

بررسی روش‌های مختلف خشک کردن گیاه دارویی نعناع فلفلی (*Mentha piperita*)

محسن مختاریان^{۱*}، حسن حامدی^۲، نعمت‌الله جنیدی جعفری^۳، افشین آخوندزاده بستی^۴

- ۱- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
 - ۲- گروه بهداشت و ایمنی مواد غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
 - ۳- مرکز تحقیقات بهداشت و تغذیه، دانشگاه علوم پزشکی بقیه‌الله (عج)، تهران، ایران
 - ۴- گروه بهداشت و کنترل کیفی مواد غذایی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه تهران، ایران
- * آدرس مکاتبه: گروه علوم و صنایع غذایی، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
تلفن و نمابر: ۷۶۵۰۵۰۱۵ (۰۲۱)
پست الکترونیک: mokhtarian.mo@riau.ac.ir

تاریخ تصویب: ۹۶/۳/۳۱

تاریخ دریافت: ۹۶/۱/۲۲

چکیده

مقدمه: محصولات کشاورزی و بخصوص گیاهان دارویی می‌بایست بعد از برداشت مورد فرآوری‌های مختلفی از جمله جداسازی اجسام خارجی، شستشو و تمیز کردن، خشک کردن، بسته‌بندی و غیره قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین مراحل پس از برداشت گیاهان دارویی بخصوص نعناع فلفلی، فرآیند خشک کردن است.

هدف: هدف از این مطالعه طراحی یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به کلکتور چند گذر جهت فرآیند آبدایی از نعناع فلفلی و مقایسه نتایج آن با روش‌های سنتی خشک کردن (سایه و آفتاب) می‌باشد.

روش بررسی: در این مطالعه فرآیند خشک کردن نعناع فلفلی با روش‌های مختلف خشک کردن خورشیدی (توسط خشک‌کن خورشیدی طراحی شده در این مطالعه) و نیز خشک کردن سنتی (سایه و آفتابی) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

نتایج: مدت زمان لازم برای خشک کردن نعناع فلفلی در روش خشک کردن خورشیدی ۱۵۰ دقیقه به دست آمد که نسبت به روش‌های خشک کردن سنتی در سایه و آفتاب حدوداً ۸۲ درصد و ۵۵ درصد کوتاه‌تر بود. همچنین نرخ آبدایی در روش‌های آبدایی خورشیدی، سنتی در آفتاب و سایه به ترتیب ۲۶/۷۷، ۱۲/۴۸ و ۴/۴۸ (کیلوگرم آب/کیلوگرم مواد جامد در ساعت) است. نتایج مدلسازی ریاضی نشان داد که مدل‌های میدلی و کوکوک (در روش‌های آبدایی خورشیدی و سایه) و آغباشلو و همکاران (در روش آبدایی آفتابی) می‌تواند با دقت بالایی منحنی‌های خشک کردن این گیاه دارویی را برازش نماید. همچنین روش خشک کردن خورشیدی می‌تواند اسانس متشکله این گیاه را به بهترین حالت حفظ نماید. نتایج نشان داد که مهم‌ترین ترکیبات تشکیل‌دهنده اسانس نعناع فلفلی شامل: ۱۸- سینئول، سیس-ساین هیدرات، متون، متوفوران، ایزو-متون، متول و ایزو-متول می‌باشد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی روش خشک کردن خورشیدی نعناع فلفلی به عنوان بهترین روش برای فرآوری پس از برداشت این گیاه دارویی پیشنهاد می‌شود.

گل‌واژگان: نعناع فلفلی، خشک کردن، عملیات پس از برداشت، مدلسازی تک لایه‌ای



مقدمه

گیاهان تیره نعناع از جمله گیاهانی هستند که از قدیم در طب سنتی به عنوان گیاهان دارویی مصرف می‌شوند، که بیشتر گونه‌های آن دارای ارزش دارویی، غذایی، آرایشی، بهداشتی و غیره هستند. نعناع فلفلی با نام علمی *Mentha piperita* و با نام عمومی Peppermint که در رده‌بندی گیاهی از تیره *Lamiaceae* راسته *Lamiaceae* و رده *Rosidae* می‌باشد، یک گیاه دورگه (هیبرید) است که به طور خود به خودی در طبیعت بوجود آمده و والدین آن را *M. spicata* و *M. aquatica* ذکر کرده‌اند. نعناع فلفلی از جمله گیاهان دارویی بسیار مهم بوده که اسانس آن مصارف گسترده‌ای در صنایع دارویی، غذایی و بهداشتی دارد [۱]. معمولاً از اسانس این گیاه جهت خوشبو کردن تنفس، نوشیدنی‌ها، ضد عفونی‌کننده دهان (Antiseptic mouth rinses) (دهان شویه)، خمیر دندان، ژله‌ها، شربت‌ها، بستنی، شکلات نعناعی و نیز برای تولید چای تورج (Touareg tea) (یکی از چای‌های محبوب در کشورهای آفریقایی و عربی) استفاده می‌شود.

ترکیبات فرار (اسانس) موجود در گیاهان دارویی بخصوص نعناع فلفلی به طور مؤثری تحت تأثیر روش فرآوری قرار می‌گیرند. از مهم‌ترین و در عین حال رایج‌ترین تمهیدات فیزیولوژی پس از برداشت گیاهان دارویی عملیات خشک کردن اندام‌های گیاهی (دارویی) جمع‌آوری شده می‌باشد که بشدت کمیت و کیفیت مواد مؤثره گیاهان دارویی (بخصوص اسانس) را دستخوش تغییر می‌نماید [۲]. این فرآیند شامل حذف رطوبت با استفاده از عمل تبخیر تا حد رسیدن به یک آستانه ایمن است تا بتوان محصول را برای مدت طولانی انبار کرده و فعالیت‌های آنزیمی، میکروارگانسیم‌ها و مخمرها را در آن متوقف نمود [۳]. متأسفانه به دلیل ناآگاهی مؤسسات و اشخاص حقیقی درگیر در تولید و فرآوری گیاهان دارویی، روش صحیح خشک کردن گیاهان معمولاً رعایت نمی‌شود. نتیجه ناگزیر این امر کاهش محتوی، عملکرد و تغییر محسوس

مواد مؤثره گیاهان دارویی و در پی آن کاهش اثرات درمانی و بیولوژیکی گیاهان فوق‌الذکر خواهد بود. همچنین لازم به ذکر است که خشک کردن سبب کاهش حجم محصول تولیدی شده که با سهولت حمل و نقل همراه است. بنابراین بدین شکل می‌توان محصول تولیدی را به راحتی به اقصی نقاط جهان ارسال نموده (چون تمام نقاط دنیا رویشگاه همه گیاهان دارویی نیست) و در دسترس همگان قرار داد. لذا بکارگیری روش‌های مناسب خشک کردن، انبارداری و بسته‌بندی در گیاهان دارویی و افزایش کیفیت آن از مؤثرترین گزینه‌های کاهش حجم ضایعات و بهبود کیفیت محصول نهایی است [۲، ۱]. سلام و همکاران (۲۰۱۵) خشک کردن خورشیدی گیاه نعناع کامل را تحت شرایط جابجایی هوای طبیعی و اجباری مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که خشک کردن نعناع تحت شرایط مختلف در مرحله نزولی خشک کردن رخ داد. همچنین نتایج نشان داد که آهنگ خشک کردن نعناع در شرایط جابجایی هوای اجباری بالاتر از جابجایی طبیعی بود [۴]. قاسمی پیربلوطی و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر روش‌های خشک کردن را روی ویژگی‌های کمی و کیفی اسانس دو نوع ریحان مطالعه کردند. نمونه‌های سبز و خالص ریحان در سایه، آفتاب، آون (در دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، مایکروویو در توان ۵۰۰ وات و خشک‌کن انجمادی خشک شدند. نتایج نشان داد که بیشترین بازده اسانس در روش خشک کردن در سایه و سپس در روش خشک کردن انجمادی مشاهده شد [۵]. ال سبای و همکاران (۲۰۱۳) بررسی تجربی یک خشک‌کن خورشیدی جابجایی هوای اجباری غیرمستقیم را برای خشک کردن آویشن و نعناع مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که مدت زمان خشک کردن برای آویشن و نعناع به ترتیب ۳۴ و ۵ ساعت به طول انجامید. نتایج نشان داد مدل میدلی و کوک توانست بهترین توصیف را از منحنی خشک کردن نعناع داشته باشند. همچنین مدل‌های پیچ و پیچ اصلاح شده توانستند در میان سایر مدل‌ها، منحنی خشک کردن آویشن را با بالاترین



جهت جلوگیری از حذف رطوبت سطحی و پژمردگی، برگ‌های تازه نعنای فلفلی در کیسه‌های پلاستیکی از جنس پلی اتیلن بسته‌بندی شدند. سپس تا زمان شروع آزمایشات در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد [۹].

