

مقاله علمی - پژوهشی

ارزیابی سینتیک خشک شدن برگ‌های نعنا و مصرف انرژی در خشک‌کن‌های حرارتی مجهز به نانوجاذب

محسن پویا^۱، بابک بهشتی^{۲*}، علیمحمد برقی^۳ و غلامحسین اسدی^۴

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ استادیار؛ و استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۴- استادیار گروه علوم مهندسی صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۲۳

چکیده

در این تحقیق، عملکرد یک خشک‌کن حرارتی با سامانه گردش هوای بسته، مجهز به سیستم چارچوب‌های فلز-آلی (MOF) ارزیابی شد. بخش‌های خشک‌کن شامل محفظه خشک کردن محصول، محفظه حاوی مواد نانوجاذب MOF و سامانه‌های اندازه‌گیری و کنترل است. عملکرد خشک‌کن روی گیاه نعنا و در سه سطح دمایی (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) مقایسه و انرژی مصرفی و خشک شدن برگ‌های نعنا ارزیابی شد. نتایج تحقیق نشان داد، سامانه گردش هوای بسته، سبب کاهش زمان خشک شدن بین ۲۷ تا ۵۰ درصد می‌شود، ضریب نفوذ برگ‌های نعنا با افزایش دما افزایش نشان داد و مقدار آن در استفاده نشدن و استفاده شدن از صفحات نانوجاذب به ترتیب برابر $(10^{-11} \times 0.569 \text{ E})$ و $(11 \times 10^{-11} \times 2.8215 \text{ E})$ مترمربع بر ثانیه تعیین شد. انرژی فعال‌سازی در دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از نانوجاذب به ترتیب برابر ۴۵/۷۲ و ۵۱/۹۶ کیلوژول بر مول به دست آمد که با نتایج بررسی‌های محققان هم‌خوانی دارد. ضریب عملکرد و میزان تبخیر رطوبت و میزان تبخیر رطوبت ویژه نشان‌دهنده اثرگذاری استفاده از نانوجاذب در سیستم خشک‌کن و کاهش مصرف انرژی است. شاخص رنگ کل (ΔE)، با افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس، تغییر چندانی نشان نداد ولی از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، شاخص رنگ کل افزایش یافت اما اختلاف آشکاری در شاخص رنگ کل، بین دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از نانوجاذب وجود نداشت.

واژه‌های کلیدی

انرژی فعال‌سازی، شاخص رنگ کل، ضریب عملکرد، ضریب نفوذ مؤثر، MOF

مقدمه

جریان هوای گرم متداول‌ترین روش خشک کردن محصولات کشاورزی است. با استفاده از این روش می‌توان با حفظ کیفیت، محصولات خشک را در مدت زمانی کوتاه تولید کرد (Doymaz, 2004). گیاه نعنا (*Mentha spicata*) یکی از گیاهان دارویی مهم است که از گذشته‌های بسیار دور از آن

خشک کردن فرآیندی پیچیده شامل انتقال حرارت، جرم و اندازه حرکت با مصرف انرژی بالاست. انتخاب روش خشک کردن مناسب می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی باعث حفظ کیفیت محصول تولیدی نیز بشود. در حال حاضر، خشک کردن با

هوای خشک و گرم مجدداً به محفظه خشک‌کن محصول بازمی‌گردد. این روش سبب استفاده مجدد از هوای گرم قبلی سیستم می‌شود. از دیگر مزایای استفاده از خشک‌کن مجهز به سامانه گردش هوای بسته، کاهش آلودگی میکروبی در محصول به دلیل کاهش استفاده از هوای محیط آزاد است (Chen et al., 2005). مطالعات برای طراحی و ارزیابی یک خشک‌کن خورشیدی با جریان هوای اجباری، برای سبزی‌های برگ‌ی آغاز شد (Soheili Mehdizadeh et al., 2006).

استفاده از مواد جاذب رطوبت در خشک کردن، علاوه بر پایین آوردن مصرف انرژی سبب خشک کردن پیوسته حتی در ساعات غیر آفتابی، افزایش سرعت خشک شدن به دلیل هوای گرم و خشک، خشک کردن بسیار یکنواخت و برای محصولاتی که حساس به حرارت هستند مناسب است. برخی از مسائل در سامانه‌های جاذب رطوبت عبارت‌اند از: افت فشار در جاذب جامد، انتقال مایع جاذب رطوبت به وسیله بخار هوا و ظرفیت جذب رطوبت پایین که با بهینه‌سازی طراحی سامانه بهبود پیدا می‌کند (Misha et al., 2012).

در پژوهش‌های متعدد از مواد جاذب رطوبت برای ذخیره انرژی در خشک‌کن‌های خورشیدی استفاده شده است. هر دو ماده جاذب مایع و جامد ذخیره انرژی بالایی برای کاربردهای خشک‌کن دارند (Bal et al., 2010).

از مواد جاذب رطوبت که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند نانوجاذب‌ها هستند. در سال‌های اخیر گونه‌های جدیدی از جاذب‌های نانو ساختار با نام چارچوب‌های فلز-آلی (MOF¹) معرفی گردیده‌اند که به دلیل سطح آزاد بسیار زیاد و ظرفیت جذب بالا و همچنین مصرف انرژی کمتر در

استفاده می‌شده است. نعنا گیاهی چند ساله، علفی و دارای ساقه‌های چهارگوش، برگ‌های پهن سبز تیره و به صورت متقابل است. این گیاه بوی بسیار مطبوع دارد که به همین دلیل از آن در اسانس‌گیری استفاده می‌شود و با نام تجاری *Spearmint oil* معروف است (Doymaz, 2004). به علت رسانش حرارتی پایین محصولات کشاورزی، انتقال حرارت به قسمت‌های داخلی این مواد بسیار کند و از این‌رو خشک کردن آنها نیازمند مصرف انرژی فراوان است (Afzal et al., 1999).

انرژی مورد نیاز برای خشک کردن به طور معمول از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌گردد. محققان تحقیقاتی کرده‌اند برای افزایش میزان بازده خشک‌کن‌هایی که در آنها از مواد جاذب رطوبت استفاده می‌شود. خشک‌کن‌های متداول، که برای گرم کردن هوای درون خشک‌کن از حرارت استفاده می‌شود، دارای مصرف انرژی بالا و بازده پایینی هستند که برای کاهش اتلاف انرژی از سامانه گردش هوای بسته استفاده می‌کنند. تعدادی از پژوهشگران به منظور افزایش بازده انرژی در خشک‌کن‌های خورشیدی از سامانه گردش هوای بسته در خشک‌کن‌ها استفاده کرده‌اند (Aboul-Enein et al., 2000; Shanmugam & Natarajan, 2007; Sarsavadia, 2007).

در خشک‌کن‌های مجهز به سامانه گردش هوای بسته، رطوبت نسبی هوای خشک‌کن پس از عبور از روی محصول بالا می‌رود و قدرت جذب رطوبت هوای خشک‌کن پایین می‌آید. در این شرایط، هوای گرم و مرطوب محفظه خشک‌کن، توسط لوله‌های رابط به محفظه استقرار مواد جاذب رطوبت منتقل می‌شود تا رطوبت نسبی هوای سیستم کاهش یابد. پس از کاهش رطوبت هوا در محفظه جاذب،

و همچنین تعیین ضریب نفوذ برگ‌های نعنا طی دماهای متفاوت خشک کردن و بررسی سرعت تبخیر رطوبت ویژه است.

مواد و روش‌ها

چارچوب‌های فلز-آلی یا به بیان کلی‌تر، پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل، ترکیبات بلورین شامل شبکه‌های محدود متشکل از واحدهای ساختاری ثانویه یون‌های فلزی یا کلاسترها^۱ و اتصال‌دهنده‌های آلی هستند که از طریق پیوندهای کوئوردیناسیونی^۲ به هم متصل شده‌اند. ترکیب دو جزء سازنده یک MOF، یون یا کلاستر فلز و پیونددهنده آلی، احتمالات زیادی را به وجود می‌آورد. مجموع خواص فیزیکی اجزای سازنده معدنی و آلی و تلفیق این دو ممکن است خواص جالب توجهی را برای MOF به وجود آورد (Mursali, 2013). در این تحقیق، نانوجاذب MOF-199 سنتز و روی سطح صفحات پوشش داده شد. مواد نانوجاذب MOF-199 با قابلیت جذب بخار آب و از زیرگروه خانواده MILها با نام MOF-199 شناخته می‌شوند (Kardani et al., 2019). نانوجاذب MOF-199، از مواد بنزن تری کربوکسیلیک اسید^۳، محلول ۱:۱ از دی متیل فرم آمید/ اتانول^۴، نمک مس استات دو آب و آب، طی عملیات آزمایشگاهی و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس تولید و سنتز شد (Kardani et al., 2019).

