردن فرآیندی است با انرژی‌بری بالا و با توجه به محدودیت استفاده از انرژی‌های فسیلی استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع تجدیدپذیر به منظور خشک کردن محصولات کشاورزی قابل اهمیت است (Nukulwar & Tungikar, 2021). با توجه به اینکه محصولاتمانند سبزی‌های برگی و گیاهان دارویی با داشتن ترکیبات معطر در برابر دمای بالای خشک‌کن‌های صنعتی بسیار حساس هستند. لذا استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی با دماهای پایین جهت خشک کردن این نوع محصولات مناسب است؛ از طرف دیگر پهن کردن محصول جلوی آفتاب به علت زیان‌های ناشی از حمله‌ی قارچ‌ها، حشرات، پرندگان، ریزش باران‌های غیرمنتظره، از دست دادن رایحه و ویتامین‌ها به دلیل تابش مستقیم نور خورشید منجر به کاهش کیفیت محصول، غیریکنواختی خشک کردن و افزایش مدت خشک کردن می‌شود (Kumar & Singh, 2020). طراحی سامانه‌ای که بتواند از انرژی خورشیدی استفاده کند، کم هزینه باشد و نیاز چندانی به تعمیر و نگهداری نداشته باشد و از افت کیفیت بالا در محصول نهایی جلوگیری کند، ضروری به نظر می‌رسد (Pagukuman & Wan Ibrahim, 2022).

استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی به دلیل هزینه پایین ساخت و نگهداری در همه مناطق از جمله مناطق روستایی امکان پذیر است (Mohana *et al.*, 2020). به دلیل واقع شدن ایران در منطقه نیمه گرمسیری و خشک و برخوردار بودن از تابش نور کافی استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی توصیه می‌شود. طی تحقیقی که به بررسی خشک شدن ریحان در یک خشک‌کن خورشیدی پرداختند؛ نشان دادند که نرخ خشک شدن و بازده جمع‌کن خورشیدی با شدت جریان هوا رابطه مستقیم دارد. با افزایش شدت جریان هوا از ۲۹ تا ۶۳ درصد، بازده جمع‌کن و نرخ خشک شدن محصول هم افزایش یافت (Gulcimen *et al.*, 2016). در مطالعه دیگری تأثیر شش روش مختلف خشک کردن (هوای گرم، سایه باز، آفتاب باز، گلخانه‌ای، هیبرید و انجمادی) بر سینتیک خشک کردن اسطوخودوس انجام شد. نتایج

شرایط آب و هوایی قاره‌ای که دارای دمای محیط پایین هستند، مناسب نیستند (Kuan et al., 2019).

گیاهان دارویی دارای ترکیبات ویژه‌ای در ساختار خود هستند که این ترکیبات به عنوان اسانس شناخته می‌شود. اسانس‌ها مخلوطی از ترکیبات روغنی فرار بوده که به عنوان یک متابولیت ثانویه در گیاهان دارویی ساخته می‌شوند. روش خشک کردن یکی از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت و بازده استخراج گیاهان دارویی خشک شده است (Argyropoulos & Müller, 2014; Homayounfar et al., 2022). در پژوهشی تأثیر خشک کردن با هوای گرم با دماهای مختلف در محدوده ۳۰ و ۹۰ درجه سلسیوس بر بازده استخراج اسانس و ترکیبات آن در برگ بادرنجبویه پرداختند. در تمامی تیمارهای آزمایش بیش‌ترین کاهش در میزان اسانس در ابتدای فرآیند خشک کردن مشاهده شد و متناسب با دمای خشک کردن بود. خشک کردن برگ‌ها در دمای ۳۰ و ۴۵ درجه سلسیوس به ترتیب منجر به کاهش ۱۶٪ و ۲۳٪ در مقدار اسانس شد، در حالی که خشک شدن در دماهای بالاتر باعث افت قابل توجه در مقدار اسانس شد، به طوری که در دمای ۶۰ درجه ۶۵٪ از میزان اسانس افت مشاهده شد. همچنین تغییرات بارز در اجزای اصلی اسانس در دمای ۶۰ درجه سلسیوس مشاهده شد (Argyropoulos & Müller, 2014). در مطالعه دیگری، تأثیر خشک‌کن انجمادی اتمسفری، خشک‌کن چند مرحله‌ای نیمه‌صنعتی پیوسته و خشک‌کن مادون قرمز-خلاتی بر سرعت خشک شدن، محتوای فنل کل، ظرفیت آنتی اکسیدانی و تغییرات رنگ اسطوخودوس پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که خشک‌کن مادون قرمز-خلاتی برای خشک کردن برگ‌های اسطوخودوس مناسب‌تر بود (Homayounfar et al., 2022).

بررسی پیشینه پژوهش بیان‌گر آن است مطالعه‌ای در زمینه توسعه و ارزیابی خشک‌کن خورشیدی-خلاتی برای خشک کردن محصولات کشاورزی صورت نگرفته است. لذا هدف پژوهش، مدل‌سازی سینتیک خشک شدن گیاه دارویی اسطوخودوس در خشک‌کن خورشیدی-خلاتی، ارزیابی عملکرد این خشک‌کن از بابت میزان زمان خشک شدن، بررسی میزان و کیفیت اسانس محصول خشک شده است.

نشان داد که مدل ریاضی وانگ و سینگ به بهترین وجه سینتیک تغییرات محتوای رطوبتی را توصیف می‌کند. همچنین خشک کردن گلخانه‌ای سریع‌ترین روش از نظر مدت زمان خشک شدن بود. خشک کردن انجمادی خواص رنگی نسبتاً خوبی برای گل‌های اسطوخودوس داشت. مقدار اسانس در روش‌های خشک کردن به ترتیب کاهشی برای هوای گرم (۵/۱۰٪)، سایه (۴/۶۵٪)، انجمادی (۴/۵۳٪)، آفتاب باز (۴/۴۹٪)، گلخانه (۴/۳۳٪) و هیبرید (۲/۲۲٪) گزارش شده است (Dalda Şekerci et al., 2023).