طراحی و ساخت خشک‌کن خورشیدی

خشک‌کن طراحی شده در این پژوهش شامل جمع‌کننده صفحه‌ای مسطح پره‌دار چند گذر، واحد خشک‌کن، فن سانتریفوژ، اتصالات و لوله‌های رابط و سامانه کنترل الکترونیکی می‌باشد. بخش‌های یاد شده در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است. بدنه جمع‌کننده خورشیدی از جنس MDF، با ابعاد مفید خارجی ۱/۵۰ متر (طول) × ۰/۹۵ متر (عرض) × ۰/۱۷ متر (ارتفاع) طراحی و ساخته شد (ضخامت وجه‌های جانبی جمع‌کننده ۱/۶ سانتی‌متر و کف ۰/۸ سانتی‌متر). سطح بیرونی در معرض تابش خورشید از یک لایه شیشه به ضخامت ۴ میلی‌متر پوشیده شد. در حد فاصل بین کف جمع‌کننده و سطح شیشه، یک صفحه جاذب پره‌دار (تعداد ۸ پره، فواصل پره‌ها از یکدیگر ۱۵ سانتی‌متر، طول پره‌ها ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع پره ۴ سانتی‌متر) از جنس ورق گالوانیزه به ضخامت ۱ میلی‌متر، نصب شد و سطح بیرونی آن جهت بهبود جذب تابش خورشید توسط رنگ مشکی مات رنگ شد. همچنین در قسمت زیرین صفحه جاذب نیز مواعی (پره یا تیغه) جهت افزایش زمان ماند هوا به منظور جذب بیشتر انرژی گرمایی از صفحه جاذب، در بخش زیرین جمع‌کننده تعبیه شد (تعداد ۷ تیغه به طول ۵۰ سانتی‌متر که با فاصله ۱۵ سانتی‌متر از یکدیگر نصب شده‌اند). در اثر تابش نور خورشید ورق آلومینیوم گرم و حرارت آن به هوایی که در مجاورت آن جریان داشت، منتقل شد. هوای گرم شده از طریق کانال‌های رابط به محفظه خشک‌کن منتقل شد. شیب جمع‌کننده خورشیدی و نحوه قرارگیری آن از رابطه (۱) تعیین شد [۱۰]:

$$\beta = (\Phi - \delta) = \left(\Phi - 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \right) \quad (1)$$

دقت برازش نمایند [۶]. فی‌جی‌ال و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر روش خشک کردن (جابجایی هوای داغ در ۶۰ درجه سانتی‌گراد، خشک کردن با میکروویو تحت خلاء و روش ترکیبی جابجایی - میکروویو تحت خلاء) را روی ترکیبات فرار آویشن (*Oregano*) (*Origanum vulgare*) مطالعه نمودند. غلظت کل ترکیبات فرار در آویشن تازه (۳۳ گرم بر کیلوگرم) بوده که طی خشک کردن به طور معنی‌دار کاهش می‌یابد که به نوع روش خشک کردن وابسته می‌باشد. مقدار ترکیبات فرار برای روش‌های خشک کردن جابجایی هوای داغ، خشک کردن با میکروویو تحت خلاء و روش ترکیبی جابجایی - میکروویو تحت خلاء به ترتیب ۱۰/۲، ۲۷/۹ و ۱۳/۱ گرم بر کیلوگرم تعیین شد. به طور کلی نتایج نشان داد که خشک کردن به روش میکروویو تحت خلاء به عنوان بهترین روش خشک کردن معرفی شد [۷]. آکینار (۲۰۰۶) مدلسازی سینتیک خشک کردن لایه‌ای نازک تحت شرایط خشک کردن در معرض تابش مستقیم آفتاب را برای برخی از گیاهان آروماتیک (نعناع، جعفری و ریحان) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که فرآیند خشک کردن هر سه گیاه مورد مطالعه در مرحله نزولی خشک کردن انجام گرفت. نتایج مدلسازی نشان داد که مدل پیچ اصلاح شده (I) توانست به بهترین صورت منحنی خشک کردن نعنای و ریحان و مدل وِرما و همکاران نیز توانست منحنی خشک کردن جعفری را توصیف نماید [۸].

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر روش‌های مختلف آبرزایی بر روی سینتیک خشک کردن و نیز کمیت اسانس استحصالی از بخش‌های هوایی گیاه نعنای فلفلی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی ماده اولیه

نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) به عنوان ماده خام اولیه به صورت روزانه از یکی از مزارع اطراف سبزوار جمع‌آوری شد. قبل از خشک کردن، ابتدا برگ‌ها از ساقه جدا و برگ‌های پژمرده و خراب از سایر برگ‌ها جداسازی شد.





شکل شماره ۱- ساختار کلی سامانه خشک‌کن طراحی شده در این مطالعه به همراه اجزاء: (۱) فن سانتریفوژ، (۲) محفظه خشک‌کن، (۳) جمع‌کننده خورشیدی، (۴) سینی‌های خشک‌کن.

عملیات پس از برداشت

فرآیند آبرزایی

برای خشک کردن ابتدا اندام‌های هوایی نعنای مورد استفاده دو ساعت قبل از شروع خشک کردن به منظور تعدیل دمایی با محیط، بیرون از یخچال قرار گرفتند. مقدار نعنای فلفلی تازه مورد استفاده در هر روش خشک کردن حدوداً ۲/۵ کیلوگرم در نظر گرفته شد. روش‌های خشک کردن مورد مطالعه به صورت زیر می‌باشد:

خشک کردن در سایه: برگ‌های تازه نعنای فلفلی به

صورت تقریباً تک لایه (ضخامت بستر حدوداً ۲ سانتی‌متر) بر روی یک پارچه نخی پهن و در هوای آزاد قرار گرفت و تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد. میانگین سرعت باد، دمایی روز (دمای خشک کردن) و رطوبت نسبی محیط طی دوره خشک کردن طبق گزارشات ایستگاه هواشناسی منطقه به ترتیب ۲/۹۸ متر بر ثانیه، ۳۲/۶۶ درجه سانتی‌گراد و ۱۲/۶۹ درصد گزارش شد.

خشک کردن آفتابی: برگ‌های تازه نعنای فلفلی به صورت

تقریباً تک لایه (ضخامت بستر حدوداً ۲ سانتی‌متر) بر روی یک پارچه نخی پهن و در معرض تابش مستقیم خورشید قرار گرفت و تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد. میانگین سرعت

در این معادله، N تعداد روز (در ۱ ژانویه (January)

$N=1$ و در ۳۱ دسامبر (December) $N=365$ می‌باشد. بدین ترتیب، برای دریافت حداکثر شدت تابش خورشید، جمع‌کننده به صورت زاویه‌دار با شیب ۴۰ درجه (با توجه به فصل برداشت و خشک کردن نعنای فلفلی) رو به سمت جنوب قرار گرفت. بدنه دستگاه از جنس ورق گالوانیزه با ضخامت ۰/۶ میلی‌متر، با ابعاد مفید خارجی ۱/۰۰ متر (طول) $0.65 \times$ متر (عرض) $0.65 \times$ متر (ارتفاع) ساخته شد. همچنین جداره داخلی دستگاه توسط ورق گالوانیزه سفید به ضخامت ۰/۶ میلی‌متر پوشش‌دهی شد. درون گرمخانه ۵ عدد سینی مشبک به ابعاد $0.59 \times 0.59 \times 0.4$ متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) تعبیه شد که برگ‌های تازه نعنای فلفلی روی این سینی‌ها پهن و خشک شدند. جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی، محفظه خشک‌کن با پشم شیشه عایق‌بندی شد. جریان هوا در داخل خشک‌کن از طریق فن سانتریفوژ (نوع پروانه بسته (Hermetic impeller) و پره پس‌خور (Backward curved impeller)) نصب شده روی دستگاه تأمین شد. مشخصات فن سانتریفوژ مورد استفاده شامل: ولتاژ ۲۲۰ ولت، فرکانس ۵۰ هرتز، توان ۰/۵ اسب بخار و تک فاز، دور موتور ۲۸۰۰ دور در دقیقه، قطر و عرض پروانه به ترتیب ۱۵ و ۵ سانتی‌متر و تعداد پره ۳۶ عدد بود.

