

مقاله پژوهشی

تأثیر شرایط مختلف خشک کردن بر ضریب پخش رطوبت مؤثر، انرژی مصرفی و راندمان استخراج اسانس بادرنجبویه

حامد کرمی^۱، علی نجات لرستانی^{۲*}، رضا تحویلیان^۳

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۳. دانشیار، گروه فارماکولوژی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه

(تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۹، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۸/۱۲/۲۰، تاریخ پذیرش: ۹۹/۳/۱۳)

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر دما و دبی جابه‌جایی هوا بر ضریب پخش رطوبت مؤثر، انرژی مصرفی ویژه، نرخ خشک کردن، نسبت رطوبت و بازده استخراج اسانس در خشک کن هیبریدی به صورت لایه نازک برای گیاه دارویی بادرنجبویه *Melissa officinalis* بود. آزمایش در چهار دمای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ و سه دبی هوای ۱ m/s، ۱/۵ و ۲ انجام شد. حداکثر مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در دبی هوای ۱/۵ m/s و دما هوای ورودی ۷۰ °C برابر با $1/05 \times 10^{-11}$ (m/s) به دست آمد. همچنین، حداقل مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در دبی هوای ۱ m/s و دما هوای ورودی ۴۰ °C برابر با $7/1 \times 10^{-12}$ (m/s) به دست آمد. کمترین میزان انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز (۷۵/۶۵ mj/kg) در دمای ۴۰ °C و دبی هوای ورودی ۱ m/s، در حالی که شرایط متناظر برای بیشترین مقدار آن (۳۲۶/۷۶ mj/kg) در دمای ۷۰ °C و دبی هوای ورودی ۲ m/s به دست آمد. بیشترین میزان اسانس استحصالی مربوط به دمای ۴۰ °C و دبی جابه‌جایی هوای ۱ m/s تا ۱/۵ با مقدار تقریبی ۰/۵ ml بر اساس حجمی (v/w) به دست آمد و با افزایش دما از ۴۰ °C به ۷۰ °C میزان اسانس استحصالی به طور معنی‌داری کاهش یافت.

کلیدواژه‌ها: انرژی مصرفی، اسانس، بادرنجبویه، ضریب پخش رطوبت مؤثر، خشک‌کن.

۱. مقدمه

گیاه بادرنجبویه، با نام علمی *Melissa officinalis* متعلق به خانواده نعنائیان (*Lamiaceae*) است. بوی لیمو از مشخصات این گیاه است و به همین دلیل به آن *Lemon balm* هم گفته می‌شود. این گیاه چندساله بوده و بلندی آن به ۳۰ cm الی ۱۲۰ می‌رسد. برگ‌های آن متقابل و دندانه‌دار به رنگ سبز تیره بوده و گل‌های آن در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد ظاهر می‌شود و در مناطق مختلف ایران از جمله تهران، رشت، رودبار، استان‌های غربی، کرمانشاه، کرج، قزوین، گرگان و برخی مناطق آذربایجان پراکنش دارد [۱].

در مطالعات متعددی که بر روی این گیاه انجام گرفته، خواص گوناگونی برای آن به اثبات رسیده است. از رایج‌ترین این خواص می‌توان به آرام بخشی، آنتی اکسیدانی، ضد اسپاسمی، ضد نفخ، ضد باکتری، ضد ویروسی و ضد التهابی آن اشاره کرد [۲].

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگاه‌داری محصولات کشاورزی است. این فرآیند اهمیت زیادی در فرآوری گیاهان دارویی دارد، زیرا گیاهان دارویی اسانس‌دار اگر بلافاصله خشک نشوند و یا اسانس آن‌ها استخراج نشود، مواد مؤثره و ترکیب‌های فرآرشان را از دست می‌دهند. تحقیقات نشان می‌دهد ترکیب‌های معطر گیاهان، تحت تأثیر روش‌های فرآوری قرار می‌گیرند. خشک کردن گیاه بلافاصله پس از برداشت، به حفظ رنگ و مواد معطر گیاه کمک می‌کند [۳].

در گذشته از نور خورشید به طور مستقیم برای خشک کردن انواع محصولات کشاورزی و مواد غذایی استفاده می‌شد، اما در استفاده از این روش مشکلات زیادی وجود دارد که عبارت‌اند از: تغییرات نامناسب در کیفیت غذا، عدم کنترل کافی در فرآیند خشک کردن، طولانی بودن زمان خشک شدن و غیربهداشتی بودن محصول. مشکلاتی از این قبیل، استفاده از تکنولوژی جدید در فرآیند خشک کردن را ضروری می‌سازد. خشک‌کن‌های صنعتی نسبت به روش‌های سنتی، مزایایی همچون برداشت به موقع محصول، کاهش تلفات در مزرعه، برنامه‌ریزی برای برداشت در شرایط نامطلوب آب و هوایی، افزایش مدت انبارمانی مواد غذایی و محصولات کشاورزی دارند [۴].

