

خشک کردن برگ‌های نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) در یک خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-ماورای صوت: تأثیر دما و توان ماورای صوت بر زمان، انرژی مصرفی و کمیت اسانس

داود قنبریان^{۱*}، مهدی ترکی هرچگانی^۲، عبدالله قاسمی پیربلوطی^۳، مرتضی صادقی^۴

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۳- استاد گروه گیاهان دارویی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرکرد

۴- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۸/۱۰)

چکیده

در دهه اخیر، استفاده از توان ماورای صوت به عنوان یکی از جدیدترین زمینه‌های تحقیقاتی در فرآوری محصولات کشاورزی و غذایی مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، تأثیر دمای هوا و توان ماورای صوت بر برخی از مهمترین شاخص‌های فرآیند خشکاندن برگ‌های نعناع فلفلی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های خشک کردن با استفاده از یک دستگاه خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-ماورای صوت در سطوح مختلف دمای هوا (۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و توان ماورای صوت (۰، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ وات) انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که اگرچه افزایش دماباعث بهبود زمان و انرژی مصرفی فرآیند شد، اما مقدار اسانس نمونه‌ها را کاهش داد. توان ماورای صوت در سطوح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس ضمن کاهش زمان و انرژی ویژه مصرفی، افزایش مقدار اسانس استحصال‌یافته را نیز به همراه داشت. در دمای هوای ۷۰ درجه سلسیوس، استفاده از توان ماورای صوت بدون تأثیر بر دو شاخص دیگر منجر به مصرف انرژی بیشتر شد. به طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده از توان ماورای صوت می‌تواند راهکاری مناسب برای ارتقاء عملکرد خشک‌کن‌های هوای گرم در خشک کردن محصولات حساس به حرارت مانند گیاهان دارویی و معطر باشد.

کلید واژگان: توان ماورای صوت، مصرف انرژی ویژه، اسانس، نعناع فلفلی

* مسئول مکاتبات: dghanbarian@yahoo.com

۱- مقدمه

خشک کردن، به معنای حذف رطوبت از یک جسم، یکی از مهم‌ترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی است. محتوای رطوبتی اغلب محصولات کشاورزی در زمان برداشت آنقدر زیاد است که امکان انبارداری مطمئن و طولانی مدت آنها را غیرممکن می‌سازد. خشکاندن و کاهش رطوبت‌تین محصولات، فعالیت میکروبی و تغییرات فیزیکی و شیمیایی آنها در مدت انبارداری را به حداقل می‌رساند. همچنین، محصولات با رطوبت کمتر دارای حجم و وزن کمتری بوده و بسته‌بندی و حمل و نقل آنها نیز آسان‌تر و کم هزینه‌تر است. علاوه بر این، خشک کردن باعث افزایش تنوع مصرف محصولات می‌شود [۱،۲].

علی‌رغم سهولت کاربرد و عدم نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه، روش‌های طبیعی خشک کردن از قبیل استفاده از نور آفتاب و سایه، به دلیل برخی معایب چالش برانگیز مانند افت کیفیت محصول، مدت زمان طولانی و عدم امکان کنترل کافی فرآیند و همچنین عدم وجود شرایط محیطی مطلوب در برخی نقاط، به سرعت در حال جایگزین شدن با خشک‌کن‌های صنعتی هستند [۳].

در میان بیش از ۵۰ نوع خشک‌کن صنعتی که امروزه به صورت تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، خشک‌کن‌های هوای گرم بیشترین کاربرد در صنایع مختلف از قبیل صنایع غذایی و کشاورزی، صنعت کاغذ، صنعت نساجی، صنایع شیمیایی و غیره را دارند. علی‌رغم کاربرد وسیع استفاده از هوای گرم در خشک کردن محصولات مختلف، این روش دارای مشکلات جدی از قبیل زمان طولانی فرآیند، بازدهی پایین، مصرف انرژی بسیار زیاد و افت کیفیت محصول خشک شده است [۴]. بنابراین، لازم است تا با استفاده از فناوری‌های جدید در ترکیب با این خشک‌کن‌ها، ضمن استفاده از مزایای متعدد آنها، معایب این نوع خشک‌کن‌ها را رفع و عملکرد آنها را بهبود بخشید.

چو و چو (۲۰۰۱) بیان داشتند که خشک کردن ترکیبی راه حلی جالب و نویدبخش برای حل مشکلات کیفی و اقتصادی فرآیند خشک کردن است. در این نوع خشک‌کن‌ها، به دلیل مکانیسم‌های متفاوت تأمین انرژی مورد نیاز برای دفع رطوبت، اثرات هم‌افزایی، اصلاح اثرات منفی انتشار حرارتی و غیره، زمان و انرژی مصرفی فرآیند کاهش و امکان دست‌یابی به

کیفیت بهتر محصول نهایی ایجاد می‌شود [۵]. برخی از پژوهشگران از فناوری‌های مختلف مانند ریزموج‌ها [۶،۷] و امواج مادون قرمز [۸،۹] در ترکیب با هوای گرم برای خشکاندن محصولات کشاورزی و غذایی استفاده و موفق به کاهش زمان و مصرف انرژی نیز شده‌اند. با این حال، علاوه بر خطرات زیست محیطی، استفاده از این امواج معمولاً باعث گرم شدن بیش از حد محصول می‌شود [۱۰]. بنابراین، در فرآیند خشک کردن محصولات حساس به حرارت، مانند گیاهان دارویی و معطر، استفاده از آنها با محدودیت‌های جدی مواجهه است.

توان ماورای صوت یکی از جدیدترین فناوری‌ها است که معمولاً در ترکیب با خشک‌کن‌های جابه‌جایی استفاده می‌شود و هدف اصلی آن افزایش سرعت فرآیند و بهبود کیفیت محصول نهایی است [۱۱]. امواج ماورای صوت با ایجاد اثرات مکانیکی و بدون تولید انرژی گرمایی زیاد، باعث افزایش سرعت دفع رطوبت مواد می‌شوند. بنابراین، استفاده از امواج ماورای صوت در روش‌های خشک کردن ترکیبی به صورت ویژه برای شرایطی که حفظ کیفیت ظاهری و ارزش غذایی محصول اولویت اصلی است، پیشنهاد شده است [۱۲]. اساس اثرات ماورای صوت در سیستم‌های جامد-گاز مرتبط با انقباض‌ها و انبساط‌های متناوب، مداوم و سریع ایجاد شده توسط این امواج بر ذرات جامد و هوا است. این نیروی مکانیکی می‌تواند باعث بوجود آمدن کانال‌های بسیار ریز داخلی شود که اجازه حرکت آسان‌تر رطوبت داخلی را می‌دهد. همچنین، امواج ماورای صوت، در حالت اعمال به صورت غیرمستقیم، منجر به ایجاد جریان‌های ریز و آشفتگی زیاد در سطوح مشترک شده که این امر نیز باعث تسهیل انتقال جرم سطحی محصول می‌شود [۱۳].

