

## استفاده از نانوجاذب MOF در خشک‌کن‌های با گردش هوای بسته با هدف کاهش مصرف انرژی

محسن پویا<sup>۱</sup>، بابک بهشتی<sup>۲\*</sup>، علی محمد برقی<sup>۳</sup> و غلامحسن اسدی<sup>۴</sup>

### چکیده

خشک کردن یکی از متداول‌ترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی است. حفظ کیفیت نهایی محصول در فرآیند خشک کردن بسیار حائز اهمیت است. تغییر ویژگی دمایی و میزان رطوبت هوای خشک‌کن تأثیر بالایی بر زمان خشک شدن و توان مصرفی دارد. در این تحقیق، برای مقایسه سرعت خشک شدن در دماهای مختلف یک دستگاه خشک‌کن حرارتی مجهز به صفحات نانوجاذب با گردش هوای بسته و بازیافت توان، مورد ارزیابی قرار گرفت. به طوری که بخش‌های خشک‌کن شامل: محفظه خشک کردن محصول، لوله‌ها ارتباطی هوا، دمنده‌های هوا، محفظه حاوی مواد نانوجاذب MOF، گرم‌کن برقی هوا و سامانه‌های اندازه‌گیری و پایش بود. آزمایشات بر روی برگ‌های گیاه نعنا و در سه سطح دمایی (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) و در دو روش گردش هوای باز و بسته مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد، که با افزایش دما، کاهش زمان خشک شدن ایجاد شد و در شرایط استفاده از صفحات نانوجاذب، زمان خشک کردن به میزان ۵۰٪ کاهش یافت. همچنین کمترین توان مصرفی در شرایط استفاده از نانوجاذب به میزان ۱۶۱/۹۲ وات ساعت برابر با ۴۹ درصد در کاهش مصرف توان به دست آمد. تغییرات شاخص رنگ کل ( $\Delta E$ ) با افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس تغییر چندانی نداشت ولی از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، شاخص رنگ کل از ۹/۲۲ به ۱۲/۸۶ افزایش یافت ولی اختلاف آشکاری در شاخص رنگ کل، بین دو روش استفاده و عدم استفاده از نانوجاذب وجود نداشت.

**واژه‌های کلیدی:** نانوجاذب MOF، گردش هوای بسته، زمان خشک شدن، توان مصرفی، شاخص رنگ کل.

**ارجاع:** پویا م. بهشتی ب. برقی ع. م. اسدی غ. ۱۴۰۳. استفاده از نانو جاذب MOF در خشک‌کن‌های با گردش هوای بسته با هدف کاهش مصرف انرژی نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی ۳۰: ۷۹-۸۵. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14129.633>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.  
۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.  
۳- 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.

\* نویسنده مسئول: [beheshti-b@srbiau.ac.ir](mailto:beheshti-b@srbiau.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

## مقدمه

خشک کردن فرآیندی پیچیده شامل انتقال حرارت، جرم و اندازه حرکت با مصرف انرژی بالا است. انتخاب روش خشک کردن مناسب می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی باعث حفظ کیفیت محصول تولیدی گردد. در حال حاضر خشک کردن با جریان هوای گرم، متداول‌ترین روش خشک کردن محصولات کشاورزی است، به طوری که با استفاده از این روش می‌توان محصولات با کیفیت را در مدت زمان کوتاهی تولید کرد (Doyma., 2004).

انرژی مورد نیاز برای خشک کردن به طور معمول از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌گردد. امروزه به دلیل افزایش قیمت جهانی سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی آن‌ها، توجه زیادی به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر به عنوان جایگزین یا مکمل سوخت‌های فسیلی و یا استفاده از روش‌های بازیافت انرژی مورد توجه محققین قرار گرفته است. تعدادی از پژوهش‌گران به منظور افزایش بازده انرژی در خشک‌کن‌های خورشیدی از سامانه گردش هوای بسته در خشک‌کن‌ها استفاده کردند (Aboul-Enein *et al.*, 2007), (Shanmugam & Natarajan., 2007), (2000). خشک‌کن خورشیدی با جریان هوای اجباری، برای سبزی‌های برگی طراحی و ارزیابی شد (Solheili *et al.*, 2006).

