

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

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

چکیده

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-خلأی 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-خلأی 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-خلأی با ۱۸۸ دقیقه و سایه با ۱۶۲۰ دقیقه بود. سینتیک خشک‌کردن در خشک‌کن توسعه داده شده مدل‌سازی شد. مدل اصلاح یافته هندرسون و پابیس با مقادیر R^2 بیش‌تر از ۰/۹۶ و مقدار خطای RMSE کم-تر 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 بورنتول بیش‌ترین مقادیر را داشتند، به طوری که بیش‌ترین مقدار اوکالیپتول برای تیمار خشک‌کردن در مقابل خورشید ۳۰/۹ درصد و بیش‌ترین مقدار بورنتول مربوط به تیمار سایه ۲۴/۶ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کردن، بازده اسانس، محتوای رطوبتی، مدل‌سازی ریاضی.

ارجاع: حاجی‌ویسه ن.، بهروزی خزاعی ن. و صمیمی اخیج‌هانی ه. ۱۴۰۳. بررسی سینتیک خشک‌کردن و اسانس استخراجی اسطوخودوس در خشک‌کن خورشیدی تحت خلأ. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۴: ۹۹-۹۹. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2025.14662.693>

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.

* نویسنده مسئول: n.behroozi@uok.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴

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 نعناعیان 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 میکروویو، 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 محصولاتی مانند 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 بادرنجوبه 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 آنتی‌اکسیدانی 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 میدل 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

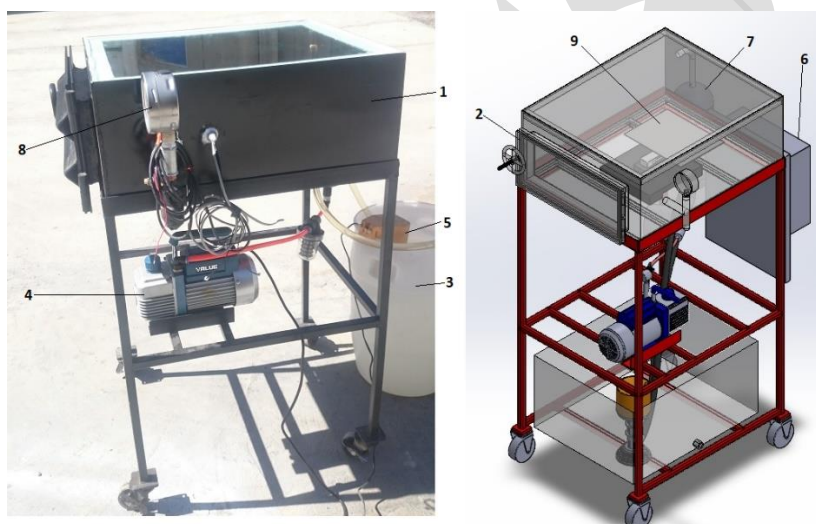
مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی کارایی خشک‌کن خورشیدی-خلاتی 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.

مقدار محتوای رطوبتی اولیه محصول بر اساس استاندارد AOAC، ۷۶٪ بر پایه نمونه تر بود (Baur & Ensminger, 1977). برای انجام هر آزمایش ۱۵۰ گرم از برگ‌ها، گل‌ها و ساقه‌های نازک این گیاه جداسازی شد به صورت یکنواخت داخل سینی پخش شد.

خشک‌کن خورشیدی - خلّاتی

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



شکل ۱- نمای کلی خشک‌کن: (۱) محفظه خشک‌کن، (۲) درب خشک‌کن، (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 جمع‌کننده 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 میلی‌بار 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 داخل محفظه در هنگام خاموش کردن پمپ به دلیل

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 $a, b, c, k, k_0, k_1, g, h$ و n 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:

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

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

نمونه‌های خشک شده محصول به آزمایشگاه اسانس‌گیری گروه باغبانی دانشگاه کردستان انتقال داده شد و پس از آسیاب و توزین محصول (3 ± 40 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 خشک‌کن‌ها و نیز برای پیش