استفاده از فناوری خلاء در خشک کردن محصولات کشاورزی یک فناوری توسعه یافته جهت بهبود کیفیت محصولات خشک شده است (Hafezi et al., 2014). در این روش، خشک کردن محصول در فشارهای کمتر از فشار اتمسفر انجام می‌شود. به دلیل عدم وجود فرآیند اکسیداسیون، رنگ و طعم محصولات خشک شده تا حد زیادی حفظ می‌شود (Dash et al., 2021). خشک شدن خلاء نسبت به خشک کردن معمولی هوای گرم به زمان خشک شدن کمتری نیاز دارد (Nguyen & Songsermpong, 2022). در پژوهشی که به منظور ارزیابی سینتیک خشک شدن با استفاده از یک خشک‌کن خلّاتی با گرمایش مبدل الکتریکی انجام شد به این نتیجه رسیدند که استفاده از این فناوری نه تنها نرخ خشک شدن را افزایش می‌دهد بلکه افت کیفی محصول نهایی را نیز کاهش داد (Zhang et al., 2018).

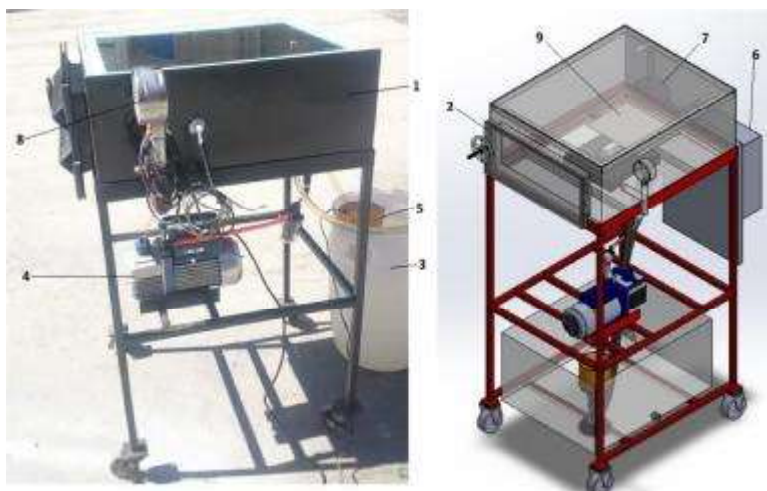
یکی از جنبه‌های مهم فناوری خشک کردن به خصوص برای فرآیندهای صنعتی، مدل‌سازی فرآیند خشک کردن است. هدف از مدل‌سازی این است که مناسب‌ترین روش خشک کردن و بهترین شرایط عملیاتی را برای به دست آوردن محصول معین بتوان انتخاب کرد (Vu & Tsotsas, 2018). مدل‌های ریاضی خشک کردن محصولات کشاورزی از رسم تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان خشک کردن حاصل می‌شوند (Buzrul, 2022). طی تحقیقی که به مدل‌سازی یک خشک‌کن خورشیدی و یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به پمپ حرارتی پرداختند، نتایج نشان داد که خشک‌کن خورشیدی با کمک جریان هوای گرم در مقایسه با خشک‌کن‌های خورشیدی معمولی دارای بازده بیشتری است و همچنین خشک‌کن‌های خورشیدی معمولی برای

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی کارایی خشک کن خورشیدی-خلائی از محصول اسطوخودوس (*Lavandula stoechas* L) تهیه شده از کارخانه گیاهان دارویی شفا در حومه شهر سنندج استفاده شد. به دلیل رطوبت بالای گیاه و به منظور جلوگیری از فسادپذیری که منجر به کدر شدن سطح برگ آن می‌شود، محصول هر روز به مقدار لازم برداشت و به آزمایشگاه فرآوری مواد غذایی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه کردستان منتقل شد. محصول تا قبل از شروع آزمایش به منظور حفظ کیفیت و تازگی در داخل یخچال با دمای 4 ± 1 درجه سلسیوس نگهداری و نیم ساعت قبل از انجام آزمایش از یخچال بیرون آورده شد تا دمای آن به محدوده‌ی ۲۱ تا ۲۴ درجه سلسیوس برسد.

خشک کن خورشیدی - خلائی

در این پژوهش به منظور خشک کردن اسطوخودوس، یک خشک کن آزمایشگاهی ساخته شد. ساختمان دستگاه شامل یک محفظه خشک کن، محفظه آب، پمپ خلاء، حسگر دما، فشارسنج، مدار پایشی آردوینو، پمپ آب، چگالنده و شیرهای پایشی است (شکل ۱).



شکل ۱- نمای کلی خشک کن: (۱) محفظه خشک کن، (۲) درب خشک کن، (۳) محفظه آب سرد، (۴) پمپ خلاء، (۵) پمپ آب، (۶) محل قرارگیری بردپایشی، (۷) چگالنده، (۸) فشارسنج، (۹) نیروسنج



شکل ۲- (الف) نمای کلی چگالنده: (۱) ورودی بخار، (۲) خروج بخار مایع شده، (۳ و ۴) محل اتصال صفحات داخلی، (۵) ورود آب سرد، (۶) خروج آب سرد، (ب) نمای داخلی چگالنده، (ج) محفظه جمع کننده مایع خروجی از چگالنده

اختلاف فشار موجود بین محفظه خشک‌کن و محفظه روغن پمپ بود و شیر پنوماتیکی جهت تنظیم فشار بین دو شیر یک طرفه قرار گرفت. برای اندازه‌گیری بر خط جرم نمونه‌ها حین انجام آزمایش از نیروسنج فشاری (زمیک مدل L6D کلاس C3) با دقت اندازه‌گیری ± 1 گرم و ظرفیت ۳ کیلوگرم استفاده شد. جهت تنظیم سامانه اندازه‌گیری درون محفظه تحت خلاء، سامانه در فشار خلائی قرار داده شد و توسط جرم‌های مشخص تنظیم جرم قرائت شده توسط نیروسنج انجام شد.

