

بررسی پارامترهای خشک شدن لایه نازک حبه‌های انار در خشک‌کن ترکیبی خلأ - خورشیدی

بهنام علائی^۱، رضا امیری چایجان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(تاریخ دریافت: ۹۱/۹/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۸)

چکیده

در این تحقیق یک دستگاه جدید آزمایشگاهی خشک‌کن خلأ- خورشیدی برای بررسی رفتار خشک‌کردن حبه‌های انار در فشارهای مختلف خلأ و با منبع حرارتی خورشیدی طراحی و ساخته شد. آزمایش‌های خشک کردن حبه‌های انار در چهار سطح فشارهای مطلق ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال انجام شدند. تأثیر فشارهای مختلف خشک‌شدن بر رفتار کاهش رطوبت، ضریب نفوذ رطوبت موثر، رنگ و چروکیدگی حبه‌های انار در طی فرآیند خشک‌شدن در خشک‌کن خلأ- خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. با تحلیل رگرسیونی برای مدل‌های مورد بررسی مشخص شد که مدل میدیلی بهترین برازش را با داده‌های تجربی به دست آمده نشان می‌دهد. نتایج نشان داد با کاهش فشار مطلق، زمان خشک شدن حبه‌های انار کاهش می‌یابد. کمترین زمان خشک شدن مربوط به فشار مطلق ۱۰ کیلوپاسکال بود. ضریب نفوذ رطوبت موثر حبه‌های انار در خشک‌کن خلأ- خورشیدی بین 10^{-10} تا $3/09 \times 10^{-11}$ مترمربع بر ثانیه به دست آمد. تغییرات کلی رنگ حبه‌های انار بین ۱۷/۲ تا ۲۲/۱ درصد چروکیدگی بین ۶۷/۵۸٪ تا ۷۴/۴۵٪ به دست آمد.

کلید واژگان: خشک‌کن خلأ-خورشیدی، حبه‌ی انار، رنگ، چروکیدگی، ضریب نفوذ رطوبت موثر

* مسئول مکاتبات: amirireza@basu.ac.ir

۱- مقدمه

خشک‌کن‌های صنعتی برای مقابله با اثرات نامطلوب خشک کردن و بالا بردن کیفیت و ارزش تغذیه‌ای محصول خشک‌شده از یک روش بالقوه مفید به نام خشک‌کردن تحت خلأ استفاده می‌شود. در خشک‌کن تحت خلأ امکان حذف رطوبت در فشارهای کم فراهم می‌شود [۸]. در خلأ به دلیل افزایش اختلاف فشار بین داخل و خارج نمونه، انتقال جرم نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان با صرف انرژی کمتر در حرارت‌های پایین‌تر رطوبت را از محصول جدا کرد. با این روش کیفیت محصول خشک شده افزایش می‌یابد. در فشارهای پایین محصول به از دست دادن رطوبت مستعدتر است اما برای کاهش رطوبت محصول نیاز به یک منبع حرارتی می‌باشد تا با ایجاد انرژی سبب تبخیر رطوبت محصول شود [۹]. در این تحقیق برای اولین بار سعی شد که با ترکیب مرحله‌ای خشک‌کن خلأ و خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم، از انرژی تابشی خورشید به عنوان منبع تأمین گرما در خشک‌کن خلأ استفاده شود. همچنین بررسی رفتار خشک‌شدن حبه‌های انار تحت شرایط خلا با منبع حرارتی خورشیدی و مطالعه ویژگیهای ضریب نفوذ رطوبت موثر، رنگ و چروکیدگی حبه‌های انار به عنوان محصول نمونه در طی فرآیند خشک‌شدن از اهداف این پژوهش می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