پس از سنتز نانوجاذب MOF-199، پوشش در چند مرحله صورت گرفت. ابتدا به منظور تولید گروه‌های سیلانول روی سطح، صفحات مذکور به مدت یک ساعت در محلول ۰/۱ مول بر لیتر سدیم هیدروکسید قرار داده شد. به منظور خنثی

حین فرآیند احیا، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند. برخی از این جاذب‌ها در دمای کمتر از ۸۰ درجه سلسیوس بازیابی می‌شوند که صرفه‌جویی چشمگیری را در مصرف انرژی به دنبال دارد (Seo et al., 2012).

امروزه از میان هزاران گونه مختلف MOF، بیش از ۶۰ نوع MOF برای جذب آب شناخته شده است که در این میان از بهترین آنها می‌توان به ترتیب و بر اساس ظرفیت جذب به HKUST-1 یا Cu₃(BTC)، خانواده MILها، Mg-MOF-74 یا Mg-COP-27 یا DUT-4، Uio-66، MOF-801-p و MOF-841 اشاره کرد (Mursali, 2013).

ظرفیت بالای جذب در مواد نانوجاذب MOF، زمینه کاربردهای متفاوت از آنها را فراهم می‌کند. جذب بخار آب یکی از ویژگی‌های این نانوجاذب‌ها است که از این ویژگی استفاده می‌شود. چارچوب‌های فلز-آلی کلاس جدیدی از مواد کریستالی با ساختار متخلخل هستند که به دلیل مساحت بالا و تخلخل، حجم منافذ و چگالی کم چارچوب قابلیت بالایی در جذب بخار آب دارند (Feng et al., 2018). در تحقیقات برخی محققان (Menghao et al., 2021; Feng et al., 2018) از چارچوب‌های فلزی-آلی به عنوان ماده جاذب رطوبت برای کنترل رطوبت محیط داخلی و صرفه‌جویی انرژی گزارش شده است. ولی تاکنون تحقیقاتی در زمینه استفاده از این نانوجاذب‌ها در خشک‌کن‌ها گزارش نشده است. هدف از این تحقیق تعیین عملکرد خشک‌کن، مطالعه سینتیک خشک شدن برگ‌های نعنا طی خشک شدن با دستگاه خشک‌کن حرارتی مجهز به نانوجاذب رطوبت MOF

1- Cluster

3- Triecarboxylic Acid

2- Coordination

4- Dimethylformamide/etanol

رطوبت، دما و سامانه کنترلی سیستم است. برای اجرای آزمایش از یک دستگاه خشک‌کن مدل GC-400 استفاده شد. تمام تجهیزات و لوله‌های ارتباطی نصب و محفظه استقرار صفحات نانوجاذب برای انتقال جریان پیوسته هوای خشک‌کن به دستگاه متصل و برای جلوگیری از هدررفت انرژی سیستم تمام لوله‌های ارتباطی و محفظه نانوجاذب عایق شد.

متغیرهایی در این آزمایش بررسی شدند از جمله دمای هوای داخل دستگاه خشک‌کن که توسط حسگر^۴ دما و رطوبت A ثبت شد، و دمای ورودی به محفظه نانوجاذب نیز توسط حسگر دما و رطوبت B اندازه‌گیری و به سامانه کنترلی ارسال شد، دمای هوای خروجی از محفظه نانوجاذب توسط حسگر دما و رطوبت C کنترل شد. اطلاعات به دست آمده از این حسگرها به یک دیتالاگر منتقل و با نرم‌افزار Labview کنترل و برنامه‌ریزی شد. پس از ارسال اطلاعات توسط حسگرها، فرمان لازم توسط نرم‌افزار داده می‌شد. با توجه به اینکه جریان هوای داخل خشک‌کن تحت تأثیر کاهش یا افزایش حرارت پس از عبور از محفظه نانوجاذب قرار می‌گرفت، حسگر دما و رطوبت A فرمان روشن یا خاموش شدن را به گرم‌کن الکتریکی خشک‌کن صادر می‌کرد. حسگر دما و رطوبت B، درصد رطوبت هوای درون محفظه خشک‌کن، قبل از ورود به محفظه صفحات نانوجاذب را اندازه‌گیری می‌کرد و حسگر دما و رطوبت C، درصد رطوبت هوای خروجی از محفظه نانوجاذب را کنترل می‌کرد. برنامه‌ریزی برای عمل حسگر دما و رطوبت C به نحوی بود که در دامنه‌ای مشخص و پس از جذب ۷۰ درصد از رطوبت توسط صفحات

کردن سدیم هیدروکسید اضافی روی سطح، این صفحات به مدت ۳۰ دقیقه در محلول ۰/۱ مول بر لیتر هیدروکلریک اسید^۱ قرار داده شدند. صفحات به دفعات با آب شسته و با جریان ثابت از گاز نیتروژن خشک شدند. از روش سل-ژل برای آماده‌سازی صفحات خشک‌کننده و پوشش نانوجاذب روی بستر فولادی استفاده شد. محلول سل-ژل به شرح زیر تهیه گردید: ۰/۴ میلی‌لیتر متیل تری‌متوکسی سیلان^۲ ۰/۶ میلی‌لیتر متانول^۳، ۰/۴ میلی‌لیتر از هیدروکلریک اسید (۰/۰۵ مول بر لیتر) به عنوان کاتالیزور برای ۴ دقیقه مخلوط شدند، پس از آن نانوجاذب اضافه شد و مخلوط حاصل برای ۲ دقیقه به شدت هم‌زده شد. محلول سل-ژل آماده شده به وسیله برس و به آرامی روی صفحات فولادی کشیده و پخش شد. برای خشک شدن مواد پوشش نانوجاذب، صفحات فولادی پوشش داده شده در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت تحت شرایط محیط (حدود ۲۵ درجه سلسیوس) خشک شدند. پوشش ژل به طور خودکار روی سطح فعال تشکیل می‌شود (Mursali, 2013; Kardani, et al., 2019). تعیین مصرف بهینه و مقایسه با سایر جاذب‌های متداول، مستلزم بررسی و تحقیق بیشتر است.

شکل ۱ شماتیک خشک‌کن و محفظه استقرار صفحات نانوجاذب استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. قسمت‌های مختلف این سیستم عبارت‌اند از دستگاه خشک‌کن شامل محفظه محصول، گرم‌کن الکتریکی، فن‌ها و سامانه کنترلی خشک‌کن؛ اجزا رطوبت‌گیر سیستم شامل محفظه استقرار صفحات نانوجاذب، صفحات نانوجاذب، گرم‌کن الکتریکی احیا، فن احیا و حسگرهای

1- Hydrochloric Acid

2 - Trimethoxymethylsilane

3- Metanol

۴- حسگر دما و رطوبت دیجیتال مدل SHT 75 با دقت اندازه‌گیری

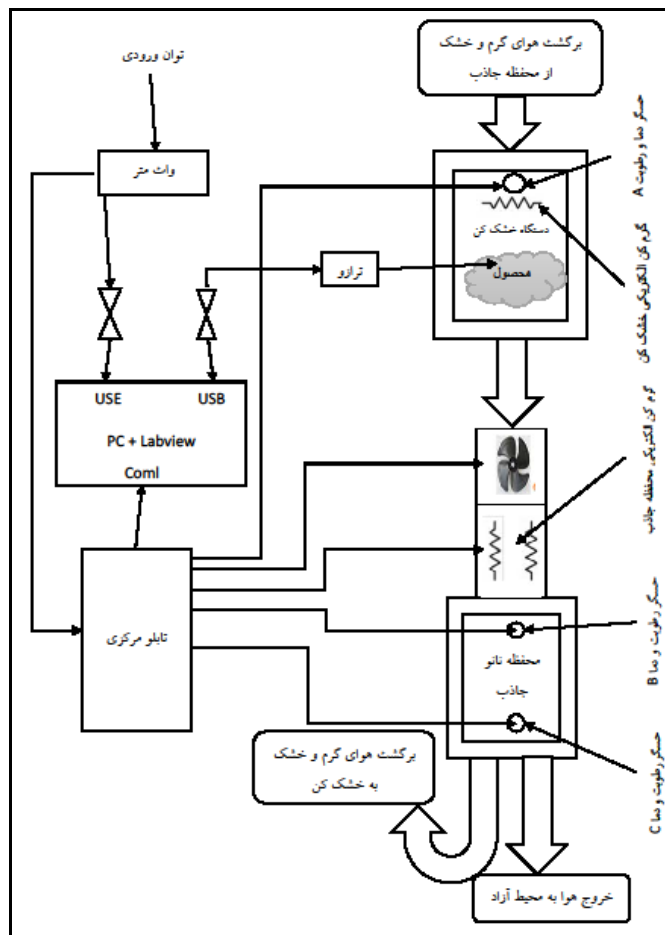
رطوبت نسبی $\pm 1/8\%$ و دقت اندازه‌گیری دما $\pm 0/3^\circ\text{C}$