تحقیقات متعددی درباره خشک کردن محصولات کشاورزی، از جمله سبزی‌ها انجام شده است. در تحقیقی، بررسی رفتار خشک کردن لایه نازک برگ پونه در درجه حرارت‌های مختلف $^{\circ}\text{C}$ ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ و سه دبی هوای ورودی m/s ۱، ۱/۵ و ۲ در خشک‌کن هیبریدی نشان داد که با افزایش دما و دبی هوای ورودی، به طور چشمگیری باعث کاهش زمان خشک کردن برگ پونه شد؛ همچنین مدل آغباشلو مناسب‌ترین مدل برای برازش داده‌ها تشخیص داده شد [۵]. در تحقیقی دیگر، بررسی رفتار خشک کردن برگ‌های جعفری در خشک‌کن همرفتی در دماهای $^{\circ}\text{C}$ ۵۶، ۶۷، ۷۵ و ۹۳ با دبی جابه‌جایی هوای m/s ۱ و خشک کردن سنتی (در زیر سایه) مشاهده شد که در منحنی‌های خشک کردن دوره‌ای، خشک کردن با دبی ثابت وجود ندارد و فرآیند خشک کردن همواره با کاهش رطوبت در واحد زمان همراه است [۶]. در تحقیقی دیگر، طی بررسی رفتار خشک کردن لایه نازک برگ شوید و جعفری در درجه حرارت‌های مختلف $^{\circ}\text{C}$ ۴۰، ۵۰ و ۶۰ در خشک‌کن کابینتی نشان داد که با افزایش دما تا $^{\circ}\text{C}$ ۶۰، به طور قابل توجهی باعث کاهش زمان خشک کردن این گیاهان شد؛ همچنین مدل لگاریتمی مناسب‌ترین مدل برای برازش داده‌ها تشخیص داده شد [۷]. علاوه بر موارد فوق، تحقیقاتی نیز در ارتباط با خشک کردن نعنای، برگ چغندر، برخی از سبزی‌ها، گیاهان دارویی، چای، برگ اسفناج، آویشن و رزماری صورت گرفته است [۸-۱۸]. با توجه به کاربرد وسیع اسانس‌ها در صنایع غذایی، دارویی، بهداشتی و صنعتی که منشاء اغلب آن‌ها گیاهان هستند، اولین بار تحقیق در مورد خصوصیات ترمودینامیکی و تأثیر شرایط مختلف خشک کردن بر اسانس گیاه بادرنجبویه، به عنوان یکی از گیاهان مهم اسانس‌دار، انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

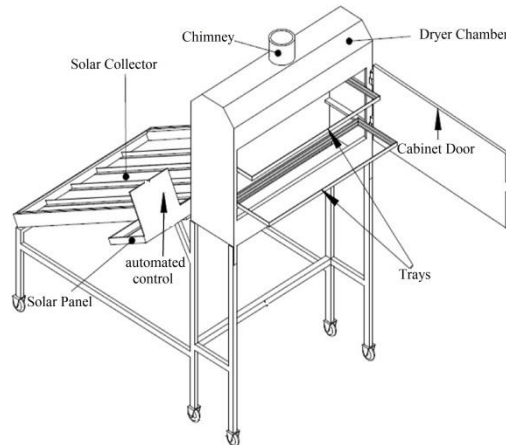
۱.۲. انجام آزمایش‌ها

به منظور مقایسه مدل‌های مرسوم خشک کردن و بررسی تأثیر روش‌های خشک کردن گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis*)، آزمایشی به مدت ۳۶ روز انجام شد. برای انجام این تحقیق، برگ و سرشاخه‌های گیاه از فاصله ۴ تا ۵

کشور تایوان، با دقت اندازه‌گیری $\pm 1\%$ و حساسیت 0.1 m/s استفاده شد. برای اجرای فرآیند خشک کردن، میکرو کنترلر AVR مدل ATMEGA 8 ساخت کشور چین مورد استفاده قرار گرفت که توسط نرم افزار CODEVISION برنامه نویسی شده بود [۱۹].

۳۰۰ gr گیاه بادرنجبویه به صورت کامل، همراه با ساقه و برگ بر روی سینی‌های توری خشک‌کن به صورت تک لایه قرار گرفت. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار، کلیه آزمایش‌ها ۳۰ min بعد از روشن کردن سیستم شروع شد. سپس سینی حاوی نمونه‌ها در محفظه خشک‌کن قرار داده شد. نحوه خشک کردن به این صورت است که فن، هوا را از روی جمع کننده که به وسیله گرم‌کن الکتریکی و جمع کننده گرم شده است، به داخل محفظه سینی‌ها انتقال می‌دهد. جریان هوا هنگام گذر از توده، رطوبت نمونه را جذب و باعث گرم شدن آن می‌شود؛ بدین ترتیب افزایش دما باعث تسریع در خروج آب از بافت نمونه و در نتیجه خشک کردن محصول می‌شود [۱۹].