در خشک‌کن‌های با سامانه گردش هوای بسته با عبور هوای گرم و مرطوب از کنار مواد جاذب رطوبت، هوای گرم و خشک مورد نیاز فرآیند خشک شدن هوا تأمین می‌شود. استفاده از مواد جاذب رطوبت در خشک کردن، علاوه بر پائین آوردن توان مصرفی، سبب خشک کردن پیوسته حتی در ساعات غیرآفتابی، افزایش نرخ خشک شدن به دلیل هوای گرم و خشک، خشک کردن بسیار یکنواخت و افزایش کیفیت محصول، و خصوصاً برای محصولاتی که به حرارت حساس هستند، می‌شود. از دیگر مزایای استفاده از خشک‌کن‌های دارای مواد جاذب رطوبت عبارتند از: ۱) ماده جاذب اشباع شده را می‌توان به وسیله جریان هوای داغ احیا کرد، ۲) طراحی سامانه آسان است و به عملیات نگهداری زیادی برای سال‌ها نیاز ندارند ۳) به کارگیری ماده جاذب به همراه سایر روش‌های خشک کردن باعث کاهش توان مصرفی می‌شود و ۴) جایگزین مواد جاذب بعد از چرخه‌های کاری آسان است (Chua & Chou., 2003)

استفاده از خشک‌کن مجهز به سامانه گردش هوای بسته، به دلیل کاهش استفاده از هوای آزاد محیط سبب کاهش آلودگی میکروبی در محصول است (Chen *et al.*, 2005). برخی از مسائل در سامانه‌های جاذب رطوبت عبارتند از افت فشار در جاذب جامد، عمل انتقال مایع جاذب رطوبت به وسیله بخار هوا و ظرفیت جذب رطوبت پایین که به وسیله بهینه‌سازی طراحی سامانه بهبود پیدا می‌کند (Misha *et al.*, 2012).

در پژوهش‌های متعدد از مواد جاذب رطوبت جهت 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). برخی از این جاذب‌ها در دمای کمتر از ۸۰ درجه سلسیوس بازیابی می‌شوند که باعث صرفه جویی چشمگیری در مصرف انرژی می‌گردد (Seo *et al.*, 2012). در سال‌های اخیر گونه‌های جدیدی از جاذب‌های نانو ساختار با نام چارچوب‌های فلز-آلی (MOF<sup>1</sup>) معرفی گردیده‌اند که به دلیل سطح آزاد بسیار زیاد و ظرفیت جذب بالا و همچنین مصرف انرژی کمتر در حین فرآیند احیا، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند.

MOFها یا به بیان کلی‌تر، پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل، ترکیبات بلورین شامل شبکه‌های محدود متشکل از واحدهای ساختاری ثانویه یون-های فلزی یا کلاسترها<sup>۲</sup> و اتصال دهنده‌های آلی هستند که از طریق پیوندهای کوئوردیناسیونی<sup>۳</sup> به هم متصل شده‌اند. 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 Cu<sub>3</sub>(BTC)، خانواده MIL ها، Mg-MOF-74 یا Mg-COP-27 یا MOF-5، Uio-66-NH<sub>2</sub>، Uio-66، DUT-4، Mg/DOBDC، MOF-801-p و MOF-841 اشاره نمود (Mursali, 2013).

