

ارزیابی خشک‌کردن ورقه‌های سیب با استفاده از یک خشک‌کن دوار مجهز به مبدل حرارتی

حمید قاسم‌خانی^{۱*}، شاهین رفیعی^۲، علیرضا کیهانی^۳ و محمد جعفر دالوند^۴

چکیده

در این تحقیق، یک خشک‌کن تحقیقاتی لایه نازک دوار سینی‌دار طراحی و ساخته شد که مجهز به یک مبدل حرارتی صفحه‌ای جریان متقاطع هوا به هوا بود. آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر شرایط مختلف خشک‌کردن (سه دمای ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سلسیوس، دو سرعت هوای ۱ و ۲ متر بر ثانیه و سه سرعت چرخش سینی ۶، ۱۲ و ۲۰ دور بر دقیقه در دو حالت با و بدون مبدل حرارتی) بر روی رفتار خشک‌شدن، ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی ورقه‌های نازک سیب انجام گرفت. بر اساس نتایج آماری (R^2 ، SSE و RMSE) مدل میدلی و همکاران بهترین برازش را داشت. نتایج نشان داد که بیشترین تأثیر در کاهش زمان خشک‌شدن را دما (۷۵/۵٪)، سپس سرعت هوا (۱۷/۶٪) و در نهایت سرعت چرخش سینی (۷/۸٪) دارد. بیشترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت $10^{-9} \times 8/37$ مترمربع بر ثانیه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه و سرعت چرخش ۱۲ دور بر دقیقه و کمترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر $10^{-9} \times 2/71$ مترمربع بر ثانیه در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و بدون چرخش سینی به دست آمد. انرژی فعال‌سازی بین ۱۶/۴۱ تا ۲۴/۱۶ کیلوژول بر مول محاسبه شد. استفاده از مبدل حرارتی حدود ۳۳٪ گرمای مورد نیاز را برای خشک‌کردن از طریق بازیافت گرمای تلف‌شده خروجی از خشک‌کن، تأمین کرده است. نتایج این تحقیق می‌تواند برای بازیافت گرمای تلف‌شده از خشک‌کن‌های با جریان اجباری هوا و افزایش بازده حرارتی آنها مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کردن، خشک‌کن سینی‌دار دوار، سیب، ضریب نفوذ مؤثر، مبدل حرارتی.

ارجاع: قاسم‌خانی ح. رفیعی ش. کیهانی ع. و دالوند م ج. ۱۳۹۷. ارزیابی خشک‌کردن ورقه‌های سیب با استفاده از یک خشک‌کن دوار مجهز به مبدل حرارتی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۷(۲): ۹-۱۹.

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت.

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۳- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۴- دانش‌آموخته دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: h_ghasemkhani@ujiroft.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۴

مقدمه

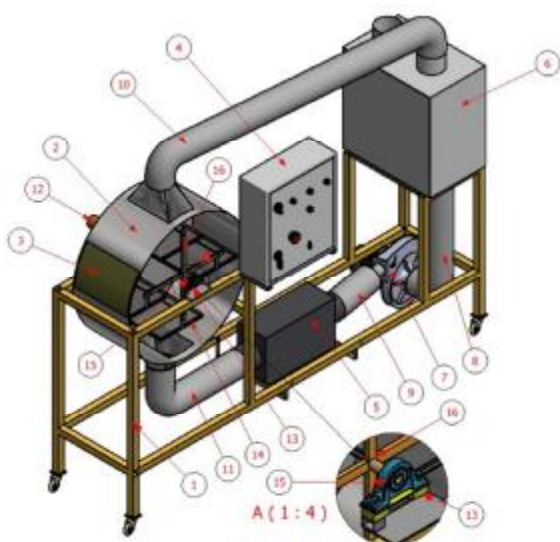
ایران یکی از کشورهای تولیدکننده سیب در جهان به شمار می‌آید که با تولید ۳/۰۴ میلیون تن در سال ۲۰۱۴ میلادی مقام چهارم را در میان کشورهای تولیدکننده سیب در جهان به خود اختصاص داده است (Anonymous, 2014). امروزه خشک‌کردن ورقه‌های میوه‌های مختلف مانند سیب، پرتقال، کیوی، موز و ... مرسوم گردیده و محصولات خشک‌شده در بازار به قیمت بسیار بالایی به فروش می‌رسد. به طور متوسط، همه‌ساله درصد زیادی از محصولات کشاورزی در ایران از بین می‌رود و در نتیجه، حاصل دسترنج باغداران و سایر عوامل سرمایه‌گذار در این بخش نابود می‌شود. بنابراین، می‌توان با خشک‌کردن آنها تا حدی ضایعات محصول را مخصوصاً در فصل برداشت کاهش داد.