شکل ۳ شماتیک محفظه استقرار صفحات نانوجاذب تجهیزاتی نصب شده را نشان می‌دهد. فرم دینامیکی محفظه برای استقرار صفحات نانوجاذب، جانمایی حسگرهای رطوبت و دما، محل دریچه‌های ورودی و خروجی هوای محفظه و محل نصب فن و گرم‌کن الکتریکی بسیار مهم است و نقش بالایی در بهتر شدن فرایند جذب رطوبت صفحات نانوجاذب و متعاقب آن احیای صفحات نانوجاذب داشت. بعد از ورود هوای گرم و مرطوب خشک‌کن به محفظه استقرار صفحات نانوجاذب، رطوبت هوا توسط نانوجاذب جذب می‌شود، سامانه کنترل سیستم به گونه‌ای برنامه‌ریزی شده بود که پس از جذب ۷۰ درصد از رطوبت توسط صفحات نانوجاذب، دریچه تخلیه هوا به محیط آزاد باز و دریچه برگشت به خشک‌کن بسته و هم‌زمان گرم‌کن الکتریکی و فن احیا روشن می‌شد تا فرآیند احیا صفحات نانوجاذب دنبال شود (حسگر دما و رطوبت C بعد از صفحات نانوجاذب نصب شده بود که میزان رطوبت بعد از صفحات نانوجاذب را مشخص می‌کرد). این روند تا زمانی ادامه می‌یافت که حسگر دما و رطوبت C کاهش رطوبت هوا در حین احیا را به میزان ۱۰ درصد نشان دهد. (شاخص تعیین ۷۰ درصد شروع و ۱۰ درصد پایان عملیات احیا صفحات نانوجاذب، از مقایسه میزان رطوبت حسگر دما و رطوبت C با حسگر دما و رطوبت B تعیین شده بود). کنترل برگشت هوای خروجی محفظه نانوجاذب به خشک‌کن، تابع شاخص تعیین شده برای درصد اشباع و احیا صفحات نانوجاذب بود. با شروع عملیات احیای صفحات نانوجاذب دریچه تخلیه هوا به محیط آزاد محفظه نانوجاذب باز و با پایان عملیات احیا دریچه تخلیه هوا به محیط آزاد بسته و هوا به خشک‌کن برگشت می‌شد. همچنین کنترل زمان

نانوجاذب، فرمان روش و خاموش شدن را به گرم‌کن الکتریکی و فن احیا صفحات نانوجاذب صادر می‌کرد تا عملیات احیا صفحات نانوجاذب اجرا شود. برای احیای صفحات نانوجاذب از یک گرم‌کن الکتریکی و فن استفاده شد که مجموع توان مصرفی توسط وات متر برابر ۳۱۷ وات بر ساعت اندازه‌گیری شد. شروع و پایان فرآیند احیا با فرمان سامانه کنترل تنظیم و کاهش یا افزایش رطوبت هوای خروجی توسط حسگر C کنترل می‌شد. این چرخه به طور مستمر با انتقال داده‌های سیستم توسط حسگرهای رطوبت و دما به سامانه کنترل و ارسال فرمان توسط سامانه کنترلی به وضعیت باز/بسته بودن دریچه محفظه صفحات نانوجاذب و همچنین روشن/خاموش کردن گرم‌کننده الکتریکی مرحله احیا نانوجاذب طی می‌شد. انرژی مصرفی گرم‌کن الکتریکی خشک‌کن و احیای صفحات نانوجاذب توسط وات متر^۱ اندازه‌گیری شد. در وضعیت استفاده نشدن از صفحات نانوجاذب برای کاهش میزان رطوبت هوای خشک‌کن و جلوگیری از رسیدن هوای درون خشک‌کن به رطوبت اشباع، هوای خشک‌کن با هوای آزاد جابه‌جا و این شرایط سبب اتلاف بخشی از انرژی مصرفی برای بالا بردن دمای هوای تازه ورودی به درون خشک‌کن می‌شد. ولی در شرایط استفاده از صفحات نانوجاذب، هوای مرطوب خشک‌کن پس از عبور از روی صفحات نانوجاذب، خشک می‌شد و بخش زیادی از هوای خشک و گرم به خشک‌کن بازگردانده می‌شد و فقط بخش کمی از هوای گرم سیستم در زمان احیا صفحات نانوجاذب به محیط آزاد منتقل می‌شد. این چرخه به طور پیوسته در سراسر عملیات خشک کردن ادامه می‌یافت که سبب جلوگیری از اتلاف انرژی شد.

۱- مدل TMI 5010 با دقت ۰/۵٪ بیشترین خروجی شرکت Lutron - تایوان

شروع و پایان احیای صفحات نانوجاذب، تابع شاخص تعیین شده بالاست.



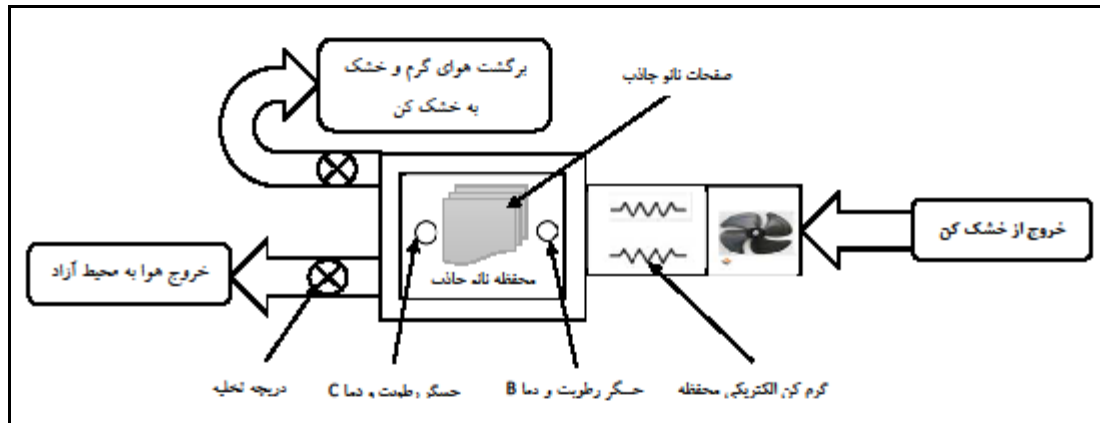
شکل ۱- شماتیک خشک کن، مخزنه نانوجاذب، تجهیزات نصب شده و نحوه ارتباط

Fig. 1- Schematic of the thermal dehydrator, nano-absorber chamber, installed equipment, and communication method



شکل ۲- خشک کن، لوله‌های ارتباطی، مخزنه نانوجاذب

Fig. 2- The thermal dryer, communication pipes, nano-adsorber chamber



شکل ۳- شماتیک محفظه استقرار صفحات نانو جاذب و تجهیزات استفاده شده

Fig. 3- Schematic of the Chamber of nano-adsorbent plates and employed equipment

صفحات نانوجاذب و با شرایط مشابه و در سه تکرار اجرا شد.

روش اندازه‌گیری ضریب نفوذ

نسبت رطوبت (MR)^۲ برگ‌های نعنا در حین فرآیند خشک شدن از رابطه ۱ محاسبه شد (Midilli, 2001).

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

که در آن،

M_t و M_e و M_0 = به ترتیب میزان رطوبت در هر لحظه، میزان رطوبت تعادلی و میزان رطوبت اولیه محصول. بنابراین بر اساس پژوهش‌ها، در محصولاتی که دارای رطوبت زیاد هستند رابطه ۱ به صورت رابطه ۲ ساده می‌شود (Diamante & Munro, 1991).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست. همچنین از قانون دوم فیک برای تعیین ضریب نفوذ استفاده شد. اگر رطوبت اولیه در کل ماده یکسان و برابر M_0 باشد و

برای تعیین میزان رطوبت اولیه برگ‌های نعنا مطابق استاندارد AOAC^۱ عمل شد. قبل از هر آزمایش، ۱۰ گرم برگ نعنا تازه که از ساقه جدا شده بود، توسط ترازوی دیجیتال (مدل KERN, 572-57 ساخت آلمان با دقت ۰/۰۰۱ گرم) توزین و در سه تکرار در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آن قرار داده شد. برگ‌ها پس از ۲۴ ساعت از آن خارج و بلافاصله برای سرد شدن در دستگاه دسیکاتور قرار داده شد و سپس نمونه توزین گردید.