در این معادله، MC میزان رطوبت بر پایه تر (درصد)، W_i وزن محصول تازه (kg) و W_f وزن محصول خشک (kg) است [۱۱].

استحصال اسانس

استخراج اسانس برگ‌های خشک شده و تازه نعنای فلفلی، به روش عملیات تقطیر توسط دستگاه کلونجر انجام شد. بدین منظور ۲۰۰ گرم نمونه خشک شده (برای نمونه تازه نیز ۲۰۰ گرم نمونه انتخاب شد) به صورت دقیق توزین و به بالن ژوژه حاوی ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد و فرآیند استخراج به مدت ۲ ساعت ادامه یافت [۱۲]. بازده اسانس با توجه به میزان مواد خشک نمونه بر حسب (ml/kg d.m.) تعیین شد. بازده اسانس در سه تکرار انجام گرفت. عمل آبیگری اسانس استحصال شده در معرض سولفات سدیم بدون آب (Na_2SO_4) انجام شد و سپس در شیشه‌های کوچک قهوه‌ای رنگ درب‌بندی و در فریزر با دمای -18 درجه سانتی‌گراد تا زمان آزمایشات بعدی نگهداری شد [۱۵].

جداسازی و شناسایی ترکیبات اسانس

شناسایی ترکیبات تشکیل‌دهنده اسانس نعنای فلفلی خشک شده و تازه، به روش کروماتوگرافی گازی/طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) اندازه‌گیری شد. بدین منظور برنامه دمایی آون از ۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم و طیف‌های جرمی از $m/z=15$ تا $m/z=240$ ثبت شد. شرایط عملیاتی و مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده شامل: نوع ستون BPX5، طول ستون ۳۰ m، قطر داخلی ستون $0.25 \mu m$ ، دمای اولیه ستون ۵۰ درجه سانتی‌گراد، دمای نهایی ستون ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، گرادیان دمایی $5^\circ C/min$ ، شناساگر Mass، دمای تزریق ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و گاز حامل هلیوم $99/999$ درصد با شدت جریان ۱ ml/min می‌باشد [۱۲].

باد، دمای روز (دمای خشک کردن)، رطوبت نسبی محیط و شدت تابش خورشید طی دوره خشک کردن طبق گزارشات ایستگاه هواشناسی منطقه به ترتیب صفر متر بر ثانیه، $29/06$ درجه سانتی‌گراد، $23/94$ درصد و $956/95$ وات بر مترمربع گزارش شد. خشک کردن خورشیدی: برگ‌های تازه نعنای فلفلی به صورت تقریباً تک لایه بر روی سینی‌های خشک‌کن پهن شد و توسط هوای گرم شده توسط جمع‌کننده (کلکتور)، تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد (شکل شماره ۱). میانگین شدت تابش خورشید طی دوره خشک کردن طبق گزارشات ایستگاه هواشناسی منطقه $860/38$ وات بر مترمربع گزارش شد.

برگ‌های تازه نعنای فلفلی در روش‌های خشک کردن آفتابی و خورشیدی از ساعت $8:30$ صبح تا ساعت 15 بعد از ظهر و در روش خشک کردن در سایه از ساعت $8:30$ صبح تا ساعت $22:30$ عصر به صورت مداوم خشک شدند. محل مورد آزمایش دارای عرض جغرافیایی شمالی ($36^\circ N$) و درجه و 13 دقیقه، طول جغرافیایی ($57^\circ E$) و درجه و 37 دقیقه بود. جهت اندازه‌گیری شدت تابش خورشید و سرعت باد به ترتیب از پیرانومتر و بادسنج نصب شده در ایستگاه هواشناسی منطقه استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های ترمودینامیکی (دما و رطوبت نسبی)، از ماژول دما و رطوبت AM2303 استفاده شد. خصوصیات عملکردی ماژول AM2303 شامل محدوده رطوبت نسبی $0/1$ درصد تا $99/9$ درصد با دقت متداول $\pm 2\% RH$ و محدوده دمایی 125 تا -40 با دقت متداول $\pm 0/3$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این ماژول در سه نقطه ثابت دستگاه خشک‌کن خورشیدی (ورودی و خروجی هوا از کلکتور و خروجی محفظه خشک‌کن) نصب شد. همچنین جهت تعیین میزان رطوبت نعنای فلفلی تازه بعد از خشک شدن از رابطه زیر استفاده شد:

$$MC(\% \text{wb}) = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (2)$$



برآزش منحنی خشک کردن

منحنی‌های خشک کردن نعنای فلفلی در روش‌های مختلف خشک کردن، توسط مدل‌های خشک کردن تک لایه‌ای برآزش شد (جدول شماره ۱). در تئوری خشک کردن به صورت تک لایه‌ای فرض بر این است که لایه مواد به اندازه کافی نازک بوده یا سرعت هوا به اندازه کافی بالا باشد، به طوری که شرایط هوای خشک کننده (رطوبت نسبی و دما) در سراسر مواد در حال خشک شدن ثابت باشد [۱۳].

ضریب تبیین (R^2) یکی از مهم‌ترین معیارها برای انتخاب بهترین مدل می‌باشد. علاوه بر ضریب تبیین، بهترین برآزش توسط پارامترهای آماری مختلفی نظیر ضریب تبیین تعدیل شده (R_{adj}^2)، کاهش مربع کای (χ^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد مدول انحراف نسبی میانگین (P درصد) تعیین شد. برای بهترین برآزش، بایستی پارامترهای آماری ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده بیشینه و کاهش مربع کای، ریشه میانگین مربعات خطا و درصد مدول انحراف نسبی میانگین کمینه باشند.

تجزیه و تحلیل آماری

آنالیز آماری با استفاده از طرح کاملاً تصادفی و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح اطمینان ۹۹ درصد انجام گرفت. جهت آنالیز آماری از نرم‌افزار Statistix نسخه ۸ استفاده شد.

نتایج

شرایط ترمودینامیکی هوا طی خشک کردن

مقادیر شدت تابش خورشید روی سطح افق طی دوره خشک کردن نعنای فلفلی در روش‌های مختلف خشک کردن در جدول شماره ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که بیشترین

شدت تابش خورشید در روش‌های مختلف خشک کردن در زمان محلی ۱۱:۳۰ تا ۱۳:۰۰ ثبت شد و سپس مقدار آن کاهش یافت. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول شماره ۲، مشاهده شد که میانگین شدت تابش خورشید ثبت شده در روش خشک کردن در آفتاب حدوداً ۱۰ درصد بیشتر از روش خشک کردن با خشک‌کن خورشیدی بود. همچنین در روش خشک کردن با خشک‌کن خورشیدی، حداقل شدت تابش خورشیدی ثبت شده حدوداً ۲/۷ مرتبه کمتر (حدوداً ۶۳ درصد کمتر) از روش خشک کردن سنتی در آفتاب بود که این حالت به دلیل شرایط جوی هوا و ابری شدن مقطعی آسمان طی دوره بهره‌برداری از خشک‌کن ایجاد شد.

در جدول شماره ۲ مقادیر میانگین دما و رطوبت نسبی هوای محیط در حالت‌های مختلف خشک کردن نعنای فلفلی ثبت و مورد مقایسه قرار گرفت. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین میانگین دمای هوای محیط ثبت شده توسط حسگرها، در روش خشک کردن با سامانه خشک‌کن خورشیدی به دست آمده است (نسبت به روش‌های خشک کردن در آفتاب و سایه به ترتیب حدود ۲۴/۶۳ درصد و ۱۵/۳ درصد بیشتر بود) که حداقل رطوبت نسبی متناظر (برابر ۱۲/۳۳ درصد) را نسبت به سایر روش‌ها داشت (این مطلب به خوبی توسط نمودارهای سایکرومتری یا رطوبت‌سنجی قابل توجه است).

همچنین مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین دما و رطوبت نسبی هوای ورودی به جمع‌کننده، ورودی و خروجی از محفظه خشک‌کن، طی دوره خشک کردن نعنای فلفلی توسط حسگرها پایش و نتایج در جدول شماره ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، جمع‌کننده خورشیدی مورد استفاده در این پژوهش (جمع‌کننده چند گذر) توانست دمای هوای محیطی را در دامنه ۲۲/۲-۱۷/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد.