یکی از سامانه‌هایی که به طور گسترده در خشک‌کردن محصولات کشاورزی به کار گرفته می‌شود، سامانه‌های خشک‌کن سینی‌دار است که علت آن را می‌توان طراحی ساده و قیمت نسبتاً پایین آنها و قابلیت‌های مربوطه برای خشک‌کردن محصولات مختلف در حجم بالا دانست. با وجود این، از بزرگ‌ترین نقایص این دستگاه‌ها، خشک‌کردن غیریکنواخت به واسطه توزیع ضعیف جریان هوا در محفظه خشک‌کن و مصرف بالای انرژی در آنها می‌باشد. تحقیقات متعددی برای رفع مشکل غیریکنواخت خشک‌شدن محصول انجام گرفته که بعضی از آنها عبارت‌اند از: تعویض متناوب برای جریان هوا هنگام خشک‌کردن، جابه‌جا کردن دوره‌ای سینی‌ها با دست، نصب پره‌ها و تجهیزاتی برای یکنواخت‌کردن جریان هوای داخل خشک‌کن (Misha et al., 2013). استفاده از راه‌حل‌های ذکر شده اگرچه تا حدودی باعث کاهش غیریکنواخت خشک‌شدن محصول می‌شود؛ ولی باعث افزایش هزینه‌ها می‌گردد. (Sarsilmaz et al., 2000). برای خشک‌کردن یکنواخت محصول، یک خشک‌کن استوانه‌ای دوار برای خشک‌کردن زردآلو ساختند. در این خشک‌کن، سینی‌ها سر جای خودشان حرکت چرخشی داشتند. نتایج این تحقیق نشان داد که سرعت خشک‌شدن زردآلو در مقایسه با فرایند خشک‌شدن بر روی یک سطح باز تا رطوبت ۲۵٪ در حدود دو برابر افزایش یافته است. همچنین، دوران محفظه خشک‌کن سبب تولید محصولاتی تقریباً یکنواخت و با کیفیت بالا شده است. در تحقیق بالا،

با توجه به اینکه سینی‌ها سر جای خودشان حرکت چرخشی داشتند، اگر توزیع جریان هوا داخل محفظه یکنواخت نباشد، محصول نیز به‌صورت یکنواخت خشک نخواهد شد. (Santos-Sánchez et al., 2012). یک نوع خشک‌کن سینی‌دار دورانی را برای خشک‌کردن گوجه فرنگی ساختند. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از چرخش سینی برای خشک‌کردن گوجه‌فرنگی، به طور معنی‌داری سرعت خشک‌کردن را افزایش داده و محصولی با کیفیت بالا تولید کرده است. به طور کلی، زمان خشک‌کردن به میزان معنی‌داری به ترتیب تحت تأثیر دما، دوران سینی و سرعت هوا بود.

از مهم‌ترین چالش‌های صنعت خشک‌کردن، کاهش قیمت انرژی تمام‌شده برای به‌دست آوردن محصولات نهایی با کیفیت بالاست. (Strumillo et al., 2006). گزارش کردند که سامانه‌های خشک‌کن صنعتی ۱۲٪ کل انرژی مصرف‌شده در فرایندهای تولیدی را مصرف می‌کنند. یکی از منابع مهم اتلاف انرژی در خشک‌کن‌های معمول، هوای خروجی از سامانه خشک‌کن می‌باشد که دارای آنتالپی قابل توجهی بوده و می‌تواند به‌عنوان یک منبع برای افزایش بازده خشک‌کن‌ها مطرح باشد (Markowski & Mujumdar, 2006). استفاده از پمپ‌های حرارتی متصل به خشک‌کن، یکی از راه‌های استفاده از جریان هوای خروجی می‌باشد؛ ولی این پمپ‌ها دارای معایبی مانند هزینه اولیه و عملیاتی بالا، احتمال نشت گاز مبرد و مسائل زیست‌محیطی متعاقب آن هستند و نیاز به سرویس منظم دارند (Patel & Kar, 2012). راه‌حل دیگر، مخلوط‌کردن قسمتی از جریان هوای خروجی از خشک‌کن با هوای تازه ورودی به خشک‌کن می‌باشد؛ ولی در این روش نیز به علت مرطوب‌بودن جریان هوای خروجی، سرعت تبخیر رطوبت از محصول کاهش می‌یابد. همچنین، ممکن است جریان هوای خروجی آلوده باشد که در این صورت باید تصفیه گردد (Oğulata, 2004). بنابراین، لازم است تا روش‌های نوآورانه‌ای برای بهبود بازده انرژی سامانه‌های خشک‌کن مورد توجه قرار گیرد. یکی از راه‌های ذخیره انرژی، بازیافت قسمتی از انرژی جریان هوای خروجی (تلف شده) و استفاده مجدد از آن برای پیش‌گرم‌کردن جریان هوای خنک ورودی به خشک‌کن است. مبدل صفحه‌ای، وسیله‌ای است کم‌هزینه، که قادر به حفظ انرژی به این روش می‌باشد.