برای شروع آزمایش‌ها ابتدا به مدت یک ساعت دستگاه خشک‌کن روشن شد تا به تعادل دمایی برسد. آزمایش در سه سطح دمایی متفاوت ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس اجرا شد. برای آزمایش، پس از تهیه گیاه نعنا تازه، برگ‌های نعنا از ساقه جدا و با قرار دادن درون ظرف توسط ترازوی دیجیتال به میزان ۱۰۰ گرم توزین شد (بدون وزن ظرف) بلافاصله نمونه توزین شده درون محفظه خشک‌کن قرار داده شد. سپس با فاصله زمانی (ابتدا با فاصله ۱۰ دقیقه و با کاهش رطوبت و پس از یک ساعت با فاصله ۲۰ دقیقه) نمونه‌های آزمایش توزین شدند. آزمایش‌ها در دو وضعیت با و بدون استفاده از

1- Association of Official Agricultural Chemists

2- Moisture Ratio

هو (درجه سلسیوس)؛ R = ثابت جهانی گاز
 ۸/۳۱۴۵ ژول بر مول درجه کلوین)؛ و $Deff$ = ضریب
 نفوذ مؤثر (مترمربع بر ثانیه).

نکته: با رسم $\ln(Deff)$ در برابر $T-1$ ، شیب
 خط (KE) تعیین می‌شود که از رابطه ۶ برای تعیین
 انرژی فعال سازی می‌توان استفاده کرد.

$$K_E = \frac{E_A}{R} \quad (7)$$

عملکرد خشک‌کن

برای بررسی عملکرد خشک‌کن، ابتدا باید
 عملکرد نانوجاذب را بررسی کرد. از رابطه ۷ برای
 بیان ضریب عملکرد پمپ حرارتی توسط اوکتای و
 حباسلی (Oktay & Hepbasli, 2003) استفاده
 گردید. با توجه به عملکرد مشابه در پارامترهای
 ورودی و خروجی از رابطه ۸ برای بیان ضریب
 عملکرد صفحات نانوجاذب (COMOF) استفاده
 شد.

$$COMOF = \frac{m \cdot C_p (T_{out\ con} - T_{in\ con})}{W} \quad (8)$$

که در آن،

m = دبی جرمی هوای عبوری از روی صفحات
 نانوجاذب (در این آزمایش دبی جرمی هوای عبوری
 برابر ۰/۰۵ کیلوگرم بر ثانیه است)؛ C_p = گرمای ویژه
 هوا (ژول بر مول درجه سلسیوس)؛ $T_{in\ con}$ و $T_{out\ con}$
 دمای هوای خروجی و ورودی محفظه استقرار
 صفحات نانوجاذب (درجه سلسیوس)؛ و W = توان
 مصرفی برای احیای صفحات نانوجاذب (وات) که
 توسط وات متر اندازه‌گیری شد.

علاوه بر ضریب عملکرد، سرعت تبخیر رطوبت
 (MER) (کیلوگرم بر ساعت) و سرعت تبخیر

در حین خشک شدن سطح ماده خشک باشد معادله
 نهایی به صورت رابطه ۳ خواهد شد.

$$MR = \frac{M_t}{M_o} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)\pi^2 Deff t}{4 l_0^2}\right) \quad (3)$$

که در آن،

L_0 = نصف ضخامت صفحه (متر)؛ $Deff$ = ضریب نفوذ
 مؤثر (مترمربع بر ثانیه)؛ MR = نسبت رطوبت؛ و
 t = زمان (ثانیه). نکته: در زمان‌های طولانی خشک
 کردن می‌توان فقط جمله نخست رابطه را در نظر
 گرفت بنابراین:

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

با رسم منحنی $\ln(MR)$ در برابر زمان، شیب
 منحنی برابر K_0 تعیین می‌شود که از رابطه ۵
 می‌توان برای محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده کرد
 (Lopez et al., 2000).

$$K_0 = \frac{\pi^2 Deff}{4 l_0^2} \quad (5)$$

انرژی فعال سازی

معادله آرنیوس، روابط بین دما، ضریب نفوذ
 مؤثر و انرژی فعال سازی را به صورت رابطه ۶ به هم
 مرتبط می‌سازد (Lopez et al., 2000).

$$Deff = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273.15)}\right) \quad (6)$$

که در آن،

D_0 = ثابت معادله آرنیوس (مترمربع بر ثانیه)؛
 E_a = انرژی فعال سازی (کیلوژول بر مول)؛ T = دمای

1- Coefficient of Performance Metal-Organic Framework
 3- Specific Moisture Extraction Rate

2- Moisture Extraction Rate

دما بالاتر باشد، میزان اتلاف رنگدانه‌ها بیشتر و تغییرات رنگ شدیدتر خواهد شد. با افزایش دما، ظرفیت نگهداری رنگ نیز کاهش می‌یابد. برای تعیین میزان تغییرات رنگ محصول خشک شده و مقایسه آن با نمونه تازه محصول، از روش اندازه‌گیری تغییرات شاخص رنگ کل معمولاً از مدل CIE^۲ استفاده شد. در این مدل از شاخص‌های رنگ L^* ، a^* و b^* استفاده شده است. شاخص L^* بیانگر روشنایی و شاخص‌های a^* و b^* که در محدوده ۶۰+ تا ۶۰- تغییر می‌کنند، مقدار مثبت بیانگر قرمزی و زردی، مقدار منفی بیانگر سبزی و آبی است. پارامترهای دیگر از ترکیب این سه پارامتر به وجود می‌آیند (Maskan et al., 2001).

بدین منظور قبل از هر آزمایش نمونه‌هایی از برگ‌های تازه نعنا آسیاب و به قطعات ریز تبدیل و بلافاصله با دستگاه اسپکتروفوتومتری مدل RT 100- 200 شاخص‌های رنگ نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. پس از خشک شدن برگ‌های نعنا در هر آزمایش، نمونه برگ‌های خشک توسط آسیاب برقی پودر گردید سپس توسط دستگاه اسپکتروفوتومتری شاخص‌های رنگ برگ‌های خشک، در دماهای مختلف و در دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از نانوجاذب اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در سه تکرار و نمونه تازه برگ‌های نعنا به عنوان شاهد تعیین و مقایسه شد. با تعیین جدول مقادیر پارامترهای شاخص‌های رنگ، مقدار شاخص رنگ کل ΔE از رابطه ۱۱ محاسبه گردید.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L^*_0)^2 + (a^* - a^*_0)^2 + (b^* - b^*_0)^2} \quad (11)$$

که در آن،

رطوبت ویژه^۱ (SMER) (کیلوگرم بر کیلووات ساعت) نیز از شاخص‌های عملکرد خشک‌کن مجهز به صفحات نانوجاذب است، که با روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شوند (Oktay & Hepbasli, 2003).

$$MER = \frac{M_d}{t_l} \quad (9)$$

$$SMER = \frac{M_d}{Q_l} \quad (10)$$

که در آنها،

M_d = آب تبخیر شده از محصول (کیلوگرم)؛ t_l = زمان کل خشک شدن (ساعت)؛ و Q_l = انرژی ورودی کل (کیلووات ساعت) که برابر $(Q_{drying} + Q_{mot})$ است.

تغییرات کیفی

تغییرات کیفی از پارامترهای مهم و قابل بررسی در فرآیند خشک کردن محصولات غذایی و کشاورزی است. تأثیرات فرآیند خشک کردن باید به شکلی باشد که حداقل تغییرات را در پارامترهای کیفی مواد داشته باشند. پارامترهای کیفی شامل تغییرات فیزیکی و شیمیایی مواد است. پارامترهایی مانند: ابعاد، شکل، چروکیدگی، سختی بافت تغییرات فیزیکی و پارامترهایی مانند: تغییر رنگ، تغییر در میزان چربی‌ها، ویتامین‌ها و ... تغییرات شیمیایی هستند. در این تحقیق به دلیل محدودیت‌های ایجاد شده فقط تغییرات رنگ اندازه‌گیری شد که از شاخص‌های کیفی فیزیکی محسوب می‌شود و سایر شاخص‌های تغییرات کیفی در تحقیق بعدی بررسی خواهد شد.