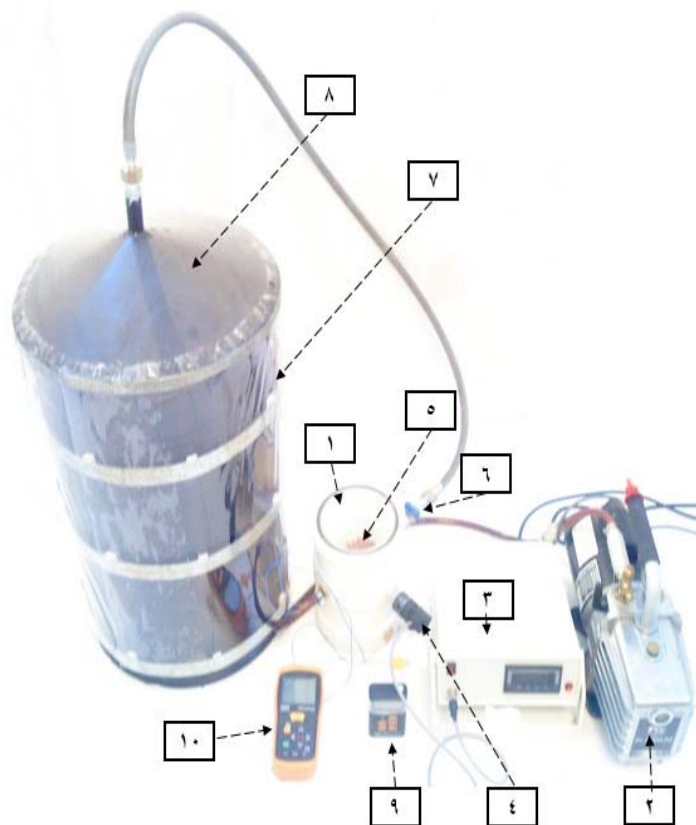
۲-۱- روش اندازه‌گیری رطوبت اولیه

انار تازه رقم ملس ساوه از شهرستان ساوه تهیه شد. نمونه‌ها به منظور حفظ رطوبت در داخل پلاستیک چند لایه قرار داده و در یخچال در دمای $3 \pm 1^\circ\text{C}$ نگهداری شدند. برای به دست آوردن مقدار رطوبت اولیه حبه‌های انار، نمونه‌ها در یک آون خشک‌کن در دمای $70 \pm 1^\circ\text{C}$ به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند و بعد از آن هر یک ساعت یک‌بار وزن شدند و در پایان دو اندازه‌گیری متوالی که تغییرات وزن نمونه‌ها کمتر از یک درصد شد، مقدار رطوبت اولیه محاسبه گردید [۱۰]. محتوای رطوبت اولیه حبه‌های انار در حدود ۳/۵ بر پایه خشک به دست آمد. رطوبت نهایی حبه‌ها در اناهای آزمایشها به حدود ۰/۰۹ بر پایه خشک رسید.

انار (*Punica granatum* L) از میوه‌های مهم مناطق نیمه گرمسیری ایران است. موطن اصلی انار خاورمیانه به ویژه ایران است. ارزش تغذیه‌ای و خواص درمانی، سازگار با شرایط آب و هوایی و عمر نگهداری بالا از دلایل کشت این محصول در مقیاس گسترده در کشور است [۱]. حبه‌ی انار خشک شده منبع خوبی از ویتامین‌ها و مواد معدنی است و می‌تواند به عنوان یک میان وعده در نظر گرفته شود [۲]. خشک کردن همیشه اهمیت زیادی در محافظت و افزایش عمر و ماندگاری محصولات کشاورزی داشته است. با این روش علاوه بر جلوگیری از فساد ماده غذایی به وسیله میکروارگانیسم‌ها و یا واکنش‌های شیمیایی، وزن ماده غذایی کاهش یافته و صرفه‌جویی بسیاری در هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری حاصل می‌شود [۳]. در مقایسه با سایر فعالیت‌ها جهت نگه‌داری مواد غذایی، خشک کردن انرژی زیادی به مصرف می‌رساند. انرژی خورشیدی یک منبع رایگان، تجدیدپذیر و عاری از هر گونه آلودگی است. خشک‌کردن خورشیدی پرکاربردترین روش برای استفاده در محصولات کشاورزی مخصوصاً در کشورهای آسیایی است. در این روش محصولات بر روی سطحی صاف پخش می‌شوند و در معرض تابش مستقیم خورشید قرار می‌گیرند [۴]. خشک کردن حبه‌های انار به وسیله خورشید یک روش متداول است اما سرعت انتقال رطوبت از محصول بسیار کم و زمان بر است [۵]. در خشک کردن به وسیله خورشید مشکل آلودگی به علت وجود گرد و غبار محیط و حمله حشرات وجود دارد، همچنین خشک کردن به وسیله خورشید بسیار به شرایط آب و هوایی وابسته است [۶]. استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی روشی مناسب برای استفاده از انرژی تابشی خورشید و برطرف کردن مشکلات روش‌های سنتی خشک‌کردن به وسیله خورشید است. خشک‌کن‌های خورشیدی به سه دسته مستقیم، غیرمستقیم و مختلط تقسیم بندی می‌شوند. در نوع مستقیم محصول در یک محفظه قرار داده می‌شود و نور خورشید به طور مستقیم از طریق پوشش شفاف به محصول می‌تابد. در نوع غیر مستقیم انرژی خورشید توسط یک جمع‌کننده خورشیدی جذب شده و هوای عبوری از جمع‌کننده را گرم می‌کند، سپس این هوای گرم برای خشک‌کردن محصول به کار می‌رود. در نوع مختلط از هر دو روش به طور همزمان استفاده می‌شود [۷].

۲-۲- طرح خشک کن خلأ- خورشیدی

نمای خشک کن خلأ- خورشیدی ساخته شده برای این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمای خشک کن آزمایشگاهی خلأ-خورشیدی (۱-محفظه‌ی خشک کن، ۲- پمپ خلأ، ۳- سیستم کنترل فشار، ۴- سنسور فشار، ۵- ظرف نمونه‌ها، ۶- شیر و اتصالات، ۷- جمع کننده‌ی خورشیدی، ۸- مخزن جمع کننده‌ی خورشیدی، ۹- توان سنج خورشیدی، ۱۰- ترمومتر)

خشک کن شامل یک محفظه خلأ به ابعاد قطر داخلی ۱۲۰ میلی‌متر، ارتفاع ۲۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر از جنس تفلون به منظور حفظ حرارت ساخته شد. برای ایجاد خلأ در محفظه از پمپ خلأ دو مرحله‌ای (JB-285، ساخت کشور آمریکا) با دبی ۲۸۵ لیتر بر دقیقه و حداقل فشار کاری ۲ پاسکال استفاده شد. فشار محفظه به وسیله سنسور (PSCH0001 BCIJ، ساخت کشور کره جنوبی) با دقت ۰/۰۰۱ بار اندازه‌گیری شد و به وسیله سیستم کنترل فشار تعیین و کنترل گردید. نمونه‌ها در یک ظرف توری داخل محفظه قرار داده شدند و هر ۱۵ دقیقه به وسیله ترازوی دیجیتال با درجه