به منظور راه‌اندازی سامانه، ابتدا سامانه به محوطه کارگاه‌های گروه بیوسیستم دانشگاه کردستان منتقل و سپس در مقابل نور مستقیم آفتاب قرار داده شد و سپس محفظه آب پر از آب و یخ شد تا دمای آب در $4-0$ درجه سلسیوس پایین بیاید و در این دما حفظ شود. پمپ آب جهت خنک‌سازی چگالنده روشن و پس از گذشت ۱۰ دقیقه سینی محصول بر روی سامانه اندازه‌گیری قرار گرفت. یکی از حسگرهای دمای وسط محصول، یکی دیگر از آن‌ها بر روی محصول به منظور اندازه‌گیری دمای سطح محصول و سومین حسگر دما به منظور ثبت دمای هوای بیرون بر روی شیشه بیرون از محفظه قرار داده شد. شیرهای پایشی باز شده و پمپ خلاء راه‌اندازی شد و توسط شیر پنوماتیکی فشار داخل محفظه در محدوده مورد نظر قرار گرفت؛ پس از آن برنامه ثبت اطلاعات توسط رایانه راه‌اندازی و تغییرات دماها و جرم به صورت برخط اندازه‌گیری شد. تا زمانی که جرم محصول به مقدار مشخص شده (40 گرم) و محتوای رطوبتی به 10 درصد بر پایه تر برسد فرآیند خشک شدن ادامه یافت.

روند انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها بر روی گیاه اسطوخودوس از ساعت $10:00$ صبح در شهریور ماه شروع می‌شد و تا رسیدن به محتوای رطوبتی 10 درصد بر پایه تر ادامه می‌یافت. به منظور خشک‌کردن گیاه اسطوخودوس؛ جداسازی برگ‌ها، گل‌ها و ساقه‌های نازک این گیاه به میزان 150 گرم برای هر آزمایش انجام شد. در این پژوهش محصول در چهار تیمار شامل دستگاه خشک‌کن در فشار خلائی 30 کیلوپاسکال، مقابل نور مستقیم خورشید، سایه و آون در دمای 40 درجه سلسیوس خشک شد. پس از خشک‌شدن، محصول درون کیسه‌های پلی اتیلن جهت حفظ رطوبت قرار گرفت.

به منظور ساخت محفظه (دیوارها و کف) از ورق آهن گالوانیزه با ضخامت 6 میلی‌متر استفاده شد و یک محفظه مکعبی شکل با ابعاد به ترتیب طول، عرض و ارتفاع $25 \times 25 \times 50$ سانتی‌متر ساخته شد. جهت جذب بیش‌تر نور خورشید کل سامانه با رنگ سیاه رنگ‌آمیزی شد و جهت افزایش مقاومت در برابر خمش به دلیل کاهش فشار، در قسمت کف و سقف دور تا دور، قابی با ابعاد 2×2 سانتی‌متر به صورت تکیه‌گاه قرار داده شد. به دلیل این که شیشه‌های سکوریت با استفاده از عملیات شوک حرارتی ساخته می‌شوند و نسبت به شیشه‌های معمولی دارای مقاومت بیش‌تری هستند، برای سقف دستگاه از شیشه سکوریت با ضخامت 10 میلی‌متر استفاده شد. جهت آب‌بندی محفظه دور تا دور شیشه از چسب آکواریوم و به منظور جلوگیری از نشت هوا در قسمت درب خشک‌کن از واشر استفاده شد تا سیستم کاملاً آب‌بندی شود. برای کاهش فشار و خارج کردن رطوبت داخل محفظه از یک پمپ خلاء روتاری روغنی (DVP-3, INDIA) استفاده شد؛ به طوری که فشار نسبی داخل محفظه توسط این پمپ حداکثر تا 80 کیلو پاسکال می‌توانست کاهش یابد. برای اندازه‌گیری دما از حسگر دما (NTC – HANYOUNG/KOREA) با دقت ± 1 سلسیوس، برای اندازه‌گیری فشار از یک فشارسنج WLKA (EN 837-1, MADE IN GERMAN) با دقت ± 0.1 میلی بار و به منظور داده‌برداری از حسگرها از یک مدار پایشی آردوینو MEGA 2560 استفاده شد. برای خنک‌کردن بخار خروجی از محفظه خشک‌کن و تبدیل آن به مایع از یک چگالنده با جنس آهن گالوانیزه به شکل استوانه استفاده شد (شکل ۲). ساختار داخلی چگالنده همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، دارای چهار لوله که به دو صفحه متصل است. بخار پس از ورود به چگالنده از داخل این لوله‌ها عبور می‌کند. آب با دمای $4-0$ درجه سلسیوس در محدوده بین دو صفحه توسط پمپ آب جریان می‌یابد و بخار داخل لوله در اثر تبادل گرما میعان می‌شود. مایع به دست آمده پس از خروج از چگالنده از فیلتر می‌گذرد و وارد محفظه‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده است، می‌شود.