در فرآیند خشک کردن، تغییرات شیمیایی در رنگدانه‌های کلروفیل محصول خشک شده ایجاد می‌شود. به هر میزان زمان خشک کردن طولانی تر و

1- Specific Moisture Extraction Rate

2- Commission International de L'Eclairage

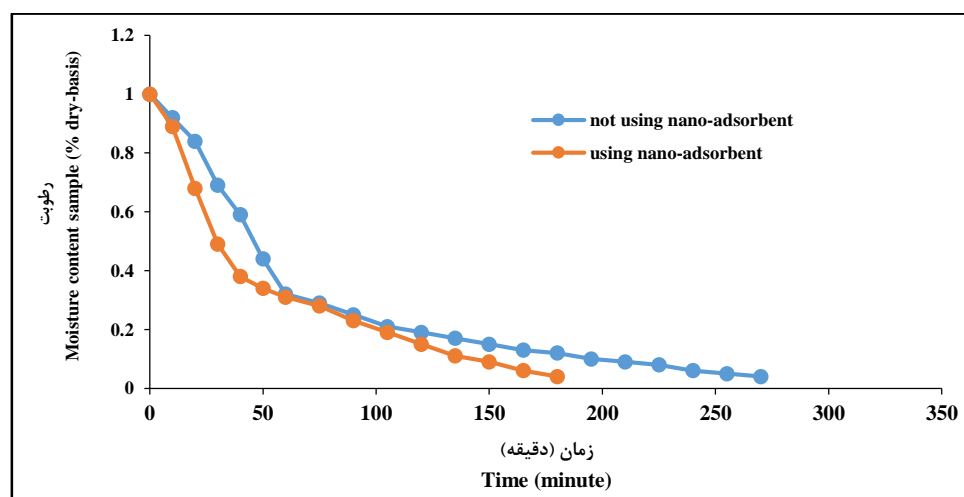
را تعیین می‌کند در ابتدا بسیار تند، ولی با گذشت زمان از ضریب زاویه شیب کم می‌شود، بدین معنا که بیشترین مقدار کاهش رطوبت محصول در همان ابتدای فرآیند خشک شدن صورت می‌گیرد. همچنین در هیچ‌یک از منحنی‌ها هیچ دوره ثابت سرعت خشک شدن محصول دیده نمی‌شود ولی با افزایش دما، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. معنای این مطلب آن است که به دلیل ضخامت کم برگ نعنا و فاصله کم بین بخش داخلی و بیرونی برگ، دوره ثابت سرعت خشک شدن، که نشان‌دهنده انتقال جرم از درون برگ به بیرون آن است، بسیار سریع اتفاق می‌افتد که قابل اندازه‌گیری نیست، یا اصولاً این دوره اتفاق نمی‌افتد. برخی محققان نشان داده‌اند که فرآیند خشک کردن برگ‌های نعنا فقط در دوره سرعت نزولی اتفاق می‌افتد. نتایج به دست آمده منطبق با نتایج تحقیقات دیگر محققان است (Doymaz, 2004; Kadam et al., 2011; Agh Khani et al., 2013).

L^* ، a^* و b^* مقایر پارامترهای نمونه‌های خشک شده؛ و L^*0 ، a^*0 و b^*0 مقادیر اولیه این پارامترها (نمونه‌های تازه قبل از خشک شدن).

نتایج و بحث

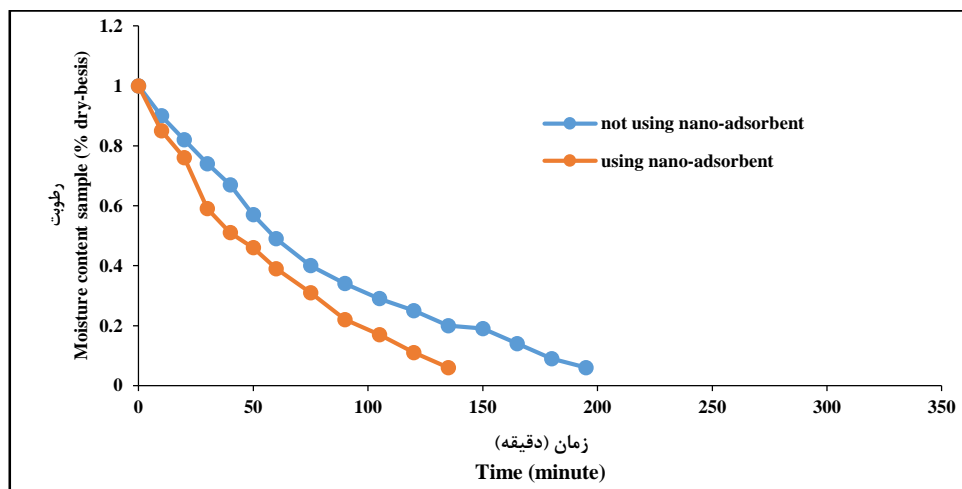
سینتیک خشک شدن برگ‌های نعنا

شکل‌های ۴، ۵ و ۶ تغییرات نسبت رطوبت بر زمان خشک شدن در دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب و در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. چنانچه در هر سه شکل دیده می‌شود، کاهش زمان خشک شدن در روش استفاده کردن از صفحات نانوجاذب نسبت به استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب کاملاً مشخص است، نتیجه اینکه استفاده از صفحات نانوجاذب علاوه بر کاهش زمان خشک شدن در هر سه دما سبب کاهش مصرف انرژی نیز خواهد شد که در بخش انرژی مصرفی توضیح داده می‌شود. شیب منحنی که روند از دست دادن رطوبت

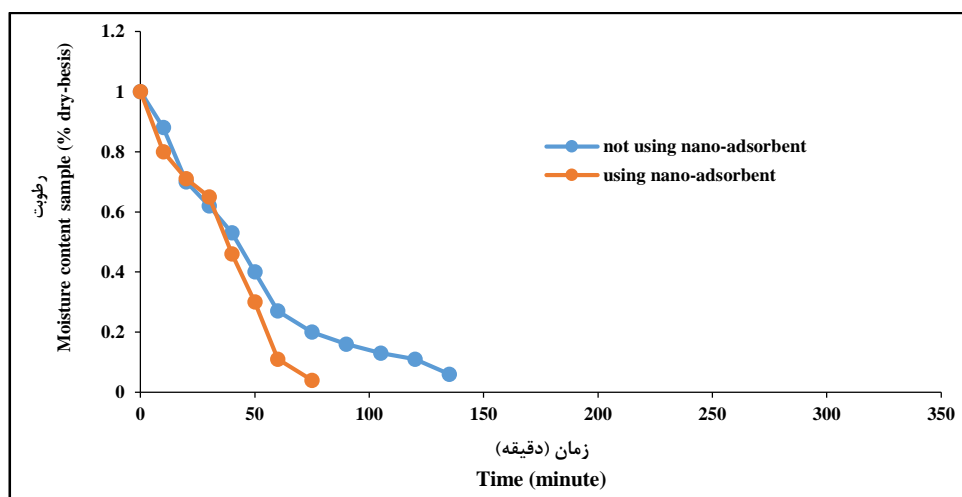


شکل ۴-۱- منحنی خشک کردن در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و با روش استفاده کردن و استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب

Fig. 4- Drying diagram for 40 °C with and without nano-absorbent plates



شکل ۵- منحنی خشک کردن در دمای ۵۰ درجهٔ سلسیوس با روش استفاده کردن و استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب
 Fig. 5- Drying diagram for 50 °C with and without nano-adsorbent plates



شکل ۶- منحنی خشک کردن در دمای ۶۰ درجهٔ سلسیوس با روش استفاده کردن و استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب
 Fig. 6- Drying diagram for 60 °C with and without nano-adsorbent plates

در شرایط استفاده از صفحات نانوجاذب، با افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجهٔ سلسیوس زمان خشک شدن محصول ۲۷/۲۷ درصد کاهش می‌یابد. در صورتی‌که با افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ درجهٔ سلسیوس، این کاهش زمان خشک شدن به ۵۰ درصد رسیده است. در این روش، به دلیل اینکه خشک‌کن به صورت سامانهٔ گردش هوای بسته کار می‌کند سرعت خشک شدن محصول نسبت به سامانهٔ هوای باز، افزایش یافت. در سامانهٔ هوای

زمان خشک شدن برگ‌های نعنا در سه دما ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجهٔ سلسیوس و در دو روش استفاده کردن یا استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب را نشان داده است. با توجه به نتایج به دست آمده در هر دو روش، با افزایش دمای خشک کردن، زمان خشک کردن نیز کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد با افزایش دما سرعت انتقال رطوبت از درون محصول به هوای محیط، افزایش می‌یابد و رطوبت در مدت زمان کمتری از درون محصول خارج می‌شود.

بسته، به دلیل استفاده از صفحات نانوجاذب، رطوبت و در نتیجه فشار جزئی بخار آب هوای خشک‌کننده کاهش می‌یابد. کاهش فشار جزئی بخار آب هوای خشک‌کننده، سبب افزایش سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوا و خشک شدن سریع‌تر محصول می‌شود. این نتیجه‌گیری مطابق با نتایج به دست آمده از دیگر پژوهش‌هاست (Shanmugam & Natarajan, 2007).