سطح سینی‌ها همیشه افقی باقی می‌ماند (شکل ۱). برای گرم کردن هوای مورد استفاده در داخل خشک‌کن از یک گرمکن الکتریکی به توان ۴۵۰۰ وات استفاده شد. سامانه خشک‌کن به تمام حسگرهای لازم برای کنترل فرایند خشک‌کردن و همچنین مشاهده مؤلفه‌های خشک‌کردن مجهز بود که نوع حسگرها در جدول ۱ آورده شده است. فرایند کنترل و پایش خشک‌کن در محیط نرم‌افزار Labview اجرایی شد و با استفاده از نرم‌افزار می‌توان دم، دور موتور الکتریکی و زمان ثبت داده‌ها را وارد و خروجی تمام حسگرها را به صورت آنلاین مشاهده کرد.



شکل ۱- طرح‌واره خشک‌کن: ۱- شاسی؛ ۲- محفظه خشک‌کن؛ ۳- درپوش محفظه خشک‌کن؛ ۴- تابلوی کنترل؛ ۵- محفظه المنت‌ها؛ ۶- مبدل حرارتی؛ ۷- دمنده؛ ۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱- لوله‌های انتقال هوا به؛ ۱۲- موتور الکتریکی؛ ۱۳- لودسل؛ ۱۴- سینی نمونه‌ها؛ ۱۵- یاتاقان؛ و ۱۶- محور چرخشی

جدول ۱- حسگرهای استفاده شده

نوع حسگر	دقت	مورد استفاده
LM35	± 0.4 °C	اندازه‌گیری دما
SHT15	$\pm 2\%$	اندازه‌گیری رطوبت نسبی
Load cell Zemic-L6D	± 0.1 gr	اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها
Hot wire sensor NBC-8X30	± 0.1 ms ⁻¹	اندازه‌گیری سرعت هوا

مبدل حرارتی

در این تحقیق، برای پیش‌گرم کردن هوای ورودی به خشک‌کن و در نتیجه صرفه‌جویی در مصرف انرژی، از یک

تحقیق‌های زیادی برای مدل‌کردن فرآیند خشک‌کردن انجام شده است، که از جمله می‌توان به مدل‌های ریاضی، روش‌های عددی، شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای (آلمان محدود، روش اجزای گسسته و شبکه عصبی مصنوعی) اشاره کرد. همه این روش‌ها، اطلاعات مفیدی را در خصوص انتقال حرارت و جرم و یا مدل‌سازی خشک‌شدن مهیا می‌کنند و می‌توانند تا حدودی در طراحی، ساخت و بهینه‌سازی خشک‌کن‌ها مؤثر باشند. مدل‌کردن فرآیند خشک‌کردن توسط محققینی مانند (Bozkır, 2006) خشک‌شدن زردآلو، Wang et al. (2007) خشک‌شدن سیب، Sacilik & Elicin, (2006) خشک‌شدن سیب، Orikasa et al. (2008) خشک‌شدن کیوی و ... انجام گرفته است. لازم به ذکر است که در تمام مطالعات انجام‌گرفته سینی‌ها ثابت بودند.

بنابراین، در پژوهش حاضر به دلیل نبود اطلاعات کافی در رابطه با تأثیر چرخش (به صورت چرخ و فلکی) سینی‌ها بر روی خشک‌شدن محصول، سینیتیک خشک‌کردن لایه نازک ورقه‌های سیب در یک خشک‌کن دوار سینی‌دار و تأثیر چرخش سینی‌ها روی یکنواخت خشک‌شدن محصول نهایی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر استفاده از یک مبدل حرارتی صفحه‌ای هوا به هوا با جریان متقاطع ساده و ارزان قیمت برای کاهش میزان مصرف انرژی خشک‌کن، بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

دستگاه خشک‌کن

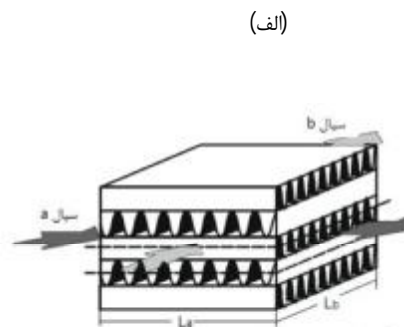
برای غلبه بر مشکل خشک‌شدن غیریکنواخت محصول در خشک‌کن‌های کابینتی مرسوم، یک طرح جدید از خشک‌کن جریان اجباری با سینی‌های دوار در گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران طراحی و ساخته شد. شکل ۱، طرح‌واره‌ای از خشک‌کن ساخته‌شده را نشان می‌دهد. در داخل محفظه خشک‌کن، مکانیزم چرخشی قرار دارد. این قسمت، شامل محور چرخشی، ۴ عدد سینی و موتور الکتریکی است. محور چرخشی از دو قسمت صلیبی شکل (از جنس تسمه تو خالی استیل به ضخامت یک میلی‌متر) تشکیل شده است، که این دو قسمت توسط چهار میله باریک استیل به هم متصل شده‌اند. از هر میله، یک سینی آویزان شده است؛ به طوری که با چرخش محور چرخشی در صفحه عمودی،

هوای گرم (هوای خروجی از محفظه خشک‌کن) از یک سمت مبدل جریان یافته و گرما را به جریان هوای سرد (هوای محیط) عبوری از سمت دیگر مبدل منتقل می‌کند؛ سپس، این هوای پیش‌گرم‌شده وارد گرمکن می‌شود تا به دمای مطلوب برسد.