جدول شماره ۱- برخی از مدل‌های مورد استفاده جهت برازش منحنی خشک کردن نعنای فلفلی

نام مدل	معادله مدل	نام مدل	معادله مدل
آغیاشلو و همکاران	$MR = \exp(-kt/1+kt)$	سهمی‌وار	$MR = a + bt + ct^2$
انتشار فیک	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	میدلی-کوکوک	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
پلگ	$MR = 1 - (t/(a+kt))$	وانگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$
بیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	سیلوا و الی	$MR = \exp(-at - bt^{0.5})$
لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + C$	نیوتن (لويس)	$MR = \exp(-kt)$

جدول شماره ۲- مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین شدت تابش خورشید و نیز میانگین دما و رطوبت نسبی هوای محیط در روش‌های مختلف خشک کردن

روش خشک کردن	شدت تابش خورشید (W/m^2)			میانگین پارامترهای محیط	
	حداقل	حداکثر	میانگین	دما ($^{\circ}C$)	RH (%)
ستنی در آفتاب	۷۵۱/۵۹	۱۰۷۵/۹۵	۹۵۶/۹۵	۲۹/۰۶	۲۳/۹۴
ستنی در سایه	-	-	-	۳۲/۶۶	۱۲/۶۴
خشک‌کن خورشیدی	۲۷۷/۸۴	۱۰۱۱/۸۶	۸۶۰/۳۸	۳۸/۵۶	۱۲/۳۳

جدول شماره ۳- مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین دما و رطوبت نسبی هوا در نواحی مختلف خشک‌کن طی خشک کردن*

منطقه نصب حسگر در خشک‌کن	حداقل		حداکثر		میانگین	
	دما ($^{\circ}C$)	RH (درصد)	دما ($^{\circ}C$)	RH (درصد)	دما ($^{\circ}C$)	RH (درصد)
ورودی به جمع‌کننده	۳۶/۱	۱۰/۳	۴۰/۴	۱۵	۳۸/۵۶	۱۲/۳۳
ورودی به خشک‌کن	۵۳/۳	۹/۴	۶۲/۶	۱۱/۴	۵۶/۴۰	۱۰/۱۷
خروجی از خشک‌کن	۳۴	۷/۵	۴۳/۸	۲۶/۹	۳۹/۴۸	۱۵/۴۷
ΔT ($^{\circ}C$) **	۱۷/۲	-	۲۲/۲	-	۱۷/۸۴	-
$\Delta T/A$ ($^{\circ}C/m^2$) ***	۱۳/۶۵	-	۱۷/۶۲	-	۱۴/۱۶	-

* خشک کردن در بازه زمانی ۱۰:۲۰ تا ۱۴:۴۵ صورت گرفته است

** نتایج: اختلاف دمای ورودی به جمع‌کننده و خروجی از جمع‌کننده

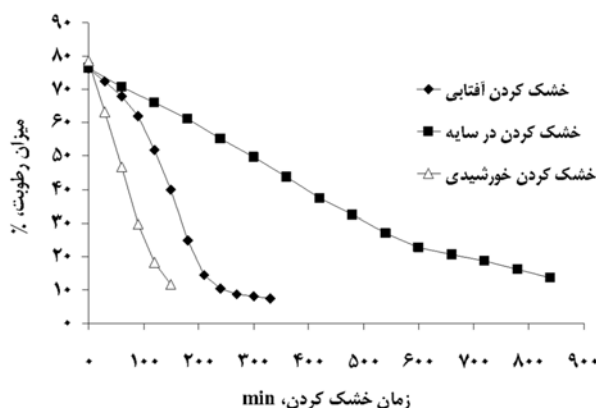
*** میزان افزایش دمای هوای محیط در واحد سطح جاذب

منحنی خشک کردن و میزان رطوبت نهایی

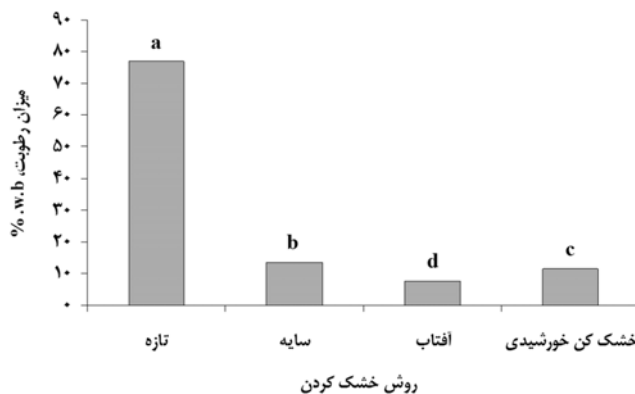
خشک کردن خورشیدی (۱۵۰ دقیقه) مشاهده شد. بعد از اتمام فرآیند خشک کردن میزان رطوبت نهایی محصول مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان رطوبت نهایی محصول خشک شده کمتر از ۱۱ درصد (مبنای مرطوب) بود. همچنین نتایج نشان داد که میزان کاهش رطوبت در روش خشک کردن خورشیدی نسبت به سایر روش‌های کمتر بود (البته با اختلاف آماری معنی‌دار یعنی $P < 0.01$) که شکل‌های شماره ۲ و ۳ این مطلب را به وضوح تأیید می‌نماید.

منحنی تغییرات میزان رطوبت نعنای فلفلی در برابر زمان خشک کردن در روش‌های مختلف خشک کردن در شکل شماره ۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در کلیه روش‌های خشک کردن، روند تغییرات میزان رطوبت نعنای فلفلی بر حسب زمان خشک کردن نزولی است. نتایج نشان داد که بیشترین زمان خشک کردن نعنای فلفلی در روش ستنی در سایه (۸۴۰ دقیقه) و کمترین زمان خشک کردن در روش





شکل شماره ۲- تأثیر روش‌های مختلف آبدایی از برگ نعناع فلفلی بر روی میزان کاهش آب



شکل شماره ۳- تأثیر روش‌های مختلف آبدایی بر روی میزان رطوبت نهایی اندام‌های هوایی نعناع فلفلی

برآزش منحنی خشک کردن

در این مطالعه به منظور امکان پیش‌بینی منحنی خشک کردن از مدل‌های تجربی مختلفی استفاده شد (جدول شماره ۱). بدین منظور ابتدا منحنی‌های خشک کردن ترسیم و سپس براساس یافته‌های منحنی خشک کردن و نیز میزان رطوبت تعادلی در هر روش خشک کردن، مقدار نسبت رطوبت (MR) برای آن روش آبدایی مشخص شد (دامنه تغییر این شاخص به صورت $0 \leq MR \leq 1$ صفر است). این شاخص در واقع مقادیر رطوبت نمونه را در فواصل مشخص آبدایی به صورت نرمالیزه تبدیل می‌نماید. با بهره‌گیری از این مدل‌های تجربی مقادیر ثابت‌های هر مدل توسط نرم‌افزار سیگما پلات تعیین و

در جداول شماره ۴ تا ۶ درج شد. نتایج نشان داد که مقادیر شاخص آماری ضریب تبیین، ضریب تبیین تعدیل شده، P ، $RMSE$ و χ^2 به ترتیب در بازه $(0/9603 \leq R^2 \leq 0/9999)$ ، $(0/0963 \leq P \leq 4/2579)$ ، $(0/9591 \leq R^2_{adj} \leq 0/9998)$ و $(0/000005 \leq \chi^2 \leq 0/0035)$ و $(0/0019 \leq RMSE \leq 0/0572)$ می‌باشند. در روش‌های خشک کردن خورشیدی، سستی در آفتاب و سستی در سایه به ترتیب مدل‌های میدلی و کوکوک، آغباشلو و همکاران و میدلی و کوکوک توانستند به بهترین حالت منحنی‌های خشک کردن نعناع فلفلی را برآزش نمایند و به عنوان مدل‌های برتر برای پژوهش‌های آتی توصیه می‌شوند.