از طرفی جاذب‌های MOF علاوه بر اینکه به دلیل برخی ویژگی‌های خاصشان، نظیر سطح زیاد و قطر منافذ، دارای ظرفیت جذب بالا هستند، در حین فرآیند احیا نیز به انرژی بسیار کمتری نیاز دارند این ویژگی‌ها سبب شده تا این مواد را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی با

1- Metal-Organic Framework  
2- Cluster  
3- Coordination

صفحات نانو جاذب در آن مستقر گردید. تمام تجهیزات و لوله‌های ارتباطی نصب و محفظه استقرار صفحات نانوجاذب برای انتقال جریان پیوسته هوای خشک‌کن به دستگاه متصل و عایق گردید. احیای نانو جاذب MOF توسط یک دستگاه دمنده و گرم‌کن برقی که در مسیر جریان هوای ورودی به محفظه استقرار صفحات نانو جاذب قرار داده شده بود صورت می‌گرفت. شکل ۲ شماتیک خشک‌کن و محفظه نانو جاذب نشان می‌دهد در فرآیند استفاده از سامانه‌ی گردش هوای بسته، هوای گرم محفظه خشک‌کن، پس از عبور از روی محصول و جذب رطوبت، به داخل محفظه استقرار صفحات نانو جاذب هدایت می‌شد. هوای گرم و مرطوب خشک‌کن پس از رطوبت‌زدایی توسط صفحات نانو جاذب، مجدداً به صورت یک چرخه بسته به خشک‌کن هدایت می‌شد.

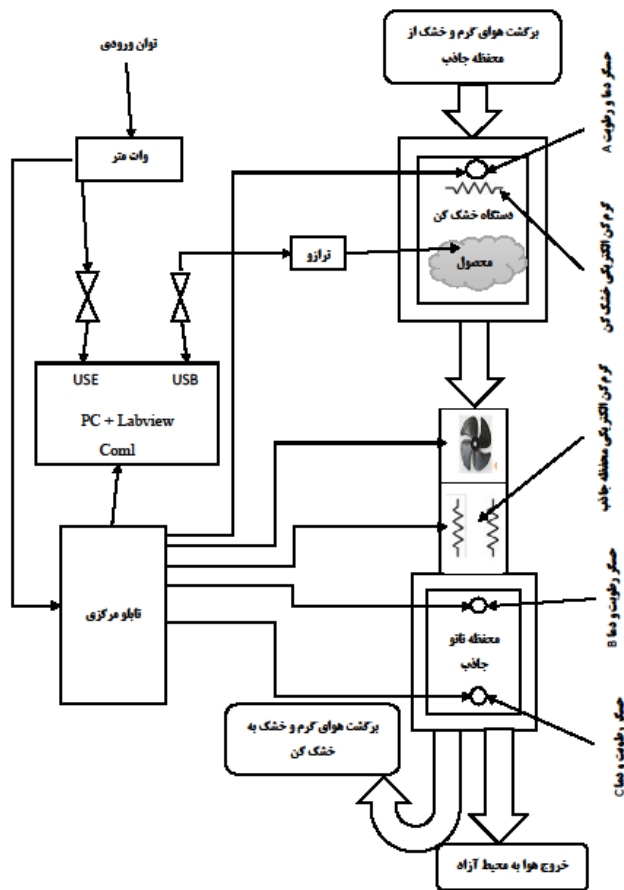
جاذب‌های مرسوم سیلیکاژل معرفی نماید. تاکنون پژوهشی با عنوان استفاده از نانو جاذب MOF در خشک‌کن‌ها صورت نگرفته است. در این تحقیق از یک سامانه گردش هوای بسته با بهره‌گیری از مواد نانوجاذب MOF برای سرعت بخشیدن به خشک شدن برگ‌های نعنا و بازیافت انرژی استفاده گردید.

### مواد و روش‌ها

در این آزمایش برای خشک کردن برگ‌های نعنا از یک دستگاه خشک‌کن و محفظه جاذب و تجهیزات جانبی استفاده شد که در شکل ۱ تصویر محفظه جاذب و بخشی از تجهیزات را نشان می‌دهد.