تفکیک ۰/۰۰۱ گرم وزن شدند. همچنین رطوبت محیط به وسیله رطوبت‌سنج دیجیتال (Lutron TM-903، ساخت تایوان) با درجه تفکیک ۰/۱ درصد و دمای آن به وسیله دماسنج دیجیتال (PSCH0001BCIJ، ساخت کره جنوبی) با درجه تفکیک ۰/۱°C اندازه‌گیری شد. شدت تابش خورشیدی با استفاده از دستگاه توان سنج خورشیدی (Tes-1333R، ساخت تایوان) با دقت $\pm 10 \text{ W/m}^2$ به دست آمد. رنگ نمونه‌ها به وسیله آنالایزر رنگ (Lutron RGB-1002، ساخت تایوان) اندازه‌گیری شد. جمع کننده خورشیدی به شکل استوانه برای جذب انرژی خورشیدی از جهات مختلف تابش در طول روز و از جنس آهن با رنگ سیاه برای جذب بیشتر ساخته شد. پوشش نازک و شفاف به فاصله ۲/۳ سانتی‌متر از بدنه برای هدایت جریان هوا از پایین به بالا و یک مخزن مخروطی شکل در بالا برای جمع‌آوری هوای گرم برای انتقال به مخزن خلأ در زمان‌های مشخص نصب گردید. ارتباط بین مخزن جمع کننده خورشیدی و محفظه خلأ به وسیله شیر دستی قطع و وصل شد.

فرآیند خشک کردن شامل دو مرحله خشک شدن در شرایط خلأ و هوای گرم جمع کننده‌ی خورشیدی است. روش کار به این صورت است که نمونه‌های حبه‌های انار در محفظه‌ی خلأ قرار می‌گیرند. پمپ خلأ به مدت ۴ ثانیه روشن می‌شود و هوای گرم را از جمع کننده‌ی خورشیدی به محفظه‌ی خلأ منتقل می‌کند، بعد از ۱۵ دقیقه شیر ارتباطی مخزن جمع کننده خورشیدی و محفظه خلأ بسته می‌شود و پمپ خلأ شروع به کار می‌کند تا فشار محفظه برای مدت ۱۵ دقیقه بر روی مقدار تعیین شده ثابت شود. این روند تا پایان فرآیند خشک شدن نمونه‌ها ادامه یافت. آزمایش‌ها در ۴ سطح فشار مطلق ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال در ساعت ۱۰:۰۰ شروع شدند. نسبت رطوبت حبه‌های انار در طول فرآیند خشک شدن با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e}$$

که در آن MR نسبت رطوبت (بدون بعد)، M میزان رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب)، M_e رطوبت تعادلی (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب) و M_o محتوای رطوبت اولیه (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب) می‌باشد. مقدار M_e در زمان‌های طولانی خشک کردن در مقایسه با M

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(\frac{-D_{eff} \pi^2 t}{r^2}\right)$$

بعد از ساده شدن معادله ۵ را می‌توان به صورت خطی نوشت. با لگاریتم‌گیری از طرفین معادله، می‌توان آن را به صورت معادله خطی ۶ نوشت [۱۴]:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff} \pi^2 t}{r^2}\right)$$

با رسم لگاریتم طبیعی داده‌های به دست آمده نسبت به زمان، خطی با شیب K به دست می‌آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t در رابطه ۶، ضریب پخش رطوبت موثر را می‌توان از رابطه‌ی ۷ به دست آورد:

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}$$

۲-۴- رنگ

یکی از مهم‌ترین شاخص کیفی ظاهری محصولات کشاورزی رنگ است. رنگ و تغییرات آن با بسیاری از خواص فیزیکی و شیمیایی محصولات ارتباط مستقیم دارند [۱۵]. میزان رنگ نمونه‌ها قبل و بعد از خشک شدن هر سری از نمونه‌ها به وسیله آنالایزر رنگ بر حسب پارامترهای مدل RGB (میزان قرمز، سبز و آبی بودن) به دست آمد. سپس مقادیر به دست آمده به وسیله نرم افزار فتوشاپ به پارامترهای مدل Lab تبدیل شدند. مدل رنگی Lab در سال ۱۹۷۶ به وسیله کمیسیون بین المللی روشنایی (CIE) به عنوان یک استاندارد بین المللی برای اندازه‌گیری رنگ مطرح شد. در این مدل رنگی L ، a و b به ترتیب نشان دهنده‌ی میزان درخشندگی (با دامنه‌ای بین ۰ تا ۱۰۰)، میزان رنگ سبز به قرمز (با دامنه‌ای بین ۱۲۰- تا ۱۲۰+) و میزان رنگ آبی به زرد (با دامنه‌ای بین ۱۲۰- تا ۱۲۰+) بیان می‌شود. پارامترهای Lab به دست آمده از نرم افزار، ارزش‌های رنگی استاندارد نیستند. لذا به وسیله روابط ۸

۹ و ۱۰ قابل تبدیل به $L^* a^* b^*$ واقعی می‌باشند [۱۶].

$$L^* = \frac{Lightness}{255} \times 100$$

$$a^* = \frac{240a}{255} - 120$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120$$

و M_0 کوچک است، لذا معادله ۱ به صورت رابطه ۲ ساده می‌شود [۱۱].

$$MR = \frac{M}{M_0}$$

برای برازش مدل‌های ریاضی خشک شدن لایه نازک جدول ۱، با داده‌های آزمایشی از محیط برازش منحنی‌های نرم‌افزار MATLAB 2012 استفاده شد. برای تعیین بهترین مدل، از سه معیار ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد [۱۲]. برازشی که خصوصیات خشک شدن حبه‌های انار را بهتر توصیف کند مدلی است که دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر χ^2 و RMSE باشد.