(ب)

مبدل هوا به هوا استفاده شد. هسته مرکزی مبدل در این تحقیق از تعدادی ورق آلومینیوم صاف به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر، که به صورت توده‌ای روی همدیگر قرار گرفته‌اند، ساخته شد. برای افزایش سطح انتقال حرارت و پایداری بیشتر، بین صفحات صاف از صفحات موج‌دار به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۲). گرمای محسوس



(الف)

شکل ۲- مبدل حرارتی: الف- طرح‌واره نشان‌دهنده مسیر حرکت سیال‌ها؛ (ب) تصویر مبدل ساخته شده

(Yaldiz, 2004) در محصولاتی که دارای رطوبت زیاد هستند، معادله نسبت رطوبت در طی خشک‌شدن به صورت معادله (۱) است:

$$MR = \frac{M_d}{M_o} \quad (1)$$

که در آن MR ، نسبت رطوبت؛ M_d ، رطوبت توده در لحظه جاری بر پایه خشک؛ و M_o ، رطوبت اولیه توده محصول (kg water/kg dry matter) می‌باشند. نسبت رطوبت به دست آمده طی آزمایش با ۶ مدل پرکاربرد از مدل‌های استاندارد خشک‌شدن لایه نازک محصولات کشاورزی (که در جدول ۲ آمده است) مقایسه گردید. مدل‌های رگرسیونی تغییرات نسبت رطوبت در طی خشک‌شدن براساس متغیر مستقل زمان با استفاده از نرم‌افزار 12a-MATLAB استخراج گردید. برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین (R^2)، مجموع مربعات خطا (SSE) و ریشه متوسط خطای داده‌ها (RMSE) استفاده شد. در مقایسه بین دو مدل، مدل با R^2 بیشتر و مقدار SSE و RMSE کمتر، بهتر می‌تواند تغییرات نسبت رطوبت را در طی خشک‌شدن پیش‌بینی کند. مقادیر SSE و RMSE با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند (Ertekin & Yaldiz, 2004):

روش انجام آزمایش

برای انجام این آزمایش سیب رقم Golden Delicious از میدان میوه و تره‌بار شهرستان کرج خریداری شد و تا زمان مصرف در سردخانه و در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. سیب‌ها کاملاً شسته و پوست‌گیری شدند. رطوبت اولیه نمونه‌ها برابر ۸۴٪ (بر پایه تر) بود. در این تحقیق، آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سلسیوس و دو سطح سرعت هوای ورودی یک و دو متر بر ثانیه و سه دور چرخش سینی صفر، ۶ و ۱۲ دور بر دقیقه انجام شد. تمام آزمایش‌ها در دو حالت با مبدل حرارتی و بدون مبدل حرارتی و در سه تکرار انجام گرفتند. ضخامت ورقه‌های سیب در تمام آزمایش‌ها یکسان و برابر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار، کلیه آزمایش‌ها یک ساعت بعد از روشن کردن سیستم شروع می‌شد و کاهش وزن نمونه‌ها هر ۳۰ ثانیه ثبت شده و خشک‌کردن تا رسیدن به رطوبت حدود ۱۴٪ (بر پایه تر) ادامه می‌یافت.

برازش منحنی خشک‌شدن

برای برازش منحنی‌های سینتیک خشک‌شدن توده بستر نازک ورقه‌های سیب از نسبت رطوبت طی خشک‌شدن توده استفاده شد. براساس تحقیقات انجام‌شده Ertekin &

مؤثر رطوبت (m^2/s) ؛ t ، زمان؛ D_0 ، ثابت ضریب نفوذ (m^2/s) ؛ E_a ، انرژی فعال‌سازی (kJ/mol) ؛ R ، ثابت جهانی گازها $(kJ/mol K)$ و T_a ، دمای مطلق هوا (K) است. ضریب K_1 با رسم منحنی $\ln(D)$ در مقابل $(1/T)$ مطابق معادله (γ) محاسبه می‌شود:

$$K_1 = \frac{E_a}{R} \quad (\gamma)$$

تحلیل آماری

ارزیابی آماری نتایج به دست آمده با استفاده از طرح فاکتوریل $2 \times 2 \times 3 \times 2$ (سه سطح دما، دوسطح دبی هوای ورودی، سه سطح سرعت چرخش سینی‌ها و دو حالت با و بدون مبدل حرارتی) انجام شد. تحلیل واریانس برای ارزیابی آثار دما، سرعت هوا و سرعت چرخش سینی‌ها و مبدل حرارتی روی سینتیک خشک‌شدن، ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی انجام گرفت. آزمون‌های مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ و کلیه نتایج آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.2 انجام گرفت.

