نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۵، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۴، ص ۱۶۲-۱۵۴

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 5, No. 1, Spring - Summer 2015, p. 154-162

تحلیل انرژی و سینتیک خشک شدن برگ‌های نعناع به روش بستر شناور ارتعاشی مجهز به پمپ حرارتی

سید مجید عطایی اردستانی[۱] - بابک بهشتی[۲] - مرتضی صادقی[۳*] - سعید مینایی[۴]

تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۱۵
تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۵

چکیده

تاکنون خشک‌کن‌های بستر شناور برای خشک کردن محصولات برگی با تخلخل بالا و مقاومت مکانیکی پایین که نتیجه آن عدم شناورسازی مطلوب می‌باشد، مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. اعمال ارتعاش به‌عنوان یک راهکار برای بهبود کیفیت شناورسازی و اجتناب از مشکلاتی همانند کانالیزه شدن و خارج شدن بستر ذرات از حالت سیالی مطرح شده است. در این تحقیق یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی مجهز به پمپ حرارتی آزمایشگاهی برای خشک کردن برگ‌های نعناع به‌عنوان یک گیاه دارویی مهم ساخته شد. آزمایش‌ها در دامنه ارتعاش ۳ میلی‌متر و فرکانس ارتعاش ۸۰ هرتز انجام شد. در این دستگاه کنترل دما و سرعت هوای ورودی به کمک یک سیستم کنترل خودکار انجام می‌گرفت. آزمایش‌های خشک کردن در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و دو روش استفاده (HPD) و عدم استفاده (NHPD) از پمپ حرارتی صورت گرفت. نتایج نشان داد که خشک شدن برگ‌های نعناع عمدتاً در دوره نرخ نزولی اتفاق می‌افتد. ضریب نفوذ برگ‌های نعناع با افزایش دما افزایش نشان داد و مقدار آن از $۴/۲۵۶۵۶\times۱۰^{-۱۱}$ تا $۲/۹۵۸۷۲\times۱۰^{-۱۰}$ و از $۳/۷۱۹۱۸\times۱۰^{-۱۱}$ تا $۱/۲۹۱۹۶\times۱۰^{-۱۰}$ متر مربع بر ثانیه به‌ترتیب برای روش HPD و NHPD به‌دست آمد که در محدوده مقادیر گزارش شده برای مواد غذایی بود. انرژی اکتیواسیون برگ‌های نعناع در روش HPD و NHPD به‌ترتیب ۸۴ و ۵۴/۳۴ کیلوژول بر مول تعیین شد که با نتایج سایر محققین مطابقت داشت. ضریب عملکرد و نرخ تبخیر رطوبت ویژه بیانگر کارایی سیستم پمپ حرارتی بودند و انرژی مصرفی دستگاه در روش NHPD بیشتر از روش HPD بود.

واژه‌های کلیدی: انرژی اکتیواسیون، خشک‌کن بستر شناور، ضریب عملکرد، ضریب نفوذ، گیاهان دارویی

مقدمه

در قرن اخیر به زیان‌های ناشی از مصرف مواد شیمیایی، داروهای مصنوعی، سموم شیمیایی، مواد افزودنی، نگهدارنده‌ها، اسانس‌ها و طعم‌های مصنوعی کاملاً پی برده شده است. گسترش انواع سرطان‌ها و بیماری‌های مختلف تأییدکننده این موضوع می‌باشند. در این بین گیاهان دارویی اسانس‌دار که از سابقه طولانی در جهان برخوردارند، نقش مهمی در زندگی انسان و جلوگیری و کاهش این مسئله دارند. نعناع (*Mentha spicata*) یکی از گیاهان دارویی مهم است که از گذشته بسیار دور مورد استفاده قرار می‌گرفته است. نعناع گیاهی چندساله، علفی و دارای ساقه‌های چهارگوش، برگ‌های پهن سبز تیره و به‌صورت متقابل است. این گیاه دارای بوی بسیار مطبوع است که به همین دلیل از آن در اسانس‌گیری استفاده می‌شود که با نام تجاری *Spearmint oil* معروف است. گیاه نعناع مصارف زیادی از جمله در صنایع دارویی، غذایی و بهداشتی دارد (Doymaz, 2006).

خشک کردن یکی از مهم‌ترین فرآیندهای پس از برداشت است که محصولات فاسد شونده را به فرآورده‌های مقاوم تبدیل می‌کند به‌گونه‌ای که سبب افزایش دوره انبارمانی و حفظ کیفیت مواد غذایی می‌شود. از سوی دیگر، ترکیبات فرار موجود در اسانس گیاهان دارویی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر روش فرآوری می‌باشد. بنابراین، روش صحیح فرآوری این محصولات از اهمیت خاصی برخوردار است (Park *et al.*, 2002).

خشک کردن به روش بستر شناور در بین سایر روش‌های خشک کردن، مزایای بسیاری را به‌همراه دارد که شامل شدت بالای خشک شدن، بازده گرمایی بالا، یکنواختی در خشک شدن، کنترل

۱- دانشجوی دکتری گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
۲- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه صنعتی اصفهان
۴- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس
(*- نویسنده مسئول: Email: sadeghimor@cc.iut.ac.ir)

Archive of SID
www.SID.ir

دقیق دما در بستر و همچنین زمان کوتاه خشک شدن به‌دلیل نرخ بالای انتقال حرارت و جرم می‌باشند (Topuz *et al.*, 2004). خشک کردن به روش بستر شناور می‌تواند به‌صورت پیوسته یا توده‌ای باشد. روش توده‌ای برای محصولات در مقیاس کم و محصولات حساس به گرما نظیر نعناع انجام می‌گیرد. خشک کردن توده‌ای گندم بهاره قرمز در یک خشک‌کن بستر شناور انجام شد و اثر دمای هوا بر نرخ خشک کردن مورد مطالعه قرار گرفت (Dimattia *et al.*, 1997).