جدول شماره ۴- پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل‌های تجربی برازش‌کننده منحنی خشک کردن نعنای فلفلی در روش خشک کردن خورشیدی

R ² adj	R ²	P (%)	RMSE	χ ²	نام مدل
۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۵	۰/۲۲۰۷	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۰۰۲	آغباشلو و همکاران ($k_1 = -۰/۰۰۱$ و $k = ۰/۰۲۵$)
۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۹۱	۰/۳۰۶۱	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۰۰۵	انتشار فیک ($L = -۳/۹۷۴۷$ و $c = ۰/۴۲۵۲$, $a = ۱/۰۰۱$)
۰/۹۹۸۴	۰/۹۹۸۷	۰/۳۶۷۷	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۰۰۶۴	پلگ ($a = ۲۹/۵۵$ و $k = ۰/۷۸۴۹$)
۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۳	۰/۲۵۴۵	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۰۰۳	پیچ ($n = ۱/۰۴۶$ و $k = ۰/۰۲۲۴$)
۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۸	۰/۱۱۵۸	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۰۹	لگاریتمی ($c = -۰/۰۲۱$ و $k = ۰/۰۲۵$, $a = ۱/۰۱۹$)
۰/۹۶۸۰	۰/۹۸۰۸	۱/۵۷۱	۰/۰۲۸۷	۰/۰۰۱	سهمی وار ($c = ۰/۰۰۰۰۷$ و $b = -۰/۰۱۶$, $a = ۰/۹۵۱$)
۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۹	۰/۰۹۶۳	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰۰۵	میدلی و کوکوک ($b = -۰/۰۰۰۰۱$ و $n = ۰/۹۶$, $k = ۰/۰۲۹$, $a = ۰/۹۹۹$)
۰/۹۷۱۰	۰/۹۷۶۸	۱/۵۲۲	۰/۰۳۱۶	۰/۰۰۱۱	وانگ و سینگ ($b = ۰/۰۰۰۰۷۲$ و $a = -۰/۰۱۷۲$)
۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۹۳	۰/۲۶۸۶	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۰۰۴	سیلوا و الی ($a = ۰/۰۲۹$ و $b = -۰/۰۱۴۶$)
۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۹۱	۰/۲۹۸۵	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۰۰۴	نیوتن (لوئیس) ($k = ۰/۰۲۶۸$)

k: ثابت نرخ خشک کردن (min⁻¹)

جدول شماره ۵- پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل‌های تجربی برازش‌کننده منحنی خشک کردن نعنای فلفلی در روش خشک کردن در سایه

R ² adj	R ²	P (%)	RMSE	χ ²	نام مدل
۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۸۱	۰/۸۳۲۰	۰/۰۱۲۱	۰/۰۰۰۱	آغباشلو و همکاران ($k_1 = -۰/۰۰۰۰۲$ و $k = ۰/۰۰۴۲$)
۰/۹۹۶۷	۰/۹۹۷۱	۱/۲۴۴۱	۰/۰۱۴۶	۰/۰۰۰۰۲	انتشار فیک ($L = -۳/۹۷۴۷$ و $c = ۰/۴۲۵۲$, $a = ۱/۰۰۱$)
۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۷۳	۱/۱۲۰۱	۰/۰۱۴۲	۰/۰۰۰۰۲	پلگ ($a = ۱۸۵/۱۰۴$ و $k = ۰/۷۵۵۹$)
۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۷۳	۱/۱۰۹۹	۰/۰۱۴۲	۰/۰۰۰۰۲	پیچ ($n = ۱/۰۲۷$ و $k = ۰/۰۰۳۹$)
۰/۹۹۸۷	۰/۹۹۸۹	۰/۶۴۴۴	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۰۱	لگاریتمی ($c = -۰/۰۳۲$ و $k = ۰/۰۰۴$, $a = ۱/۰۱۶$)
۰/۹۸۳۱	۰/۹۸۵۶	۲/۵۵۰۲	۰/۰۳۳۰	۰/۰۰۱۳	سهمی وار ($c = ۰/۰۰۰۰۰۰۲$ و $b = -۰/۰۰۲۶$, $a = ۰/۹۱۲۳$)
۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۹۰	۰/۶۸۷۳	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۰۰۹۵	میدلی و کوکوک ($b = ۰/۰۰۰۰۰۰۵$ و $n = ۰/۹۶$, $k = ۰/۰۰۵$, $a = ۰/۹۹$)
۰/۹۷۰۶	۰/۹۷۲۷	۳/۵۴۰۷	۰/۰۴۵۴	۰/۰۰۲۳	وانگ و سینگ ($b = ۰/۰۰۰۰۰۰۲$ و $a = -۰/۰۰۰۳$)
۰/۹۹۶۹	۰/۹۹۷۱	۱/۱۹۵۳	۰/۰۱۴۶	۰/۰۰۰۰۲	سیلوا و الی ($a = ۰/۰۰۴۶$ و $b = -۰/۰۰۰۹۴$)
۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۷۱	۱/۲۲۱۷	۰/۰۱۴۷	۰/۰۰۰۰۲	نیوتن (لوئیس) ($k = ۰/۰۰۴۵$)

k: ثابت نرخ خشک کردن (min⁻¹)

جدول شماره ۶- پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل‌های تجربی برازش‌کننده منحنی خشک کردن نعنای فلفلی در روش خشک کردن در آفتاب

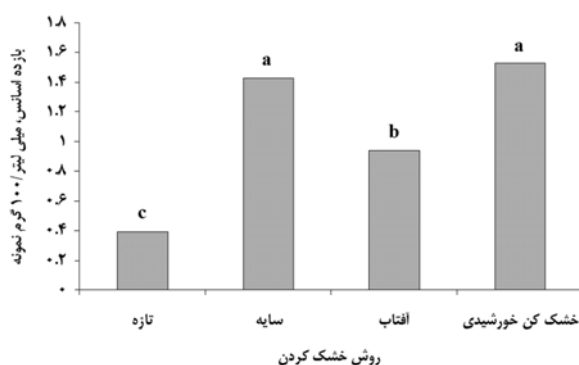
R ² adj	R ²	P (%)	RMSE	χ ²	نام مدل
۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۵	۰/۴۳۳۴	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۰۰۵	آغباشلو و همکاران ($k_1 = -۰/۰۰۳$ و $k = ۰/۰۰۵۹$)
۰/۹۵۹۱	۰/۹۶۶۶	۴/۰۷۲	۰/۰۵۲۵	۰/۰۰۳۳	انتشار فیک ($L = -۱/۲۰۸$ و $c = ۰/۰۱۵۷$, $a = ۱/۰۷۷۲$)
۰/۹۷۱۸	۰/۹۷۴۴	۳/۳۴۴	۰/۰۴۶	۰/۰۰۲۴	پلگ ($a = ۱۰۷/۲۱$ و $k = ۰/۰۶$)
۰/۹۹۵۱	۰/۹۹۵۵	۱/۲۲۸۵	۰/۰۱۹۲	۰/۰۰۰۰۴	پیچ ($n = ۱/۵۴۲$ و $k = ۰/۰۰۷۵$)
۰/۹۸۱۱	۰/۹۸۴۶	۲/۶۴۲۲	۰/۰۳۵۶	۰/۰۰۱۵	لگاریتمی ($c = -۰/۱۴۰۶$ و $k = ۰/۰۰۷۹$, $a = ۱/۱۸۶۶$)
۰/۹۹۵۳	۰/۹۹۶۱	۱/۳۱۹۸	۰/۰۱۷۸	۰/۰۰۰۰۳۸	سهمی وار ($c = ۰/۰۰۰۰۱۳$ و $b = -۰/۰۰۷۴۶$, $a = ۱/۰۲۴$)
۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۶۶	۱/۱۶۱۹	۰/۰۱۶۶	۰/۰۰۰۰۳۶	میدلی و کوکوک ($b = -۰/۰۰۰۰۰۰۵$ و $n = ۱/۵۶$, $k = ۰/۰۰۰۶$, $a = ۰/۹۷۶$)
۰/۹۹۴۹	۰/۹۹۵۳	۱/۳۶۴	۰/۰۱۹۶	۰/۰۰۰۰۴۳	وانگ و سینگ ($b = ۰/۰۰۰۰۱۳$ و $a = -۰/۰۰۷۱$)
۰/۹۸۵۲	۰/۹۸۶۵	۲/۳۸۰	۰/۰۳۳۳	۰/۰۰۱۲	سیلوا و الی ($a = ۰/۰۱۶۴$ و $b = -۰/۰۰۶۶۲$)
۰/۹۶۰۳	۰/۹۶۰۳	۴/۲۵۷۹	۰/۰۵۷۲	۰/۰۰۳۵	نیوتن (لوئیس) ($k = ۰/۰۱۰۱$)

k: ثابت نرخ خشک کردن (min⁻¹)

استحصال اسانس

مقایسه میانگین تأثیر نوع روش خشک کردن بر روی استحصال اسانس از برگ نعناع فلفلی خشک شده در شکل شماره ۴ ارائه شده است. همانطور که از نمودار مشخص است، نوع روش خشک کردن تأثیر معنی‌دار ($P < 0/01$) بر روی استحصال اسانس از برگ نعناع خشک شده دارد. به طوری‌که بیشترین استحصال اسانس از برگ نعناع فلفلی خشک شده به روش خورشیدی مشاهده شد که تفاوت آماری معنی‌دار با برگ نعناع فلفلی خشک شده به روش سنتی در سایه نداشت ($P > 0/01$). همچنین نتایج نشان داد که کمترین میزان اسانس استحصال شده در نمونه برگ نعناع فلفلی تازه مشاهده شد. به منظور بررسی تأثیر نوع روش خشک کردن بر روی

ترکیبات متشکله اسانس نعناع فلفلی، اسانس استحصال شده از هر روش خشک کردن به دستگاه GC/MS تزریق شد و پروفایل ترکیبات اسانس شناسایی شد. نتایج نشان داد که در مجموع ۳۸ ترکیب در اسانس‌های یاد شده شناسایی شد. با این حال مهم‌ترین ترکیبات شناسایی شده در اسانس نعناع فلفلی شامل: ۱۸- سینثول، سیس- سابین هیدرات، منتون، منتوفوران، ایزو- منتون، منتول و ایزو- منتول می‌باشد. در جدول شماره ۷ مهم‌ترین ترکیبات شناسایی شده از اسانس‌های فوق ارائه شده است. با توجه به نتایج این جدول مشاهده می‌شود که در مجموع میزان ترکیبات موجود در اسانس به دست آمده از نعناع‌های خشک شده به روش خورشیدی نسبت به روش‌های خشک کردن در سایه و آفتابی به مقدار جزئی بیشتر است.