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N} \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

انرژی فعال‌سازی به کمترین انرژی مورد نیاز برای شروع تبخیر رطوبت از محصول و ادامه فرایند اطلاق می‌شود و یک مؤلفه بسیار مهم برای تخمین حداقل شرایط خشک‌کردن برای به‌دست آوردن ماده دلخواه خشک‌شده با میزان رطوبت تعادلی مناسب می‌باشد. با استفاده از قانون دوم پخش فیک و با در نظر گرفتن ورقه‌ها به صورت باریکه‌های نامحدود و برای زمان‌های طولانی خشک‌کردن، ضریب نفوذ مؤثر از روابط زیر استفاده می‌شود (Aghbashlo *et al.*, 2008):

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

$$k_0 = \frac{p^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (5)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (6)$$

که در آن L ، نصف ضخامت ورقه‌ها (m) ؛ D_{eff} ، ضریب نفوذ

جدول ۲- مدل‌های خشک‌کردن به روش لایه‌نازک

ردیف	نام مدل	مدل	مرجع
۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	Westerman <i>et al.</i> , 1973
۲	آغباشلو و همکاران	$MR = \exp\left(-\frac{k_1 t}{1 + k_2 t}\right)$	Aghbashlo <i>et al.</i> , 2009 b
۳	بیج	$MR = \exp(-kt^n)$	Guarte, 1996
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yaldiz & Ertekin, 2001
۵	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	Ozdemir & Devres, 1999
۶	میدلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli <i>et al.</i> , 2002

نتایج و بحث

(Yaldiz, 2004). نتایج استفاده از رگرسیون چندگانه، برای ارزیابی کلی مدل‌های به‌کار رفته در شرایط آزمایش در جدول ۳ آمده است. با توجه به این جدول، مدل Midilli (2002) *et al.* در تمامی شرایط آزمایش نسبت به سایر مدل‌ها با دقت بیشتری خشک‌شدن ورقه‌های سیب را پیش‌بینی کرده است. کاربرد مدل میدلی در تحقیقات گذشته نیز برای خشک‌کردن سیب ملاحظه گردیده است

پس از به دست آوردن نسبت رطوبت در دماها، سرعت‌های هوا و سرعت‌های مختلف چرخش سینی از ۶ مدل جدول ۲، برای برازش منحنی خشک‌شدن استفاده شد. با توجه به مقادیر R^2 ، SSE و RMSE مدل‌های رگرسیونی مختلف ارزیابی شد و معیار مدل بهتر، مقدار بیشتر R^2 و مقدار کمتر SSE و RMSE بود (Ertekin &

می‌باشد (به علت زیاد بودن تعداد ضرایب از ذکر آنها خودداری شده است).

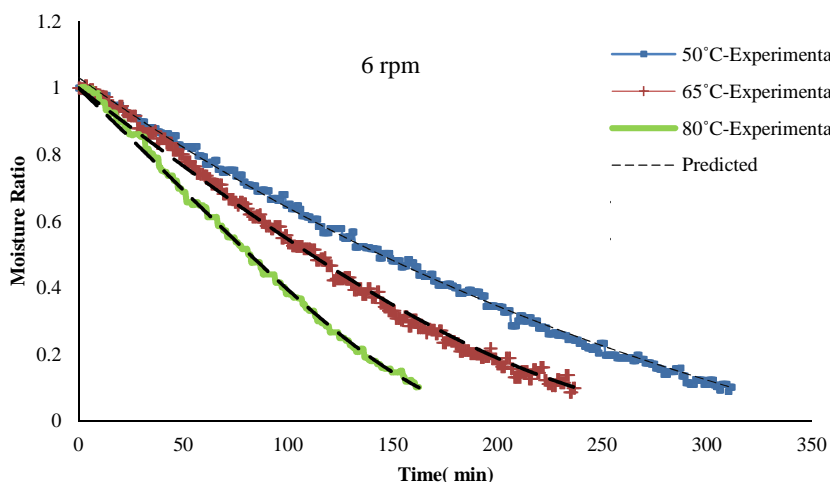
(Menges & Ertekin, 2006). ضرایب تعیین به دست آمده برای همه مدل‌ها در شرایط مختلف تحقیق، بیانگر توافق خوب داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های به کار رفته

جدول ۳- ارزیابی مدل‌های رگرسیونی خشک‌شدن بستر نازک ورقه‌های سیب

شاخص‌های مورد بررسی			مدل
RMSE	SSE	R ²	
۰/۰۳۵۸	۰/۵۷۲۷	۰/۹۷۶۹	نیوتن
۰/۰۱۵	۰/۱۲۸۸	۰/۹۹۵	پیچ
۰/۰۱۷۶	۰/۱۶۰۶	۰/۹۹۳۶	وانگ و سینگ
۰/۰۱۷۱	۰/۱۷۹	۰/۹۹۳	آغباشلو و همکاران
۰/۰۱۵۴	۰/۱۲۷۷	۰/۹۹۵	لگاریتمی
۰/۰۱۳۴	۰/۰۹۸۶	۰/۹۹۶۱	میدلی و همکاران