در شرایط استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب، با افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس زمان خشک شدن به ۳۱/۲۵ درصد کاهش یافته است. در صورتی که با افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، این کاهش زمان خشک شدن به ۳۶/۳۶ درصد رسیده است. چنانچه از اطلاعات جدول مشخص است در روش استفاده نکردن از صفحات جاذب، با افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، کاهش زمان خشک شدن در حدود ۵ درصد بیشتر از زمانی است که افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس افزایش داشته در حالی که در روش استفاده از صفحات نانوجاذب با افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس نسبت به افزایش از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، افزایش دما تأثیر قابل توجهی در زمان خشک شدن دارد. علت احتمالی آن می‌تواند کاهش فشار جزئی بخار آب هوای خشک‌کن توسط صفحات نانوجاذب در چرخه بسته گردش هوای سیستم خشک‌کن باشد. بنابراین، چنانچه انتظار می‌رفت استفاده از صفحات نانوجاذب در سیستم خشک‌کننده سبب ایجاد تأثیر بر گرمای نهان تبخیر و جذب رطوبت هوای مرطوب خشک‌کن به دلیل

بازگشت هوای گرم و خشک به سیستم خشک‌کننده شده است. در صورتی که در سامانه گردش هوای باز به دلیل تبادل رطوبت محیط با هوای ورودی به سیستم خشک‌کن که دارای درصدی از رطوبت محیط است این اختلاف زمان خشک شدن کمتر شده است. در مناطق مرطوب این تأثیر در زمان خشک شدن محصول بیشتر محسوس است ولی در مناطق خشک مانند فلات مرکزی ایران که رطوبت بالایی ندارد، تفاوت قابل توجهی در زمان خشک شدن محصول بین دو روش استفاده کردن یا استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب دیده نخواهد شد.

ضریب نفوذ مؤثر برگ‌های نعنا

ضریب نفوذ مؤثر بیانگر انتقال رطوبت درونی به بیرون در حرارت دادن با هدف خشک کردن محصول است. جدول ۲ نتایج ضریب نفوذ مؤثر خشک کردن برگ‌های نعنا را در دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب نشان می‌دهد. چنانچه از نتایج به دست آمده مشخص است. در هر دو روش با افزایش مقدار دما ضریب نفوذ مؤثر نیز افزایش یافته است. علت احتمالی آن می‌تواند این باشد که ضریب نفوذ پارامتری مرتبط با ساختار بافت برگ گیاه نعناست و پارامتر داخلی است و نشان می‌دهد که فقط تغییرات دما می‌تواند بر سرعت انتقال رطوبت از درون بافت گیاه به بیرون تأثیر بگذارد و به سایر عوامل بستگی ندارد. این نتیجه‌گیری با مطالعات برای اندازه‌گیری ضریب نفوذ مؤثر بر برگ‌های نعنا منطبق است (Kadam *et al.*, 2011).

جدول ۲- مقایسه ضریب نفوذ مؤثر خشک شدن برگ‌های نعنا در دماهای مختلف و در دو روش خشک کردن

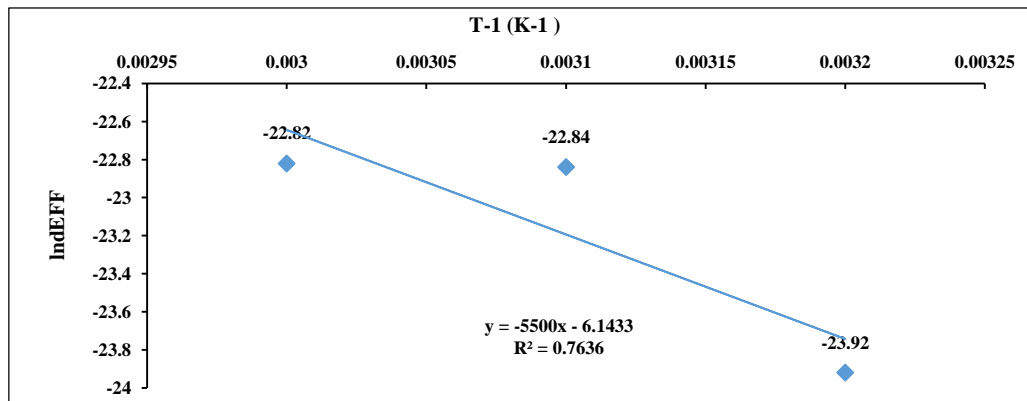
Table 2- Comparison of effective drying coefficients of mint leaves at different temperatures using two drying methods

مقایسه ضریب نفوذ مؤثر (مترمربع بر ثانیه)		دما
Comparison of effective (m^2/s)		(درجه سلسیوس)
استفاده نکردن از نانوجاذب not using nano-adsorbent	استفاده از نانوجاذب using nano-adsorbent	Temperature (°C)
4.0569×10^{-11}	8.1139×10^{-11}	40
1.2035×10^{-10}	2.4341×10^{-10}	50
1.2170×10^{-10}	2.8215×10^{-10}	60

انرژی فعال‌سازی

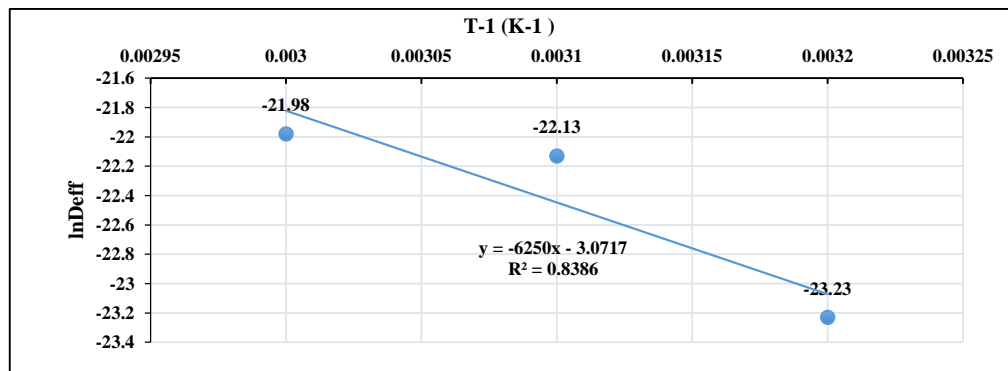
نکردن از صفحات نانوجاذب اندازه‌گیری شد. در این بررسی انرژی فعال‌سازی در شرایط عدم استفاده از صفحات نانوجاذب برابر $45/72$ کیلوژول بر مول و در شرایط استفاده از صفحات نانوجاذب برابر $51/96$ کیلو ژول بر مول به دست آمد.

انرژی فعال‌سازی نشان‌دهنده مقدار انرژی لازم برای خارج شدن آب از محصول است تا محصول خشک شود. در این تحقیق مقدار انرژی فعال‌سازی برگ نعنا در دو حالت استفاده کردن و استفاده



شکل ۷- نمودار تعیین انرژی فعال‌سازی برگ‌های نعنا در روش استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب

Fig. 7- Diagram of the activation energy of mint leaves for not using nano-adsorbent plates



شکل ۸- تعیین انرژی فعال‌سازی خشک شدن برگ‌های نعنا در روش استفاده کردن از صفحات نانوجاذب

Fig. 8- Diagram of the activation energy of mint leaves for using nano-adsorbent plates

مقادیر انرژی فعال‌سازی خشک شدن برگ نعنا در هر دو روش به دست آمده در محدوده نتیجه‌گیری‌ها از تحقیقات دیگران در خصوص برگ نعنا بوده است (Park *et al.*, 2002; Doymaz, 2004; Ethman Kane *et al.*, 2009). جدول ۳ مقادیر انرژی فعال‌سازی برخی از سبزی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳ - مقادیر انرژی فعال‌سازی برخی از سبزی‌ها و مواد غذایی

Table 3- Activation energies of various vegetables and foods

مرجع Sources	انرژی فعال‌سازی (کیلوژول بر مول) Activation energies (KJ/mol)	سبزی و مواد غذایی Foodstuff
Doymaz, 2004	28.36	Carrot هویج
Kaymak-Ertakin, 2002	42.80	Red pepper فلفل قرمز
Simal <i>et al.</i> , 1996	24.70	Green peas لوبیا سبز
Panchariya <i>et al.</i> , 2002	406.02	Black tea چای سیاه

دمای خشک‌کن بالاتر رود ظرفیت جذب رطوبت هوا و نسبت رطوبت هوای خشک‌کننده بیشتر می‌شود و فشار جزئی بخار آب در سیستم کمتر خواهد شد و انتقال رطوبت از محصول نیز سرعت خواهد گرفت. از طرفی، جذب رطوبت توسط صفحات نانوجاذب کاهش و تعداد نوبت احیا صفحات نانوجاذب نیز کاهش خواهد یافت که نتیجه آن کاهش مصرف انرژی برای احیا صفحات نانوجاذب است. در پژوهش‌ها، ضریب عملکرد پمپ حرارتی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس ۵/۷۵ گزارش شده است (Schmidt *et al.*, 1998).

تغییرات سرعت تبخیر رطوبت در جدول ۴ نشان داده شده است. شاخص سرعت تبخیر رطوبت نشان‌دهنده مقدار آب خارج شده از محصول در واحد زمان است. به عبارتی، هرچه دما بالاتر رود، سرعت انتقال رطوبت از درون محصول در واحد زمان بیشتر می‌شود. چنانچه نشان داده شده است، با افزایش دما مقادیر سرعت تبخیر رطوبت افزایش یافته است. البته این روند افزایشی فقط در دوره‌ای به صورت صعودی خواهد بود و پس از آن به دوره نزولی خواهد رسید.