جهت پایش فشار داخل محفظه از سه شیر پایشی که دو شیر از آن‌ها از نوع شیر یک طرفه گازی و یکی از آن‌ها پنوماتیکی بود استفاده شد. شیرهای یک طرفه به منظور جلوگیری از برگشت روغن درون پمپ خلاء به دلیل داخل محفظه در هنگام خاموش کردن پمپ به دلیل

نمونه‌های خشک شده محصول به آزمایشگاه اسانس‌گیری گروه باغبانی دانشگاه کردستان انتقال داده شد و پس از آسیاب و توزین محصول (40 ± 3 گرم)، دو سوم حجم بالن یک لیتری کلونجر (Clevenger) پر از آب می‌شد و محصول آسیاب شده هم به بالن اضافه می‌شد به مدت ۳ ساعت فرآیند اسانس‌گیری انجام گرفت و سپس اسانس آن به وسیله سرنگ جداسازی شده و مقدار حجم آن اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه مقدار حجم اسانس استخراجی بسیار پایین بود و قابل جداسازی نبود، ۲ میلی‌لیتر هگزان به عنوان حلال به اسانس جمع شده در کلونجر اضافه شد و سپس اسانس توسط سرنگ جداسازی گردید. همچنین برای حذف آب همراه اسانس از سولفات سدیم استفاده شد. در پایان اسانس به دست آمده درون شیشه‌های اسانس که کاملاً آب‌بندی شده‌اند قرار داده شد (Abri & Noroozi, 2022).

نمونه‌ها پس از اسانس‌گیری به آزمایشگاه GC-MS گروه شیمی دانشگاه کردستان انتقال داده شد و توسط دستگاه کروماتوگرافی گازی-اسپکترومتر جرمی (GC-MS) طیف‌گیری شد. نوع و مقدار هرکدام از ترکیبات موجود در اسانس شناسایی شد.

مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن

مدل‌های ریاضی خشک کردن محصولات کشاورزی در طراحی و بهینه‌سازی خشک کن‌ها و نیز برای پیش

مراحل عملیاتی آنها مؤثر است. از مدل‌های آورده شده در جدول ۱ استفاده شد؛ که در این مدل‌ها منحنی‌های خشک کردن از رسم تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان خشک کردن حاصل می‌شود (Buzrul, 2022). جهت برازش داده‌های آزمایشگاهی از نرم‌افزار MATLAB 2013 استفاده شد. در جدول ۲، ویژگی‌های a , b , c , k , k_1 , k_2 , g و h ثابت‌های معادله، k ثابت نرخ خشک کردن و t زمان خشک کردن (بر حسب دقیقه) هستند. میزان رطوبت نمونه را در هر زمان از فرآیند خشک شدن می‌توان بر حسب ویژگی بدون بعد نسبت رطوبت (MR) بیان نمود:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

که در آن، M_t ، M_0 و M_e به ترتیب میزان رطوبت در هر زمان از خشک شدن، میزان رطوبت اولیه و میزان رطوبت تعادلی ($kg_{water} \times kg_{dry}^{-1} \text{ matter}$) هستند. با توجه به مقدار پایین M_e در مقایسه با مقادیر M_0 و M_t در معادله بالا از آن صرف‌نظر شد.

برای انتخاب بهترین مدل از بین مدل‌های موجود از ضریب تعیین R^2 نشان دهنده دقت مدل و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان دهنده تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی، استفاده شد. به هر اندازه R^2 به یک نزدیک‌تر و RMSE کوچک‌تر باشد، مدل برازش بهتری بر داده‌ها داشت و به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

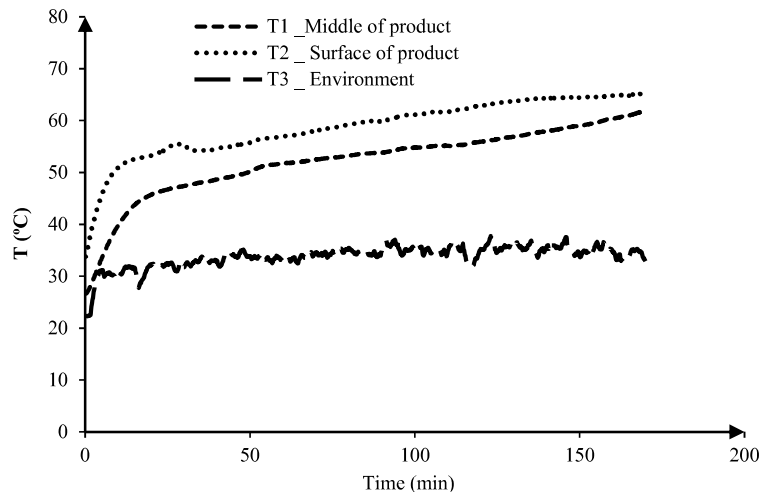
جدول ۱- مدل‌های ریاضی استفاده شده برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن (Buzrul, 2022)

مدل	رابطه ریاضی مدل
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = (-kt^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Approximation of difsfusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kbt)$
Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
Verma et al	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-gt)$
Midilli-Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

نتایج و بحث

شکل ۳ نمودار تغییرات دمایی را در سه نقطه؛ وسط محصول (T_1)، سطح محصول (T_2) و بیرون از خشک‌کن (T_3) در فشار ۳۰ kPa نشان می‌دهد. نتایج شکل ۳ بیان کننده آن است که دمای سطح محصول با وسط آن متفاوت بوده و با گذشت زمان این تفاوت کاهش یافته

است. دلیل این امر آن است که انرژی خورشید ابتدا توسط لایه سطح محصول جذب می‌شود و تبدیل به گرما می‌شود و سپس در اثر بالا رفتن دمای سطح محصول، گرما به لایه‌های پایین انتقال می‌یابد و لذا بدین خاطر اختلاف دما بخصوص در شروع فرآیند بین دمای سطح و لایه‌های زیرین دیده می‌شود.