شده است (شکل ۳). با افزایش دما، اختلاف حرارت بین محصول و محیط اطراف افزایش یافته و در نتیجه رطوبت با آهنگ بیشتری از محصول خارج می‌شود. مقایسه میانگین‌های زمان خشک‌شدن نشان داد که افزایش دما از ۵۰ به ۸۰ درجه سلسیوس موجب کاهش ۴۹/۳۷ درصدی زمان خشک‌شدن می‌شود. در این تحقیق، به طور متوسط افزایش دما از ۵۰ به ۶۵ و از ۶۵ به ۸۰ درجه به ترتیب ۳۰/۳۵٪ و ۲۷/۲۷٪ زمان خشک‌شدن ورقه‌های سیب را کوتاه‌تر کرد. نتایج حاضر با تحقیقات انجام‌شده قبلی در مورد سیب همخوانی دارد (Sacilik & Elicin, 2006; Seiedlou *et al.*, 2010; Vega-Galvez *et al.*, 2008).

به‌عنوان نمونه، مقایسه روند تغییرات نسبت رطوبت نمونه‌های آزمایشی و مدل برتر (میدلی و همکاران) در سرعت هوای ۱m/s و سرعت چرخش سینی ۶rpm در حالت با مبدل حرارتی در شکل ۳ نمایش داده شده است. نمودارهای مشابهی برای سایر شرایط تحقیق به دست آمده است. تغییرات دما، سرعت هوا و سرعت چرخش سینی تأثیر معنی‌داری بر زمان خشک‌شدن ورقه‌های سیب در سطح احتمال یک درصد دارد؛ ولی مبدل حرارتی روی این شاخص تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۴)؛ چون که مبدل حرارتی تأثیر چندانی روی تغییرات دما و سرعت هوای داخل محفظه خشک‌کن ندارد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش دما باعث کاهش زمان خشک‌کردن



شکل ۳- تغییرات نسبت رطوبت ورقه‌های سیب در حالت با مبدل و سرعت هوای ۱m/s و سرعت چرخش سینی ۶rpm

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر شرایط خشک کردن روی زمان خشک شدن

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
مبدل حرارتی	۱	۲۶۵۶۵۱۲/۵	۲۶۵۶۵۱۲/۵	۰/۱۰۷۳ ^{ns}
دما (A)	۲	۹۱۰۱۹۰۱۰۰	۴۵۵۰۹۵۰۵	۴۹۷/۲۸ ^{**}
سرعت هوا (B)	۱	۱۳۶۳۷۲۶۱۲/۵	۱۳۶۳۷۲۶۱۲/۵	۱۴۹/۰۱ ^{**}
سرعت چرخش سینی (C)	۲	۳۴۷۱۸۱۷۵	۱۷۳۵۹۰۸۷	۱۸/۹۷ ^{**}
A×B	۲	۳۱۳۵۶۰۰	۱۵۶۷۸۰۰	۱/۷۱ ^{ns}
A×C	۴	۱۴۹۲۴۶۲۵	۳۷۳۱۱۵۶/۲	۴/۰۸ ^{**}
B×C	۲	۴۲۳۶۵۲۵	۲۱۱۸۲۶۲/۵	۲/۳۱ ^{ns}
A×B×C	۴	۶۹۰۰۷۵	۱۷۲۵۱۸/۷	۰/۱۹ ^{ns}
خطای آزمایش	۳۴	۳۱۱۱۶۰۲۵	۹۱۵۱۷۷	
کل	۷۱	۱۱۴۳۵۶۷۷۸۸		

ضریب تغییرات (CV): ۷/۳۴۸۲%

ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵%

** وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱%، * وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵%

زمان خشک شدن کاهش یافته است. علت آن را به این صورت می‌توان توضیح داد که چرخش سینی‌ها باعث به هم خوردن هوای داخل محفظه خشک‌کن شده و اختلاف دما در قسمت‌های مختلف خشک‌کن کاهش می‌یابد که با تحقیق محققان دیگر مطابقت دارد (Santos-Sánchez et al., 2012). دلیل احتمالی دیگر می‌تواند این باشد که چرخش سینی‌ها باعث کاهش تجمع رطوبت در اطراف محصول گشته و تبادل رطوبت با هوا را آسان‌تر می‌کند. افزایش سرعت چرخش سینی‌ها از صفر به ۶ و ۱۲ دور بر دقیقه به ترتیب زمان خشک شدن را به طور متوسط ۸/۵۱ و ۱۱/۵ درصد کاهش داده است؛ ولی افزایش دور از ۶ به ۱۲ دور بر دقیقه فقط باعث کاهش ۳/۴ درصدی زمان خشک شدن گردیده است و بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، افزایش سرعت چرخش از ۶ به ۱۲ دور بر دقیقه تأثیر معنی‌داری روی کاهش زمان خشک شدن نداشت. این مطلب این گونه استنباط می‌شود که این افزایش سرعت چرخش در حدی نیست که باعث جابه‌جایی قابل توجه هوای داخل محفظه خشک‌کن و در نتیجه افزایش سرعت خشک شدن شود. با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس، نکته قابل توجه دیگر، تأثیر معنی‌دار اثر متقابل دما و سرعت چرخش سینی‌ها روی زمان خشک شدن است؛ به طوری که در دماهای ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سلسیوس تأثیر تغییر سرعت چرخش روی کاهش زمان خشک شدن به طور متوسط ۱۱، ۷/۱۳ و