سطح زمین و از مزرعه آزمایشی گیاهان دارویی دانشکده علوم پزشکی کرمانشاه برداشت و تمامی آزمایش‌ها با سه سطح دبی هوا (1 m/s ، $1/5$ و 2) و 4 سطح دمایی (40°C ، 50 ، 60 و 70) با سه تکرار انجام شد. نمونه‌ها با رطوبت اولیه در حدود $78 \pm 2\%$ به صورت روزانه برای خشک شدن از سطح مزرعه برداشت شد و بلافاصله به محل آزمایش انتقال داده شد. ساختمان خشک‌کن مورد استفاده در این تحقیق، در شکل (۱) مشاهده می‌شود که شامل یک جمع کننده خورشیدی به همراه یک المنت برقی 1000 V برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه خشک‌کن، ۵ حسگر دمای (LM75) با دامنه اندازه‌گیری دما از 55°C تا 125 و دقت اندازه‌گیری $\pm 2^\circ \text{C}$ همچنین از ۲ حسگر رطوبت (HS1101) با دقت اندازه‌گیری $\pm 2\%$ برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی جا به جایی هوا است. فن خشک‌کن دارای قابلیت تغییر میزان هوای ورودی به محفظه خشک‌کن است. برای اندازه‌گیری دبی جریان جا به جایی هوا به محفظه خشک‌کن، از یک دبی‌سنج پره‌ای مدل AVM-07 ساخت



شکل (۱) طرحواره خشک‌کن هیبریدی ساخته شده

Fig 1. Schematic of Constructed Hybrid Dryer

نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه، طی خشک کردن از معادله (۱) محاسبه شد. نسبت رطوبت (MR) شکل، بدون بعد محتوای رطوبتی است. این پارامتر بیانگر رطوبت محصول در زمان t نسبت به رطوبت اولیه محصول است [۲۰، ۲۱]:

نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه، طی خشک کردن از معادله (۱) محاسبه شد. نسبت رطوبت (MR) شکل، بدون بعد محتوای رطوبتی است. این پارامتر بیانگر رطوبت محصول در زمان t نسبت به رطوبت اولیه محصول است [۲۰، ۲۱]:

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

(۱) به صورت معادله (۲) ساده می‌شود [۲۲]:

$$(۶) \quad MR = \frac{M_d}{M_0} \quad (۲)$$

آهنگ تبخیر رطوبت عبارت است از مقدار رطوبت خارج شده از واحد سطح ماده خشک شده در واحد زمان که نشان‌دهنده دبی تبخیر رطوبت از محصول است. آهنگ تبخیر رطوبت با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$DR = \frac{(M_{t+dt} - M_t)}{dt} \quad (۳)$$

که در این معادله، مقدار رطوبت در زمان (t+dt) و M_t میزان رطوبت در زمان t است که بر پایه خشک محاسبه می‌شوند.

قانون دوم فیک فرآیند انتقال جرم در خشک کردن را توصیف می‌کند. قانون دوم فیک برای شرایط لایه نازک در محصولات با فرض ناچیز بودن اثرات دما و مجموع گرادیان فشار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند. ضریب پخش رطوبت مؤثر با استفاده از معادله (۴) محاسبه شد [۲۳]:

$$MR = \frac{(M_i - M_e)}{M_j - M_e} = \quad (۴)$$

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

که در آن MR نسبت رطوبت، n تعداد جملات معادله (۱)، ۲، ۳، ...، t زمان خشک شدن (ثانیه)، M_i مقدار رطوبت در یک زمان (بر پایه خشک)، M_j مقدار رطوبت اولیه (بر پایه خشک)، M_e مقدار رطوبت تعادل (بر پایه خشک)، L نیمی از ضخامت لایه (متر) و D_{eff} ضریب پخش مؤثر (m^2/s) است. در صورت طولانی بودن زمان خشک شدن، تنها جمله اول سری را می‌توان در نظر گرفت. در این شرایط، معادله (۴) به صورت معادله (۵) خلاصه می‌شود:

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

با اعمال لگاریتم از طرفین معادله می‌توان آن را به صورت خطی معادله (۶) درآورد [۲۲]:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M_i - M_e}{M_j - M_e}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$$

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M_i - M_e}{M_j - M_e}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$$

حال می‌توان ضریب پخش مؤثر رطوبت را از روش شیب معادله (۷) محاسبه کرد. در این روش، با ترسیم مقدار لگاریتم، نسبت رطوبت حاصل از داده‌های آزمایشگاهی در مقابل زمان، خط ثابتی با شیب K به دست می‌آید:

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (۷)$$

انرژی مصرفی ویژه به صورت مقدار انرژی مصرفی در واحد جرم رطوبت خارج شده از نمونه آزمایشی تعریف می‌شود. در این پژوهش، انرژی مصرفی ویژه با استفاده از معادله (۸) محاسبه شد.

$$SEC = (C_{pa} + C_{pv} h_a) Q t \frac{(T_{in} - T_{am})}{m_w V_a} \quad (۸)$$

که در آن SEC انرژی مصرفی ویژه بر حسب J/kg ، C_{pa} و C_{pv} به ترتیب ظرفیت گرمایی بخار آب و هوا و برابر با ۱۰۴/۱۶ و ۱۸۲۸/۸ ($J/kg^{\circ}C$)، Q دبی هوای ورودی به محفظه خشک‌کن بر حسب m^3/min ، t زمان کل خشک کردن بر حسب min، h_a رطوبت مطلق هوا (کیلوگرم بخار/کیلوگرم هوای خشک)، T_{in} و T_{am} به ترتیب دمای هوای ورودی به خشک‌کن و دمای محیط بر حسب $^{\circ}C$ ، m_w مقدار انتقال جرم بر حسب kg و V_h حجم ویژه هوا بر حسب m^3/kg است.