شکل ۳- روند تغییرات دما در فشار خلای ۳۰ kPa در خشک‌کن خورشیدی خلای

با توجه به شکل ۴ در روش‌های خشک شدن در مقابل خورشید، سایه و آون روند تغییر محتوای رطوبتی به صورت سهمی است و در ابتدای فرآیند خشک کردن محتوای رطوبت به سرعت کاهش می‌یابد اما در مراحل بعدی کاهش محتوای رطوبت به آهستگی صورت می‌گیرد. ولی در خشک‌کن با گذشت زمان، دما افزایش می‌یابد و این افزایش دما باعث می‌شود که مقدار کاهش رطوبت تقریباً خطی باشد. با مقایسه نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که دو عامل دما و خلأ تأثیر زیادی بر روی روند و زمان خشک شدن دارند و این سامانه می‌تواند زمان خشک شدن نسبت به تیمارهای آون، خورشید و سایه به ترتیب ۴۰۰، ۵۵۰ و ۱۴۲۰ دقیقه کاهش دهد که این کاهش بسیار قابل ملاحظه است.

جدول ۳ نتایج مدل‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به ویژگی‌های آماری R^2 و RMSE مشاهده می‌شود؛ مدل اصلاح یافته هندرسون و پابیس با R^2 بزرگ‌تر از ۰/۹۶ و RMSE کوچک‌تر از ۰/۰۵ برای اسطوخودوس به خوبی توانسته است سینتیک خشک شدن را مدل‌سازی کند. با توجه به شکل ۵ که تغییرات محتوای رطوبت پیش‌بینی شده نسبت به مقدار واقعی برای محصول اسطوخودوس را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که مدل انتخابی به خوبی سینتیک خشک شدن را مدل‌سازی کرده است. جدول ۴ ضرایب a, b, c, g و k را برای مدل Modified Henderson and Pabis and برای اسطوخودوس نشان می‌دهد. این ضرایب بر میزان دقت به دست آمده مدل تأثیر می‌گذارند. به غیر تیمار آون، در تیمارهای خشک‌کن، خورشیدی و سایه به

جدول ۲ مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین تغییرات دما را در سه حالت مختلف برای تیمار اسطوخودوس در فشار خلای ۳۰ kPa نشان می‌دهد. بیشینه دمای محیط در محدوده بین ۳۵/۸۰ درجه سلسیوس در تیمار اسطوخودوس قرار دارد. با بررسی ΔT که نشان دهنده حداکثر اختلاف بین دمای بیرون از محفظه و سطح محصول است می‌توان نتیجه گرفت؛ این سامانه قادر است تا حدود زیادی دمای داخل محفظه را نسبت به بیرون از آن افزایش دهد که نتایج مشابهی توسط سایر محققین گزارش شده است (Abri & Noroozi, 2022).

جدول ۲- تغییرات دمایی خشک‌کن در فشار خلای ۳۰ kPa

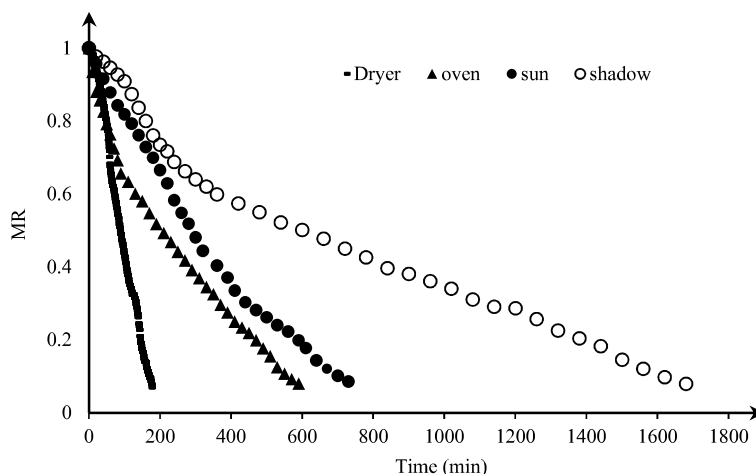
ΔT	T_3	T_2	T_1^*	
۱۶/۶۰	۲۲/۲۰	۳۸/۸۰	۲۶	کمینه
۲۹/۴۰	۳۵/۸۰	۶۵/۲۰	۵۹/۲۰	بیشینه
۲۴/۹۰	۳۳/۸۰	۵۸/۷۰	۵۲/۲۰	میانگین

* دماها بر حسب درجه سلسیوس است.

شکل ۴ تغییرات محتوای رطوبتی اسطوخودوس را نشان می‌دهد. کم‌ترین زمان خشک شدن مربوط به تیمار خشک‌کن در مدت زمان ۱۶۹ دقیقه و بیش‌ترین زمان خشک شدن برای تیمار سایه در مدت زمان ۱۶۲۰ دقیقه به دست آمد. دلیل این امر آن است که در خلأ، اختلاف فشار بین سطح و فشار داخلی سلولی افزایش می‌یابد و از طرفی دیگر آب در دمای پایین‌تری تبخیر می‌شود، که منجر به افزایش سرعت خشک شدن و کاهش زمان خشک شدن می‌شود (Liu et al., 2022).

Henderson and Pabis نسبت به مدل های دیگر بهتر بوده است.

دلیل تغییرات شرایط محیطی نرخ خشک کردن هم از یک روند ثابت افزایشی/کاهشی تبعیت نمی کند و بدین خاطر نتایج مدل سازی با معادله اصلاح یافته Modified



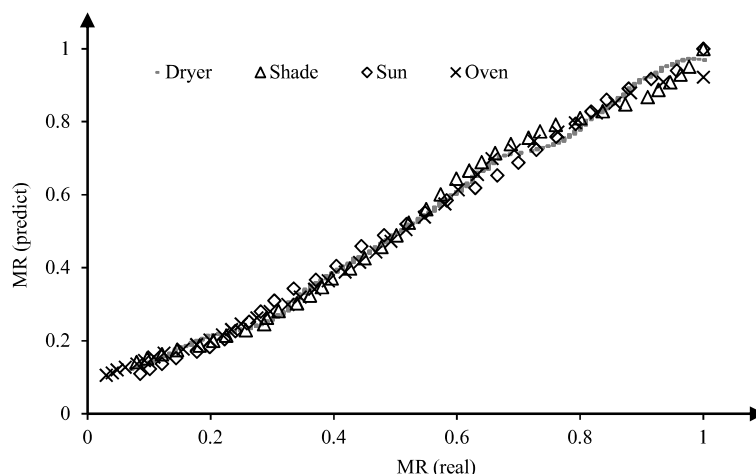
شکل ۴- تغییرات محتوای رطوبتی نسبت به زمان