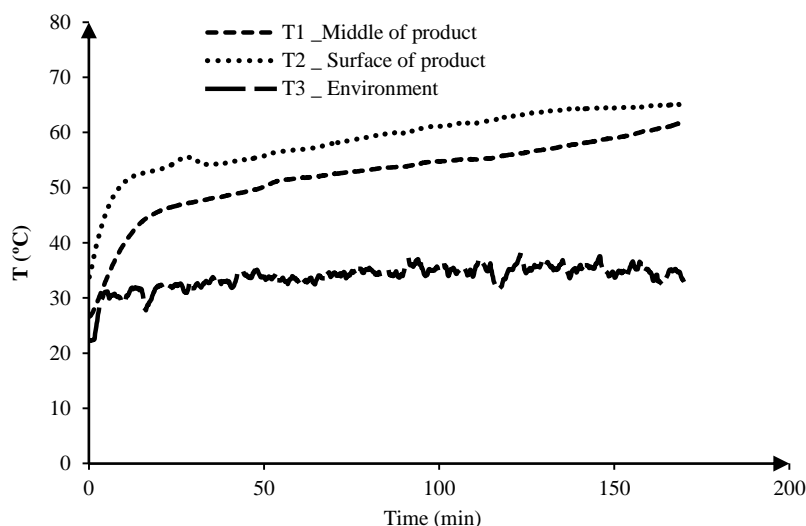
جدول ۱- مدل‌های ریاضی استفاده شده برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن (Buzrul, 2022)

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 difsdusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kbt)$
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

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 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



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

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 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 خلائی 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 خلائی ۳۰ kPa

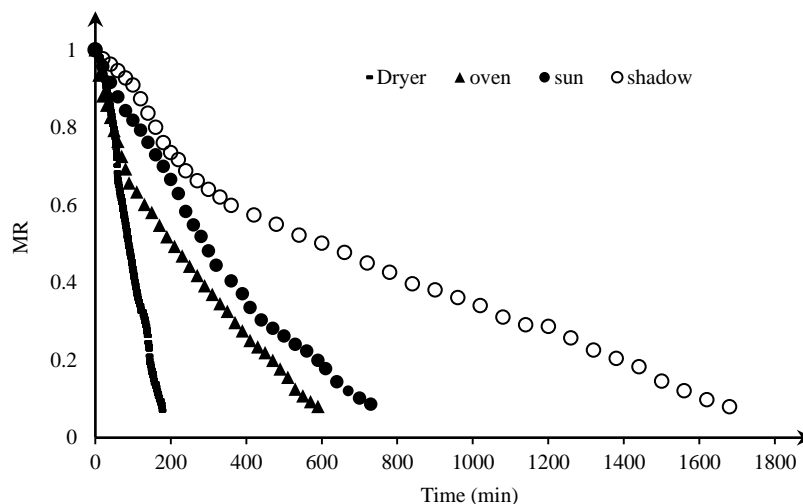
ΔT	T_3	T_2	T_1^*	
۱۶/۶۰	۲۲/۲۰	۳۸/۸۰	۲۶	کمینه
۲۹/۴۰	۳۵/۸۰	۶۵/۲۰	۵۹/۲۰	بیشینه
۲۴/۹۰	۳۳/۸۰	۵۸/۷۰	۵۲/۲۰	میانگین

*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 نمی‌کند و بدین خاطر نتایج مدل‌سازی با معادله اصلاح یافته Modified



شکل ۴- تغییرات محتوای رطوبتی نسبت به زمان

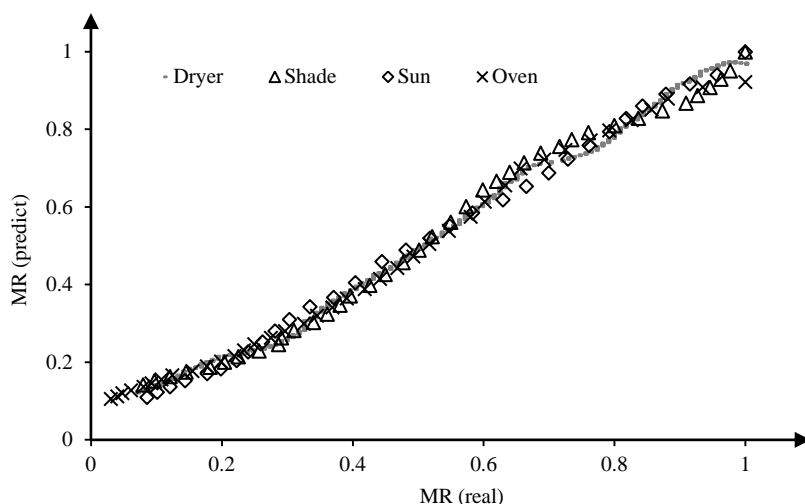
جدول ۳- نتایج مدل‌سازی ریاضی

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

جدول ۵ نشان می‌دهد که درصد اسانس حاصل شده برای اسطوخودوس در تیمارهای سایه، خورشید، خشک‌کن با فشار ۳۰ کیلوپاسکال و آن به ترتیب ۲، ۱/۷، ۲/۱ و ۰/۵ میلی‌لیتر بر ۱۰۰ گرم ماده خشک است. این مقادیر نشان می‌دهد که برای اسطوخودوس مقدار درصد اسانس به دست آمده در تیمار خشک‌کن بیش‌تر از مقابل خورشید به صورت باز است. همچنین 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 آن به دلیل قرارگیری محصول در