۲.۲. استخراج اسانس به روش تقطیر با آب

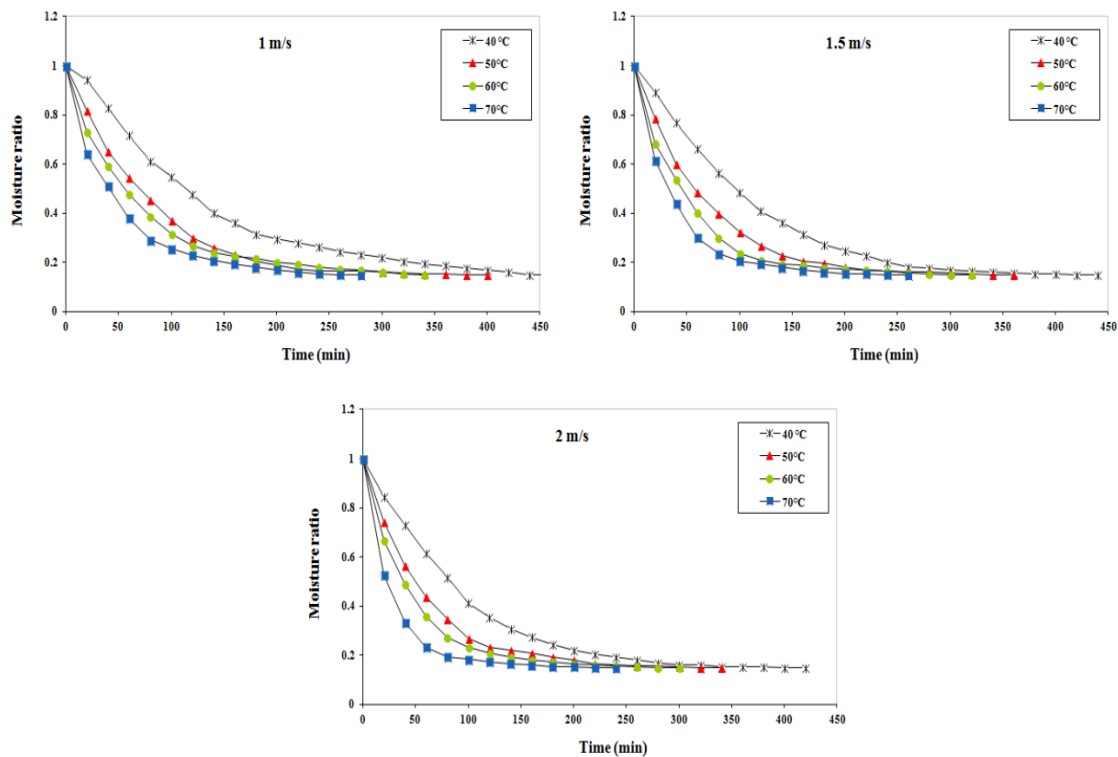
برای اسانس‌گیری از دستگاه کلونجر و با روش تقطیر با آب استفاده شد. مقدار بادرنجیویه خشک شده مورد استفاده برای این تحقیق ۱۰۰ gr و مقدار آب مورد استفاده در هر آزمایش ۵۰۰ ml بود. مدت زمان اسانس‌گیری برای هر تیمار پس از به جوش آمدن ۲ ساعت بود. میزان اسانس به دست آمده از هر تیمار، به صورت حجم اسانس بر حسب میلی‌لیتر (V/W%) محاسبه شد [۱۰، ۵].

۳. نتایج و بحث

۱.۳. بررسی سینتیک خشک شدن

۲۴۰ min برای دمای 70°C و دبی هوای 2 m/s حاصل شد و بیشترین زمان خشک شدن نیز برابر 420 min و برای دمای 40°C و دبی هوای ورودی 1 m/s به دست آمد. به طور کلی می‌توان گفت افزایش دمای ورودی منجر به انتقال بیشتر جرم و حرارت و کاهش رطوبت شدیدتر می‌شود که این امر، منجر به کاهش زمان خشک کردن می‌شود. با این حال، میزان کاهش رطوبت، به علت بیشتر شدن انرژی جنبشی مولکول‌ها و افزایش انتقال جرم، افزایش یافت. همچنین افزایش دبی جابه‌جایی هوا ورودی از 1 m/s تا 2 m/s ، سبب کاهش مدت‌زمان خشک کردن گیاه بادرنجبویه شد. در دماهای بالا، تفاوت بین مدت‌زمان خشک کردن در دبی‌های متفاوت قابل نظر کردن است در حالی که این تفاوت در دماهای پایین بیشتر است؛ به عبارت دیگر، تأثیر دبی جا به جایی هوا بر مدت زمان خشک کردن در دماهای پایین بیشتر است.