جدول ۳- نتایج مدل سازی ریاضی

Dryer		Shade		Oven		Sun		Model
R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	
۰/۹۳۲	۰/۰۷۵	۰/۹۵۳	۰/۰۴۳	۰/۹۷۱	۰/۰۴۰	۰/۹۷	۰/۰۴	Newton
۰/۹۴۵	۰/۰۷۰	۰/۹۸۱	۰/۰۳۵	۰/۹۸	۰/۰۳۵	۰/۹۸	۰/۰۲	Page
۰/۹۵۱	۰/۰۵۸	۰/۹۶۶	۰/۰۴۸	۰/۹۵	۰/۰۶۷	۰/۹۶۸	۰/۰۶۳	Wang and Singh
۰/۹۶۳	۰/۰۵۴	۰/۹۷	۰/۰۳۷	۰/۹۷	۰/۰۴۳	۰/۹۶۳	۰/۰۵۸	Henderson and pabis
۰/۹۴۱	۰/۰۸۰	۰/۹۸	۰/۰۳۵	۰/۹۷	۰/۰۲۵	۰/۹۹	۰/۰۲۱	Logarithmic
۰/۹۳۰	۰/۰۶۸	۰/۹۷۱	۰/۰۴۷	۰/۵۶	۰/۱۹۷	۰/۹۸	۰/۰۱۴	Midilli-Kucu
۰/۹۶	۰/۰۵۱	۰/۹۸۲	۰/۰۳۶	۰/۹۹۱	۰/۰۲۲	۰/۹۹۸	۰/۰۱۲	Modified Henderson and Pabis
۰/۹۴۴	۰/۰۶۸	۰/۹۳	۰/۰۵۷	۰/۹۸	۰/۰۴۴	۰/۹۹۷	۰/۰۱۴	Approximation of diffusion
۰/۹۴	۰/۰۶۲	۰/۹۳۳	۰/۰۷۴	۰/۹۸	۰/۰۲۴	۰/۹۸۶	۰/۰۳	Verma et al

معرض جریان هوای گرم، کمترین مقدار اسانس حاصل شده است. نتایج مشابهی توسط سایر محققین هم گزارش شده است (Ghasemi Pirbalouti *et al.*, 2013). همان طور که در جدول ۵ نشان داده شده است مقدار بخار مایع شده برای تیمار ۳۰ کیلوپاسکال، ۳۸ سی سی به دست آمد. مایع به دست آمده پس از قرارگیری در کلونجر حاوی ترکیبات اسانسی نیست، ولی دارای رایحه بویایی بالایی است که دلیل این امر را می توان به فرار بودن ترکیبات معطر اسطوخودوس نسبت داد.

جدول ۵ نشان می دهد که درصد اسانس حاصل شده برای اسطوخودوس در تیمارهای سایه، خورشید، خشک کن با فشار ۳۰ کیلوپاسکال و آون به ترتیب ۲، ۱/۷، ۲/۱ و ۰/۵ میلی لیتر بر ۱۰۰ گرم ماده خشک است. این مقادیر نشان می دهد که برای اسطوخودوس مقدار درصد اسانس به دست آمده در تیمار خشک کن بیش تر از مقابل خورشید به صورت باز است. هم چنین در تیمار سایه به دلیل خشک شدن محصول در سایه و به دور از نور مستقیم خورشید، بیشترین مقدار و کیفیت اسانس استخراجی و در تیمار آون به دلیل قرارگیری محصول در



شکل ۵- تغییرات محتوای رطوبت پیش‌بینی شده نسبت به واقعی

درصد مهم‌ترین ترکیبات اصلی اسانس برای اسطوخودوس که از نتایج تحلیل اسانس توسط GC-MS، مشخص شد در جدول ۶ نشان داده شده است. در میان ترکیبات شناخته شده، بیش‌ترین درصد مربوط به ترکیبات اوکالیپتول (Eucalyptol) با نام دیگر سینئول و بورنئول (Borneol) است. این دو ترکیب دارای رابطه شیمیایی $C_{10}H_{18}O$ است، ولی ساختار مولکولی آن‌ها با هم متفاوت است. اوکالیپتول یک ترکیب آلی بی‌رنگ است که برای ترشحات مخاطی بسیار شدید و همچنین پایش‌کننده راه‌های تنفسی مفید است. به طور وسیع در تهیه نرم‌کننده‌ها، پمادها، شربت‌های ضد سرفه، خمیر دندان و به عنوان طعم دهنده در سایر داروها مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین به عنوان مواد معطرکننده در صابون‌ها، پودرها و مواد شوینده و به مقدار کم در عطرها به کار می‌رود (Salehi *et al.*, 2019). بورنئول نیز به عنوان یک عطر و طعم دهنده مواد غذایی و سایر مواد شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه جدول ۶، تیمار خورشید حاوی بیش‌ترین درصد اوکالیپتول (۳۰/۹۰) و تیمار سایه حاوی بیش‌ترین درصد بورنئول (۲۴/۶۹) بود و تیمار آون کم‌ترین درصد اوکالیپتول (۱۶/۴۰) را داشت و در تیمار آون بورنئول یافت نشد. خشک‌کن در مقایسه با خورشید مقدار کم‌تری درصد اوکالیپتول (۲۸/۷۸) و مقدار درصد بیش‌تری بورنئول (۲۳/۸) را حفظ کرد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب اوکالیپتول در مقابل خورشید بیش‌تر حفظ می‌شود و ترکیب بورنئول که به نور و دمای بالا