ضریب عملکرد و سرعت تبخیر رطوبت ویژه

جدول ۴ محاسبات ضریب عملکرد، سرعت تبخیر رطوبت و سرعت تبخیر رطوبت ویژه در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس در شرایط استفاده از صفحات نانوجاذب را نشان می‌دهد. ضریب عملکرد هر سیستم نشان‌دهنده بهبود عملکرد آن سیستم است. به هر میزان ضریب عملکرد سیستم عدد بزرگ‌تری از یک باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر آن سیستم است. نتایج به دست آمده در هر سه دمای آزمایش نشان می‌دهد که ضریب عملکرد سیستم بزرگ‌تر از یک است و چنانچه در مقادیر جدول دیده می‌شود با افزایش دمای خشک‌کن ضریب عملکرد سیستم نیز بالا می‌رود و بیشترین ضریب عملکرد مربوط به دمای ۶۰ درجه سلسیوس است. رابطه ۸ نشان می‌دهد که صورت کسر تقریباً در هر سه دما مقداری ثابت است و تنها مخارج کسر که میزان انرژی مصرفی در دماهای مختلف است تغییر پیدا کرده است. دلیل اصلی تغییرات ضریب عملکرد سیستم در دماهای مختلف به انرژی مصرفی برای احیای صفحات نانوجاذب مرتبط است. هرچه

که با افزایش دما سرعت انتقال رطوبت داخلی محصول به سمت بیرون افزایش خواهد یافت، زمان خشک شدن کوتاه‌تر می‌شود. در نتیجه با مقایسه نتایج سرعت تبخیر رطوبت ویژه در دماهای مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که تأثیر سرعت تبخیر رطوبت بر میزان مصرف انرژی بیشتر است. شاخص سرعت تبخیر رطوبت ویژه در حین خشک کردن برگ بو ۰/۱۲۲ کیلوگرم بر کیلووات-ساعت گزارش شده است (Kuzgunkaya & Hepbasli 2007).

در صورتی که سرعت تبخیر رطوبت ویژه بیانگر میزان انرژی مورد نیاز برای خارج کردن یک کیلوگرم آب از محصول در واحد زمان است هرچه سرعت تبخیر رطوبت ویژه عددی بزرگ‌تر باشد بیانگر عملکرد بهتر نانوجاذب است. به عبارتی، با افزایش توان مصرفی سرعت تبخیر رطوبت ویژه نیز کاهش خواهد یافت. همان‌طور که نشان داده شده است، با افزایش دما سرعت تبخیر رطوبت ویژه کاهش یافته است. با افزایش دما میزان مصرف انرژی نیز افزایش خواهد یافت ولی از آنجا

جدول ۴- مقادیر مرتبط به عملکرد صفحات نانوجاذب

Table 4- Values related to the performance of nano-adsorbent plates

سرعت تبخیر رطوبت ویژه (کیلوگرم بر کیلووات ساعت) SMER(kg kW-1 h-1)	سرعت تبخیر رطوبت (کیلوگرم بر ساعت) MER (kgh-1)	ضریب عملکرد Coefficient of Performance	دما (درجه سلسیوس) Temperature(°C)
0.054	0.032	4.53	40
0.084	0.044	4.94	50
0.289	0.088	6.08	60

هوای بسته است. در سامانه گردش هوای بسته، به دلیل استفاده از صفحات نانوجاذب، رطوبت و در نتیجه فشار جزئی بخار آب هوای خشک‌کننده کاهش می‌یابد. کاهش فشار جزئی بخار آب، سبب افزایش سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوای خشک‌کننده و خشک شدن سریع‌تر محصول می‌گردد. از طرفی، با افزایش دما، مقادیر ضریب عملکرد و سرعت تبخیر رطوبت ویژه نیز افزایش نشان دادند، به عبارتی، هرچه سرعت تبخیر رطوبت ویژه بالاتر رود، عملکرد نانوجاذب نیز بهتر می‌شود و در نتیجه توان مصرفی دستگاه به ازای میزان خروج از محصول کمتر می‌شود. در تحقیقی، سرعت تبخیر رطوبت ویژه و ضریب عملکرد در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۲/۹۵ و ۵/۷۵ کیلوگرم بر

سینتیک انرژی در خشک کردن برگ‌های نعنا

جدول ۵ تغییرات مصرف انرژی را در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس در دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب نشان می‌دهد. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، استفاده از صفحات نانوجاذب تأثیر بالایی در کاهش توان مصرفی سیستم دارد. در مقایسه نسبت تغییرات مصرف انرژی در دماهای مختلف و بین دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب، شاهد کاهش مصرف انرژی مصرفی به میزان ۴۹ درصد در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و ۳۰ درصد در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ۲۹ درصد در دمای ۶۰ درجه سلسیوس در روش استفاده از صفحات نانوجاذب هستیم. علت اصلی این کاهش مصرف انرژی استفاده از سامانه گردش

کیلووات ساعت و در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر ۰/۱۸۸ کیلوگرم بر کیلووات ساعت و ۱/۸۷ کیلوگرم بر کیلووات ساعت گزارش شده است (Kuzgunkaya & Hepbasli, 2007).

جدول ۵- مصرف انرژی در دماهای مختلف و در دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از نانوجاذب

Table 5- Energy consumption at different temperatures and in two methods of using and not using nano-adsorbent

مصرف انرژی (وات) Energy consumption (W)		دما (درجه سلسیوس) Temperature (°C)
استفاده نکردن از نانوجاذب not using nano-adsorbent	استفاده از نانوجاذب using nano-adsorbent	
319.8	161.92	40
379.5	263.24	50
430.1	304.33	60
1129.4	729.49	Total

تغییرات شاخص رنگ
بین شاخص‌های L^* ، a^* و b^* نمونه‌های خشک شده با نمونه‌های تازه است. نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری شاخص رنگ کل در جدول ۶ نشان داده شده است.

از شاخص رنگ ΔE برای توصیف تغییرات رنگ استفاده می‌شود. مقادیر کم شاخص اختلاف رنگ کل، نشان‌دهنده کمترین اختلاف

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های رنگ برگ‌های خشک شده در دماهای مختلف و در دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از نانوجاذب

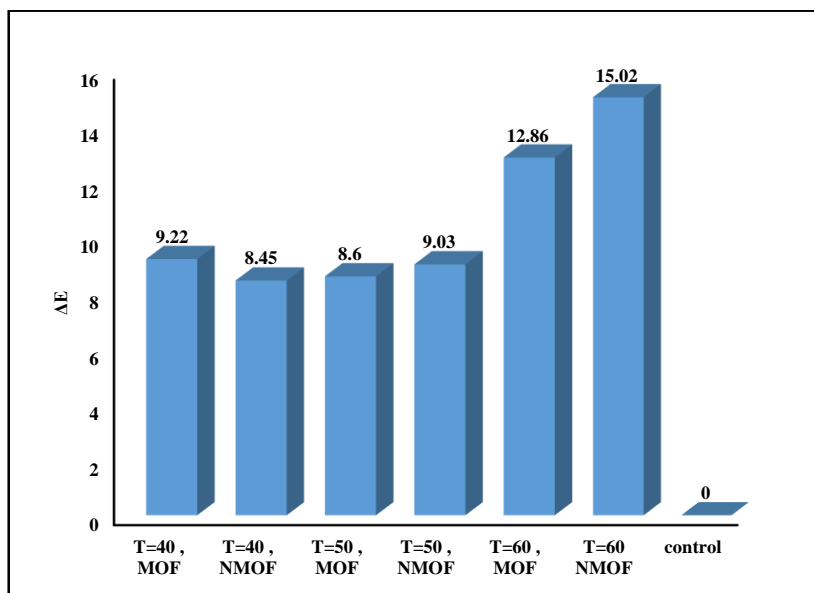
Table 6- Values of dried leaf color indices at different temperatures and in two methods without using nano adsorbent

ΔE	b^*	a^*	L^*	نمونه Sample
9.22	15.52	-3.21	37.9	T= 40 °C MOF
8.45	16.07	-2.64	39.25	T=50 °C NMOF
8.6	16.46	-2.72	39.02	T=40 °C MOF
9.03	16.31	-2.99	38.32	T= 50 °C NMOF
12.86	14.35	0.39	35.88	T=60 °C MOF
15.02	14.02	-0.05	34.69	T=60 °C NMOF
0.00	15.06	-7.36	46.13	Testator

با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، شاخص رنگ کل از ۹/۲۲ به ۱۲/۸۶ افزایش می‌یابد. و با تغییر دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس، شاخص رنگ کل بین ۹/۲۲ و ۸/۶ است که تغییر آشکاری ندارد. ولی با تغییر دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، شاخص رنگ کل افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر دمای بالای ۵۰ درجه سلسیوس بر اختلاف

شاخص رنگ بین نمونه خشک شده با نمونه تازه است. در هر سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، تفاوت آشکاری بین دو روش استفاده یا بدون استفاده از صفحات نانوجاذب دیده نمی‌شود. با افزایش دما، اختلاف در مقادیر بین دو روش بیشتر می‌شود که علت آن هم می‌تواند اختلاف زمان خشک شدن در روش

استفاده از نانوجاذب باشد. شکل ۹، تغییرات شاخص رنگ کل را در دماهای مختلف و در دو روش استفاده و بدون استفاده از نانوجاذب نشان می‌دهد.