مطالعه سینتیک افت رطوبت برای رسیدن به اطلاعاتی درباره زمان مورد نیاز برای خشک کردن صحیح محصول ضروری است. سینتیک افت رطوبت در مواد غذایی به عوامل متعددی مانند، دما، رطوبت اولیه محصول و غیره وابسته است و با تغییر شرایط فرآیند سینتیک افت رطوبت نیز تغییر می‌کند. محتوای رطوبت اولیه بادرنجبویه در حدود 78% بر پایه خشک بود که فرآیند خشک کردن تا رطوبت نهایی 12% بر پایه خشک انجام شد. شکل (۲) منحنی‌های سینتیک کاهش رطوبت نمونه‌ها را به صورت محتوی رطوبت بر پایه خشک (گرم آب بر گرم ماده خشک) در طول زمان خشک شدن و در سطوح مختلف نشان می‌دهد. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که محتوی رطوبت نمونه‌های بادرنجبویه در طول خشک شدن به صورت مداوم و نمایی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده، کمترین زمان خشک شدن برابر



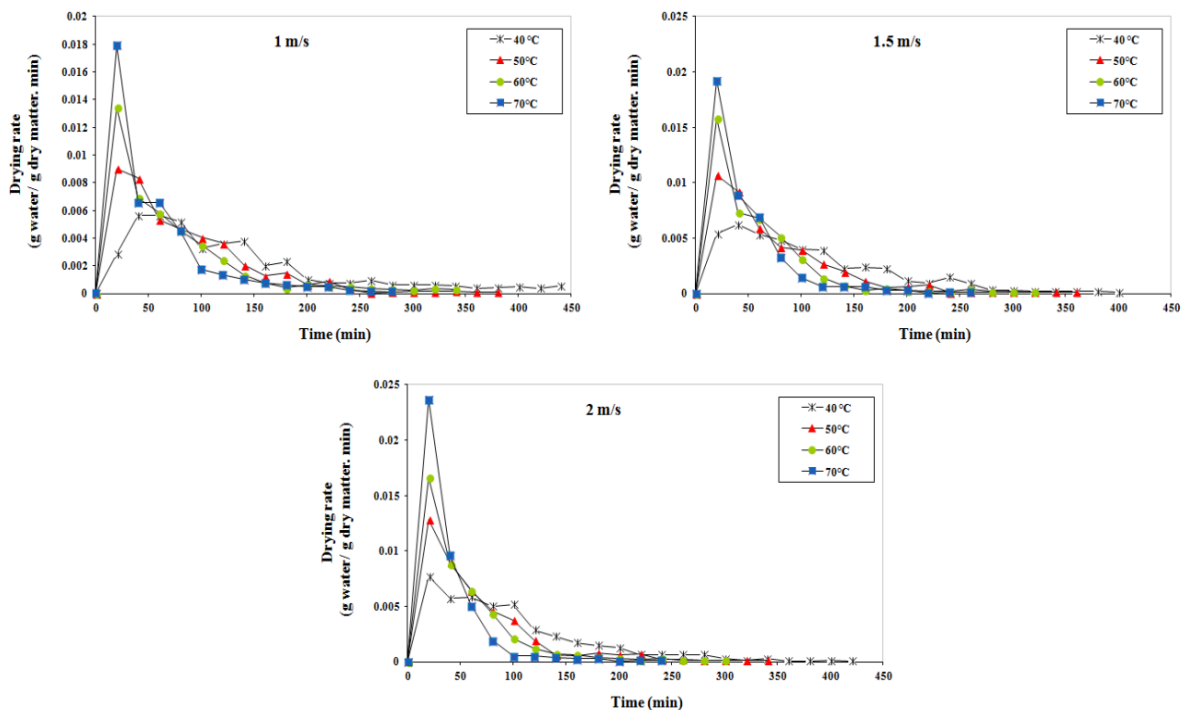
شکل (۲) تأثیر دما بر نسبت رطوبت در سطوح مختلف دبی هوا در طی خشک شدن بادرنجبویه

Fig 2. Effect of temperature on MR at different level of air velocity during drying of *Melissa officinalis*

۲.۳. نرخ خشک کردن

همچنین در زمان‌های اولیه خشک شدن، به علت افزایش دمای ماده و وجود آب کافی در حوالی سطح ماده، نرخ خشک شدن افزایشی است تا اینکه آب در حوالی سطح ماده کاهش می‌یابد و نفوذ آب از درون ماده به سطح شروع می‌شود که از این لحظه به بعد نفوذ رطوبت، کنترل‌کننده نرخ خشک شدن می‌شود، لذا نرخ خشک شدن کاهش می‌شود؛ بنابراین در این روش خشک کردن با کاهش محتوای رطوبت محصول در طول فرآیند خشک شدن، نرخ از دست دادن رطوبت کاهش می‌یابد.

در شکل (۳) مشاهده می‌شود که آهنگ تبخیر در لحظات اولیه با گذشت زمان نسبت به دبی افزایش می‌یابد و به نقطه اوجی که بیشترین مقدار آهنگ تبخیر است می‌رسد، به تدریج با پیشرفت زمان، محتوی رطوبت و نرخ رطوبت به طور طبیعی کاهش می‌یابد. محصول، عمده رطوبت خود را در لحظات اولیه فرآیند خشک کردن از دست می‌دهد و برای از دست دادن باقیمانده رطوبت، به مدت زمان زیادی نیاز است.