اکثر تحقیقاتی که برای افزایش بازده خشک‌کن‌ها صورت گرفته است به‌وسیله کاربرد و مطالعه خشک‌کن‌های مجهز به پمپ حرارتی انجام شده است. خشک‌کن‌های معمولی هوا را با استفاده از انرژی زیاد و با بازده پایین گرم می‌کنند که مقدار انرژی زیادی از فرآیند اتلاف می‌شود. برای کاهش این اتلاف، پمپ‌های حرارتی در سیستم به‌منظور احیای گرمای نهان تبخیر آب در خروجی خشک‌کن تعریف شده‌اند. کاربرد خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی برای محصولات با ارزش بالا و همچنین محصولات حساس به گرما مناسب است و توانایی آن در ایجاد یک فرآیند خشک کردن کنترل شده یک از مزیت‌های آن است. برخی محققین اولین مطالعه فرآیند خشک کردن با این نوع خشک‌کن را انجام دادند (Hodgett, 1976). وی گزارش کرد که مصرف انرژی خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی کمتر از خشک‌کن گرمایی معمولی بود. برآورد اکسرژی خشک‌کردن برگ‌های نعناع در خشک‌کن هوای داغ مجهز به پمپ حرارتی مورد مطالعه قرار گرفت (Colak *et al.*, 2008). همچنین افزایش کیفیت خشک کردن و کاهش مصرف انرژی طی خشک کردن گیاهان علوفه‌ای مختلف با استفاده از خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی گزارش شده است (Fatouh *et al.*, 2006). ضریب عملکرد و نرخ تبخیر رطوبت ویژه از جمله مهم‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی پمپ حرارتی می‌باشند (Oktay and Hepbasli, 2003). آن‌ها گزارش کردند که نرخ تبخیر رطوبت ویژه خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی وقتی که در دمای ۵۰ و ۸۰ درجه سلسیوس به‌کار گرفته شد به‌ترتیب ۰/۵۷ و ۱/۰۲ کیلوگرم بر کیلووات ساعت بود. همچنین نرخ تبخیر رطوبت ویژه در یک سیستم پمپ حرارتی در دمای ۴۵ درجه سلسیوس ۰/۱۲۲ کیلوگرم بر کیلووات ساعت گزارش شد (Kuzgunkaya and Hepbasli, 2007).

علی‌رغم کاربردهای وسیع خشک‌کن‌های بستر شناور، استفاده از آن‌ها برای خشک کردن گیاهان دارویی و به‌ویژه محصولات برگی نظیر نعناع صورت نگرفته است. زیرا محصولات برگی به‌دلیل تخلخل زیاد و توزیع پهنی که دارند و همچنین به‌علت مقاومت کم، می‌شکنند و یا چسبنده و گرما نرم است و در خشک‌کن بستر شناور، شناور نمی‌شوند (Pahlavanzadeh, 1998). برخی محققان ارتعاش را به‌عنوان یک راهکار برای بهبود کیفیت شناورسازی و اجتناب از مشکلاتی همانند کانالیزه شدن و خارج شدن بستر ذرات از حالت سیالی مطرح کرده‌اند (Moreno *et al.*, 2000). در زمینه خشک کردن برگ‌های نعناع تحقیقات اندکی گزارش شده است که به روش معمولی بوده است. رفتار خشک شدن برگ نعناع در دماهای ۳۵، ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه مورد مطالعه قرار گرفته است (Doymaz, 2006). او نشان داد که افزایش دمای هوای ورودی به‌طور معنی‌داری زمان خشک شدن برگ‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین سینتیک خشک شدن برگ‌های نعناع در یک خشک‌کن تونلی در دماهای ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درجه سلسیوس مورد مطالعه قرار گرفت و گزارش شد که خشک شدن نعناع عمدتاً در دوره نرخ نزولی اتفاق می‌افتد (Kadam *et al.*, 2010). آن‌ها همچنین ضریب نفوذ برگ‌های نعناع را اندازه‌گیری کردند و گزارش نمودند که این ضریب با افزایش دما، افزایش می‌یابد.

هدف از انجام این تحقیق مطالعه سینتیک خشک شدن برگ‌های نعناع طی خشک شدن با استفاده از یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی مجهز به پمپ حرارتی و همچنین تعیین ضریب نفوذ برگ‌های نعناع طی دماهای متفاوت خشک کردن و بررسی ضریب عملکرد پمپ حرارتی و نرخ تبخیر رطوبت ویژه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

دستگاه خشک‌کن

برای انجام آزمایش‌های این تحقیق یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی مجهز به پمپ حرارتی آزمایشگاهی ساخته شد که در شکل ۱ a اجزاء اصلی آن نشان داده شده است. پمپ حرارتی متشکل از تبخیرکننده، چگالنده، کمپرسور و شیر انبساط می‌باشد (شکل ۱ b). در این دستگاه هوای مورد نیاز برای فرآیند شناورسازی و خشک کردن ذرات، توسط یک دمنده سانتریفیوژ ۱/۵ کیلووات با موتور محرک سه فاز ۲۸۳۰ دور در دقیقه (موتوژن تبریز مدل 90L2A) تأمین می‌گردد. تغییر سرعت دمنده از طریق یک دستگاه تغییر سرعت فرکانسی TECO مدل 7300 CV صورت می‌گیرد. هوای مورد نیاز پس از عبور از یک کوره‌ی حرارتی ۱۰ کیلووات متشکل از ۱۱ المان حرارتی الکتریکی به دمای مطلوب می‌رسد. دمای هوای خروجی از گرمکن توسط یک کنترلگر PI با دقت ±۰/۵ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته می‌شود. سرعت هوای عبوری با استفاده از یک حسگر سرعت (AVT, HK Instruments) اندازه‌گیری می‌شود. محفظه‌ی خشک‌کن از جنس پلکسی‌گلاس شفاف با قطر خارجی ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۵ میلی‌متر ساخته شده است. صفحه توزیع‌کننده از جنس پلکسی گلاس با ضخامت ۵ میلی‌متر و از ۱۶۳۰ سوراخ با قطر ۲ میلی‌متر تشکیل شده است. حسگرهای اندازه‌گیری دما و رطوبت (SHT75) در ورودی