۲-۳- ضریب نفوذ موثر رطوبت

در هر آزمایش ابعاد ۳۰ نمونه حبه‌ی انار قبل و بعد از خشک کردن با استفاده از یک کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. از آنجا که حبه‌های انار شبیه به کره هستند میانگین قطر هندسی از رابطه ۳ محاسبه شد.

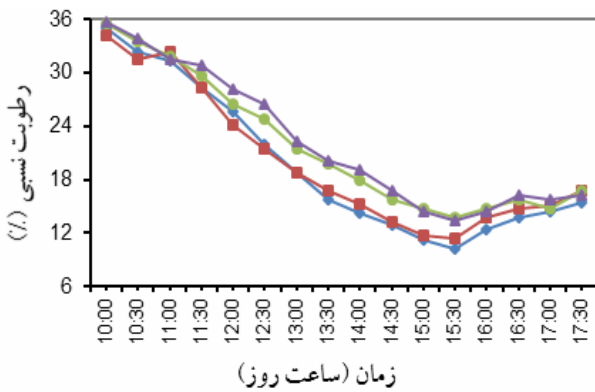
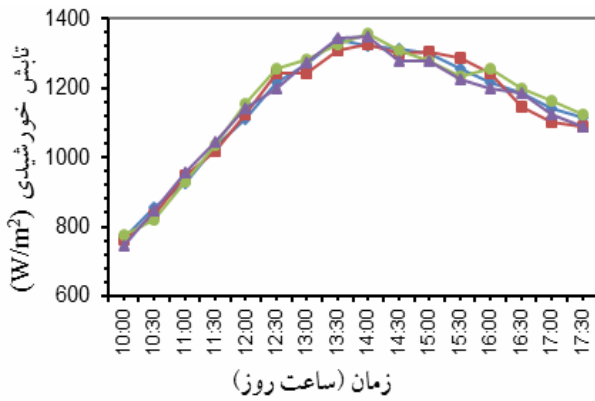
$$D = (A \times B \times C)^{\frac{1}{3}}$$

در این رابطه D قطر میانگین هندسی (متر) و A ، B و C به ترتیب قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک (متر) می‌باشند.

قطر هندسی به دست آمده برای محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت به کار می‌رود. قانون دوم فیک که توسط کرانک برای شرایط لایه نازک در محصولات دایره‌ای شکل ارائه شد با فرض ناچیزبودن اثرات دما و مجموع گرادیان فشار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند [۱۳]. با فرض اینکه در فرآیند خشک کردن، پخش رطوبتی موثر ثابت و شعاعی است، می‌توان مقدار آن را از معادله ۴ محاسبه نمود:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right)$$

در این رابطه n تعداد جملات خشک شدن (۱، ۲، ۳، ...)، t زمان خشک شدن (ثانیه)، r شعاع هندسی حبه‌ی انار (m) و D_{eff} ضریب پخش رطوبت موثر (m^2/s) است. وقتی t افزایش می‌یابد، تمام جملات به غیر از جمله اول صفر می‌شوند. در نتیجه به شکل معادله ۵ ساده می‌شود:



شکل ۲ مقایسه شدت تابش و رطوبت محیط در روزهای مختلف برای فشارهای مطلق ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال

۲-۳- شرایط محیط و دمای محفظه خشک کن

شکل ۳ درجه حرارت محیط و دمای جمع کننده خورشیدی را در روزهای مختلف آزمایش برای خشک کردن حبه های انار نشان می دهد. تمام آزمایش ها از ساعت ۱۰:۰۰ شروع شد و جایگاه جمع کننده خورشیدی در طی تمام آزمایش ها ثابت بود. رطوبت نسبی در نیمه اول روز بیشتر از نیمه دوم بود و با گذشت زمان رو به کاهش گذاشت. درجه حرارت هوا در نیمه اول روز به تدریج افزایش یافت و در ساعت ۱۳:۰۰ به بیشترین میزان خود رسید و سپس رو به کاهش گذاشت. روند تغییرات دمای هوای مخزن جمع کننده خورشیدی مانند دمای هوای محیط بود.

مقدار روشنایی در پنجره هیستوگرام نرم افزار فتوشاپ موجود می باشد. تغییرات کلی رنگ (ΔE) نمونه ها با استفاده از رابطه

۱۱ بر حسب پارامترهای رنگی $L^* a^* b^*$ محاسبه شد.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_t^*)^2 + (a_0^* - a_t^*)^2 + (b_0^* - b_t^*)^2}$$

در این رابطه L_0^*, a_0^*, b_0^* مقادیر اولیه پارامترهای رنگی و L_t^*, a_t^*, b_t^* مقادیر پارامترهای رنگی حبه های انار پس از خشک شدن می باشند.