شکل (۳) تأثیر دما بر نرخ خشک شدن در سطوح مختلف دبی هوا در طول خشک شدن بادرنجبویه
Fig 3. Effect of temperature on Drying rates (DR) at different level of air velocity during drying of *Melissa officinalis*

حداکثر مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در دبی هوا، $1/5 \text{ m/s}$ و دمای هوای ورودی 70°C برابر با $1/06 \times 10^{-11}$ (m^2/s) به دست آمد. همچنین، حداقل مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در دبی هوا یک متر بر ثانیه و دمای هوای ورودی 40°C برابر با $7/1 \times 10^{-12}$ (m^2/s) به دست آمد. در این روش خشک کردن با افزایش دمای ورودی و دبی هوا ضریب پخش رطوبت مؤثر افزایش یافت. ضریب پخش رطوبت مؤثر، به دما و ترکیب مواد بستگی دارد. با افزایش

۳.۳. ضریب پخش رطوبت مؤثر

مقادیر ضریب پخش رطوبت مؤثر (D_{eff}) برای دماهای مختلف و دبی هوا، از معادله (۶) محاسبه شد، این مقادیر برای تمام سطوح درجه حرارت هوا و دبی هوا در جدول (۱) نشان داده شده است. مقادیر ضریب پخش رطوبت مؤثر در آزمایش‌ها، برای محصولات کشاورزی و مواد غذایی در محدوده بین 10^{-8} و $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ است که مقادیر به دست آمده برای بادرنجبویه نیز در این محدوده قرار داشت [۲۴].

دمای داخل خشک کن، میزان ضریب پخش رطوبت مؤثر افزایش یافت. دلیل وقوع این مسئله، تأثیر بارز دمای هوای ورودی در ایجاد جنبش مولکولی، افزایش بخار آب داخل محصولات، افزایش مکش سطحی و کاهش رطوبت تعادلی سطح محصولات در افزایش ضریب پخش رطوبت مؤثر است [۲۵].

جدول (۱) اثر دما و دبی هوای ورودی بر مقادیر ضریب پخش رطوبت مؤثر (D_{eff}) در خشک کردن بادرنجبویه
Table 1. The effect of temperature and at different level of air velocity on effective moisture diffusivity (D_{eff}) values during drying of *Melissa officinalis*

دبی هوا (متر بر ثانیه) air velocity (m/s)	دما (درجه سانتی گراد) Temperature (°C)				R^2
	40	50	60	70	
1	7.1×10^{-12}	7.7×10^{-12}	8.5×10^{-12}	1.03×10^{-12}	0.95
1.5	7.61×10^{-12}	8.36×10^{-12}	8.71×10^{-12}	1.06×10^{-12}	0.91
2	7.69×10^{-12}	8.53×10^{-12}	9.25×10^{-12}	1.05×10^{-12}	0.99

شده به دست آمد. انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز با افزایش دمای هوا و دبی هوای ورودی، افزایش پیدا کرد. با افزایش دبی هوا، سطح محصول خنک شده، دمای آن کاهش یافته و زمان خشک شدن افزایش می‌یابد، در نتیجه انرژی ویژه مصرفی نیز افزایش پیدا می‌کند؛ ضمن این که افزایش دبی هوا خود مستلزم صرف انرژی بیشتر است.

۴.۳. انرژی مصرفی ویژه

مقادیر مصرف انرژی برای بادرنجبویه در دما و دبی‌های هوای ورودی در جدول (۲) نشان داده شده است. انرژی مصرفی ویژه برای محصول بادرنجبویه در خشک‌کن هیبریدی، از معادله (۸) محاسبه شد. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه برای بادرنجبویه، به ترتیب در دبی هوا ۲ m/s و دما هوای ورودی 70°C ، برابر با 326.76 mj/kg آب خارج

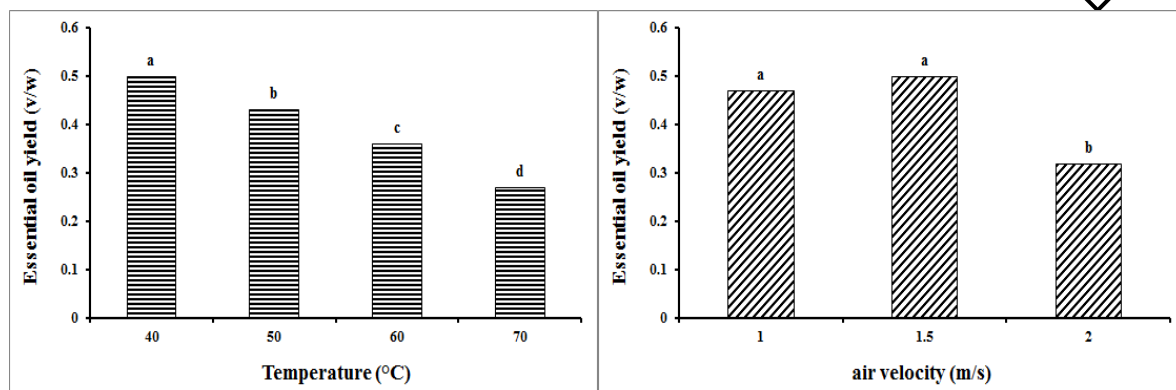
جدول (۲) تأثیر درجه حرارت و دبی هوای ورودی بر انرژی مصرفی ویژه در خشک کردن لایه نازک بادرنجبویه
Table 2. The Effect of Temperature and air velocity on Specific Consumption Energy during drying of *Melissa officinalis*

دبی هوا (m/s)	دما (°C)			
	40	50	60	70
1	75.653	136.74	187.12	194.24
1.5	108.12	183.89	248.54	268.50
2	136.02	230.69	307.16	326.76

این دبی هوا به دست آمد. بیشترین میزان اسانس استخراج شده مربوط به دمای 40°C ، با میزان اسانس 0.5 ml براساس وزن حجمی (v/w) بود. همچنین با افزایش دما از 40°C به 70°C ، میزان اسانس استحصالی کاهش یافت و کمترین مقدار آن برابر 0.27 ml براساس وزن حجمی (v/w) در درجه حرارت 70°C به دست آمد.