Archive of SID

www.SID.ir

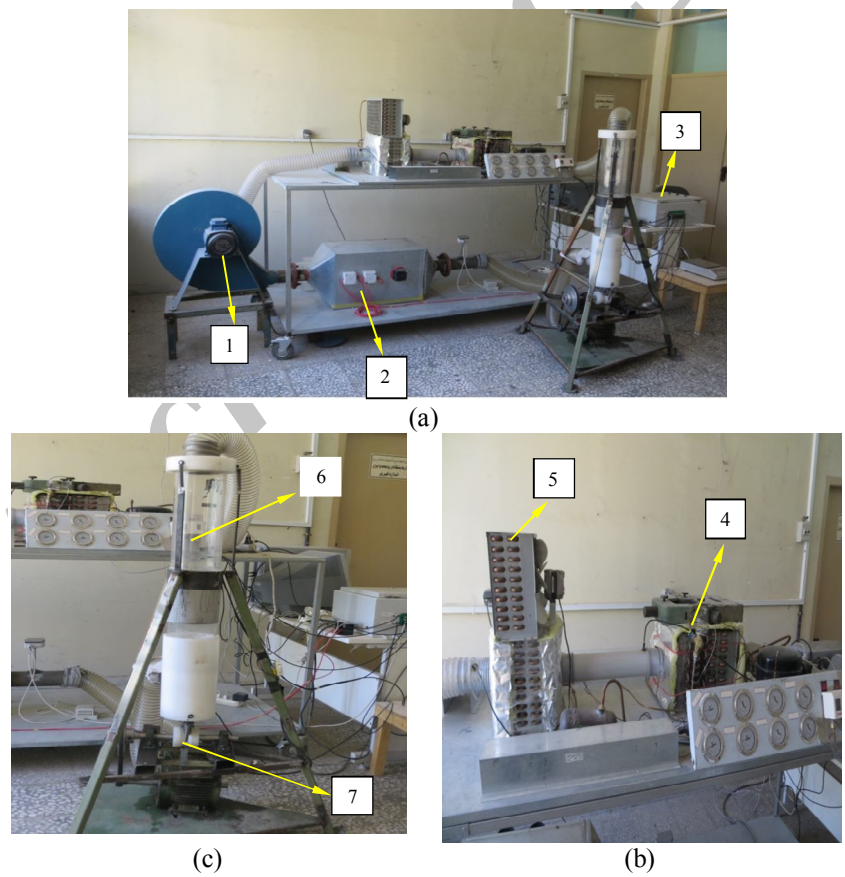
محفظه خشک‌کن و همچنین در ارتفاع ۱۰ میلی‌متر و ۳۰۰ میلی‌متر بالاتر از صفحه توزیع‌کننده، قبل و بعد از تبخیرکننده و بعد از چگالنده در سیستم پمپ حرارتی قرار گرفتند.

از یک ترازوی دقیق با دقت ۰/۱ گرم (مدل KERN, 572-57) برای توزین نمونه‌ها در طول آزمایش استفاده شد. تمام داده‌های به‌دست آمده از حسگرهای دما و رطوبت و حسگر سرعت هوا، ترازو و انرژی مصرفی توسط یک سیستم کنترلی به‌طور هم‌زمان هر ۱۵ ثانیه یک‌بار ثبت و در کامپیوتر ذخیره شد. برنامه‌ی سیستم کنترل با نرم افزار Labview نوشته شده است. به‌منظور ایجاد ارتعاش در محفظه خشک‌کن، از یک موتور الکتریکی تک فاز ۲۸۰۰ دور در دقیقه و یک مکانیزم با خارج از مرکزیت ۳ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۱ c). به‌منظور کاهش فرکانس ارتعاشی از یک سیستم پولی و تسمه استفاده شد به‌گونه‌ای که فرکانس ارتعاشی ۸۰ هرتز به‌دست آمد. دایره خارج از مرکز در زیر محفظه خشک‌کن نصب گردید.

روش انجام آزمایش‌ها

کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه خشک‌کن‌های محصولات کشاورزی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها نمونه‌های تازه نعناع از یک بازار محلی تهیه می‌شدند. ابتدا برگ نمونه‌ها از ساقه جدا شده و در داخل یخچال با دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری می‌شدند. مقدار رطوبت اولیه برگ‌ها با قرار دادن در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد (AOAC, 1990). رطوبت اولیه نمونه‌ها ۱±۸۲/۴٪ بر پایه وزن تر (۴۵±۴۵۷/۲٪ بر پایه وزن خشک) به‌دست آمد.

آزمایش‌ها در سه سطح دما (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) و در دو تیمار با و بدون پمپ حرارتی انجام شد. دستگاه خشک‌کن قبل از انجام هر آزمایش حدود ۳۰ دقیقه روشن شده تا یک حالت پایدار برای انجام آزمایش فراهم گردد. در حین فرآیند خشک کردن، محفظه خشک‌کن هر ۱۰ دقیقه یک‌بار به سرعت از دستگاه جدا و روی ترازوی دقیق توزین می‌شد. انجام آزمایش تا زمانی ادامه می‌یافت که تغییری در وزن مشاهده نمی‌شد. سپس نمونه‌ها به سرعت به داخل نایلون منتقل می‌شدند تا تغییر وزنی در آن‌ها رخ ندهد.