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، سرعت هوا تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد روی زمان خشک شدن ورقه‌های سیب داشت و با افزایش سرعت هوا، زمان خشک شدن کاهش یافت. در یک دمای ثابت، افزایش سرعت هوا باعث افزایش ضریب انتقال حرارت بین محصول و هوای خشک‌کننده شده و سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوا را افزایش می‌دهد. نتایج تحقیق نشان داد که در محدوده دمایی ۵۰ تا ۶۵ درجه سلسیوس افزایش سرعت هوا از ۱ به ۲ متر بر ثانیه و تهویه بهتر در توده محصول موجب کاهش زمان خشک شدن محصول به میزان حدود ۱۷/۲۷% می‌شود؛ اما با افزایش دمای خشک‌کن از ۶۵ به ۸۰ درجه سلسیوس تأثیر افزایش سرعت هوا بیشتر شده و در این حالت، ۲۳/۸% از زمان خشک شدن کاسته می‌شود و این امر نشان می‌دهد که در دمای بالا هنوز پتانسیل انتقال جرم زیاد است. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که در این خشک‌کن با افزایش دما، زیاد شدن سرعت جابه‌جایی هوا مطلوب است؛ ولی باید میزان مصرف انرژی در اثر افزایش سرعت جریان هوا را مدنظر قرار داد. کاربرد صحیح این دو عامل در طراحی خشک‌کن‌ها و بهینه‌سازی فرایند خشک کردن مهم می‌باشد. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تغییر سرعت چرخش سینی‌ها تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر روی زمان خشک شدن ورقه‌های سیب داشته است؛ به طوری که با افزایش سرعت چرخش سینی‌ها،

به علت افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی بین محصول و هوا باشد که از تجمع رطوبت روی محصول بکاهد و با افزایش گرادیان رطوبت، انتقال رطوبت را ساده‌تر کند. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گفت که بیشترین تأثیر در ضریب نفوذ مؤثر را دما (۳۵/۳۶٪)، سپس سرعت هوا (۱۹/۴۳٪) و در نهایت، سرعت چرخش سینی (۱۵٪) دارد.

انرژی فعال‌سازی در شرایط مختلف تحقیق با استفاده از معادله (۶) محاسبه شد. جدول ۵ ثابت ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی برای خشک‌شدن لایه نازک ورقه‌های سیب را در سرعت‌های مختلف هوا و چرخش سینی نشان می‌دهد. میزان انرژی فعال‌سازی برای محصول‌های غذایی بین ۱۲/۷ تا ۱۱۰ کیلوژول بر مول متغیر است (Aghbashlo *et al.*, 2008). انرژی فعال‌سازی برای خشک‌شدن لایه نازک ورقه‌های سیب در این تحقیق بین ۱۶/۴۱ تا ۲۴/۱۶ کیلوژول بر مول به دست آمد. مقادیر به دست آمده در محدوده مناسب گزارش شده در مقالات برای سیب است (از جمله Vega-Galvez *et al.*, 2008) در محدوده ۲۱/۳۱-۴۳/۲ kJ/mol؛ Kaya & Aydın, 2009) در محدوده ۱۹/۹۵۷-۲۲/۶۲۴ kJ/mol).

تأثیر مبدل حرارتی

مبدل حرارتی دارای دو ورودی، شامل ورودی هوای گرم خارج شده از محفظه خشک‌کن ($T_{hot,in}$) و ورودی هوای تازه و خنک محیط ($T_{cold,in}$) و دو خروجی، شامل خروجی هوای گرم وارد شده از محفظه خشک‌کن ($T_{hot,out}$) و خروجی هوای تازه ($T_{cold,out}$) که همان ورودی به گرمکن الکتریکی می‌باشد. در شکل ۵، نمونه‌ای از تغییرات دمای هوا در ورودی‌ها و خروجی‌های مبدل حرارتی برای دمای ۶۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و سرعت چرخش ۶ دور بر دقیقه نشان داده شده است. برای سایر آزمایش‌ها، نمودارهای مشابهی به دست آمده است. از این شکل، مشخص است که مبدل به خوبی توانسته مقدار قابل توجهی از گرمای خروجی را بازیافت کند. افزایش سرعت چرخش سینی به علت اینکه تأثیری روی مبدل ندارد، در میزان دمای بازیافت شده تأثیری نداشته است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش دما باعث افزایش دمای بازیافتی شده است؛ ولی نقش آن در تأمین گرمای مورد نیاز خشک‌کردن ثابت بوده است؛ یعنی تنها افزایش