شکل شماره ۴- تأثیر روش‌های مختلف آبدایی بر روی استحصال اسانس از برگ نعناع فلفلی

جدول شماره ۷- مهم‌ترین ترکیبات شناسایی شده در اسانس نعناع فلفلی بعد از تزریق به دستگاه GC/MS

ترکیب	KI	RT	روش خشک کردن/درصد اجزاء			
			تازه	سایه	آفتابی	خورشیدی
1,8-Cineole	۱۰۳۸	۱۶/۹۸	۵/۹۳	۶/۶۹	۷/۳۰	۸/۴۶
cis-Sabinene hydrate	۱۰۷۸	۱۹/۰۶	۲/۳۱	۲/۶۲	۲/۱۴	۲/۲۴
Menthone	۱۱۶۹	۲۳/۶۵	۲۹/۸۱	۳۲/۱۴	۳۳/۰۰	۳۶/۶۷
Menthofuran	۱۱۷۴	۲۳/۸۸	۴/۴۹	۳/۷۹	۱/۷۴	۲/۳۲
iso-Menthone	۱۱۷۷	۲۴/۰۲	۳/۵۱	۳/۷۶	۳/۸۹	۴/۳۰
Menthol	۱۱۸۱	۲۴/۲۱	۳/۴۰	۳/۱۶	۲/۹۱	۳/۰۴
iso-Menthol	۱۱۹۲	۲۴/۷۵	۳۴/۵۸	۳۷/۰۸	۳۸/۶۸	۳۲/۵۲
iso-Menthone + Menthone	-	-	۳۳/۳۲	۳۵/۰۹	۳۶/۸۹	۴۰/۹۷
iso-Menthol + Menthol	-	-	۳۷/۹۸	۴۰/۲۴	۴۱/۵۹	۳۵/۵۶
کل ترکیبات شناسایی شده			۹۹/۴۷	۹۹/۳۲	۹۹/۶۴	۹۹/۶۶

بحث

شرایط ترمودینامیکی خشک‌کن

همانطور که قبلاً بیان شد، بیشترین میانگین دمای هوای محیطی ثبت شده توسط حسگرها، در روش خشک کردن با سامانه خشک‌کن خورشیدی بدست آمده است. ال خادرائو و همکاران (۲۰۱۵) یک نوع خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای حالت مختلط را برای خشک کردن فلفل قرمز و انگور در سپتامبر ۲۰۱۳ مورد مطالعه قرار دادند. آنها دمای هوای محیط را در دامنه ۲۱/۲۵-۳۵/۷۱ درجه سانتی‌گراد ثبت نمودند. دمای هوای خشک کردن در خروجی جمع‌کننده خورشیدی و درون گلخانه به ترتیب در دامنه ۲۷/۸۷-۵۴/۶۸ درجه سانتی‌گراد و ۲۹/۲۱-۴۹/۸۸ درجه سانتی‌گراد ثبت شد [۱۴]. این نتایج با یافته‌های حاضر مطابقت دارد.

همانطور که مشاهده می‌شود، جمع‌کننده خورشیدی مورد استفاده در این پژوهش (جمع‌کننده چند گذر) توانست دمای هوای محیطی را در دامنه ۱۷/۲-۲۲/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد. مختاریان و همکاران (۲۰۱۶) طراحی، ساخت و ارزیابی انرژی و انرژی یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سیستم بازگردش هوا را برای خشک کردن پسته مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این محققین نشان داد که میزان اختلاف دما (ΔT) در حالت خشک کردن با بازگردش هوا ۱۵-۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد بود که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد. همچنین نتایج نشان داد که میزان افزایش دمای هوای محیط در واحد سطح جاذب ($\Delta T/A$) برای خشک کردن پسته در حالت بازگردش هوا حدوداً ۴ (درجه سانتی‌گراد/مترمربع) بود که نسبت به نتایج این پژوهش کمتر می‌باشد [۱۱]. مونتر و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی، طراحی، ساخت و ارزیابی یک خشک‌کن خورشیدی برای محصولات جانبی مطالعه قرار دادند. آنها اذعان داشتند که، میزان افزایش دمای هوای محیط در واحد سطح جاذب ($\Delta T/A$) حدوداً ۱۱/۵ (درجه سانتی‌گراد/مترمربع) به دست آمد که با نتایج این پژوهش

مطابقت دارد [۱۵]. عامر و همکاران (۲۰۱۰) عملکرد نوع جدیدی از خشک‌کن خورشیدی هیبریدی را جهت خشک کردن موز مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ارزیابی دستگاه در اواسط تابستان در اروپا نشان داد که میانگین دمای هوای خروجی از جمع‌کننده، حدوداً ۳۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای محیط ثبت شد [۱۶].

منحنی سینتیک خشک کردن و مدل‌سازی ریاضی

همانطور که قبلاً بیان شد، در کلیه روش‌های خشک کردن، روند تغییرات میزان رطوبت نعنای فلفلی بر حسب زمان خشک کردن نزولی بود. بیشترین زمان خشک کردن نعنای فلفلی در روش سنتی در سایه (۸۴۰ دقیقه) و کمترین زمان خشک کردن در روش خشک کردن خورشیدی (۱۵۰ دقیقه) مشاهده شد. آکپینار (۲۰۱۰) فرآیند خشک کردن نعنای را در دو حالت خشک کردن با خشک‌کن خورشیدی و سنتی در آفتاب مورد بررسی قرار داد. نتایج این محقق نشان داد که مدت زمان لازم برای خشک کردن برگ‌های نعنای (تا میزان رطوبت نهایی ۴/۷۶ درصد مبنای مرطوب)، در دو روش خشک‌کن خورشیدی و سنتی در آفتاب به ترتیب، ۲۱۰ و ۳۹۰ دقیقه به طول انجامید که با نتایج یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد [۱۷]. دویمز (۲۰۰۶) در پژوهشی گزارش نمود که مدت زمان لازم برای خشک کردن برگ نعنای در یک خشک‌کن کابینتی از رطوبت اولیه ۸۴/۷ درصد مبنای مرطوب تا رطوبت نهایی ۱۰ درصد مبنای مرطوب، به ترتیب در دماهای ۳۵، ۴۵، ۵۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۶۰۰، ۲۸۵، ۱۸۰ و ۱۰۵ دقیقه است [۱۸]. مولر (۱۹۸۹) فرآیند خشک کردن برگ‌های نعنای را در یک خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که مدت زمان لازم برای کاهش رطوبت برگ‌های نعنای از رطوبت اولیه ۸۰ درصد مبنای مرطوب تا رطوبت نهایی ۱۱ درصد مبنای مرطوب، حدوداً ۳-۴ روز طول کشید [۱۹]. این نتایج نشان می‌دهد که خشک کردن با خشک‌کن خورشیدی طراحی شده