معرض جریان هوای گرم، کم‌ترین مقدار اسانس حاصل شده است. نتایج مشابهی توسط سایر محققین هم گزارش شده است (Ghasemi Pirbalouti et al., 2013). همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است مقدار بخار مایع شده برای تیمار ۳۰ کیلوپاسکال، ۳۸ سی‌سی 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 می‌توان به فرار بودن ترکیبات معطر اسطوخودوس نسبت داد.

جدول ۵ نشان می‌دهد که درصد اسانس حاصل شده برای اسطوخودوس در تیمارهای سایه، خورشید، خشک‌کن با فشار ۳۰ کیلوپاسکال و آن به ترتیب ۲، ۱/۷، ۲/۱ و ۰/۵ میلی‌لیتر بر ۱۰۰ گرم ماده خشک است. این مقادیر نشان می‌دهد که برای اسطوخودوس مقدار درصد اسانس به دست آمده در تیمار خشک‌کن بیش‌تر از مقابل خورشید به صورت باز است. همچنین 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 آن 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 پاییس

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

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

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

جدول ۶- ترکیب‌های شیمیایی اسانس روغنی گیاه اسطوخودوس

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

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2021.104327>
- Ezzoubi, Y., Boustia, D. & Farah, A. (2020). A Phytopharmacological review of a Mediterranean plant: *Lavandula stoechas* L. *Clinical Phytoscience*, 6, 9. <https://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. <https://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
- 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.

حساس است در سایه بیش‌ترین مقدار را داشت. بر اساس نتایج به دست آمده با توجه به تغییرات مقدار بورنئول 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 خلّاتی بر روی روند خشک شدن تأثیر می‌گذارد به گونه‌ای که در فشار خلاء سرعت خشک شدن افزایش می‌یابد.
 - بکار بردن خشک‌کن خورشیدی خلّاتی 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 بورنئول بیش‌ترین مقادیر را داشتند، به طوری که بیش‌ترین مقدار اوکالیپتول برای تیمار خورشید (۳۰/۹۰۸) و بیش‌ترین مقدار بورنئول 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.

تشکر و قدردانی

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

منابع

- Bakhtiarizade, M. & Souri, M. K. (2019). Beneficial effects of rosemary, thyme and tarragon essential oils on postharvest decay

- 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. & Ensminger, 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>
- 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., Llaïque, 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>
- <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. & Gülşen, 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.
- 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 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>

Research paper

Evaluation of drying kinetic and extracting essential oil of lavender in solar dryer under vacuum

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

Abstract

In this research, considering the importance of medicinal plants in the food and pharmaceutical industries and the undeniable role of the drying process in their processing, a solar-vacuum drying system was implemented and evaluated for drying medicinal plants. The system includes a drying chamber, a cold water chamber, a vacuum pump, temperature sensors, pressure gauges, an Arduino control board, a water pump, a condenser, and control valves. Experiments were conducted on oregano products at a pressure of 30 kPa in the solar-vacuum dryer and drying under sunlight, shade, and oven to evaluate the dryer and drying kinetics. The results of the drying kinetics study showed that the minimum and maximum drying times were 188 minutes for the dryer and 1620 minutes for the shade, respectively. The drying kinetics in the developed dryer were modeled. The modified Henderson and Pabis model with an R^2 value greater than 0.96 and an RMSE value less than 0.05 was selected as the best-performing model. GC-MS was used in various experiments to evaluate the quality of the dried essential oil. The main compounds, eucalyptol and borneol, had the highest values. The highest amount of eucalyptol was obtained for the solar treatment at 30.9%, and the highest amount of borneol was associated with the shade treatment at 24.6%.

Keywords: Drying process, Moisture content, Modeling, Extraction efficiency.

Citation: Hajivaise N. Behrooz-Khazaei N. and Samimi Akhijahani H. Evaluation of drying kinetic and extracting essential oil of lavender in solar dryer under vacuum. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery, 34: ??-??. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2025.14662.693>

1- Graduated M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

* Corresponding Author: n.behrooz@uok.ac.ir

Received: 2024/01/14

Accepted: 2025/01/18

<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2025.14662.693>