(a) (c) (b)

شکل ۱– خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی مجهز به پمپ حرارتی؛ (a) تصویر کلی، (b) سیستم پمپ حرارتی، (c) سیستم ارتعاشی، (۱) فن، (۲) گرمکن، (۳) سیستم کنترلی، (۴) تبخیرکننده، (۵) چگالنده، (۶) محفظه خشک‌کن، (۷) مکانیزم ارتعاشی

Fig.1. Vibro-fluidized bed heat pump dryer; (a) Overall picture, (b) Heat pump system, (c) Vibration system, (1) Fan, (2) Heater, (3) Control system, (4) Evaporator, (5) Condenser, (6) Plenum, (7) Vibration system

www.SID.ir

روش اندازه‌گیری ضریب نفوذ

نسبت رطوبت (MR) برگ‌های نعناع در حین آزمایش از رابطه (۱) محاسبه شد (Midilli, 2001; Erenturk *et al.*, 2004).

$$MR=\frac{M-M_e}{M_o-M_e} \quad (۱)$$

که M، M_e و M_o به‌ترتیب محتوای رطوبتی در هر لحظه، محتوای رطوبتی تعادلی و محتوای رطوبتی اولیه بر پایه خشک می‌باشد.

قانون دوم فیک برای تعیین ضریب نفوذ استفاده می‌شود. در بررسی فرآیند خشک کردن، معمولاً ماده با سه شکل هندسی صفحه نامتناهی، کره و استوانه نامتناهی تقریب زده می‌شود و انتشار رطوبت تنها در یک جهت مورد توجه قرار گرفته و از انتشار در جهات دیگر صرف نظر می‌شود. برگ‌های نعناع به‌صورت صفحه نامتناهی در نظر گرفته می‌شوند (Doymaz, 2006). حل معادله مشتقات جزئی قانون دوم فیک برای شرایط مختلف با استفاده از انواع روش‌های تحلیلی و عددی ارائه شده است (Crank, 1975). اگر رطوبت اولیه در کل ماده یکسان و برابر M_0 باشد و در حین خشک شدن نیز سطح ماده خشک باشد، معادله نهایی به‌صورت رابطه (۲) خواهد بود.

$$MR=\frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)^2}\exp\left(-\frac{(2n-1)^2\pi^2D_{eff}t}{4l_0^2}\right) \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، l_0 نصف ضخامت صفحه برحسب متر و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر برحسب متر مربع بر ثانیه می‌باشد. در زمان‌های طولانی خشک کردن می‌توان فقط جمله نخست رابطه (۲) را در نظر گرفت (Lopez *et al.*, 2000).

$$MR=\frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2D_{eff}t}{4l_0^2}\right) \quad (۳)$$

با رسم منحنی ln(MR) در برابر زمان، شیب منحنی (k_0) تعیین می‌شود که از رابطه (۴) می‌توان برای محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده کرد.

$$K_0=\frac{\pi^2D_{eff}}{4l_0^2} \quad (۴)$$

محاسبه انرژی اکتیواسیون

معادله آرنیوس، دما و ضریب نفوذ مؤثر را به‌صورت رابطه (۵) به هم مرتبط می‌سازد (Lopez *et al.*, 2000).

$$D_{eff}=D_0\exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (۵)$$

که در رابطه (۵)، D_0 ثابت معادله آرنیوس برحسب متر مربع بر ثانیه، E_a انرژی اکتیواسیون برحسب کیلوژول بر مول و T دمای هوا برحسب درجه سلسیوس و R ثابت جهانی گاز (۸/۳۱۴۵ ژول بر مول درجه کلوین) می‌باشد.

با رسم منحنی $\ln(D_{eff})$ در برابر T^{-1}، شیب خط (k_E) تعیین می‌شود که از رابطه (۶) برای تعیین انرژی اکتیواسیون می‌توان استفاده نمود.

$$K_E=\frac{E_a}{R} \quad (۶)$$

عملکرد خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی

عملکرد خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی وابسته به عملکرد پمپ حرارتی است. عملکرد پمپ حرارتی برحسب ضریب عملکرد (COP) سنجیده می‌شود. ضریب عملکرد تابع مستقیمی از سیال مورد استفاده، آرایش خشک‌کن و شرایط خشک‌کردن است. ضریب عملکرد پمپ حرارتی به‌صورت نسبت میزان حرارت داده شده به هوا توسط چگالنده به انرژی مصرفی توسط کمپرسور تعریف می‌شود (رابطه ۷)، (Oktay and Hepbasli, 2003).

$$COP=\frac{Q}{W} \quad (۷)$$

که در رابطه (۷)، COP ضریب عملکرد، Q میزان حرارت داده شده به هوا (وات) و W انرژی مصرفی (وات) توسط کمپرسور است.

از طرفی می‌توان ضریب عملکرد پمپ حرارتی را به‌وسیله نسبت دماها نیز با رابطه (۸) بیان کرد (Oktay and Hepbasli, 2003).

$$COP=\frac{T_2}{T_2-T_1} \quad (۸)$$

که در رابطه (۸)، T_2 دمای منبع حرارتی با دمای بالاتر (چگالنده) و T_1 دمای منبع حرارتی با دمای پایین‌تر (تبخیرکننده) است. همچنین رابطه‌ی دیگری مانند رابطه (۹) نیز برای بیان ضریب عملکرد پمپ حرارتی وجود دارد (Oktay and Hepbasli, 2003).

$$COP=\frac{\dot{m}\,C_p\left(T_{out,con}-T_{in,con}\right)}{W} \quad (۹)$$

که $\dot{m}$ دبی جرمی هوای عبوری از چگالنده (کیلوگرم بر ثانیه)، c_p گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)، $T_{out,con}$ و $T_{in,con}$ به‌ترتیب، متوسط دمای هوای خروجی و ورودی چگالنده (درجه سلسیوس) و W میزان توان مصرفی کمپرسور (ژول بر ثانیه) می‌باشد.