۲-۵- چروکیدگی

در طول فرآیند خشک شدن به دلیل خروج رطوبت از مواد غذایی، پدیده چروکیدگی اتفاق می افتد و همین امر بر روی ویژگی های فیزیکی مواد جامد و پدیده انتقال جرم اثر می گذارد. حجم حبه های انار قبل از خشک کردن با استفاده از رابطه ۱۲ به دست آمد:

$$V_b = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3$$

و در نهایت درصد چروکیدگی از رابطه ۱۳ محاسبه شد [۱۷].

$$S_b = \left(1 - \frac{V}{V_b} \right) \times 100$$

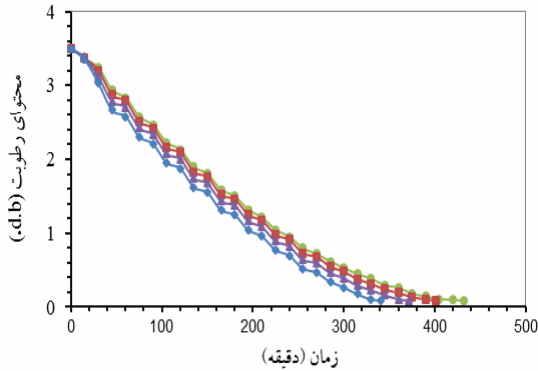
در این رابطه S_b درصد چروکیدگی، V_b و V حجم حبه های انار (بر حسب متر مکعب) به ترتیب قبل و بعد از خشک کردن است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شدت تابش خورشید

میزان تابش خورشیدی بین ۷۶۵ تا 1309 W/m^2 در طول دوره خشک کردن متغیر بود. تغییرات تابش خورشید در شکل ۲ در طول روزهای مختلف نشان داده شده است. روند افزایش و کاهش میزان تابش خورشیدی مشابه روند تابش خورشیدی در خشک کردن لونگان پوست کنده می باشد [۱۸]. رطوبت نسبی محیط در شکل ۲ نشان داده شده است. رطوبت نسبی در نیمه اول روز بیشتر از نیمه دوم بود و با گذشت زمان رو به کاهش گذاشت.

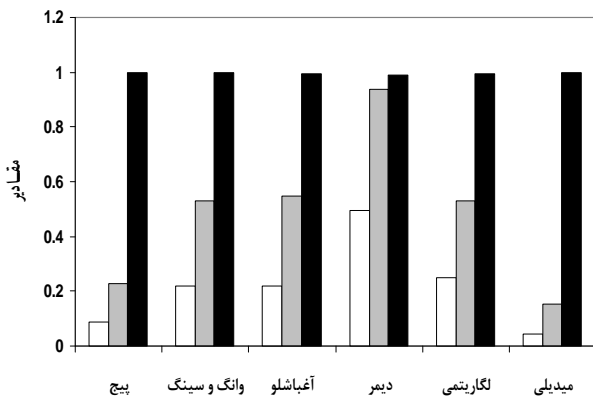
فشار مطلق، دمای تبخیر آب کاهش یافت که سبب افزایش نرخ تبخیر در مرحله خلأ و انتقال رطوبت از لایه‌های داخلی به سطح حبه‌های انار شده و افزایش تبخیر در مرحله گرمایش خورشیدی بیشتر شد.



شکل ۴ نمودار محتوای رطوبت بر حسب زمان برای فشارهای مطلق ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال در خشک‌کن خلأ- خورشیدی

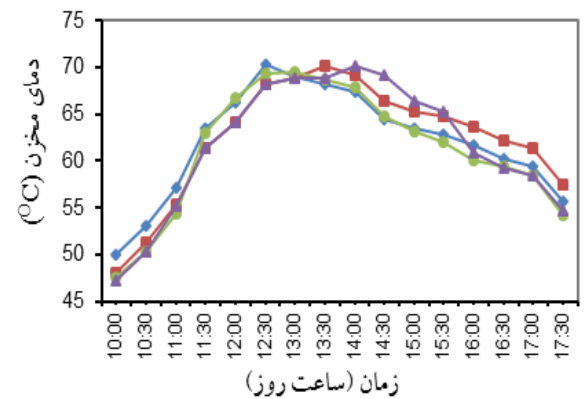
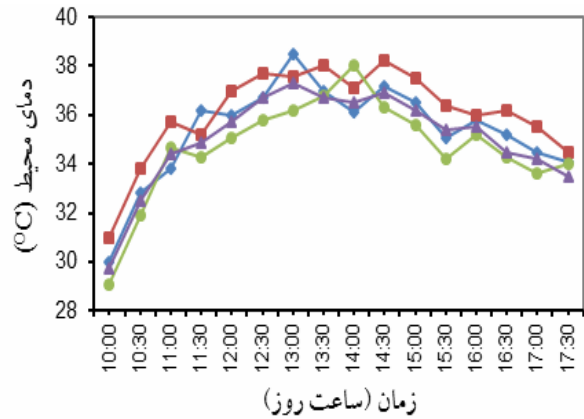
۳-۴- مدل‌سازی سینتیک خشک شدن