۵.۳. استخراج اسانس

نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی دما و اثر اصلی دبی جابه‌جایی هوای خشک‌کن در میزان اسانس استخراج شده از بادرنجبویه در شکل (۴) آورده شده است. مشاهده می‌شود که دبی جابه‌جایی هوای ورودی ۱ m/s و $1/5$ اختلاف معنی‌داری نداشتند و بالاترین میزان اسانس استحصالی در



شکل (۴) مقایسه میانگین اثر اصلی دمای هوا و دبی هوا بر میزان اسانس استحصالی (حروف مشابه روی ستون‌ها به معنی عدم اختلاف معنی‌دار است)
Fig 4. the average of the mutual effects between air temperature and air velocity of essential oil extracted (Similar letters on columns mean no significant difference)

۴. نتیجه‌گیری

مؤثر مربوط به بالاترین دما است. دلیل وقوع این مسئله، تأثیر بارز دما و دبی هوا در ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر و افزایش ضریب مذکور است. کمترین میزان اسانس استحصالی مربوط به دمای 70°C و دبی جا به جایی هوا 2 m/s و بیشترین میزان اسانس استحصالی مربوط به دمای 40°C و دبی جا به جایی هوا 1 m/s تا $1/5$ با مقدار تقریبی $0/5\text{ ml}$ به دست آمد. این امر ناشی از فرار برخی از مواد مؤثره گیاه در طول خشک کردن با دمای بالا است. همچنین در طول فرآیند خشک کردن، رطوبت به وسیله انتشار از سطح برگ‌ها خارج می‌شود و از آنجایی که غده‌های حاوی اسانس در سطح برگ‌ها یا نزدیکی آن قرار دارند، در فرآیند خشک کردن مقداری از اسانس گیاه از دست می‌رود، این مکانیزم می‌تواند علت کاهش میزان اسانس در طی خشک کردن را توضیح دهد. با استفاده از نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود جهت کاهش مصرف انرژی و حفظ بیشترین مقدار اسانس استحصالی، عمل خشک کردن گیاه بادرنجبویه در دمای 40°C و دبی جابه‌جایی هوا 1 m/s تا $1/5$ انجام شود.

افزایش دما و دبی جابه‌جایی هوا باعث افزایش دبی خشک کردن می‌شود، همچنین تأثیر افزایش دبی جابه‌جایی هوا بر مدت زمان خشک کردن در دماهای پایین نسبت به دماهای بالاتر بیشتر بود، به طوری که افزایش دبی جابه‌جایی هوا ورودی از 1 m/s تا 2 ، سبب کاهش مدت زمان خشک کردن گیاه بادرنجبویه شد؛ به عبارت دیگر تأثیر دبی جابه‌جایی هوا بر مدت زمان خشک کردن در دماهای پایین بیشتر است. حداکثر مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در دبی هوا $1/5\text{ m/s}$ و دمای 70°C برابر با $1/06 \times 10^{-11}$ (m^2/s) به دست آمد. همچنین، حداقل مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر در دبی هوا 1 m/s و دمای 40°C برابر با $7/1 \times 10^{-12}$ (m^2/s) به دست آمد. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه برای بادرنجبویه، به ترتیب در دبی هوا 2 m/s و دمای 70°C برابر با $326/76\text{ mJ/kg}$ به دست آمد. به نظر می‌رسد D_{eff} با افزایش دمای هوا و دبی هوا (انتقال سریع آب در دماهای بالاتر) به دلیل انتقال جرم بیشتر افزایش یافته است، بیشترین ضریب پخش رطوبت

منابع

[1] Ghahraman, A. (2013). Flora of Iran. Research Institute of Forests and Rangelands (RIFR) Publisher, Vol. 27 Tehran, Iran. [In Persian]
 [2] Kabiri, S., Sayyed-Alangi, S. Z. (2015). Comparison of Antioxidant effect of different extracts from *Melissa officinalis* leaves with immersion and

microwave-assisted extractions and its oxidative stability on soybean oil. *Innov. Food Technol.*, 2(4), 23-38. [In Persian]
 [3] Omidbaigi, r. (2014). Production and processing of medicinal plants. third volume. Astan Quds Razavi Publications, Mashhad, Iran. [In Persian]