علاوه بر ضریب عملکرد، نرخ تبخیر رطوبت (MER) و نرخ تبخیر رطوبت ویژه (SMER) نیز از شاخص‌های عملکرد خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی هستند که با روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند (Oktay and Hepbasli, 2003).

$$MER=\frac{\text{آب تبخیر شده از محصول}}{\text{زمان کل خشک شدن}} \quad (۱۰)$$

$$SMER=\frac{\text{آب تبخیر شده از محصول}}{\text{انرژی ورودی کل}} \quad (۱۱)$$

Archive of SID

www.SID.ir

که در روابط (۱۰) و (۱۱)، آب تبخیر شده از محصول برحسب کیلوگرم، زمان کل خشک شدن برحسب ساعت و انرژی ورودی کل برحسب وات ساعت می‌باشد.

نتایج و بحث

سینتیک خشک شدن

تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان خشک شدن و تغییرات نرخ خشک شدن در برابر محتوای رطوبتی در دو روش استفاده از پمپ حرارتی و عدم استفاده از آن در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. مطابق انتظار با افزایش دما، زمان خشک شدن کاهش یافته است. همچنین دوره ثابت نرخ خشک شدن در هیچ یک از منحنی‌ها مشاهده نمی‌شود. این بدین معنی است که خشک شدن برگ‌های نعناع عمدتاً در دوره نرخ نزولی اتفاق می‌افتد. این نکته مؤید آن است که فرآیند انتقال جرم توسط مکانیزم دیفیوژن می‌باشد. نتایج ارائه شده توسط محققان نتایج این تحقیق را تأیید می‌کند (Doymaz, 2006; Kadam *et al.*, 2011).

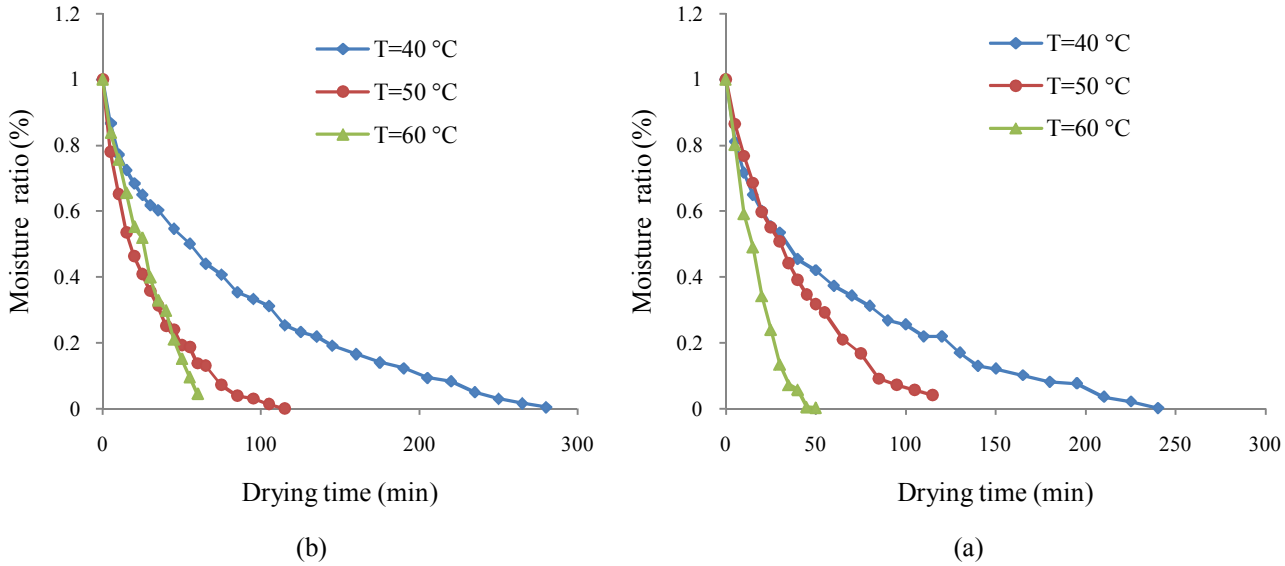
مطابق شکل ۲ در شروع فرآیند خشک کردن، آهنگ از دست دادن رطوبت که همان شیب منحنی‌ها می‌باشد، بسیار زیاد است ولی با گذشت زمان این آهنگ به‌تدریج کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، بیشترین مقدار رطوبت محصول در همان لحظات اولیه از دست می‌رود.

ضریب نفوذ (دیفیوژن) برگ‌های نعناع

مقادیر مربوط به ضریب نفوذ برگ‌های خشک شده نعناع در تیمارهای مربوط به استفاده از پمپ حرارتی و عدم استفاده از پمپ حرارتی در جدول ۱ آمده است. مطابق مقادیر ارائه شده در هر دو تیمار با افزایش دما، ضریب نفوذ نیز افزایش یافته است. همچنین از مقایسه بین دو تیمار در هر دما مشاهده می‌شود که تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین دو تیمار وجود ندارد. دلیل این نتیجه آن است که ضریب نفوذ یک پارامتر داخلی است که به نوع روش آزمایش بستگی ندارد و به‌شدت به دمای آزمایش وابسته است. نتایج مشابهی برای ضریب نفوذ برگ‌های نعناع گزارش شده است (Kadam *et al.*, 2011). محققان گزارش نمودند که ضریب نفوذ مواد غذایی معمولاً در محدوده 10^{-9} تا 10^{-11} متر مربع بر ثانیه می‌باشد که نتایج آزمایش اخیر را تأیید می‌کند (Maskan *et al.*, 2002).