در سال‌های اخیر استفاده از توان ماورای صوت در فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی و غذایی توسط پژوهشگران به صورت روز افزون در حال گسترش است. شوسلر و همکاران (۲۰۱۱) یک سیستم ماورای صوت را درون یک آون هوای گرم آزمایشگاهی قرار داده و از آن برای خشک کردن قطعات سیب و فلفل دلمه قرمز استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که استفاده از سیستم خشک کردن ترکیبی آون-ماورای صوت باعث کاهش معنی‌دار زمان خشک شدن نمونه‌ها در مقایسه با روش بدون استفاده از سیستم ماورای

اسانس گیاهان دارویی و معطر گزارش نشده است. بنابراین، در این پژوهش، برگ‌های گیاه نعناع فلفلی در یک خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-ماورای صوت خشکانده شده و تأثیر دمای هوا و توان ماورای صوت بر زمان و مصرف انرژی فرآیند و همچنین مقدار اسانس قابل استحصال از نمونه‌های خشکانده شده مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های تازه

بوته‌های سالم و بدون آسیب‌دیدگی گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.)، قبل از شروع مرحله گلدهی و از مزرعه‌ای در خمینی‌شهر، توسط دست از ارتفاع ۵ سانتیمتری سطح زمین به دقت برداشت شدند. نام علمینمونه‌ای از گیاه تازه در مرکز تحقیقات گیاهان دارویی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد و با مقایسه با نمونه هرباریومی تأیید شد. به منظور حفظ کیفیت گیاه، تا شروع آزمایش‌ها، نمونه‌های برداشت شده به صورت لایه‌ای و درون پارچه‌های نخی مرطوب در یخچالی در دمای 4 ± 1 درجه سلسیوس قرار داده شدند.

به منظور تعیین رطوبت اولیه برگ‌های نعناع فلفلی، چهار نمونه ۵۰ گرمی از برگ‌ها به دقت توزین و درون آونی با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده و سپس از رابطه (۱) استفاده شد:

$$M_0 = \frac{W_f - W_d}{W_f} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، M_0 رطوبت اولیه برگ‌های تازه (بر پایه تر)، W_f جرم نمونه برگ تازه (گرم) و W_d جرم نمونه برگ خشک (گرم) است.

میانگین محتوای رطوبتی برگ‌ها نعناع فلفلی تازه حدود ۰/۷۷ (بر پایه تر) به دست آمد.

۲-۲- دستگاه خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-

ماورای صوت

به منظور انجام آزمایش‌ها و بررسی اثر امواج ماورای صوت بر زمان و انرژی مصرفی فرآیند خشک کردن و همچنین کیفیت نهایی محصولات کشاورزی و غذایی، یک دستگاه خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-ماورای صوت طراحی و ساخته شد. طرح‌واره دستگاه خشک‌کن مذکور در شکل ۱ نشان داده شده

صوت شد [۱۴]. کارسل و همکاران (۲۰۱۱) قطعات هویج در یک خشک‌کن هوای گرم مجهز به توان ماورای صوت را در سرعت هوای یک متر بر ثانیه و دمای هوای ۴۰ درجه سلسیوس خشک کردند. ایشان گزارش کردند که استفاده از توان ماورای صوت ۷۵ وات، در مقایسه با حالت بدون اعمال توان ماورای صوت، تأثیر معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) بر مدت زمان خشک شدن نمونه‌ها داشت [۱۵]. تأثیر توان ماورای صوت در ترکیب با هوای گرم بر سینتیک خشک شدن ورقه‌های توت فرنگی توسط گامبوا-سانتوس و همکاران (۲۰۱۴) مطالعه شد. ایشان از سه سطح توان ماورای صوت ۰، ۳۰ و ۶۰ و همچنین چهار سطح دمای هوای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس در آزمایش‌های خود استفاده و گزارش کردند که استفاده از توان ماورای صوت ضمن افزایش ضریب انتقال جرم و کاهش زمان فرآیند، باعث ارتقاء کیفیت نیز محصول شد [۱۰]. در پژوهشی دیگر، رودریگوئز و همکاران (۲۰۱۴) از خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-ماورای صوت، در سطوح مختلف دما و سرعت هوا و توان ماورای صوت، به منظور خشکاندن برگ‌های آویشن استفاده و دریافتند که استفاده از توان ماورای صوت، در دماهای کمتر از ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت‌های کمتر از ۳ متر بر ثانیه، به صورت مؤثر باعث کاهش زمان فرآیند شد [۱۶]. ساباز و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه تأثیر توان ماورای صوت بر مصرف انرژی فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیب در یک خشک‌کن هوای گرم و در دمای ۴۰ درجه سلسیوس پرداختند. ایشان گزارش کردند که اعمال توان ماورای صوت در سطوح ۷۵ و ۹۰ وات به ترتیب منجر به کاهش ۴۲ و ۵۴ درصدی انرژی مصرفی شد [۱۷].

بررسی مطالعات گزارش شده نشان می‌دهد ترکیب توان ماورای صوت با خشک‌کن هوای گرم باعث بهبود شاخص‌های عملکردی فرآیند خشک کردن محصولات مختلف شده است. با توجه به اهمیت گیاهان دارویی و معطر و لزوم فرآوری صحیح آنها، به نظر می‌رسد استفاده از این فناوری بتواند، علاوه بر کاهش زمان و مصرف انرژی فرآیند خشک کردن، باعث ارتقاء کیفیت محصول نهایی نیز شود. علی‌رغم گزارش پژوهش‌های متعدد در زمینه استفاده موفقیت‌آمیز از توان ماورای صوت در خشکاندن محصولات مختلف، تا کنون مطالعه‌ای در ارتباط با تأثیر آن بر میزان

سانتی‌متر، ضخامت ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۲/۵ سانتی‌متر ساخته شد.

۲-۳- آزمایش‌های خشک کردن

به منظور بررسی تأثیر اعمال توان ماورای صوت، در دماهای مختلف هوای ورودی به محفظه خشک‌کن، بر شاخص‌های خشک شدن برگ‌های نعنای فلفلی، آزمایش‌های خشک کردن نمونه‌ها در چهار سطح دمای هوای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و پنج سطح توان ماورای صوت ۰، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ وات انجام شد. قبل از شروع آزمایش‌های خشک کردن، گیاه نعنای فلفلی تازه به مقدار مورد نیاز از یخچال خارج و برگ‌های آنها به دقت جدا شدند. در هر آزمایش، حدود ۱۶۰ گرم از برگ‌ها داخل محفظه خشک‌کن، به طوری که ارتفاع نمونه‌ها درون محفظه خشک‌کن حدود ۱۲ سانتی‌متر بود، قرار داده شد. در طی فرآیند خشک شدن برگ‌ها، وزن نمونه‌ها بطور پیوسته و در فواصل زمانی ۵ دقیقه توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم (Vibra, AJH-4200E) اندازه‌گیری و محتوای رطوبتی لحظه‌ای آنها با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد [۱۸]:

$$M = \left(\frac{(M_0 - 1) \times W_0}{W} + 1 \right) \quad (2)$$

که، M ، W_0 و W به ترتیب محتوای رطوبتی لحظه‌ای (بر پایه تر)، جرم اولیه (کیلوگرم) نمونه‌های تازه و جرم لحظه‌ای (کیلوگرم) نمونه‌های در حال خشک شدن هستند.