شکل ۱- محفظه جاذب و بخشی از تجهیزات نصب شده



شکل ۲ - شماتیک خشک‌کن، محفظه جاذب و تجهیزات نصب شده و نحوی اتصال

متغیرهایی که در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از: دمای هوای داخل دستگاه خشک‌کن

قسمت‌های مختلف این سامانه عبارتند از: دستگاه خشک‌کن شامل محفظه محصول، گرم‌کن برقی، دمنده‌ها و سامانه پایشی خشک‌کن، اجزاء رطوبت‌گیر سامانه شامل: محفظه استقرار صفحات نانو جاذب، صفحات نانو جاذب، گرم‌کن برقی احیا، دمنده احیا و حسگرهای رطوبت، دما و سامانه پایشی سامانه بود.

پیش از شروع آزمایش‌ها مواد نانوجاذب MOF در آزمایشگاه ساخته و سپس این مواد بر روی صفحات فلزی پوشش داده شد. همچنین محفظه‌ای طراحی و ساخته و

۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس انجام گردید. پس از به تعادل رسیدن دمای سامانه، محصول درون محفظه خشک‌کن قرار می‌گرفت. برای شروع آزمایش و برای دقت بیشتر، ابتدا ۱۰ گرم برگ نعنا در سه تکرار در داخل آن قرار گرفت و میزان رطوبت اولیه اندازه‌گیری شد. توزین نمونه‌ها توسط ترازوی<sup>۲</sup> دیجیتال انجام می‌گرفت. این آزمایش منطبق بر استاندارد<sup>۴</sup> AOAC صورت پذیرفت.

مراحل خشک کردن برگ‌های نعنا برای دو وضعیت با و بدون استفاده از صفحات نانوجاذب کاملاً مشابه بود. ابتدا برای به تعادل رسیدن سامانه با دمای محیط آزمایشگاه، دستگاه در شرایط دمایی ثابت ۲۵ درجه سلسیوس محیط آزمایشگاه، به مدت یک ساعت به طور پیوسته کار کرد تا پایداری سامانه ایجاد شود. این آزمایشات برای تعیین دقیق میزان انرژی مصرفی و بازده خشک‌کن، در سه تکرار، و در شرایط مشابه انجام پذیرفت. تمامی اطلاعات زمان، دمای محیط، دمای دستگاه خشک‌کن قبل و بعد از صفحات نانوجاذب، رطوبت قبل و بعد از صفحات جاذب، مصرف انرژی مجموع و لحظه‌ای سامانه، ثبت گردید. در این تحقیق ویژگی‌های اصلی مانند: رطوبت، دما و ویژگی‌های فرعی مانند: تأثیر جریان هوا در حین انجام آزمایش و ... ثبت و مورد دقت نظر قرار گرفت. برای اندازه‌گیری دبی جریان هوا از یک دستگاه سرعت‌سنج هوا<sup>۵</sup> استفاده شد. همچنین به جهت پایش ویژگی‌های اصلی و فرعی این تحقیق، آزمایش‌ها در دستگاه خشک‌کن به روش Batch انجام گردید.

در تمامی آزمایشات از برگ‌های نعنا تازه استفاده شد. برگ‌های نعنا از ساقه جدا و در هر آزمایش از ۱۰۰ گرم برگ نعنا تازه استفاده گردید.

انجام آزمایشات ابتدا در فاصله زمانی ۱۰ دقیقه و پس از یک ساعت به دلیل کاهش رطوبت نمونه‌ها با فاصله ۲۰ دقیقه‌ای انجام پذیرفت.

میزان انرژی مصرفی توسط گرم‌کن‌های خشک‌کن و همچنین میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم برگ نعنا محاسبه شد. میزان انرژی مصرفی در هر دوره با معادله (۱) اندازه‌گیری شد (Kyuncu et al., 2007), (Aghbashl et al., 2008).