جدول ۴- ضرایب مدل اصلاح شده هندرسون و پابیس

Experiment	k	h	g	c	b	a
Dryer	۰/۰۱	۰/۲۹	۰/۰۲	۰/۵۶	-۳۸/۳۴	۳۹/۳۲
Sun	۰/۰۱	۰/۰۱	۱/۱۹	۲/۱۹	۰/۰۴	-۱/۲۳
Shade	۰/۰۰۱	۰/۵۲	۰/۵۶	-۰/۳۸	۰/۴۱	۰/۹۷
Oven	۰/۰۰۳	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۰۷	-۰/۰۱	۰/۹۳

جدول ۵- درصد اسانس اسطوخودوس (mL/100 g dry plant material)

Experiment	Dryer	Sun	Shade	Oven
Extraction efficiency	۲/۱۰	۱/۷۰	۲/۰۰	۰/۵۰
Amount of liquefied steam	۳۸ cc	-	-	-

جدول ۶- ترکیب‌های شیمیایی اسانس روغنی گیاه اسطوخودوس

Compound	Oven	Sun	Dryer	Shade
alpha.-Pinene	----	۳/۳۷۳	۲/۳۶۱	۲/۰۱۰
beta.-Pinene	----	۳/۵۲۴	۷/۳۷۴	۳/۷۸۳
Eucalyptol	۱۶/۴۰۲	۳۰/۹۰۸	۲۷/۷۸۲	۳۰/۱۶۶
Linalol	----	۰/۷۸۷	۶/۴۹۱	۴/۷۱۳
Alcanfor	----	۱۲/۰۸۳	۷/۴۸۳	۱۳/۱۲۰
Borneol	----	۲۰/۲۶۶	۲۳/۸۰۷	۲۴/۶۹۸
Crypton	----	۲/۳۳۸	۳/۰۷۵	۲/۵۴۲
alpha.-Terpicoel	----	۱/۲۱۳	۳/۲۹۴	۲/۱۴۵
Borneol, formate	----	۱/۲۸۴	۱/۲۰۴	۰/۳۵۰
gamma.-Cadinene	----	۱/۱۲۰	۱/۱۳۹	۱/۱۹۰
tau.-Cadinol	----	۲/۴۲۰	۱/۹۹	۱/۸۲۸
Total	۱۶/۴۰۲	۷۹/۳۱۶	۸۶/۹۹۸	۸۶/۵۴۵

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

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

نگین حاجی ویسه: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و آنالیز داده‌ها و تهیه پیش‌نویس مقاله.

ناصر بهروزی خزایی: نظارت بر روند انجام پژوهش، بازنگری، اصلاح و تکمیل مقاله.

هادی صمیمی اخیجهانی: مشاوره و نظارت بر روند انجام پژوهش.

اصول اخلاقی

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

منابع

- Bakhtiarizade, M. & Souri, M. K. (2019). Beneficial effects of rosemary, thyme and tarragon essential oils on postharvest decay of Valencia oranges. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 6, 9. <https://doi.org/10.1186/s40538-019-0146-3>
- Chograni, H., Riahi, L. & Messaoud, C. (2021). Variability of qualitative and quantitative secondary metabolites traits among wild genetic resources of *Lavandula stoechas* L. *Biochemical Systematics and Ecology*, 98, 104327. doi.org/10.1016/j.bse.2021.104327
- Ezzoubi, Y., Bousta, D. & Farah, A. (2020). A Phytopharmacological review of a Mediterranean plant: *Lavandula stoechas* L. *Clinical Phytoscience*, 6, 9. doi.org/10.1186/s40816-019-0142-y
- Pacifico, I., De Gara, L., Stellari, A., Marinoni, L. & Cattaneo, T. M. P. (2022). The application of solar drying process for the valorisation of papaya fruit. *European Food Research and Technology*, 248, 857-867. doi.org/10.1007/s00217-021-03932-6
- Seiiedlou, S., Nalbandi, H., & Bodaghi, A. (2020). Determination of performance parameters of infrared dryer to increase drying performance and uniformity of heat distribution. *Innovative Food Technologies*, 7(2), 313-326. (in Persian). [doi. 10.22104/jift.2019.3700.1883](https://doi.org/10.22104/jift.2019.3700.1883)

حساس است در سایه بیش‌ترین مقدار را داشت. بر اساس نتایج به دست آمده با توجه به تغییرات مقدار بورنتول برای محصول اسطوخودوس که مربوط به رایحه بویایی محصول هستند می‌توان نتیجه گرفت که این ترکیبات در خلاء بالا از بین می‌روند و ایجاد خلاء بر روی رایحه بویایی محصول تأثیر می‌گذارد که این امر معطر بودن بخار مایع شده حاصل از تیمار خشک‌کن را تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

- فشار خلأی بر روی روند خشک شدن تأثیر می‌گذارد به گونه‌ای که در فشار خلاء سرعت خشک شدن افزایش می‌یابد.
 - بکار بردن خشک‌کن خورشیدی-خلأی منجر به افزایش بهره‌وری از انرژی خورشید می‌شود و زمان خشک شدن را به صورت قابل توجهی کاهش می‌دهد؛ به طوری که کم‌ترین و بیش‌ترین زمان خشک شدن به ترتیب مربوط به خشک‌کن با ۱۸۸ دقیقه و در سایه با ۱۶۲۰ دقیقه بود.
 - با توجه به ارزیابی کیفی محصول ترکیب‌های اصلی اوکالیپتول و بورنتول بیش‌ترین مقادیر را داشتند، به طوری که بیش‌ترین مقدار اوکالیپتول برای تیمار خورشید (۳۰/۹۰۸) و بیش‌ترین مقدار بورنتول مربوط به تیمار سایه (۲۴/۶۹۸) به دست آمد.
- مدل اصلاح یافته Modified Henderson and Pabis با R^2 بزرگ‌تر از ۰/۹۶ و RMSE کوچک‌تر از ۰/۰۵ به خوبی توانست سینتیک خشک شدن محصول اسطوخودوس را مدل‌سازی کند.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت دانشگاه کردستان در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد انجام گرفته است. لذا بدین وسیله از دانشگاه کردستان بابت حمایت مالی نهایت تشکر و قدردانی را داریم.