در طی آزمایش‌ها، سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن ثابت و معادل یک متر بر ثانیه بود و فرآیند خشک کردن برگ‌ها تا رسیدن به رطوبت حدود ۱۰ درصد بر پایه تر ادامه پیدا کرد. بعد از رسیدن رطوبت برگ‌ها به اندازه مورد نظر، نمونه‌های خشک در کیسه‌های نایلونی ضخیم قرار داده شده و درب آنها به منظور جلوگیری از جذب رطوبت از محیط محکم بسته شد.

آزمایش‌های خشک کردن در شرایط انتخاب شده با سه تکرار انجام و مقادیر میانگین پارامترهای مورد مطالعه محاسبه شد.

۲-۴- استخراج اسانس

از روش تقطیر با آب و دستگاه کلونجر برای استخراج اسانس نمونه‌ها استفاده شد. ۳۵ گرم از نمونه‌های خشک شده در هر تیمار توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم توزین و درون بالن به ظرفیت ۱۵۰۰ میلی‌لیتر منتقل شد. سپس ۱۰۰۰

است. دستگاه طراحی و ساخته شده، ترکیبی از خشک‌کن جابه‌جایی هوای گرم مرسوم و مجموعه تولید و تبدیل امواج ماورای صوت بود.

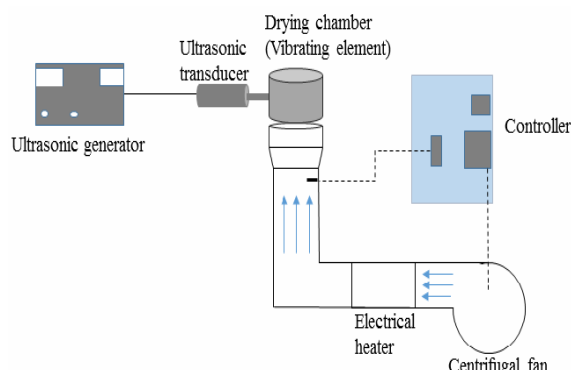


Fig 1 A schematic of the combined hot air-ultrasonic dryer.

در بخش خشک‌کن هوای گرم، یک دمنده گریز مجهز به یک موتور سه فاز با توان ۱/۵ کیلو وات و پروانه‌ای به قطر ۴۲ سانتی‌متر هوای مورد نیاز را تأمین می‌کند. هوای خروجی از دمنده، بعد از عبور از یک گرم‌کن الکتریکی و رسیدن به دمای مورد نظر، به صورت عمودی وارد محفظه خشک‌کن می‌شود. سرعت خطی هوای ورودی به محفظه با استفاده از یک سرعت‌سنج سیم داغ با دقت ۰/۰۱ متر بر ثانیه (testo, AG 435) اندازه‌گیری و با استفاده از یک دستگاه اینورتر فرکانسی (TECO, S310-202-H1BCD) تنظیم و کنترل شد. از یک حسگر PT100 با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس در ورودی محفظه به منظور اندازه‌گیری دمای هوا و از یک کنترل کننده PI (TPR2-N220V35AMR) برای تنظیم آن استفاده شد. توان مصرفی گرم‌کن الکتریکی با استفاده از توان‌سنج دیجیتال (Ziegler Delta Power) اندازه‌گیری شد. بخش تولید و تبدیل امواج ماورای صوت شامل سه واحد تولید امواج ماورای صوت، مبدل امواج ماورای صوت و محفظه خشک‌کن بود. مولد امواج ماورای صوت دارای قابلیت تنظیم بسامد خروجی در محدوده ۱۹ تا ۲۲ کیلوهرتز و کنترل و اندازه‌گیری توان خروجی از صفر تا ۱۲۰۰ وات بود. بسامد تشدید مبدل ماورای صوت ۲۰ کیلوهرتز و حداکثر توان قابل انتقال آن ۲۰۰۰ وات بود. به منظور همسانی بسامد تشدید محفظه خشک‌کن با مبدل و استفاده کارا از توان ماورای صوت، این محفظه از جنس آلومینیوم به قطر خارجی ۱۹

مدت زمان فرآیند شد؛ به طوری که به عنوان مثال، در سطح توان مایورای صوت ۱۸۰ وات، افزایش دما از ۴۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب منجر به ۵۲، ۴۲ و ۲۶ درصد کاهش در زمان خشک شدن شد. در دماهای بالاتر، آهنگ انتقال حرارت از منبع حرارتی به محصول افزایش می‌یابد که باعث افزایش سرعت تبخیر رطوبت و کاهش زمان فرآیند می‌شود. علاوه بر این، در مقادیر ثابت رطوبت نسبی، افزایش دمای خشک کردن غلظت رطوبت مرزی محصول را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش نیروی محرکه انتقال جرم (رطوبت) از محصول به محیط اطراف می‌شود [۱۸]. نتایج مشابهی در ارتباط با تأثیر دما بر زمان فرآیند خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی و غذایی مانند زعفران [۱۹]، قارچ [۲۰]، و دانه‌های شلتوک [۹] گزارش شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، برای دیگر شرایط خشک کردن نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود.

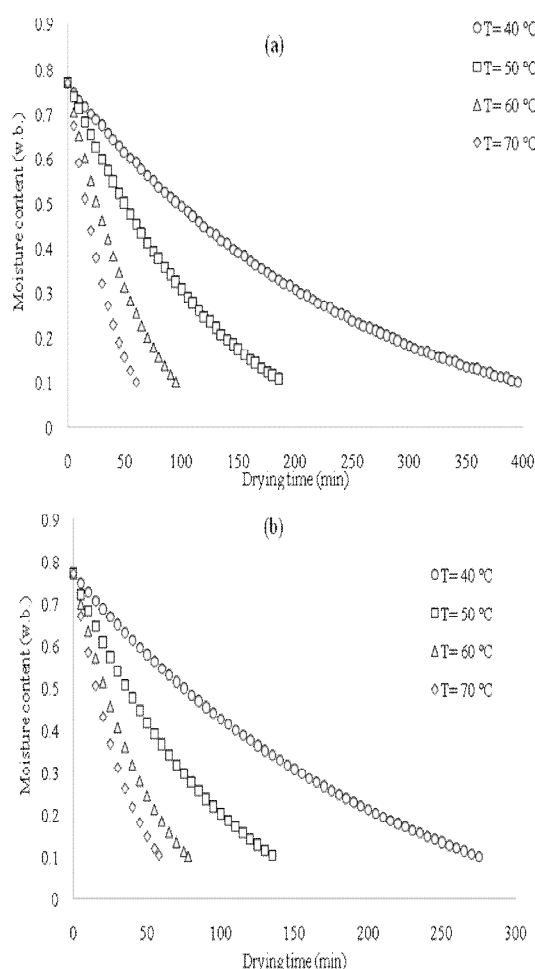


Fig 2 Variation in moisture content of the peppermint leaves at different drying air temperatures for (a) USP=0W and (b) USP=180W.

میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه و عمل استخراج اسانس به مدت ۳ ساعت انجام شد [۴]. همچنین، به منظور بررسی تأثیر خشک کردن بر میزان اسانس گیاه تازه، ۱۶۰ گرم برگ تازه به درون بالن منتقل و به روش مشابه، اسانس آن استخراج شد. اسانس‌های به دست آمده توزین و سپس در ظرف‌های سربسته درون یخچال در دمای 4 ± 1 درجه سلسیوس نگهداری شدند.

۲-۵- اندازه‌گیری توان مصرفی و تعیین

مصرف انرژی ویژه

در طی انجام آزمایش‌ها، با اندازه‌گیری توان مصرفی دمنده، گرم‌کن الکتریکی و مولد امواج مایورای صوت، مقدار کل انرژی مصرفی به دست آمد و مصرف انرژی ویژه (SEC) از رابطه ۳ محاسبه شد [۱۸]:

$$SEC = \frac{TEC}{m_w} \quad (3)$$

در رابطه ۳، SEC مصرف انرژی ویژه (مگاژول بر کیلوگرم آب) و TEC مصرف انرژی کل (مگاژول) است. همچنین، m_w مقدار آب خارج شده از نمونه‌ها در طی فرآیند خشک کردن (کیلوگرم) است که با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد [۱۸]:

$$m_w = \frac{W_0(M_0 - M_f)}{1 - M_f} \quad (4)$$

در رابطه ۴، M_f محتوای رطوبت نهایی (بر پایه تر) نمونه‌های خشک شده است.

۲-۶- تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق از طرح آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و از نرم‌افزار SPSS 20 برای تحلیل آماری نتایج استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- زمان خشک شدن

شکل‌های ۲ و ۳ تغییرات محتوای رطوبتی برگ‌های نعنای فلفلی در طی فرآیند خشک کردن ترکیبی هوای گرم-توان مایورای صوت را به عنوان نمونه و در برخی از شرایط مورد آزمایش نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، افزایش دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن باعث کاهش

مایع-گاز شده که این امر نیز باعث آسان‌تر شدن انتقال جرم می‌شود. در مجموع، گزارش شده است که استفاده از امواج ماورای صوت در فرآیند خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات، سیستمیک خشک شدن را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش زمان فرآیند می‌شود [۱۳]. این یافته با نتایج گزارش شده توسط کوچک‌زاده و قبادی (۲۰۱۲) برای خشک کردن شبه بستر عمیق پسته [۲۱]، سابارز و همکاران (۲۰۱۲) برای فرآیند خشک کردن بستر نازک ورقه‌های سیب [۱۷]، پوئیگ و همکاران (۲۰۱۲) برای خشکاندن قطعات سیلندری شکل بادمجان [۲۲] و گارسیا پرز و همکاران (۲۰۱۳) برای فرآیند خشک کردن ساقه انگور [۲۳] مطابقت دارد. بر اساس نتایج به دست آمده، تأثیر اعمال توان ماورای صوت با افزایش دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن کاهش یافت؛ به طوری که به عنوان مثال، اعمال توان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ وات ماورای صوت در دمای هوای ۶۰ درجه سلسیوس، زمان فرآیند را به ترتیب ۱۱، ۱۸، ۲۳ و ۲۶ درصد کاهش داد؛ در حالی که در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، استفاده از توان ماورای صوت، در هیچ کدام از سطوح اعمالی، تأثیری بر زمان فرآیند نداشت (شکل ۴). نتایج مشابهی توسط کارسل و همکاران (۲۰۰۷) [۲۴]، سابارز و همکاران (۲۰۱۲) [۱۷]، رودریگز و همکاران (۲۰۱۴) [۱۶] و بک و همکاران (۲۰۱۴) [۲۵] گزارش شد. کاهش چگالی هوا و افزایش انرژی حرارتی موجود در محفظه خشک‌کن در دماهای بالاتر هوای ورودی، مهمترین عوامل افت تأثیر امواج ماورای صوت بر مدت زمان فرآیند هستند [۲۶].

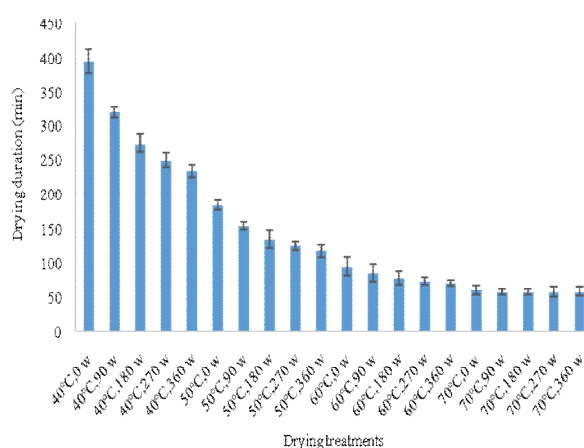


Fig 4 Average drying time for the reduction of the peppermint leaves moisture content from 0.77 to 0.10 (w.b.) at different drying conditions.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دمای هوا و توان ماورای صوت بر مدت زمان فرآیند خشک شدن برگ‌های نعناع

تأثیر استفاده از توان ماورای صوت بر مدت زمان فرآیند خشک شدن نمونه‌ها در دماهای ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که اعمال توان ماورای صوت منجر به کاهش زمان فرآیند شد؛ به طوری که به عنوان مثال، استفاده از توان‌های ماورای صوت ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ وات در دمای هوای ۴۰ درجه سلسیوس در مقایسه با عدم استفاده از توان ماورای صوت به ترتیب باعث کاهش ۱۹، ۳۰، ۳۷ و ۴۱ درصدی زمان فرآیند خشکاندن برگ‌ها شد.

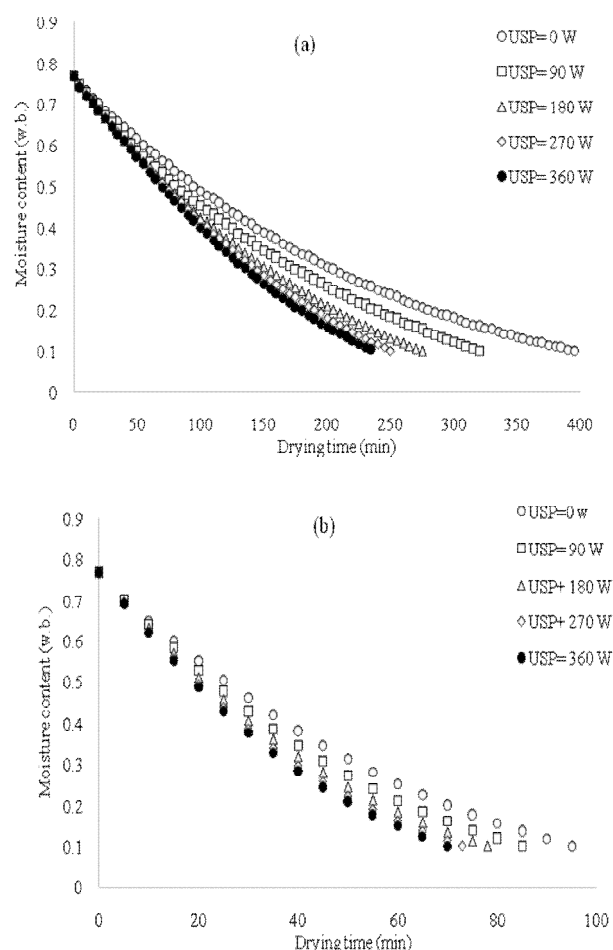


Fig 3 Variation in moisture content of the peppermint leaves at different ultrasound powers for (a) $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and (b) $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که امواج ماورای صوت درون جسم چرخه‌های متناوب فشار و انبساط (اثر اسفنجی) ایجاد کرده، باعث بوجود آمدن کانال‌های بسیار ریز داخلی شده و بدین ترتیب دفع آب را آسان‌تر می‌سازند. ضمناً، امواج ماورای صوت در حالت اعمال به صورت غیرمستقیم، باعث تولید تکان‌ها و حرکات بسیار ریز در سطوح مشترک