در این پژوهش توانست زمان خشک کردن نعناع فلفلی را در حدود ۳۸/۴ مرتبه کوتاه‌تر (تقریباً ۹۷/۳۹ درصد کاهش) نماید. مقایسه میانگین تأثیر نوع روش خشک کردن بر روی میزان رطوبت نعناع فلفلی نشان داد که نوع روش خشک کردن تأثیر معنی‌دار ($P < 0/01$) بر روی میزان رطوبت نعناع فلفلی خشک شده دارد. به طوری که بیشترین میزان رطوبت در برگ نعناع فلفلی تازه مشاهده شد. نتایج نشان داد که کمترین میزان رطوبت برگ نعناع فلفلی در روش خشک کردن سنتی در آفتاب مشاهده شد. این حالت به دلیل تابش مستقیم نور خورشید و گرم شدن سطحی برگ‌های نعناع بوده (یعنی بیشتر بودن تنش حرارتی) که سبب خشک شدن سریع رطوبت سطحی و انتقال سریع‌تر رطوبت از قسمت‌های درونی بافت برگ‌های نعناع توسط خاصیت موئینه می‌شود. نتایج مشابه در خصوص خشک کردن ارقام مختلف برگ نعناع، در پژوهش‌های پیشین گزارش شد که نتایج ارائه شده در این مطالعه را تأیید می‌نماید. آکپینار (۲۰۱۰) فرآیند خشک کردن نعناع را در دو حالت خشک کردن با خشک‌کن خورشیدی و سنتی در آفتاب مورد بررسی قرار داد. نتایج این محقق نشان داد که میزان رطوبت نهایی برگ‌های نعناع خشک شده حدوداً ۴/۷۶ درصد مبنای مرطوب است [۱۷]. دویمز (۲۰۰۶) در پژوهشی گزارش نمود که میزان رطوبت اولیه و نهایی برگ‌های نعناع خشک شده به ترتیب ۸۴/۷ و ۱۰ درصد مبنای مرطوب می‌باشد [۱۸]. مولر (۱۹۸۹) فرآیند خشک کردن برگ‌های نعناع را در یک خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای مورد بررسی قرار داد. نتایج این محقق حاکی از آن بود که میزان رطوبت اولیه و نهایی نعناع خشک شده به ترتیب ۸۰ و ۱۱ درصد مبنای مرطوب می‌باشد [۱۹].

بازده اسانس

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که نوع روش خشک کردن تأثیر معنی‌دار ($P < 0/01$) بر روی استحصال اسانس از برگ

نعناع فلفلی خشک شده دارد و بیشترین استحصال اسانس در برگ نعناع فلفلی خشک شده به روش خورشیدی مشاهده شد. روچا و همکاران (۲۰۱۱) بیان داشتند که بازده و ترکیبات شیمیایی اسانس گیاهان دارویی به فاکتورهای داخلی و خارجی متفاوتی من جمله فرآیند خشک کردن وابسته است [۲۰]. طبق یافته‌های سینگ و همکاران (۲۰۱۵) بازده اسانس *M. piperita* حدود ۰/۶۴ درصد بر پایه وزن خشک مواد گیاهی تعیین شد [۲۱]. بارووس و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای ترکیبات شیمیایی و ویژگی‌های عملکردی اسانس گونه‌های نعناع (*Mentha*) را مطالعه نمودند. آنها مقدار بازده اسانس نعناع را برای گونه‌های مختلف نعناع بین ۰/۵۴-۰/۰۲ درصد گزارش نمودند. آنها بیان داشتند که بازده پایین (۰/۵۴-۰/۰۲ درصد) اسانس استحصال شده از گونه‌های نعناع به یک سری فاکتورها از قبیل ژنوتیپ، مرحله توسعه گیاه و شرایط محیطی مرتبط است که در نواحی نیمه خشک مشاهده می‌شود. بازده اسانس گزارش شده در منابع برای پاره‌ای از گونه‌های جنس *Mentha* می‌تواند بین ۰/۰۵ تا ۱/۶ درصد متغیر باشد [۲۲]. کروتچت و همکاران (۲۰۱۴) مقدار بازده اسانس برخی از ارقام نعناع را ۳/۲۱-۱/۵۱ (میلی‌لیتر/۱۰۰ گرم ماده خشک) گزارش نمودند [۲۳]. چوهان و همکاران (۲۰۰۹) بازده اسانس *M. spicata* را ۰/۵۷ درصد (بر مبنای مرطوب) گزارش نمودند [۲۴]. رادونز و همکاران (۲۰۱۰) بیان نمودند که بازده اسانس برگ‌های گواکو (*Guaco*) به شدت تحت تأثیر دمای هوای خشک کردن است. آنها مقدار بازده اسانس را در دمای ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۰/۷۳۷ و ۰/۵۶ (میلی‌لیتر/گرم ماده خشک) گزارش نمودند [۲۵]. قاسمی پیربلوطی و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر روش‌های خشک کردن را روی ویژگی‌های کمی و کیفی اسانس دو گونه ریحان مطالعه و گزارش دادند که نوع روش خشک کردن و دمای هوای خشک کردن تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی میزان بازده اسانس دارد [۵]. ساروسی و همکاران (۲۰۱۳) گزارش نمودند که میزان بازده

است در حالی که مقدار ترکیب شیمیایی آلفا-پیننو (α -pineno) در نمونه کنترل و نمونه خشک شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۵/۲۳ و ۲/۲۳ درصد می‌باشد [۲۵].

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد: بعد از خشک کردن گیاه دارویی نعنای فلفلی مشاهده شد که مدت زمان‌های لازم برای خشک کردن این گیاه دارویی در روش‌های آبدزایی خورشیدی، سنتی در آفتاب و سایه به ترتیب به ترتیب ۲/۵، ۵/۵ و ۱۴ ساعت است.

نتایج نشان داد که نرخ آبدزایی از محصول در روش‌های آبدزایی خورشیدی، سنتی در آفتاب و سایه به ترتیب ۲۶/۸۷، ۱۲/۴۸ و ۴/۴۸ (کیلوگرم آب/کیلوگرم مواد جامد در ساعت) است.

نتایج مدل‌سازی ریاضی منحنی‌های خشک کردن نشان داد که مدل‌های میدلی و کوکوک (در روش‌های آبدزایی خورشیدی و سایه) و آغباشلو و همکاران (در روش آبدزایی آفتابی) توانستند منحنی خشک کردن را با بالاترین ضریب تبیین و کمترین خطا پیش‌بینی نماید.

مقادیر اسانس استحصال شده در روش‌های آبدزایی با خشک‌کن خورشیدی، سنتی در سایه و آفتاب به ترتیب ۱/۵۳، ۱/۴۳ و ۰/۹۴ میلی‌لیتر در هر ۱۰۰ گرم نمونه بود، که البته نتایج نشان داد که میزان اسانس استحصالی در روش‌های خورشیدی و سایه از لحاظ آماری معنی‌دار ارزیابی نشد ($P > 0.01$).

جداسازی و شناسایی ترکیبات اسانس نشان داد که در مجموع ۳۸ نوع ترکیب در اسانس نعنای فلفلی وجود داشته که مهم‌ترین آنها ۱۸-سینئول، سیس-سایین هیدرات، منتون، متوفوران، ایزو-منتون، منتول و ایزو-منتول می‌باشند.

به طور کلی نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که آبدزایی به روش خورشیدی می‌تواند به بهترین شکل این گیاه دارویی را خشک نماید و برای صنعتگران در این امر توصیه می‌شود.

اسانس گیاه آویشن (*Thymus vulgaris*) به شدت تحت تأثیر دما و روش خشک کردن قرار می‌گیرد. آنها مقدار اسانس آویشن را در نمونه تازه و خشک شده در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد را به ترتیب ۱/۷۷ و ۰/۶۹ (میلی‌لیتر/۱۰۰ گرم ماده خشک) گزارش نمودند [۲۶].

نتایج ترکیبات متشکله اسانس نعنای فلفلی نشان داد که در مجموع ۳۸ ترکیب در اسانس‌های یاد شده شناسایی شد که مهم‌ترین ترکیبات آن شامل: ۱۸-سینئول، سیس-سایین هیدرات، منتون، متوفوران، ایزو-منتون، منتول و ایزو-منتول بودند. باروس و همکاران (۲۰۱۵) گزارش نمودند که فراوان‌ترین اسانس‌های روغنی گونه *Mentha* شامل لیمونن، ایزو-منتون، منتول، متوفوران، *D*-نتو ایزو-منتول، ۱۸-سینئول (اِئوکالپیتول)، *D*-کارون، لینالول، لینالیل استات، پی‌پری‌تون اکسید و پولگون هستند [۲۲]. گراسیندو و همکاران (۲۰۰۶) مهم‌ترین مونوترپن‌های اکسیژن‌دار شناسایی شده در اسانس ارقام مختلف نعنای را منتول (بین ۶۵-۳۸ درصد) و ایزو-منتول (بین ۵/۷-۵/۳ درصد) گزارش نمودند که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد [۲۷]. بررسی تأثیر نوع روش خشک کردن بر روی ترکیبات متشکله اسانس نشان داد که اجزاء متشکله اسانس از یک روند واحد پیروی نمی‌کند. به عنوان مثال در خشک کردن با روش خشک‌کن خورشیدی، ترکیبات (منتون+ایزو-منتون) و (منتول+ایزو-منتول) نسبت به نمونه کنترل (تازه) به ترتیب ۱۸/۶۷ درصد افزایش و ۶/۸ درصد کاهش یافتند. رادونز و همکاران (۲۰۱۰) بیان نمودند که ترکیبات شیمیایی اسانس برگ‌های گواکو به شدت تحت تأثیر دمای هوای خشک کردن است، به طوری که مقدار ترکیبات شیمیایی اسانس می‌تواند با افزایش دمای هوای خشک کردن، در مورد برخی از ترکیبات افزایش و در مورد برخی دیگر کاهش یابد. به عنوان مثال مقدار ترکیب شیمیایی جرم‌اکرن *D* (Germacrene D) در نمونه کنترل و نمونه خشک شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۳۲/۵۱ و ۴۲/۶۹ درصد