ابتدا محتوای رطوبت داده‌ها در طی فرآیند خشک کردن به نسبت رطوبت تبدیل شدند. سپس به وسیله نرم افزار مطلب مدل‌های ریاضی جدول ۱ بر داده‌ها برازش داده شدند. میزان میانگین برازش داده‌های تجربی روند کاهش رطوبت حبه‌های انار با مدل‌های ریاضی در فشارهای مختلف خشک‌کن خلأ- خورشیدی در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵ میانگین برازش داده‌های تجربی روند کاهش رطوبت حبه‌های انار با مدل‌های ریاضی در فشارهای مختلف خشک‌کن خلأ-

$$\text{خورشیدی بر اساس سه معیار } R^2, \chi^2 \text{ و } \frac{RSME}{25}$$



شکل ۳ مقایسه دمای محیط و دمای مخزن جمع‌کننده خورشیدی در روزهای مختلف برای فشارهای مطلق ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال

۳-۳- سینتیک خشک شدن

منحنی‌های محتوای رطوبت بر حسب زمان خشک شدن نمونه‌های حبه‌ای انار تحت فشارهای خلأ در شکل ۴ نشان داده شده است. زمان مورد نیاز برای رساندن رطوبت حبه‌های انار از ۳/۵ به ۰/۰۹ بر پایه خشک در فشارهای مطلق ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال به ترتیب ۳۴۱، ۳۷۲، ۴۰۱ و ۴۳۲ دقیقه بود. میزان کاهش رطوبت در مرحله خورشیدی نسبت به مرحله خلأ بیشتر است. در مرحله خورشیدی هوای گرم با فشار اتمسفر توانایی بالایی در جذب رطوبت محصول دارد. در مرحله خلأ رطوبت محصول، انرژی ذخیره شده در مرحله خورشیدی را جذب کرده و تبخیر شد. این پدیده سبب کاهش دمای محصول گردید. با کاهش فشار مطلق، میزان کاهش رطوبت در هر دو مرحله افزایش یافت. نتایج مشابهی در خشک کردن هویج [۱۹]، تکه‌های موز [۲۰] و برش‌های قارچ [۲۱] در خشک‌کن‌های خلأ به دست آمده است. با کاهش

مترمربع بر ثانیه بود. مقادیر این ضریب برای خشک کردن حبه-ی انار $10^{-11} \times 3/43$ تا $10^{-9} \times 2/92$ مترمربع بر ثانیه [۲۳]، برش‌های انبه $10^{-9} \times 1/60$ تا $10^{-9} \times 9/20$ مترمربع بر ثانیه [۸] و برای برش‌های پیاز $10^{-11} \times 1/32$ تا $10^{-9} \times 1/09$ مترمربع بر ثانیه [۲۴] گزارش شد. به علت بالابودن درصد آب آزاد حبه‌های انار، کاهش فشار خلأ سبب افزایش ضریب پخش رطوبت موثر شد. رابطه رگرسیون بین ضریب پخش رطوبت موثر حبه‌های انار و فشارهای مطلق خشک‌کن خلأ-خورشیدی را می‌توان با رابطه ۱۴ نشان داد.

$$D_{eff} = -6 \times 10^{-11} \ln(P) + 5 \times 10^{-10}$$

$$R^2 = 0.8846$$

در این رابطه P فشار مطلق خلأ بر حسب کیلو پاسکال می‌باشد.

مدل میدیلی با بیشترین میانگین مقدار R^2 (۰/۹۹۹۶) و کمترین میانگین مقدارهای χ^2 (۰/۰۰۱۶) و $RMSE$ (۰/۰۰۶۱) توانست نسبت به سایر مدل‌ها روند خشک شدن لایه نازک حبه‌های انار را بهتر پیش‌بینی کند. نتیجه مشابهی در خشک کردن انار حاصل شده است [۲۲] ضرایب مدل میدیلی در جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۵- ضریب پخش رطوبت موثر

مقادیر ضریب پخش رطوبت موثر در فشارهای مختلف خشک‌کردن با استفاده از معادله‌ی ۷ محاسبه شد. مقادیر برآوردشده در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد کاهش فشار مطلق سبب افزایش مقدار ضریب پخش رطوبت موثر شد. مقادیر ضریب پخش رطوبت موثر حبه‌های انار در خشک‌کن خلأ-خورشیدی بین $10^{-11} \times 3/09$ تا $10^{-11} \times 4/13$

جدول ۱ مدل‌های مورد استفاده برای برازش داده‌های تجربی

نام مدل	رابطه مدل	منابع
پیچ	$MR = \exp(-k \cdot t)^n$	[۲۸]
وانگ و سینگ	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	[۲۹]
آغباشلو	$MR = \exp\left(-a \cdot t / (1 + b \cdot t)\right)$	[۲۷]
دیمر	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)^n + b$	[۳۰]
لگاریتمی	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	[۲۹]
میدیلی	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	[۳۰]

جدول ۲ ضرایب مدل میدیلی برای فشارهای مختلف خشک کردن حبه‌های انار در خشک‌کن خلأ-خورشیدی

فشارهای مطلق (کیلو پاسکال)	a	b	k	n	R^2	RSME	χ^2
۱۰	۰/۹۹۸۷	-۰/۰۰۰۷۴	۰/۰۰۵۴	۱/۱۲۴	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۱۸
۲۰	۰/۹۹۵۶	-۰/۰۰۰۷۱	۰/۰۰۵۹	۱/۱۳۲	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۱۶
۴۰	۰/۹۹۴۳	-۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۰۶۳	۱/۱۴۱	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۱۷
۶۰	۰/۹۹۲۳	-۰/۰۰۰۵۳	۰/۰۰۷۲	۱/۲۱۸	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۱۵

جدول ۳ ضریب نفوذ موثر، تغییرات کلی رنگ و درصد چروکیدگی حبه‌های انار در شرایط مختلف خشک‌کن خلأ-خورشیدی