شکل ۹- نمودار مقایسه مقادیر مربوط به شاخص اختلاف رنگ ΔE نمونه خشک شده با نمونه شاهد

Fig. 9- Diagram of comparison of the values related to the color difference index ΔE of the dried sample with the control sample

نتیجه‌گیری

انرژی فعال‌سازی برگ‌های نعنا در شرایط استفاده نکردن از صفحات نانوجاذب برابر ۴۵/۷۲ کیلوژول بر مول و در شرایط استفاده کردن از صفحات نانوجاذب برابر ۵۱/۹۶ کیلوژول بر مول به دست آمده است که با نتایج تحقیقات دیگر محققان مطابقت دارد. ضریب عملکرد، سرعت تبخیر رطوبت و سرعت تبخیر رطوبت ویژه نیز با افزایش دما کاهش می‌یابد. شاخص رنگ کل با افزایش دما بیشتر می‌شود ولی تفاوت آشکاری بین دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از نانوجاذب وجود ندارد.

سینتیک خشک شدن برگ‌های نعنا به دو روش استفاده کردن و استفاده نکردن از نانوجاذب‌های MOF نشان می‌دهد که خشک شدن عمدتاً در دوره سرعت نزولی اتفاق می‌افتد. مقدار ضریب نفوذ مؤثر در شرایط استفاده نکردن و استفاده کردن از صفحات نانوجاذب به ترتیب ۱۱-۱۰×۱۰^{-۱۱} و ۴/۰۵۶۹×۱۰^{-۱۱} در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و ۱۰-۱۰×۱۰^{-۱۰} در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، مترمربع بر ثانیه قرار دارد که با افزایش دما افزایش می‌یابد و در محدوده مقادیر گزارش شده است. نتایج اندازه‌گیری

مراجع

Aboul-Enein, A. El-Sebaei, M. R. I., Ramadan, A. A., & El-Gohary. H. G. (2000). Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications. *Renewable Energy*, 21, 505-522.

- Afzal, T. M., Abe, T., & Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Food Engineering*, 42, 177-182.
- Ag khani, M. H., Abbaspour Fard, M. H., Bayati, M. R., Morteza pour, H., Saedi. A., & Moghimi. A. (2013). Investigate the performance of a solar dryer equipped with a closed air circulation system and a dehumidifier chamber. *Journal of Agricultural Machinery*, 3(2), 92-103. (in Persian)
- Bal, L. M., Satya, S., & Naik, S. N. (2010). Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2298-2314.
- Chen, H., Hernandez, C. E., & Dogan, H. (2005). Anti-Oxidant activity of flavonoids from *Licania Licaniaeflora*. *Journal of Ethnopharmacology*, 79, 379-381.
- Diamante, L. M., & Munro, P. A. (1991). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato lices. *Solar Energy*, 51, 271-276.
- Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 61, 359-364.
- Ethman Kane, C. S., Sid' Ahmed, M. A. O., & Kouhila, M. (2009). Evaluation of drying parameters and sorption isotherms of mint Leaves (*M. pulegium*). *Revue des Energies Renouvelables*, 12, 449-470.
- Feng, X., Qin, M., & Cui, Sh. (2018). Metal-Organic Framework MIL-100(Fe) as a Novel Moisture Buffer Material for Energy-Efficient Indoor Humidity Control. *Building and Environment*, 145, 234-242.
- Kardani, F., Mirzajani, R., & Ramezani, Z. (2019). Determination of nanomolar dissolved polycyclic aromatic hydrocarbons in different water and wastewater samples using metal-organic framework. *Journal Desalination and Water Treatment*, 144, 99-115.
- Kaymak-Ertekin, F. (2002). Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. *Food Science*, 67(1), 168-175.
- Kuzgunkaya, E. H., & Hepbasli, A. (2007). Exergetic performance assessment of a ground-source heat pump drying system. *International Journal of Energy Research*, 31, 760-777.
- Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A., & Virseda, P. (2000). Thin Layer drying behavior of vegetable wastes from wholesale market. *Drying Technology*, 18, 995-1006.
- Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of Kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 169-175.
- Menghao, Q., Kan, Z., & Pumin H. (2021). *Metal-Organic Framework (MOF) as a novel humidity control material for autonomous indoor moisture management. Proceedings of the 1st International Conference on Moisture in Buildings (ICMB21)*. June 28-29, UCL London.
- Midilli, A. (2001). Determination of pistachio drying behavior and conditions in solar drying systems. *International Journal of Energy Research*, 25, 715-725.
- Misha, S., Mat, S., Ruslan, M., & Sopian, K. (2012). Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4686-4707.
- Mursali, A. (2013). *Metal-organic frameworks and introduction of some examples*. Tarbiat Modares University Publications. (in Persian)

- Oktay, Z., & Hepbasli, A. (2003). Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer. *Energy Conversion and Management*, 44, 1193-1207.
- Panchariya, P. C., Popovic, D., & Sharma, A. L. (2002). Thin Layer modeling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 349-357.
- Park, K. J., Vohnikova, Z., & Brod, F. P. R. (2002). Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of ferden mint Leaves (*Mentha crispa*. L). *Journal of Food Engineering*, 51, 193-199.
- Sarsavadia, P. N. (2007). Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. *Renewable Energy*, 32, 2529-2547.
- Schmidt, E. L., Klocker, K., Flacke, N., & Steimle, F. (1998). Applying the transcritical CO2 process to a drying heat pump. *International Journal of Refrigeration*, 21, 202-211.
- Seo, Y., Yoon, J. W., Lee, J. S., Hwang, Y. K., Jun, Ch., & Chang, S. (2012). Wuttke, energy-efficient dehumidification over hierachically porous metal-organic frameworks as advanced water adsorbents. *Advance Materials*, 24, 806-810.
- Shanmugam. V., & E. Natarajan. (2007). Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Applied Thermal Engineering*, 27, 1543-1551.
- Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J., & Rossello, C. (1996). Drying models for green peas. *Food Chemistry*, 55, 121-128.
- Soheili Mehdizadeh, A., Kayhani, A., Abbaspour Sani, K., & Akram, A. (2006). Design a solar drier with compulsory convection for vegetables and evaluate its performance. *Agricultural Engineering Research*, 7(27), 147-164. (in Persian)

Research Paper

Kinetics of drying of Mint Leaves and Energy Consumption in Thermal Dryers Equipped with Nano-Adsorbents: Examination and Analysis

M. Pouya, B. Beheshti*, A. M. Borghei and Gh. Asadi

*Corresponding Author: Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: beheshti-b@srbiau.ac.ir

Received: 16 February 2022, Accepted: 7 October 2022

[http://doi: 10.22092/AMSR.2022.357853.1412](http://doi:10.22092/AMSR.2022.357853.1412)

Abstract

This study evaluated the performance of a thermal dryer with a closed air circulation system equipped with a metal-organic framework (MOF) system. Dryer sections included: product drying chamber, the MOF containing chamber nano-absorbents, measurement and control systems. Dryer yield on mint was compared at three temperature levels (40, 50, and 60 °C). Finally, the energy consumption and drying mint leaves was evaluated. The results showed that the closed air circulation system reduces the dry time by 27% to 50%, the penetration coefficient of mint leaves increased with increasing temperature. Its values in cases of not using and using nano-absorbent plates were determined respectively (4.05690×10^{-11}) and (2.8215×10^{-10}) m^2/s . The activation energy in two methods of not using and using the nano-absorbents was 45.72 and 51.96 kJ/mol, respectively, which is consistent with the researchers' results. Also, the coefficient of performance, the rate of moisture evaporation, and the rate of specific moisture evaporation showed the effectiveness of using nano-absorbent in the dryer system and reducing energy consumption. The total color index (ΔE) did not change much with increasing temperature from 40 to 50 °C, but from 50 to 60 °C, the increased total color index. There wasn't a clear difference in total color index between the two methods of using and not using nano-adsorbent.

Keywords: Activation Energy, Coefficient of Performance, Diffusivity, Nano-Adsorbent, Total Color Index



© 2022 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)