توسط حسگر<sup>۱</sup> دما و رطوبت (A) ثبت می‌شد. دمای ورودی به محفظه نانوجاذب توسط حسگر دما و رطوبت (B) اندازه‌گیری و به سامانه پایشی ارسال می‌شد، و دمای هوای خروجی از محفظه نانوجاذب توسط حسگر دما و رطوبت (C) پایش می‌شد. اطلاعات به دست آمده از این حسگرها به یک داده‌پرداز منتقل و توسط نرم‌افزار Labview 2015 پایش و برنامه‌ریزی می‌شد. 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 برقی خشک‌کن صادر می‌کرد. حسگر دما و رطوبت (B)، درصد رطوبت هوای درون محفظه خشک‌کن، قبل از ورود به محفظه صفحات نانو جاذب را اندازه‌گیری می‌کرد و حسگر دما و رطوبت (C)، درصد رطوبت هوای خروجی از محفظه نانو جاذب را کنترل می‌کرد. برنامه‌ریزی برای عمل حسگر دما و رطوبت (C) به نحوی بود که در یک دامنه مشخص و پس از جذب ۷۰ درصدی رطوبت توسط صفحات نانو جاذب، فرمان روشن شدن را به گرم‌کن برقی و دمنده احیا صفحات نانوجاذب را فعال می‌کرد تا عملیات احیای صفحات نانوجاذب انجام شود.

مجموع توان مصرفی یک گرم‌کن برقی و دمنده استفاده شده برای احیای صفحات نانو جاذب توسط یک دستگاه وات‌متر<sup>۲</sup> اندازه‌گیری شد. شروع فرآیند احیای صفحات نانوجاذب با فرمان سامانه پایشی و توسط حسگر (C) انجام می‌شد. این چرخه به طور مستمر با انتقال داده‌های سامانه توسط حسگرهای رطوبت و دما به سامانه پایشی انجام می‌گردید.

میزان توان مصرفی در وضعیت عدم استفاده از صفحات نانوجاذب، برای بالا بردن دمای هوای تازه ورودی به درون خشک‌کن افزایش می‌یافت. ولی در شرایط استفاده از صفحات نانوجاذب، چون هوای خشک و گرم مجدداً به خشک‌کن بازگردانده می‌شد سبب کاهش مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن و سبب جلوگیری از اتلاف انرژی می‌شد. آزمایش در سه سطح دمایی متفاوت

۱- حسگر دما و رطوبت دیجیتال مدل SHT 75 با دقت اندازه‌گیری رطوبت نسبی ± ۱.۸٪ و دقت اندازه‌گیری دما ۰.۳ °C ±

۲- مدل TMI 5010 با دقت ۰.۵٪ بیشترین خروجی شرکت Lutron - تایوان

۳- مدل 572-57 KERN، با دقت ۰/۱ گرم

4- Association of official Agricultural Chemists

۵- مدل HWA 30 - T - DL با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ (m/s)

و بلافاصله با دستگاه اسپکتروفتومتری<sup>۲</sup> شاخص‌های رنگ نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

همچنین پس از خشک شدن برگ‌های نعنا در هر آزمایش، نمونه برگ‌های خشک توسط آسیاب برقی پودر گردید و سپس توسط دستگاه اسپکتروفتومتری شاخص‌های رنگ برگ‌های خشک، در دماهای مختلف و در دو روش استفاده و بدون استفاده از نانو جاذب اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در سه تکرار و نمونه تازه برگ‌های نعنا به عنوان شاهد تعیین و مقایسه شد. با تعیین جدول مقادیر ویژگی‌های شاخص‌های رنگ، مقدار شاخص رنگ کل  $\Delta E$  توسط معادله (۳) محاسبه گردید.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L^*_0)^2 + (a^* - a^*_0)^2 + (b^* - b^*_0)^2} \quad (3)$$

$L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  مقادیر ویژگی‌های نمونه‌های خشک شده و  $L^*_0$ ،  $a^*_0$  و  $b^*_0$  مقادیر اولیه این ویژگی‌ها (نمونه‌های تازه قبل از خشک شدن) هستند. در این آزمایش از طرح آماری کرت‌های دوبرار خرد شده در قالب بلوک‌های کاملاً تصادفی استفاده شد.