منابع

1. Omid Beigi R. Production and Medical Plant Processing (Vol. 2). Astaneqods publisher. 2006.
2. Ahmadi A. The effect of different drying methods and storage on essential oil content and composition of peppermint (*Mentha piperita*). M.Sc. Thesis, Department of Botanical Science, Oromiye University, Iran. 2010.
3. Azizi M, Rahmati M, Ebadi T and Hassan Zadeh Khayat M. Investigation of the effect of different drying methods on weight loss rate, essence content and percentage of Kamazolen of chamomile medical plant (*Matricaria recutita* L.). *Iranian J. Med. Aroma. Plant.* 2010; 25 (2): 182-92.
4. Sallam YI, Aly MH, Nassar AF and Mohamed EA. Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. *J. Adv. Reas.* 2015; 6: 171-78.
5. Ghasemi Pirbalouti A, Mahdad E and Craker L. Effects of drying methods on qualitative and quantitative properties of essential oil of two basil landraces. *J. Food Chem.* 2013; 141: 2440 - 9.
6. El-Sebaai AA and Shalaby SM. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy Convers. Manage.* 2013; 74: 109 - 16.
7. Figiel A, Szumny A, Gutierrez-Ortiz A and Carbonell-Barrachina AA. Composition of oregano essential oil (*Origanum vulgare*) as affected by drying method. *J. Food Eng.* 2010; 98: 240 - 7.
8. Akpınar EK. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *J. Food Eng.* 2006; 77: 864 - 70.
9. Uribe E, Marín D, Vega-Gálvez A, Quispe-Fuentes I and Rodríguez A. Assessment of vacuum-dried peppermint (*Mentha piperita* L.) as a source of natural antioxidants. *J. Food Chem.* 2016; 190 (1): 559-65.
10. Duffie JA and Beckman WA. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, Inc, New York. 1991.
11. Mokhtarian M, Tavakolipour H and Kalbasi-Ashtari A. Energy and exergy analysis in solar drying of pistachio with air recycling system. *J. Dry. Technol.* 2016; 34 (12): 1484-1500.
12. Sadowska U, Zabinski A, Szumny A and Dziadek K. An effect of peppermint herb (*Mentha piperita* L.) pressing on physico-chemical parameters of the resulting product. *Ind. Crop. Produc.* 2016; 94: 909 - 19.
13. Mokhtarian M, Tavakolipour H and Kalbasi-Ashtari A. Drying kinetic modelling of Kalle-Ghuchi cultivar pistachio nut using different methods: solar, sun and shade drying. *J. Food Res.* 2017; 26 (4): 627-37.
14. Elkhadraoui A, Kooli S, Hamdi I and Farhat A. Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. *Renew. Energy* 2015; 77: 1-8.
15. Montero I, Blanco J, Miranda T, Rojas S and Celma AR. Design, construction and performance testing of a solar dryer for agro-industrial by-products. *Energy Convers. Manage.* 2010; 51 (7): 1510 - 21.
16. Amer BMA, Hossain MA and Gottschalk K. Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Convers. Manage.* 2010; 51: 813 - 20.
17. Akpınar EK. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. *Energy Convers. Manage.* 2010; 51: 2407-18.
18. Doymaz I. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *J. Food Eng.* 2006; 74: 370 - 5.
19. Müller J, Reisinger G, Kisgeci J, Kotta E, Tesic M and Mühlbauer W. Development of a greenhouse-type solar dryer for medicinal plants and herbs. *Solar Wind Technol.* 1989; 6: 523 - 30.
20. Rocha RP, Melo EC and Radünz LL. Influence



of drying process on the quality of medicinal plants: A review. *J. Med. Plant. Res.* 2011; 5 (33): 7076-84.

21. Singh R, Shushni MAM and Belkheir A. Antibacterial and antioxidant activities of *Mentha piperita* L.. *Arabian J. Chem.* 2015; 8: 322-8.

22. Barros ADS, Morais SMD, Ferreira PAT, Vieira IGP, Craveiro AA, Fontenelle RODS, Menezes JESAD, Silva FWFD and Sousa HAD. Chemical composition and functional properties of essential oils from *Mentha* species. *Ind. Crop. Prod.* 2015; 76: 557-64.

23. Curutchet A, Dellacassa E, Ringuet JA, Chaves AR and Viña SZ. Nutritional and sensory quality during refrigerated storage of fresh-cut mints (*Mentha*×*piperita* and *M. spicata*). *J. Food Chem.* 2014; 143: 231-8.

24. Chauhan RS, Kaula MK, Shahia AK, Kumara A, Rama G and Tawa A. Chemical composition of

essential oils in *Mentha spicata* L. accession [IIIM(J)26] from North-West Himalayan region, India. *Ind. Crop. Prod.* 2009; 29: 654 - 6.

25. Radünz LL, Melo EC, Rocha RP, Berbert PA and Gracia LMN. Study of essential oil from guaco leaves submitted to different drying air temperature. *J. Eng. Agr.* 2010; 18: 241-7.

26. Sárosi Sz, Sipos L, Kókai Z, Pluhár Zs, Szilvássy B and Novák I. Effect of different drying techniques on the aroma profile of *Thymus vulgaris* analyzed by GC-MS and sensory profile methods. *Ind. Crop. Prod.* 2013; 46: 210-6.

27. Gracindo LAMB, Grisi MCM, Silva DB, Alves RBN, Bizzo HR and Vieira RF. Chemical characterization of mint (*Mentha* spp.) germplasm at Federal District, Brazil. *Revista Brasileira de Plantas Med.* 2006; 8: 5-9, special.



Investigation of Different Drying Methods of Peppermint (*Mentha piperita*) Medical Plant

Mokhtarian M (Ph.D.)^{1*}, Hamedi H (Ph.D.)², Jonaidi-Jafari NA (Ph.D.)³, Akhondzadeh Basti A (Ph.D.)⁴

1- Young Researchers and Elite Club, Roudhen Branch, Islamic Azad University, Roudhen, Iran

2- Department of Food Safety and Hygiene, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Health & Nutrition Research Center, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran

4- Department Food Hygiene and Quality Control, Faculty of Veterinary Medicine, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding author: Department of Food Science and Technology, Roudhen Branch, Islamic Azad University, Roudhen, Iran

Tel & Fax: +98-21-76505015

Email: mokhtarian.mo@riau.ac.ir

Abstract

Background: Agriculture products, especially medical plants after harvest should be processed by different processes such as removal of foreign bodies, washing and cleaning, drying, packaging and so forth. One of main postharvest stages of medical plant especially peppermint is drying process.

Objective: The aim of this study is design a solar dryer equipped with double pass collector to drying process of peppermint and comparison their results with traditional drying methods (sun and shade).

Methods: In this study drying process of peppermint with different methods of solar drying (by solar dryer designed in this study) and also traditional drying (shade and sun drying) were investigated and compared.

Results: The drying time required for dehydration of peppermint in solar drying method was 150 min, which it was approximately 82% and 55% shorter than to traditional methods of shade and sun. Furthermore, dehydration rate in drying methods of solar drying, sun drying and shade drying were 26.77, 12.48 and 4.48 (kg H₂O/kg D.M h), respectively. The results of mathematical modelling indicated that Midli and kucuk (in drying methods of solar and shade) and Aghbashlo et al (in drying method of sun) can be fitted drying curve of this medical plant with high accuracy. Also, solar drying by dryer could be protecting the essential oil of this plant in the best form. The results show that the main components of peppermint essential oil was included: 1,8-Cineole, *cis*-Sabinene hydrate, Menthone, Menthofuran, *iso*-Menthone, Menthol and *iso*-Menthol

Conclusion: Generally, solar drying method of peppermint was recommended as the best method for postharvest processing of this medical plant.

Keywords: Drying, Monolayer modelling, Peppermint, Postharvest operation