فلغلی در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است دما، توان ماورای صوت و اثرهای متقابل آنها در سطح احتمال یک درصد، بر زمان فرآیند دارای تفاوت معنی‌دار هستند. مقایسه میانگین اثرهای اصلی دمای هوا و توان ماورای

صوت بر مدت زمان فرآیند خشک شدن نمونه‌ها نشان داد که بین تمامی دماهای مورد آزمایش و همچنین بین تمامی سطوح توان اعمالی تفاوت معنی‌داری وجود داشت.

Table 1 Results of variance analysis for drying duration.

P	F	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
0.000	1982.80	172503.75	3	517511.25	Temperature
0.000	91.14	7929.53	4	31718.10	USP
0.000	27.79	2418.13	12	29017.50	Temperature * USP
		87.00	40	3480.00	Error
			60	1835409.00	Total

۳-۲- کمیت اسانس برگ‌های نعنای فلغلی

مقادیر میانگین اسانس استخراج شده از برگ‌های تازه و خشک شده نعنای فلغلی در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین مقدار اسانس (۲۶/۴۲ گرم بر کیلوگرم ماده خشک) از برگ‌های خشک شده در با دمای هوای ۴۰ درجه سلسیوس و اعمال توان ماورای صوت ۳۶۰ وات و کمترین مقدار (۹/۹۳ گرم بر کیلوگرم ماده خشک) از نمونه‌های خشکانده شده با دمای هوای ۷۰ و بدون استفاده از توان ماورای صوت حاصل شد. این در حالی بود که میانگین مقدار اسانس برگ‌های تازه نعنای فلغلی ۱۶/۰۸ گرم بر کیلوگرم ماده خشک به دست آمد. همان‌گونه که از شکل ۵ مشخص است، خشک کردن برگ‌ها قبل از اسانس‌گیری، هم باعث کاهش (خشکاندن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس) و هم باعث افزایش (خشکاندن در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) مقدار اسانس شده است. به طور کلی، با توجه به شرایط و مدت زمان خشک کردن، این فرآیند می‌تواند باعث افزایش یا کاهش مقدار اسانس شود [۲۷]. نتایج مشابه با این یافته توسط دیگر پژوهشگران در مطالعه تأثیر روش‌های مختلف خشک کردن بر مقدار اسانس برخی از گیاهان دارویی و معطر گزارش شده است. در تحقیقی، قاسمی پیربلوطی و همکاران (۲۰۱۳) گیاه ریحان را با روش‌های مختلف خشک، اسانس آن‌ها را استحصال و گزارش کردند که مقدار اسانس استحصالی از نمونه‌های خشک شده در برخی از روش‌ها در مقایسه با نمونه‌های تازه افزایش یافت؛ در حالی که در برخی دیگر از روش‌ها کاهش یافت [۲۸]. رحیم‌ملک و گلی (۲۰۱۳) تأثیر تیمارهای مختلف خشک کردن بر مقدار اسانس گیاه دارویی

آویشن را مطالعه و اعلام داشتند که روش خشک کردن انجام‌دای (۱/۷ درصد)، آون با دمای ۵۰ درجه سلسیوس (۱/۴۶ درصد)، آفتاب (۱/۴۲ درصد)، آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس (۱/۰۱ درصد)، سایه (۰/۹۱ درصد) و مایکروویو (۰/۸۹ درصد) به ترتیب بیشترین تا کمترین مقدار اسانس را حاصل کردند. ایشان مقدار اسانس گیاه تازه را ۱/۰۴ درصد گزارش کردند [۲۹].

همان‌گونه از شکل ۵ مشخص است، در تمامی سطوح توان ماورای صوت اعمال شده (از صفر تا ۳۶۰ وات)، بیشترین مقدار اسانس از برگ‌های خشکانده شده در دمای هوای ۴۰ درجه سلسیوس حاصل شده‌و با افزایش دما به طور پیوسته از مقدار اسانس برگ‌ها کاسته شد. یافته‌های گزارش شده توسط دیگر محققان در ارتباط با تأثیر دمای خشک کردن بر مقدار اسانس گیاهان دارویی و معطر مانند ریحان [۳۰]، بادرنجویه [۳۱]، برگ بو [۲۷] و مریم گلی [۳۲] نتایج به دست آمده در این تحقیق را تأیید می‌کنند. کروماسکو (۲۰۰۳) بیان کرد که در شروع فرآیند خشک شدن گیاهان دارویی و معطر، رطوبت از آنها به واسطه پدیده انتشار از درون به سطح آنها حرکت می‌کند و اسانس را نیز با خود حمل می‌کند. در دماهای بالاتر، ضریب انتشار بیشتر است. بنابراین، میزان افت اسانس نیز افزایش می‌یابد [۳۳]. البته، در برخی از گزارشات علمی مشاهده می‌شود که افزایش دمای خشک کردن منجر به افزایش میزان اسانس برخی از گیاهان دارویی و معطر مانند درمنه [۳۴] و مرزه [۳۵] شده است. این مغایرت در نتایج می‌تواند به خاطر تفاوت‌ها بین گونه‌های گیاهی، ساختارهای تراوشی و استقرار آنها در گیاه و ترکیبات اسانس باشد [۲۷].

مقایسه میانگین اثرات اصلی دمای هوا و توان ماورای صوت بر مقدار اسانس برگ‌ها نشان داد بین تمامی دماهای مورد آزمایش اختلاف معنی‌دار وجود داشت در حالی که اختلاف بین توان‌های ماورای صوت معنی‌دار نبود.

جدول ۲ نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دما و توان ماورای صوت بر مقدار اسانس استحصالی از برگ‌های خشک را نشان می‌دهد بر اساس نتایج به دست آمده، اثر دما دارای تفاوت معنی‌دار است. در حالی که، اثر توان ماورای صوت و اثرات متقابل دما و توان‌های اختلاف معنی‌دار نیست. نتایج

Table 2 Results of variance analysis for essential oil yield.

P	F	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
0.000	203.65	654.61	3	1963.82	Temperature
0.367	1.11	3.56	4	14.22	USP
0.988	0.291	0.93	12	11.21	Temperature * USP
		3.21	40	128.58	Error
			60	22154.18	Total

نیز شده، استفاده از توان ماورای صوت همزمان باعث کاهش زمان فرآیند و افزایش مقدار اسانس شد. حفظ و یا ارتقاء کیفیت محصول در کنار کاهش زمان خشکاندن آنها توسط برخی از محققان گزارش شده است [۲۲، ۳۶].