### نتایج و بحث

جدول ۱ زمان خشک شدن برگ‌های نعنا در سه دما ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و در دو روش استفاده یا عدم استفاده از صفحات نانو جاذب را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده در هر دو روش، با افزایش دمای خشک کردن، زمان خشک کردن نیز کاهش می‌یابد. به عبارتی با افزایش حرارت نرخ انتقال رطوبت از درون محصول به هوای محیط افزایش یافته و رطوبت در مدت زمان کمتری از درون محصول خارج می‌شود. در شرایط استفاده از صفحات نانو جاذب، و با افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس، زمان خشک کردن محصول ۲۷/۲۶ درصد کاهش یافت. در صورتی که با افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، این کاهش زمان خشک شدن به ۵۰ درصد رسید. در این روش به دلیل این که خشک‌کن به صورت سامانه گردش هوای بسته کار می‌کند. سرعت خشک شدن محصول نسبت به سامانه هوای باز، افزایش یافت. در سامانه 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

$$E_t = A v \rho_{air} C_a \Delta T D_t \quad (1)$$

$E_t$  کل انرژی مصرفی در هر دوره خشک شدن بر حسب (kJ.h)،  $A$  مساحت سطح ظرفی که نمونه آزمایش در آن قرار داده شده ( $m^2$ )،  $v$  سرعت باد ( $m/s$ )،  $\rho_{air}$  چگالی هوا ( $kg/m^3$ )،  $\Delta T$  کل زمان خشک شدن هر نمونه ( $h$ )،  $D_t$  دماهای مختلف خشک کردن ( $^{\circ}C$ ) و  $C_a$  گرمای ویژه ( $kJ/kg^{\circ}C$ ) است. میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم نعنا با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد (Aghbashl *et al.*, 2008).

$$E_{kg} = \frac{E_t}{W_0} \quad (2)$$

$E_t$  کل انرژی مصرفی در هر دوره خشک شدن بر حسب (kJ.h) و  $E_{kg}$  انرژی مخصوص مورد نیاز (kJ.h/kg) و  $W_0$  وزن اولیه نمونه آزمایشی (kg) است.

تغییرات کیفی از ویژگی‌های مهم و قابل بررسی در فرآیند خشک کردن محصولات غذایی و کشاورزی است. تأثیر فرآیند خشک کردن باید به شکلی باشد که حداقل تغییرات در ویژگی‌های کیفی مواد وجود داشته باشد.

ویژگی‌های کیفی شامل تغییرات فیزیکی و شیمیایی مواد است. ویژگی‌هایی مانند ابعاد، شکل، چروکیدگی، و سختی بافت را تغییرات فیزیکی و ویژگی‌هایی مانند تغییر رنگ، تغییر در میزان چربی‌ها، ویتامین‌ها و... را تغییرات شیمیایی گویند. در این تحقیق به دلیل محدودیت‌های ایجاد شده فقط تغییرات رنگ که از شاخص‌های کیفی فیزیکی محسوب می‌شود اندازه‌گیری و سایر شاخص‌های تغییرات کیفی در تحقیق بعدی بررسی خواهند شد. برای تعیین میزان تغییرات رنگ محصول خشک شده و مقایسه آن با نمونه تازه محصول، از روش اندازه‌گیری تغییرات شاخص رنگ کل و از مدل  $CIE^1$  استفاده گردید. در این مدل از شاخص‌های رنگ  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  استفاده شد. شاخص  $L^*$  نشاندهی روشنایی و شاخص‌های  $a^*$  و  $b^*$  دامنه‌ای از رنگ را نشان می‌دهد که در محدوده +۶۰ تا -۶۰ تغییر می‌کنند، مقدار مثبت بیانگر قرمزی و زردی، مقدار منفی بیانگر سبزی و آبی است. ویژگی‌های دیگر از ترکیب این سه ویژگی به وجود می‌آیند (Maskan *et al.*, 2002). قبل از هر آزمایش نمونه‌هایی از برگ‌های تازه نعنا آسیاب و به قطعات ریز تبدیل