- [4] Cakmak, G., Yıldız, C. (2011). The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 103-108.
- [5] Karami, H., Rasekh, M., Darvishi, Y., Khaledi, R. (2017). Effect of drying temperature and air velocity on the essential oil content of *Mentha pulegium* L. *Innov. Food Technol.*, 5(1), 65-75. [In Persian]
- [6] Akpınar, E.K., Bicer, Y., Cetinkaya, F. (2006). Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *J. Food Eng.*, 3, 308-315.
- [7] Doymaz, I., Tugrul, N., Pala, M. (2006). Drying characteristics of dill and parsley leaves. *J. Food Eng.*, 3: 559-565.
- [8] Karami, H., Rasekh, M., Darvishi, Y., Khaledi, R. (2017). Effect of drying temperature and air velocity on the essential oil content of *Mentha aquatica* L. *J. Essent. Oil Bear. Pl.*, 20(4), 1131-1136.
- [9] Karami, H., Rasekh, M., Darvishi, Y. (2017). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics and organo essential oil extraction efficiency in a hybrid dryer. *Innov. Food Technol.*, 5(1): 65-75. [In Persian]
- [10] Karami, H., Rasekh, M. (2018). Investigation of mass transfer kinetics and modeling of tarragon drying (*Artemisia dracunculus* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants.*, 5(1): 65-75. [In Persian]
- [11] Alibas, I. (2006). Characteristics of chard leaves during microwave, convective, and combined microwave-convective drying. *Dry. Technol.*, 24(11), 1425-1435.
- [12] Yaldiz, O., Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some different vegetables. *Dry. Technol.*, 19, 586-596.
- [13] Panchariya, P.C., Popovic, D., Sharma, A.L. (2002). Thin-layer modeling of black tea drying process. *J. Food Eng.*, 52, 349-357.
- [14] Kaya, A., Aydin, O., (2009). An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Convers. Manag.*, 50, 118-124.
- [15] Doymaz, I. (2009). Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer. *J. Food Process Eng.*, 32, 112-125.
- [16] Doymaz, I. (2011). Drying of thyme (*Thymus vulgaris* L.) and selection of a suitable thin-layer drying model. *J. Food Process. Preserv.*, 35, 458-465.
- [17] Borah, A., Hazarika, K., Khayer, S.M. (2015). Drying kinetics of whole and sliced turmeric rhizomes (*Curcuma longa* L.) in a solar conduction dryer. *Inf. Process. Agric.*, 2, 85-92.
- [18] Sharabiani, V. R., Taghinezhad, E., Hadipour Rokni, R. (2019). Modeling and Optimization of Energy Parameters in *Rosmarinus officinalis* Drying with Microwave Pretreatment. *Innov. Food Technol.*, DOI: 10.22104/JIFT.2019.3500.1839. [In Persian]
- [19] Karami, H. (2014). Design, manufacture and evaluation of hybrid dryers for medicinal plants. Master of Science thesis. Razi University, Kermanshah, Iran. [In Persian]
- [20] Aghbashlo, M., Kianmehr, M., Samimi-Akhijahani, H. (2009). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of barberries (*Barberries vulgaris*). *J. Food Process Eng.*, 32(2), 278-293.
- [21] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Khani, S., Ghasemi, M. (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. *Int. Agrophys.*, 23(4), 313-317.
- [22] Karami, H., Lorestani, A.N., Tahvilian, R. (2018). Experimental study of performance of a Forced convection Hybrid Dryer (Solar-electric). *Journal of New and Renewable Energy*, 5(2), 107-115. [In Persian]
- [23] Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, Oxford, Bristol, England.
- [24] Rodriguez, I., Clemente, G., Sanjuan, N., Bon, I. (2014). Modelling drying kinetics of thyme (*Thymus vulgaris* L.): theoretical and empirical models, and neural networks. *Food Sci. Technol. Int.*, 20: 13-22.
- [25] Dehghannya, J., Hosseinar, S. Heshmati M.K. (2018). Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. *Innov. Food Sci. Emerg Technol.* 45, 132-151.

*Research Article***The effect of different drying conditions on effective moisture diffusivity, specific energy consumption and extraction efficiency of *Melissa officinalis* essential oil****Hamed Karami¹, Ali Nejat Lorestani^{2*}, and Reza Tahvilian³****1.MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah****2. Associate professor, Mechanical Engineering of Biosystems Department, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah****3. Associate professor, Department of Pharmaceutics, Novel Drug Delivery Research Center, Students Research Committee School of Pharmacy, Kermanshah University of Medical Sciences(KUMS), Kermanshah****Abstract**

The aim of this study was to investigate the effect of temperature and air displacement rate on effective moisture diffusivity, specific energy consumption, drying rate, moisture ratio, and the extraction efficiency of *Melissa officinalis* essential oil in hybrid dryer as thin layer. This paper presents the thin layer drying behavior of *Tarragon (Melissa officinalis)* by a solar hybrid dryer. Experiments were carried out at the air temperatures of 40°C, 50°C, 60°C, 70°C and air velocity of 1m/s, 1.5 and 2 m/s. Effective moisture diffusivity values were achieved to be in the range of 7.1×10^{-12} - 1.05×10^{-11} m²/s. Specific energy consumption values were achieved to be in the range of 75.65-326.76 (MJ/kg). Also the effect of the air velocity on the drying time at a low temperature is greater than that at a high temperature. The highest amount of essential oil related to a temperature of 40°C and air velocity of 1-1.5 m/s was achieved with approximately 0.5 cc (v/w) and by increasing the temperature from 40°C to 70°C the amount of essential oil was decreased Significantly.

Keywords: Specific Energy Consumption, *Melissa Officinalis*, Essential Oil, Effective Moisture Diffusivity, Dryer.

* Corresponding authors: lorestani@razi.ac.ir