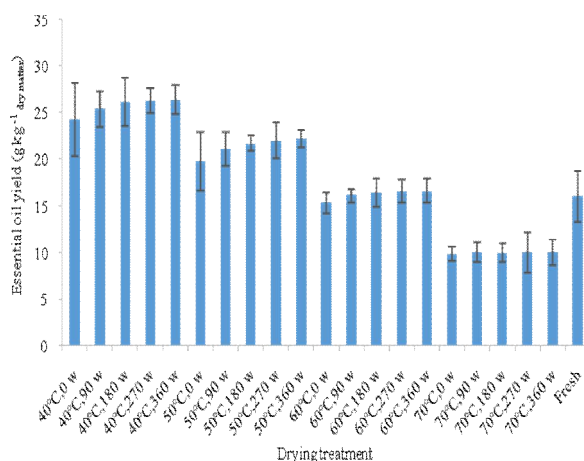


Fig 5 Effect of drying temperature and ultrasound power on average essential oil yield of the peppermint leaves.

۳-۳- مصرف انرژی ویژه

شکل ۶ مقادیر مصرف انرژی ویژه فرآیند خشکاندن برگ‌های نعناع فلفلی در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. در این تحقیق، انرژی مصرفی ویژه در محدوده ۶۳/۳۶ تا ۱۷۰/۸۴ مگاژول بر کیلوگرم آب به دست آمد که با نتایج گزارش شده توسط دیگر پژوهشگران برای محصولات کشاورزی و غذایی در شرایط مختلف خشک کردن قابل مقایسه است (جدول ۳).

نتایج به دست آمده (شکل ۵) نشان می‌دهند اعمال توان ماورای صوت (به غیر از دمای ۷۰ درجه سلسیوس) باعث افزایش مقدار اسانس به دست آمده از برگ‌ها شده است. به عنوان مثال، در دمای هوای ۴۰ درجه سلسیوس، اعمال توان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ وات در مقایسه با حالت بدون استفاده از توان ماورای صوت، به ترتیب باعث ۸/۸، ۷/۸، ۴/۸ و ۸/۷ درصدی اسانس استحصالی شده از برگ‌های خشک نعناع فلفلی شد. همچنین، برای دمای هوای ۵۰ درجه سلسیوس، این مقادیر به ترتیب ۶/۷، ۹/۷، ۱۱/۲ و ۱۲/۴ درصد به دست آمدند. علاوه بر دما، مدت زمان خشک کردن گیاهان دارویی و معطر در مقدار اسانس آنها تأثیرگذار است. کاهش مدت فرآیند می‌تواند باعث افزایش بازده اسانس شود؛ به شرطی که این کاهش زمان با افزایش انتقال انرژی حرارتی به گیاه همراه نشود. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، توان ماورای صوت یکی روش غیرحرارتی است که با ایجاد کانال‌های ریز درون محصول و همچنین ضربه‌های مداوم و سریع روی محصول، بدون افزایش دمای محصول، باعث سرعت بخشیدن به انتقال جرم (رطوبت) و کاهش زمان خشک شدن می‌شود. در واقع، استفاده از توان ماورای صوت بدون آن که مقدار زیاد انرژی گرمایی تولید کند، منجر به افزایش سرعت دفع رطوبت مواد می‌شود. بنابراین، برخلاف افزایش دما که در کنار افزایش سرعت خشکاندن محصول منجر به کاهش چشمگیر اسانس

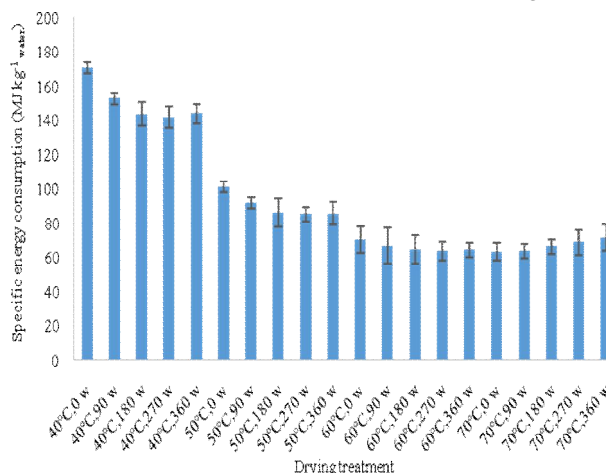
Table 3 Some studies reporting the specific energy consumption (*SEC*) values for drying process.

Reference	Results	Drying conditions	Product
[37]	$29.98 \text{ MJ kg}^{-1} \leq SEC \leq 74.73 \text{ MJ kg}^{-1}$	Air velocity= 2.3, 2.5 and 2.8 m s^{-1} Air temperature= 50, 60 and 70°C	Rough rice
[38]	$85.45 \text{ MJ kg}^{-1} \leq SEC \leq 214.51 \text{ MJ kg}^{-1}$	Air velocity = 1 and 2 m s^{-1} Air temperature = 40 - 70°C	Garlic cloves
[39]	$182.81 \text{ MJ kg}^{-1} \leq SEC \leq 908.39 \text{ MJ kg}^{-1}$	Air velocity = 0.5, 1 and 1.5 m s^{-1} Air temperature = 45 - 70°C	Pomegranate arils
[7]	$69.76 \text{ MJ kg}^{-1} \leq SEC \leq 251.78 \text{ MJ kg}^{-1}$	Air velocity = 0.5, 1 and 1.5 m s^{-1} Air temperature = 40, 50 and 60°C	Roman chamomile
[40]	$23.29 \text{ MJ kg}^{-1} \leq SEC \leq 90.90 \text{ MJ kg}^{-1}$	Air velocity = 0.5 and 1 m s^{-1} Air temperature = 40 - 70°C	Chestnuts

نتایج به دست آمده (شکل ۶) نشان می‌دهند که اعمال توان ماورای صوت در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس منجر به کاهش انرژی مصرفی فرآیند شد؛ در حالی که در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، نه تنها باعث کاهش نشده بلکه انرژی مصرفی را نیز افزایش داده است. دلیل این امر آن است که اعمال توان ماورای صوت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، هیچ‌گونه کاهشی در مدت زمان فرآیند خشک کردن نمونه‌ها ایجاد نکرد (شکل ۴). در ضمن، توان مصرفی مولد امواج ماورای صوت نیز به مقادیر انرژی مصرفی گرم‌کن الکتریکی و دمنده اضافه شده است. همچنین، در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس، با افزایش توان ماورای صوت مصرفی تا ۲۷۰ وات، انرژی مصرفی به صورت پیوسته کاهش یافت؛ ولی استفاده از توان ماورای صوت ۳۶۰ وات منجر به اندکی افزایش مصرف انرژی در مقایسه با توان ۲۷۰ وات شد. به عنوان مثال، در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، استفاده از توان ماورای صوت در سطوح ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ وات به ترتیب باعث کاهش انرژی مصرفی فرآیند خشک کردن برگ‌های نعنای فلفلی به میزان ۱۰/۶، ۱۵/۹، ۱۷ و ۱۵/۷ درصد شد. گارسیا پرز و همکاران (۲۰۱۲) با خشکاندن پوست پرتقال در یک خشک‌کن ترکیبی (دمای هوا ۴۰ درجه سلسیوس، سرعت هوا یک متر بر ثانیه، سطوح توانماورای صوت ۰، ۴۵ و ۹۰ وات) به تأثیر توان ماورای صوت بر انرژی مصرفی فرآیند را مطالعه کردند. ایشان گزارش کردند استفاده از توان‌های ماورای صوت ۴۵ و ۹۰ وات به ترتیب باعث کاهش ۱۲ و ۲۰ درصدی مصرف انرژی شد [۴۱].