فشارهای مطلق (کیلو پاسکال)	۱۰	۲۰	۴۰	۶۰
D_{eff} (متر مربع بر ثانیه)	$4/13 \times 10^{-11}$	$3/39 \times 10^{-11}$	$3/22 \times 10^{-11}$	$3/09 \times 10^{-11}$
ΔE	۱۷/۴	۱۹/۲	۲۰/۴	۲۲/۱
چروکیدگی (%)	۶۷/۵۸	۷۰/۸۹	۷۲/۲۳	۷۴/۴۵

۳-۶- رنگ

تغییرات کلی رنگ (ΔE) با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه شد و در جدول ۳ ارائه شده است. تغییرات کلی رنگ حبه‌های انار در فشارهای مختلف خلأ بین ۱۷/۴ تا ۲۲/۱ بود. با کاهش فشار خلأ تغییرات کلی رنگ کاهش یافت. در فرآیندهای حرارتی مواد غذایی، تعدادی واکنش شیمیایی رخ می‌دهد که یکی از شناخته شده‌ترین آنها واکنش میلارد [۲۵] که عامل قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی است. واکنش میلارد شامل واکنش یک آلدهید و آمین (معمولاً یک پروتئین یا آمینو اسید) می‌باشد و بسیار وابسته به دما است. در خشک‌کن خلأ- خورشیدی در مرحله خلأ، دمای محصول با تبخیر رطوبت کاهش می‌یابد. با این روش محصول در مدت زمان طولانی در دماهای بالا قرار نخواهد گرفت که به این ترتیب از واکنش‌های شدید شیمیایی و تغییر رنگ زیاد دانه‌ها جلوگیری می‌شود، لذا تغییرات کلی رنگ کاهش می‌یابد. رابطه رگرسیون بین تغییرات کلی رنگ حبه‌های انار و فشارهای مطلق خشک‌کن خلأ- خورشیدی را می‌توان با رابطه ۱۵ نشان داد.

$$\Delta E = 0.0876 \times P + 16.927$$

$$R^2 = 0.9625$$

۳-۷- چروکیدگی

درصد چروکیدگی حبه‌های انار تحت فشارهای مختلف خشک‌کن خلأ- خورشیدی در جدول ۳ نشان داده شده است. چروکیدگی حبه‌های انار در خشک‌کن خلأ- خورشیدی بین ۶۷/۵۸٪ تا ۷۴/۴۵٪ بود. در حالی که مقدار آن برای مواد غذایی با مقدار رطوبت زیاد مانند میوه‌ها و سبزیجات بین ۷۰٪ تا ۹۰٪ است [۲۶]. در فرآیند خشک شدن هنگامی که آب به تدریج از مواد غذایی خارج می‌شود، عدم تعادل فشار بین درون و بیرون مواد غذایی سبب اعمال تنش بر محصول شده و منجر به انقباض، تغییر شکل و گاهی اوقات ترک خوردگی محصول می‌گردد [۲۷]. با کاهش فشار مطلق، میزان چروکیدگی محصول کاهش می‌یابد. رابطه رگرسیون بین چروکیدگی حبه‌های انار و فشارهای مطلق خشک‌کن خلأ- خورشیدی را می‌توان با رابطه ۱۶ نشان داد.

$$S_b = 0.1237 \times P + 67.268$$

$$R^2 = 0.91$$

۴- نتیجه‌گیری

رفتار خشک شدن حبه‌های انار به صورت لایه نازک در خشک‌کن خلأ- خورشیدی در فشارهای مختلف خلأ بررسی شد و نتایج نشان داد با کاهش فشار مطلق، زمان خشک شدن حبه‌های انار کاهش می‌یابد. کمترین زمان خشک شدن مربوط به فشار مطلق ۱۰ کیلو پاسکال بود. نتایج نشان داد مدل میدیلی بهترین پیش بینی را برای روند خشک شدن لایه نازک حبه‌های انار در خشک‌کن خلأ- خورشیدی دارد. ضریب نفوذ رطوبت موثر حبه‌های انار بین $3/09 \times 10^{-10}$ تا $4/13 \times 10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه به دست آمد و با کاهش فشار خلأ افزایش یافت. تغییرات کلی رنگ و درصد چروکیدگی با کاهش فشار خلأ کاهش یافت و کمترین مقادیر آنها به ترتیب ۱۷/۲ و ۶۷/۵۸٪ مربوط به فشار مطلق ۱۰ کیلو پاسکال بود.

۵- منابع

- [1] Kingsly, A.R.P. and Singh, D.B. (2007). Drying kinetics of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 79(2): 741-744.
- [2] Bialonska, D., Kasimsetty, S.G., Schrader, K. and Ferrera, D. (2009). The effect of pomegranate (*Punica granatum L.*) byproducts and ellagitannins on the growth of human gut bacteria. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 57(3): 8344-8349.
- [3] Sahin, A.Z. and Dincer, I. (2002). Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 45 (16): 3267-3273.
- [4] Phoungchandang, S., Nongsang, S., Sanchai, P. (2009). The development of ginger drying using tray drying, heat pump-dehumidified drying and mixed-mode solar drying. *Drying Technology*, 27(10): 1123-1131.
- [5] Kingsly, A.R.P., Singh, D.B., Manikantan, M.R. and Jain, R.K. (2006). Moisture dependent physical properties of dried pomegranate seeds (*Anardana*). *Journal of Food Engineering*, 75(4): 492-496.
- [6] Doymaz, I. and Pala, M. (2002). Hot air drying characteristics of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 55(4): 331-335.
- [7] Simate, I.N. (2001). Simulation of the mixed-mode natural-convection solar drying of maize. *Drying Technology*, 19(6): 1137-1155.