تضاد منافع نویسندگان

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

- Preservation*, 45, e15290. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15290>
- Nguyen, T. P. & Songsermpong, S. (2022). Microwave processing technology for food safety and quality: A review. *Agriculture and Natural Resources*, 56, 57–72. doi.org/10.34044/j.anres.2021.56.1.06
- Zhang, W., Pan, Z., Xiao, H., Zheng, Z., Chen, C. & Gao, Z. (2018). Pulsed vacuum drying (PVD) technology improves drying efficiency and quality of Poria cubes. *Drying Technology*, 36, 908-921. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1362647>
- Vu, H. T. & Tsotsas, E. (2018). Mass and Heat Transport Models for Analysis of the Drying Process in Porous Media: A Review and Numerical Implementation. *International Journal of Chemical Engineering*, 2018, Article ID 9456418. <https://doi.org/10.1155/2018/9456418>
- Buzrul, S. (2022). Reassessment of Thin-Layer Drying Models for Foods: A Critical Short Communication. *Processes*, 10(1), 118. <https://doi.org/10.3390/pr10010118>
- Kuan, M., Shakir, Y., Mohanraj, M., Belyayev, Y., Jayaraj, S. & Kaltayev, A. (2019). Numerical simulation of a heat pump assisted solar dryer for continental climates. *Renewable Energy*, 143, 214-225. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.119>
- Argyropoulos, D. & Müller, J. (2014). Changes of essential oil content and composition during convective drying of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). *Industrial Crops and Products*, 52, 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.020>
- Homayounfar H, Amiri Chayjan R, Sarikhani H, Kalvandi R. (2022). Optimization of different drying systems for lavender leaves applying response surface methodology. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 22(3): 679-692. <https://doi.org/20.1001.1.16807073.2020.22.3.9.9>
- Baur, F.J. & Enslinger, L.G. (1977). *The Association of Official Analytical Chemists (AOAC)*. Journal of the American Oil Chemists' Society. 54, 171–172. <https://doi.org/10.1007/BF02670789>
- Abri, A., & Noroozi, M. (2022). Extraction and identification of Gallic acid and some active ingredients in *Lavandula angustifolia* plant and synthesis of silver nanoparticles by green method from the extract of this plant. *Applied Chemistry*, 17(63), 165-178. <https://doi.org/10.22075/chem.2021.20160.1824>
- Calín-Sánchez, Á., Lipan, L., Cano-Lamadrid, M., Kharaghani, A., Masztalerz, K., Carbonell-Barrachina, Á. A. & Figiel, A. (2020). Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*, 9, 1261. <https://doi.org/10.3390/foods9091261>
- Nukulwar, M. R. & Tungikar, V. B. (2021). A review on performance evaluation of solar dryer and its material for drying agricultural products. *Materials Today. Proceedings*, 46, 345-349. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.354>
- Kumar, P. & Singh, D. (2020). Advanced technologies and performance investigations of solar dryers: A review. *Renewable Energy Focus*, 35, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2020.10.003>
- Pagukuman, B. N. & Wan Ibrahim, M. K. (2022). A review of the significance effect of external factors of the solar dryer design to dried foods product quality. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 20(6), 1765-1786. <https://doi.org/10.1108/JEDT-01-2021-0033>
- Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A. & Anandharamakrishnan, C. (2020). Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy*, 208, 321-344. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.098>
- Gulcimen, F., Karakaya, H. & Durmus, A. (2016). Drying of sweet basil with solar air collectors. *Renewable Energy*, 93, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.033>
- Dalda Şekerci, A., Çetin, N., Beyzi, E., Karaman, K. & Gülsen, O. (2023). Drying Methods Affect the Drying Kinetics, Bioactive Characteristics and Essential Oil Composition of Lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) and Lavandin (*Lavandula hybrida*). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 26(1), 1-18. DOI: [10.1080/0972060X.2022.2160280](https://doi.org/10.1080/0972060X.2022.2160280)
- Hafezi, N., Sheikhdavoodi, M. J., Sajadiye, S. M. & Ferdavani, M. (2014). Evaluation of energy consumption of potato slices drying using vacuum-infrared method. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2, 2651-2658. (No Doi)
- Dash, K. K., Shangpliang, H., Bhagya Raj, G. V. S., Chakraborty, S. & Sahu, J. K. (2021). Influence of microwave vacuum drying process parameters on phytochemical properties of sohiong (*Prunus nepalensis*) fruit. *Journal of Food Processing and*

- Liu, Z.-L., Xie, L., Zielinska, M., Pan, Z., Deng, L.-Z., Zhang, J.-S., Gao, L., Wang, S.-Y., Zheng, Z.-A. & Xiao, H.-W. (2022). Improvement of drying efficiency and quality attributes of blueberries using innovative far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102948. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102948>
- Ghasemi Pirbalouti, A., Mahdad, E. & Craker, L. (2013). Effects of drying methods on qualitative and quantitative properties of essential oil of two basil landraces. *Food Chemistry*, 141, 2440-2449. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.098>
- Salehi, B., Sharifi-Rad, J., Quispe, C., Llaique, H., Villalobos, M., Smeriglio, A., Trombetta, D., Ezzat, S. M., Salem, M. A., Zayed, A., Salgado Castillo, C. M., Yazdi, S. E., Sen, S., Acharya, K., Sharopov, F. & Martins, N. (2019). Insights into Eucalyptus genus chemical constituents, biological activities and health-promoting effects. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 609-624. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.003>