انرژی اکتیواسیون

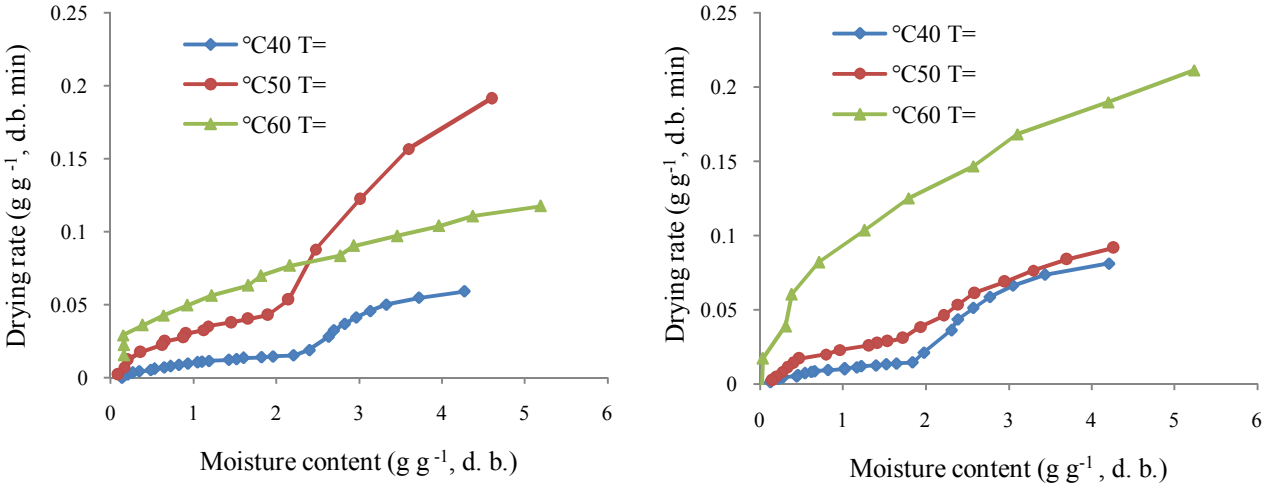
شیب خط $\ln(D_{eff})$ در برابر T^{-1} مطابق شکل ۴ انرژی اکتیواسیون برگ‌های نعناع را نشان می‌دهد. انرژی اکتیواسیون بیانگر مقدار انرژی لازم برای خروج آب از محصول (خشک‌کردن) می‌باشد. انرژی اکتیواسیون برگ‌های نعناع در تیمار مربوط به استفاده از پمپ حرارتی برابر با ۸۴ kJ mol^{-1} و در تیمار مربوط به عدم استفاده از پمپ حرارتی برابر با ۵۴/۳۴ kJ mol^{-1} به‌دست آمد.



شکل ۲– تغییرات نسبت رطوبت با زمان خشک شدن برگ‌های نعناع در دماهای مختلف و دو روش خشک کردن؛ (a) استفاده از پمپ حرارتی، (b) عدم استفاده از پمپ حرارتی

Fig.2. Variations in moisture ratio with drying time for mint leaves dehydrated by two drying methods at different air-drying temperatures; (a) Heat pump, (b) Non-heat pump

www.SID.ir



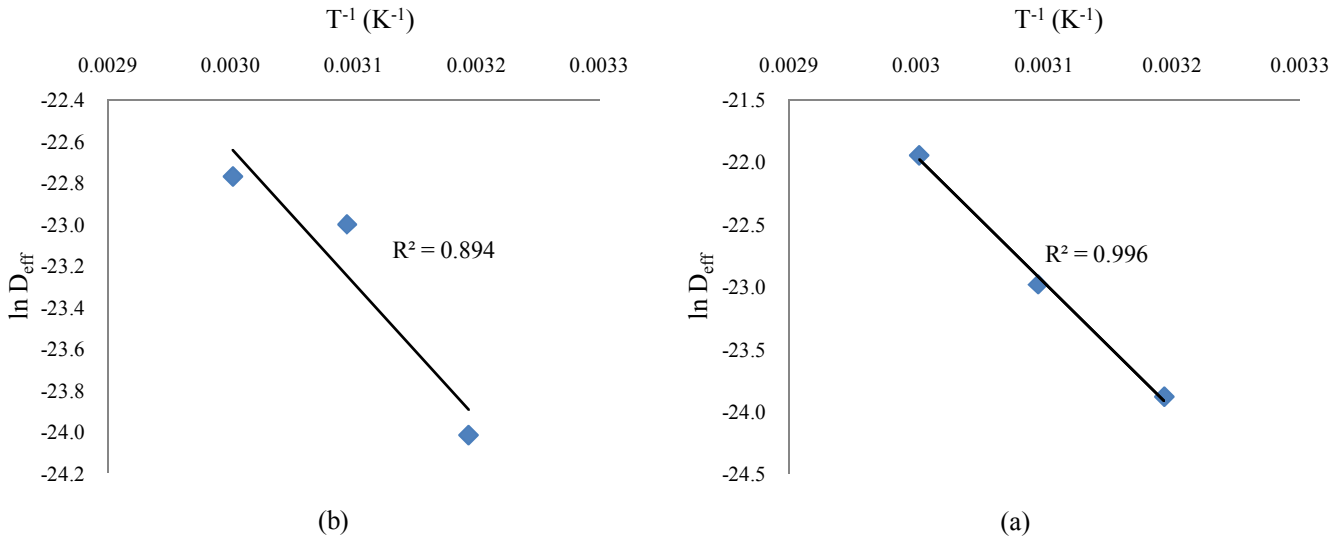
شکل۳- تغییرات نرخ خشک شدن با محتوای رطوبتی برگ‌های نعناع در دماهای مختلف و دو روش خشک کردن؛ (a) استفاده از پمپ، (b) عدم استفاده از پمپ حرارتی

Fig.3. Variation in drying rate with moisture content for mint leaves dehydrated by two drying methods at different air-drying temperatures; (a) Heat pump, (b) Non-heat pump