گیری از سامانه گردش هوای بسته در سامانه خشک‌کن است. در سامانه گردش هوای بسته به دلیل استفاده از صفحات نانوجاذب، رطوبت و در نتیجه فشار جزئی بخار آب هوای خشک کننده کاهش می‌یابد. کاهش فشار جزئی بخار آب خشک کننده سبب افزایش سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوای خشک کننده و خشک شدن سریع‌تر محصول و کاهش زمان خشک شدن می‌گردد. این نتایج منطبق با سایر پژوهش‌های مشابه است.

جدول ۲- مصرف انرژی در دماهای مختلف و در دو روش استفاده و عدم استفاده از نانو جاذب

تغییرات دما °C	متوسط توان مصرفی (وات)		تغییرات (%)
	استفاده از صفحات نانو جاذب	عدم استفاده از صفحات نانو جاذب	
۴۰	۱۶۱.۹۲	۳۱۹.۸	۴۹
۵۰	۲۶۳.۲۴	۳۷۹.۵	۳۰
۶۰	۳۰۴.۳۳	۴۳۰.۱	۲۹
مجموع	۷۲۹.۴۹	۱۱۲۹.۴	۳۵

(Punlek *et al.*, 2009), (Aboul-Enein *et al.*, 2000), (Shanmugam & Natarajan., 2007), (Sarsavadia., 2007) از شاخص رنگ  $\Delta E$  برای توصیف تغییرات رنگ استفاده گردید. بطوری که مقادیر کم شاخص اختلاف رنگ کل، نشان دهنده کم‌ترین اختلاف بین شاخص‌های  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  نمونه‌های خشک شده با نمونه‌های تازه است. نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری شاخص رنگ کل در جدول ۳ نشان داده شده است. 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 معناداری ندارد. ولی با تغییر دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، شاخص رنگ کل افزایش می‌یابد که نشان دهنده تأثیر دمای بالای ۵۰ درجه سلسیوس بر اختلاف شاخص رنگ بین نمونه خشک شده با نمونه تازه است. همچنین در هر سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، تفاوت آشکاری بین دو روش استفاده یا عدم استفاده از صفحات نانوجاذب دیده نشد. البته با افزایش دما، اختلاف در مقادیر بین دو روش بیشتر می‌شود که علت آن هم می‌تواند به دلیل اختلاف زمان خشک شدن در روش استفاده از نانوجاذب باشد.

هوای خشک‌کننده، سبب افزایش سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوا و خشک شدن محصول می‌گردد. این نتایج مطابق با نتایج به دست آمده در سایر پژوهش‌های مشابه است (Shanmugam & Natarajan., 2007).

در شرایط عدم استفاده از صفحات نانوجاذب، با افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس زمان خشک شدن به ۳۱/۳۷ درصد کاهش یافت. در صورتیکه با افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، این کاهش زمان خشک شدن به ۳۶/۲۹ درصد رسید.

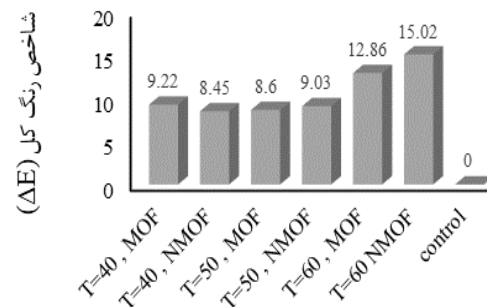
جدول ۱- زمان خشک شدن در دماهای مختلف و در دو روش استفاده و عدم استفاده از نانو جاذب

دما °C	زمان خشک شدن (دقیقه)	
	استفاده از صفحات نانو جاذب	عدم استفاده از صفحات نانو جاذب
۴۰	۱۶۵	۲۴۰
۵۰	۱۲۰	۱۶۵
۶۰	۶۰	۱۰۵