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دما و توان ماورای صوت بر انرژی مصرفی ویژه فرآیند (جدول ۴) نشان داد که اثر دما و توان ماورای صوت و همچنین اثرهای متقابل آنها دارای اختلاف معنی‌داری هستند. نتایج مقایسه میانگین‌های اثر اصلی

طبق نتایج به دست آمده، بیشترین و کمترین مقادیر انرژی ویژه به ترتیب در فرآیند خشک کردن برگ‌ها با دماهای ۴۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و بدون اعمال توان ماورای صوت مصرف شد. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، در تمامی سطوح توان ماورای صوت، افزایش دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن از ۴۰ به ۷۰ درجه سلسیوس به طور پیوسته باعث کاهش مصرف انرژی شده است. علی‌رغم کاهش گرمای ویژه هوا در دماهای بالاتر، به دلیل کاهش چشمگیر زمان فرآیند در این دماها، افزایش دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن باعث کاهش مقدار انرژی مصرفی فرآیند می‌شود [۱۸]. پژوهشگران مختلف از قبیل توحیدی و همکاران (۲۰۱۷) [۱۸]، ترکی هرچگانی و همکاران (۲۰۱۶) [۴] و متولی همکاران (۲۰۱۴) [۷] نتایج مشابهی در ارتباط با تأثیر دمای بر مصرف انرژی فرآیند خشک کردن محصولات مختلف گزارش کرده‌اند.

**Fig 6** Average specific energy consumption for combined hot air-ultrasonic power drying of the peppermint at different drying conditions.

ماورای صوت در ترکیب باه هوای گرم باعث کاهش معنی‌دار انرژی مصرفی شد اما اختلافی معنی‌داری بین سطوح توان اعمالی (۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ وات) وجود نداشت.

دما بر انرژی مصرفی و پڑوهش، برگ‌های گیاه دارویی نعنای فلفلی در یک دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس بود در حالی که اختلاف بین دمای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس معنی‌دار نبود. همچنین، نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که هرچند استفاده از توان

Table 4 Results of variance analysis for specific energy consumption.

P	F	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
0.000	664.72	24453.04	3	73359.11	Temperature
0.000	11.22	412.68	4	1650.71	USP
0.000	4.30	158.28	12	1899.34	Temperature * USP
		36.79	40	1471.48	Error
			60	609872.80	Total

on rough rice drying kinetics at various thin layers of a deep bed, Heat and Mass Transfer. 50, 1717–1725.

- [2] Demiray, E., Tulek, Y. 2014. Drying characteristics of garlic (*Allium sativum* L) slices in a convective hot air dryer, Heat and Mass Transfer. 50, 779–786.
- [3] Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., Madadlou, A. 2013. A review on exergy analysis of drying processes and systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 22, 1–22.
- [4] Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Ghasemi Pirbalouti, A., Sadeghi, M. 2016. Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 58, 407–418.
- [5] Chou, S. K., Chua, K. J. 2001. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs, Trends in Food Science & Technology. 12, 359–369.
- [6] Stanisławski, J. 2005. Drying of diced carrot in a combined microwave–fluidized bed dryer, Drying Technology. 23, 1711–1721.
- [7] Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M. H. 2014. Comparison of energy parameters in various dryers, Energy Conversion and Management. 87, 711–725.
- [8] Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K., Achariyaviriya, S. 2011. Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air, Journal of Food Engineering. 102, 233–239.
- [9] Zare, D., Naderi, H., Ranjbaran, M. 2015. Energy and quality attributes of combined

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برگ‌های گیاه دارویی نعنای فلفلی در یک خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-ماورای صوت در سطوح مختلف دمای هوای ورودی توان ماورای صوت اعمالی به محفظه خشک‌کن خشکانده و تأثیر دما و توان ماورای صوت بر مدت زمان، میزان اسانس و همچنین انرژی مصرفی فرآیند مطالعه شد. نتایج نشان دادند که استفاده از دماهای بالای هوا، علی‌رغم مدت زمان و مصرف انرژی کمتر فرآیند، به دلیل کاهش شدید میزان اسانس، برای خشکاندن گیاه نعنای فلفلی مطلوب نیست. اعمال توان ماورای صوت، به ویژه در دماهای پایین‌تر، باعث کاهش هم‌زمان زمان و انرژی مصرفی و همچنین افزایش مقدار اسانس استحصالی از گیاه شد. با افزایش دما از شدت اثر توان ماورای صوت کاسته شد؛ به طوری که در دمای هوای ۷۰ درجه سلسیوس نه تنها اعمال توان ماورای صوت باعث بهبود زمان و مقدار اسانس نشد، بلکه مصرف انرژی فرآیند را نیز افزایش داد.

از آنجا که زمان طولانی، مصرف انرژی زیاد و تأثیر منفی بر کیفیت محصول از مهمترین معایب خشک‌کن‌های هوای گرم به شمار می‌روند، با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که توان ماورای صوت‌دارای قابلیت استفاده مؤثر به منظور بهبود عملکرد این خشک‌کن‌ها، بویژه در خشک کردن محصولات ارزشمند و حساس به حرارت، است.

۵- منابع

- [1] Torki-Harchegani, M., Sadeghi, M., Moheb, A., Naghavi, Z. 2014. Investigation