جدول ۱- مقادیر ضریب نفوذ خشک شدن برگ‌های نعناع در دماهای مختلف و دو روش خشک کردن

Table 1- Values of effective moisture diffusivity of mint leaves dehydrated by two drying methods at different air-drying temperatures

ضریب نفوذ Moisture diffusivity ($m^2 s^{-1}$)		
دما Temperature (°C)	استفاده از پمپ حرارتی Heat pump	عدم استفاده از پمپ حرارتی Non-heat pump
40	4.25656×10^{-11}	3.71918×10^{-11}
50	1.04859×10^{-10}	1.02623×10^{-10}
60	2.95872×10^{-10}	1.29196×10^{-10}



شکل ٤- اثر دمای هوا بر ضریب نفوذ خشک شدن برگ‌های نعناع در دو روش؛ (a) استفاده از پمپ حرارتی، (b) عدم استفاده از پمپ حرارتی

Fig.4. Effect of air temperature on moisture diffusivity for mint leaves dehydrated by two methods; (a) Heat pump, (b) Non-heat pump

www.SID.ir

جدول ۲- مقادیر انرژی اکتیواسیون برخی از سبزی‌ها و مواد غذایی

Table 2- The activation energy values of some vegetables and food stuffs

نوع ماده غذایی Type of food	انرژی اکتیواسیون ($kJ\ mol^{-1}$) Activation energy	منبع Refrence
هویج Carrots	28.36	Doymaz (2004)
فلفل قرمز Chili	42.80	Kaymak-Ertekin (2002)
نخود سبز Green Peas	24.70	Simal *et al*. (1996)
چای سیاه Black Tea	406.02	Panchariya *et al.* (2002)

محققان انرژی اکتیواسیون برگ‌های نعناع را به‌ترتیب ۸۲/۹۳ kJ mol^{-1} (Park *et al.*, 2002)، ۶۲/۹۶ kJ mol^{-1} (Doymaz, 2006) و ۵۷/۱۲ kJ mol^{-1} (Ethmane Kane *et al.*, 2009) گزارش نمودند. انرژی اکتیواسیون برخی از انواع سبزی‌ها و مواد غذایی در جدول ۲ آورده شده است. واضح است که انرژی اکتیواسیون برگ‌های نعناع از انرژی اکتیواسیون هویج، فلفل قرمز و نخود سبز بالاتر است ولی از انرژی اکتیواسیون چای سیاه بسیار کمتر است.

ضریب عملکرد و نرخ تبخیر رطوبت ویژه

مقادیر مربوط به ضریب عملکرد، نرخ تبخیر رطوبت و نرخ تبخیر رطوبت ویژه در دماهای مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. در تمامی آزمایش‌ها دمای محیط ۰/۵±۱۸/۵ درجه سلسیوس بود. برای محاسبه ضریب عملکرد از رابطه (۸) استفاده شد. ضریب عملکرد همواره عددی بزرگتر از یک است و هرچه مقدار آن بیشتر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر پمپ حرارتی است. همان‌طور که مقادیر در جدول ۳ نشان می‌دهد، در هر سه تیمار ضریب عملکرد عددی بزرگ‌تر از یک است. همچنین با افزایش دما ضریب عملکرد مقادیر بزرگ‌تری را نشان می‌دهد. علت این امر این است که طبق رابطه محاسبه ضریب عملکرد، مخرج کسر به توان مصرفی کمپرسور اختصاص دارد که در هر سه تیمار یکسان است. از طرفی ماده مبرد سیستم پمپ حرارتی قادر است حرارت هوای خشک کننده را دریافت و در تبخیرکننده آن را به فاز بخار تبدیل کند و دمای هوای خشک‌کننده را تا سطح معینی پایین بیاورد. با افزایش دما ماده مبرد آمادگی بیشتری برای تغییر فاز می‌یابد. به‌عبارت دیگر، دمای دو طرف چگالنده اختلاف کمتری را نشان می‌دهد که نتیجه آن افزایش ضریب عملکرد است. به‌عبارت دیگر هر چه اختلاف دمای بین خروجی چگالنده و خروجی تبخیر کننده کمتر باشد، ضریب عملکرد بیشتر خواهد بود.

شاخص نرخ تبخیر رطوبت و نرخ تبخیر رطوبت ویژه نیز با افزایش دما افزایش نشان می‌دهند چرا که با افزایش دما نرخ انتقال رطوبت از محصول در واحد زمان افزایش می‌یابد. نرخ تبخیر رطوبت ویژه بیانگر میزان انرژی مورد نیاز برای خارج کردن یک کیلوگرم آب از محصول می‌باشد. هر چه نرخ تبخیر رطوبت ویژه عددی بزرگ‌تر باشد بیانگر عملکرد بهتر پمپ حرارتی می‌باشد. با افزایش توان مصرفی نرخ تبخیر رطوبت ویژه کاهش می‌یابد. از مقایسه کلیه تیمارهای مربوط به استفاده و عدم استفاده از پمپ حرارتی واضح است که در کلیه تیمارهای مربوط به عدم استفاده از پمپ حرارتی، انرژی مصرفی دستگاه بیشتر است (جدول ۴). اختلاف بین دو تیمار با افزایش دما چشمگیرتر می‌شود. علت این است که دستگاه خشک‌کن به یک حداقل انرژی برای کار نیاز دارد ولی با افزایش دما همان‌طور که مقادیر ضریب عملکرد و نرخ تبخیر رطوبت ویژه نشان دادند، عملکرد پمپ حرارتی بهبود می‌یابد و در نتیجه انرژی مصرفی دستگاه کمتر می‌شود. نرخ تبخیر رطوبت ویژه و ضریب عملکرد در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۲/۹۵ کیلوگرم بر کیلووات ساعت و ۵/۷۵ گزارش شد در حالی‌که این مقادیر در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۰/۱۸۸ کیلوگرم بر کیلووات ساعت و ۱/۸۷ بود (Kuzgunkaya and Hepbasli, 2007).