چنانچه از اطلاعات جدول ۱ مشخص است در روش عدم استفاده از صفحات جاذب، با افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، کاهش زمان خشک شدن حدوداً ۵ درصد بیش‌تر از زمانی است که افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سلسیوس افزایش داشته در حالیکه در روش استفاده از صفحات نانوجاذب با افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ و همچنین از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، افزایش دما تأثیر قابل توجهی در زمان خشک شدن دارد. علت آن تأثیر بر کاهش فشار جزئی بخار آب هوای خشک‌کن توسط صفحات نانوجاذب در چرخه بسته گردش هوای سامانه خشک‌کن است. بنابر این چنانچه انتظار می‌رفت استفاده از صفحات نانوجاذب در سامانه خشک‌کننده سبب تأثیر بر گرمای نهان تبخیر و جذب رطوبت هوای مرطوب خشک‌کن و بازگشت هوای گرم و خشک به سامانه خشک‌کننده شده است. در صورتی که در سامانه گردش هوای باز هوای ورودی به سامانه خشک‌کن دارای درصدی از رطوبت محیط است.

جدول ۲ تغییرات مصرف انرژی در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس در دو روش استفاده و عدم استفاده از صفحات نانو جاذب را نشان می‌دهد. علت اصلی کاهش مصرف انرژی در روش استفاده از نانوجاذب بهره-

- Chua, K., & Chou, S. (2003). Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*, 14: 519-582.
- Doymaz, I., (2004). Convective air drying characteristics of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 61: 359-364.
- Kyuncu, T., Pinar, Y., & Lule, F. (2007). Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna* Jacq.) and yellow (*Crataegus aegonia* Bosc.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 78: 1471-1475.
- Maskan, A., Kaya, S., & Maskan, M. (2002). Hot air and sun drying of grape leather (pestil). *Journal of Food Engineering*, 54: 81-88.
- 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).
- Punlek, Ch., Pairintra, R., Chindaraksa, S., & Maneewan S. (2009). Simulation design and evaluation of hybrid PV/T assisted desiccant integrated HA-IR drying system (HPIRD). *Food and Bioprocess Technology*, 2: 77-86.
- Sarsavadia, P. N. (2007). Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. *Renewable Energy*, 32(15): 2529-2547.
- Seo, Y. K., Yoon, J. W., Lee, J. S., Hwang, Y. K., Jun, Ch., & Chang, S. (2012). Energy-Efficient Dehumidification over Hierarchically Porous Metal-Organic Frameworks as Advanced Water Adsorbents. *Adv. Mater.*, 24: 806-810.
- Shanmugam, V., & Natarajan, E. (2007). Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Applied Thermal Engineering*, 27: 1543-1551.
- Solheili 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).



شکل ۴- نمودار مقایسه مقادیر مربوط به شاخص اختلاف رنگ  $\Delta E$  نمونه خشک شده با نمونه شاهد

### نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، با افزایش دمای خشک‌کن، زمان خشک شدن محصول در روش استفاده و عدم استفاده نانوجاذب کاهش می‌یابد، کمترین مصرف انرژی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و در روش استفاده از نانوجاذب و بیشترین مصرف انرژی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و در روش عدم استفاده از نانو جاذب به ترتیب برابر ۱۶۱/۹۲ تا ۴۳۰/۱ وات ساعت به دست آمد. شاخص رنگ کل با افزایش دما بیشتر می‌شود ولی تفاوت آشکاری بین دو روش استفاده و عدم استفاده از نانو جاذب وجود نداشت.

### منابع

- Aboul-Enein, s., El-Sebaei, A. A., Ramadan, M. R. I., & El-Gohary, H. G. (2000). Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications. *Renewable Energy*, 21(3-4): 505-522.
- Aghbashl, M., Kianmehr, M. H., & Samimi-Akhijahani H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit. *Energy Conversion and Management*, 49(10): 2865-2871
- 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.