- [20] Ghanbarian, D., Baraani Dastjerdi, M., Torki-Harchegani, M. 2016. Mass transfer characteristics of bisporus mushroom (*Agaricus bisporus*) slices during convective hot air drying, *Heat and Mass Transfer*. 52, 1081–1088.
- [21] Kouchakzadeh, A., Ghobadi, P. 2012. Modeling of ultrasonic-convective drying of pistachios, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 14, 145–149.
- [22] Puig, A., Perez-Munuera, I., Carcel, J. A., Hernando, I., Garcia-Perez, J. V. 2012. Moisture loss kinetics and microstructural changes in eggplant (*Solanum melongena* L.) during conventional and ultrasonically assisted convective drying, *Food and Bioproducts Processing*. 90, 624–632.
- [23] Garcia-Perez, J. V., Carcel, J. A., Simal, S., Garcia-Alvarado, M. A., Mulet, A. 2013. Ultrasonic intensification of grape stalk convective drying: kinetic and energy efficiency, *Drying Technology*. 31, 942–950.
- [24] Cárcel, J. A., Garcia-Perez, J. V., Riera, E., Mulet, A. 2007. Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon, *Drying Technology*. 25, 185–193.
- [25] Beck, S. M., Sabarez, H., Gaukel, V., Knoerzer, K. 2014. Enhancement of convective drying by application of airborne ultrasound – A response surface approach, *Ultrasonics Sonochemistry*. 21, 2144–2150.
- [26] Gallego-Juárez, J. A., Riera, E., de la Fuente Blanco, S., Rodríguez-Corral, G., Acosta-Aparicio, V. M., Blanco, A. 2007. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices, *Drying Technology*. 25, 1893–1901.
- [27] Hamrouni-Sellami, I., Wannes, W. A., Bettaieb, I., Berrima, S., Chahed, T., Marzouk, B., Limam, F. 2011. Qualitative and quantitative changes in the essential oil of *Laurus nobilis* L. leaves as affected by different drying methods, *Food Chemistry*. 26, 691–769.
- [28] Ghasemi Pirbalouti, A., Oraie, M., Pouriamehr, M., Babadi, E. S. 2013. Effects of drying methods on qualitative and quantitative of the essential oil of Bakhtiari savory (*Satureja bachtiarica* Bunge.), *Industrial Crops and Products*. 46, 324–327.
- [29] Rahimmalek, M., Goli, S. A. H. 2013. Evaluation of six drying treatments with respect to essential oil yield, composition and color characteristics of *Thymys* hot-air/infrared drying of paddy, *Drying Technology*. 33, 570–582.
- [10] Gamboa-Santos, J., Montilla, A., Soria, A. C., Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V., Villamiel, M. 2014. Impact of power ultrasound on chemical and physicochemical quality indicators of strawberries dried by convection, *Food Chemistry*. 128, 132–139.
- [11] Kowalski, S. J., Pawłowski, A., Szadzińska, J., Lechtańska, J., Stasiak, M. 2016. High power airborne ultrasound assist in combined drying of raspberries, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 34, 225–233.
- [12] Siucińska, K., Konopacka, D. 2014. Application of ultrasound to modify and improve dried fruit and vegetable tissue – a review, *Drying Technology*. 32, 1360–1368.
- [13] Jambrak, A. R., Mason, T. J., Paniwnyk, L., Lelas, V. 2007. Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties, *Journal of Food Engineering*. 81, 88–97.
- [14] Schössler, K., Jäger, H., Knorr, D. 2012. Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper, *Journal of Food Engineering*. 108, 103–110.
- [15] Cárcel, J. A., Garcia-Perez, J. V., Riera, E., Mulet, A. 2011. Improvement of convective drying of carrot by applying power ultrasound- Influence of mass load density, *Drying Technology*. 29, 174–182.
- [16] Rodríguez, J., Mulet, A., Bon, J. 2014. Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics in fixed beds of high porosity, *Journal of Food Engineering*. 127, 93–102.
- [17] Sabarez, H. T., Gallego-Juarez, J. A., Riera, E. 2012. Ultrasonic-assisted convective drying of apple slices, *Drying Technology*. 30, 989–997.
- [18] Tohidi, M., Sadeghi, M., Torki-Harchegani, M. 2017. Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy, *Renewable and Sustainable Energy reviews*. 70, 519–528.
- [19] Akhondi, E., Kazemi, A., Maghsoodi, V. 2011. Determination of a suitable thin layer drying curve model for saffron (*Crocus sativus* L) stigmas in an infrared dryer, *Scientia Iranica*. 18, 1397–1401.

- of the essential oil of *Satureja hortensis*, Food Chemistry. 99, 19–23.
- [36] M.G.C. do Nascimento, E., Mulet, A., Ascheri, J. L. R., de Carvalho, C. W. P., Cárcel, J. A. 2016. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel, Journal of Food Engineering. 107, 108–118.
- [37] Khanali, M., Banisharif, A., Rafiee, S. 2016. Modeling of moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in fluidized bed drying of rough rice, Heat and Mass Transfer. 52, 2541–2549.
- [38] Sharma, G.P., Prasad, S. 2006. Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves, Energy. 31, 1921–1926.
- [39] Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H. 2011. Evaluation of energy consumption in different drying methods, Energy Conversion and Management. 52, 1192–1199.
- [40] Koyuncu, T., Serdar, U., Tosun, I. 2004. Drying characteristics and energy requirement for dehydration of chestnuts (*Castanea sativa* Mill.), Journal of Food Engineering. 62, 165–168.
- [41] Garcia-Perez, J. V., Ortuño, C., Puig, A., Carcel, J. A., Perez-Munuera, I. 2012. Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying, Food and Bioprocess Technology. 5, 2256–2265.
- daenensis subsp. daenensis*. Celak leaves, Industrial Crops and Products. 42, 613–619.
- [30] 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.
- [31] Agryropoulos, 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.
- [32] Hamrouni Sellami, I., Bettaieb Rebey, I., Sriti, J., Zohra Rahali, F., Limam, F., Marzouk, B. 2012. Drying sage (*Salvia officinalis* L.) plants and its effects on content, chemical composition, and radical scavenging activity of the essential oil, Food and Bioprocess Technology. 5, 2978–2989.
- [33] Cremasco, M. A. 2003. Influence of fixed-bed drying on the safrole content in essential oil from long pepper (*Piper hispidinervium* C. DC). Final report, FAPESP Project., No. 00/12422-7.
- [34] Khangholi, S., Rezaeinodehi, A. 2008. Effect of drying temperature on essential oil content and composition of sweet wormwood (*Artemisia annua*) growing wild in Iran, Pakistan Journal of Biological Sciences. 11, 934–937.
- [35] Sefidkon, F., Abbasi, K., Bakhshi, K. G. 2006. Influence of drying and extraction methods on yield and chemical composition

Drying of peppermint leaves (*Mentha piperita* L.) in a combined hot air-ultrasonic dryer: Influences of temperature and ultrasound power on duration, energy consumption, and essential oil yield

Ghanbarian, D.^{1*}, Torki-Harchegani, M.², GhasemiPirbalouti, A.³, Sadeghi, M.⁴

1. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

2. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

3. Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Research Centre of Medicinal Plants & Ethno-veterinary, Department of Medicinal Plants, Shahrekord, Iran

4. Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received: 2017/07/25 Accepted: 2017/11/01)

Over the last decade, the use of ultrasound power has been attended as one of the most novel research fields in processing of food and agricultural products. In the present research, influences of the air temperature and ultrasound power were investigated on some important indices of peppermint leaves drying process. The experiments were conducted by using a combined hot air-ultrasonic dryer at different levels of air temperature (40, 50, 60 and 70°C) and ultrasound power (0, 90, 180, 270 and 360 W). The obtained results showed that although, increasing temperature improved the process time and energy consumption, but decreased the essential oil yield of the samples. In addition to decreasing the process duration and consumed energy, ultrasound power at temperature levels of 40, 50 and 60°C increased the extracted essential oilyield. At air temperature of 70°C, using of the ultrasound power led to more energy consumption without any effect on the two other indices. Generally, results of this research indicated that application of ultrasound power could be a useful method to improve the performance of hot air dryers in drying of heat-sensitive products such as medicinal and aromatic plants.

Keywords: Ultrasound power, Specific energy consumption, Essential oil, Peppermint

* Corresponding Author E-Mail Address: dghanbarian@yahoo.com