- [20] Swasdisevi, T., Devahastin, S., Saadchom, P. and Soponnarit, S. (2009). Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering*, 92(1): 100–106.
- [21] Giri, S.K. and Prasad, S. (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 512–521.
- [22] Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H., Kazemi, M. and Nikbakht, A.M. (2010). Drying of pomegranate arils: comparison of predictions from mathematical models and neural networks. *Journal of Food Engineering*, 6(3): 1556–3758.
- [23] Minaei, S., Motevali, A., Najafi, G. and Seyedi, S.R.M. (2012). Influence of drying methods on activation energy, effective moisture diffusion and drying rate of pomegranate arils (*Punica Granatum*). *Australian Journal of Crop Science*, 6(4): 586–591.
- [24] Mitra, J., Shrivastava, S.L. and Srinivasarao, P. (2011). Vacuum dehydration kinetics of onion slices. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4): 1–9.
- [25] Milton, S.F. (1985). Some aspects of the chemistry of non-enzymatic browning (the maillard reaction), in chemical changes in food during processing, edited by Richardson, T, AVI Publishing Co. pp. 289–303.
- [26] May, B.K. and Pere, P. (2002). The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 54(4): 271–282.
- [27] Mayor, L. and Sereno, A.M. (2006). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61(3): 373–386.
- [28] Ruiz Diaz, G., Martinez-Monzo, P. and Chiralt, A. (2003). Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave-air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 4(1): 203–209.
- [29] Amiri Chayjan, R., Alaei, B. (2013). Characteristics of thin layer microwave drying of apricot. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 16(4): paper #12.
- [30] Bantle, M., Kafer, T. and Eikevik, T.M. (2013). Model and process simulation of microwave assisted convective drying of clip fish. *Applied Thermal Engineering*, 59(1-2): 675–682.
- [8] Jaya, S. and Das, H. (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology*, 21(7): 1215–1234.
- [9] Pere, C. and Rodier, E. (2002). Microwave vacuum drying of porous media: experimental study and qualitative considerations of internal transfers. *Chemical Engineering Process*, 41(5): 427–436.
- [10] Motevali, A. and Minaei, S. (2012). Effects of microwave pretreatment on the energy and exergy utilization in thin-layer drying of sour pomegranate arils. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 18(1): 63–72.
- [11] Minaei, S., Motevali, A., Ahmadi, E. and Azizi, M.H. (2012). Mathematical models of drying pomegranate arils in vacuum and microwave dryers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14(2): 311–325.
- [12] Celma, A. Cuadros, F. and Rodriguez, L. (2008). Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process. *Food and Bioproducts Processing*, 87(4): 282–291.
- [13] De Matteo, M., Cinquanta, A. L., Galiero, G. and Crescitelli, S. (2000). Effect of novel physical pretreatment process on the drying kinetics of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 46(2): 83–89.
- [14] Akpınar, E., Midilli, A. and Bicer, Y. (2003). Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 44(7): 1689–1705.
- [15] Koca, N. Burdurlu, H.S. and Karadeniz, F. (2007). Kinetics of colour changes in dehydrated carrots. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 449–455.
- [16] Yam, K.L. and Papadakis, S.E. (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61(1): 137–142.
- [17] Demir, V., Gunhan, T., Yagcioglu, A.K. and Degirmencioglu, A. (2004). Mathematical modeling and determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. *Biosystems Engineering*, 88(3): 325–335.
- [18] Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B. K., Nagle, M. and Muller, J. (2009). Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy*, 83(9): 1550–1565.
- [19] Cui, Z.W., Xu, S.Y. and Sun, D.W. (2004). Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices. *Journal of Food Engineering*, 65(2): 157–164.

Study on thin layer drying parameters of pomegranate arils in a solar-vacuum dryer

Alaei, B. ¹, Chayjan, R. ^{2*}

1. MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

(Received: 91/9/23 Accepted: 92/4/8)

In this research a new laboratory solar-vacuum dryer was designed and fabricated to study drying behavior of pomegranate arils with heat source of solar energy. Drying of the samples was implemented at the absolute pressures of 10, 20, 40 and 60 kPa. Impact of different absolute pressures on moisture loss trend, effective moisture diffusivity, color and shrinkage of pomegranate arils, dried in solar-vacuum dryer was studied. With regression analysis of the applied models, proved that the Midilli model had supremacy in drying behavior prediction of pomegranate arils. Results indicated that with decreasing absolute pressure, drying time was decreased. Minimum drying time was related to the absolute pressure of 10 kPa. Effective moisture diffusivity of the pomegranate arils was estimated at the ranges of 3.09×10^{-10} to 4.13×10^{-10} m²/s. Total color changes and shrinkage percent of the pomegranate arils were estimated at the ranges of 17.4 to 22.1 and 67.58% to 74.45%, respectively.

Keywords: Solar-vacuum dryer, Pomegranate aril, Color, Shrinkage, Effective moisture diffusivity

* Corresponding Author E-Mail Address: amirireza@basu.ac.ir