جدول۳- مقادیر مربوط به عملکرد پمپ حرارتی

Table 3- Values of the heat pump performance

دما Temperature (°C)	ضریب عملکرد Coefficient of performance	نرخ تبخیر رطوبت MER ($kg\ h^{-1}$)	نرخ تبخیر رطوبت ویژه SMER ($kg\ kW^{-1}\ h^{-1}$)
40	2.32	0.020	0.054
50	2.55	0.030	0.081
60	3.69	0.102	0.273

Archive of SID

www.SID.ir

جدول٤- مقادیر مربوط به انرژی مصرفی دستگاه خشک‌کن

Table 4- Values of energy consumption for the dryer system

میانگین انرژی مصرفی کل دستگاه خشک‌کن Mean values the total energy consumption of the dryer (W)		
عدم استفاده از پمپ حرارتی Non-heat pump	استفاده از پمپ حراتی Heat pump	دما Temperature (°C)
157.1	151.7	40
303.0	256.6	50
334.3	273.4	60

نتیجه‌گیری

سینتیک خشک شدن برگ‌های نعناع به روش بستر شناور ارتعاشی مجهز به پمپ حرارتی نشان داد که خشک شدن عمدتاً در دوره نرخ نزولی اتفاق می‌افتد. ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دما افزایش نشان داد و در محدوده مقادیر گزارش شده برای مواد غذایی بود. انرژی اکتیواسیون برگ‌های نعناع اندازه‌گیری شد که با نتایج سایر محققین مطابقت نشان داد. ضریب عملکرد، نرخ تبخیر رطوبت و نرخ تبخیر رطوبت ویژه نیز با افزایش دما افزایش یافت. به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که خشک کردن گیاهان دارویی و معطر نظیر نعناع به روش بستر شناور همراه با پمپ حرارتی به‌دلیل کاهش زمان خشک شدن، باعث کاهش مصرف انرژی در حین فرآیند می‌شود و به یکنواختی خشک شدن کمک بیشتری می‌کند.

منابع

1. AOAC. 1990. Official Method of Analysis. Washington, D. C. Association of Official Analytical Chemists (No. 934.06).
2. Colak, N., E. Kuzgunkaya, and A. Hepbasli. 2008. Exergetic assessment of drying of mint leaves in a heat pump dryer. Journal of Food Processing Engineering 31: 281-298.
3. Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion (2nd ed.). UK: Oxford Clarendon Press.
4. Dimattia, D. G., P. R. Amyotte, and F. Hamdullahpur. 1997. Slugging characteristics of group D particles in fluidized beds. Canadian Journal of Chemistry Engineering 75: 452-459.
5. Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering 61: 359-364.
6. Doymaz, I. 2006. Thin layer drying behavior of mint leaves. Journal of Food Engineering 74: 370-375.
7. Erenturk, S., M. S. Gulaboglu, and S. Gultekin. 2004. The thin layer drying characteristics of rosehip. Biosystems Engineering 89: 159-166.
8. Ethmane Kane, C. S., M. A. O. Sid'Ahmed, and M. Kouhila. 2009. Evaluation of drying parameters and sorption isotherms of mint leaves (M. *pulegium*). Revue des Energies Renouvelables 12: 449-470.
9. Fatouh, M., M. N. Metwally, A. B. Helali, and M. H. Shedid. 2006. Herbs drying using a heat pump dryer. Energy Conversion and Management 47: 2629-2643.
10. Hodgett, D. L. 1976. Efficient drying using heat pump. Chemistry Engineering 1976: 510-522.
11. Kadam, D. M., R. K. Goyal, K. K. Singh, and M. K. Gupta. 2011. Thin layer convective drying of mint leaves. Journal of Medicinal Plants Research 5: 164-170.
12. Kaymak-Ertekin, F. 2002. Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. Journal of Food Science 67: 168-175.
13. Kuzgunkaya, E. H., and A. Hepbasli. 2007. Exergetic performance assessment of a ground-source heat pump drying system. International Journal of Energy Research 31: 760-777.
14. Lopez, A., A. Iguaz, A. Esnoz, and P. Virseda. 2000. Thin layer drying behavior of vegetable wastes from wholesale market. Drying Technology 18: 995-1006.
15. Maskan, A., S. Kaya, and M. Maskan. 2002. Hot air and sun drying of grape leather (pestil). Journal of Food Engineering 54: 81-88.
16. Midilli, A. 2001. Determination of pistachio drying behavior and conditions in solar drying systems. International Journal of Energy Research 25: 715-725.
17. Moreno, R., R. Rios, and H. Calbucura. 2000. Batch vibrating fluid bed dryer for sawdust particles: experimental results. Drying Technology 18: 1481-1493.

Archive of SID

www.SID.ir

18. Oktay, Z., and A. Hepbasli. 2003. Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer. Energy Conversion and Management 44: 1193-1207.
19. Pahlavanzadeh, H. 1998. Drying: principles, applications and design. By: Strumilp, C., and T. Kudra. Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran. (In Farsi).
20. Panchariya, P. C., D. Popovic, and A. L. Sharma. 2002. Thin-layer modeling of black tea drying process. Journal of Food Engineering 52: 349-357.
21. Park, K. J., Z. Vohnikova, and F. P. R. Brod. 2002. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa*. L.). Journal of Food Engineering 51: 193-199.
22. Simal, S., A. Mulet, J. Tarrazo, and C. Rosello. 1996. Drying models for green peas. Food Chemistry 55: 121-128.
23. Topuz, A., M. Gur, and M. Z. Gul. 2004. An experimental and numerical study of fluidized bed drying of hazelnuts. Applied Thermal Engineering 24: 1535-1547.

Archive of SID

www.SID.ir