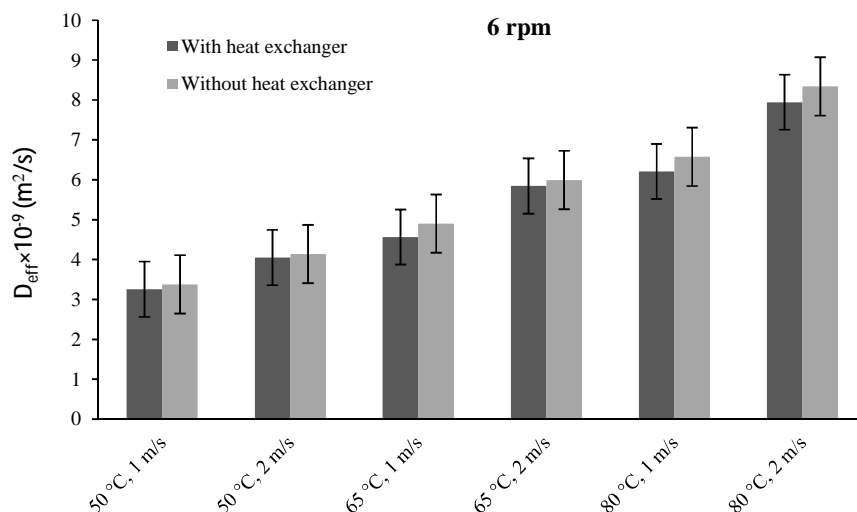
۵/۳۱ درصد بوده است. در دماهای پایین‌تر، پتانسیل انتقال جرم کمتر بوده و افزایش سرعت در دماهای پایین، این پتانسیل را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، در دماهای پایین خشک‌کردن، تأثیر تغییر سرعت چرخش بیشتر بوده است و با بالا رفتن دمای خشک‌کردن، زمان خشک‌شدن بیشتر تحت تأثیر دما قرار می‌گیرد. بنابراین، توصیه می‌شود که در خشک‌کردن محصول در دماهای پایین از سرعت چرخش بیشتری استفاده شود؛ ولی در دماهای بالا این کار می‌تواند باعث اتلاف انرژی گردد.

نتایج حاصل از ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی

ضریب نفوذ رطوبت مؤثر (D_{eff})، برای ورقه‌های سیب توسط معادله (۶) محاسبه شد و نتایج برای سرعت چرخش سینی ۶ دور در دقیقه در شکل ۴ نشان داده شده است. برای سایر آزمایش‌ها، نتایج مشابهی به دست آمده است. کمترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر $2/71 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و بدون چرخش سینی به دست آمد. بیشترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای خشک‌شدن لایه نازک ورقه‌های سیب $8/37 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه و سرعت چرخش ۱۲ دور بر دقیقه به دست آمد. مقادیر به دست آمده در دامنه مناسب گزارش شده در مقالات برای سیب است (Velić *et al.*, 2004; Sacilik & Elicin, 2006; Vega-Galvez *et al.*, 2008; Kaya & Aydın, 2009). بر اساس نتایج جدول واریانس، افزایش دما و سرعت هوا موجب افزایش ضریب نفوذ رطوبتی می‌شود. دلیل این مسئله می‌تواند افزایش جنبش مولکولی و کشش سطحی در دماها و دبی‌های بالا باشد (Vega-Galvez *et al.*, 2008; Kaya & Aydın, 2009; Zlatanović *et al.*, 2013). در حالیکه برای مبدل حرارتی و آثار متقابل آن معنی‌دار نبوده است؛ چون مبدل حرارتی تأثیری در تغییرات دما و سرعت هوای محفظه خشک‌کن ندارد. نکته قابل توجه، تأثیر سرعت چرخش بر روی ضریب نفوذ مؤثر است؛ به طوری که با افزایش سرعت چرخش سینی از صفر به ۶ و ۱۲ دور بر دقیقه این ضریب افزایش نسبتاً قابل توجهی داشته است. نتایج مشابهی در مورد ارتباط ضریب نفوذ مؤثر با دما و سرعت‌های هوا و چرخش توسط محققین دیگر Santos-Sánchez *et al.* (2012) گزارش شده است. نتیجه مذکور احتمالاً می‌تواند

آن، افزایش میزان گرمای منتقل شده در اثر افزایش سرعت هوا می‌باشد. با توجه به اینکه اکثر خشک‌کن‌های صنعتی مورد استفاده برای خشک کردن محصولات کشاورزی و صنایع غذایی، از نوع جریان هوای گرم می‌باشند، استفاده از مبدل‌های حرارتی ساده و کم‌هزینه راه حل مناسبی در زمینه کاهش مصرف انرژی در این خشک‌کن‌ها می‌باشد. همچنین، استفاده از مبدل حرارتی باعث افزایش بازده اکسرژی خشک‌کن شده است (Ghasemkhani *et al.*, 2016).

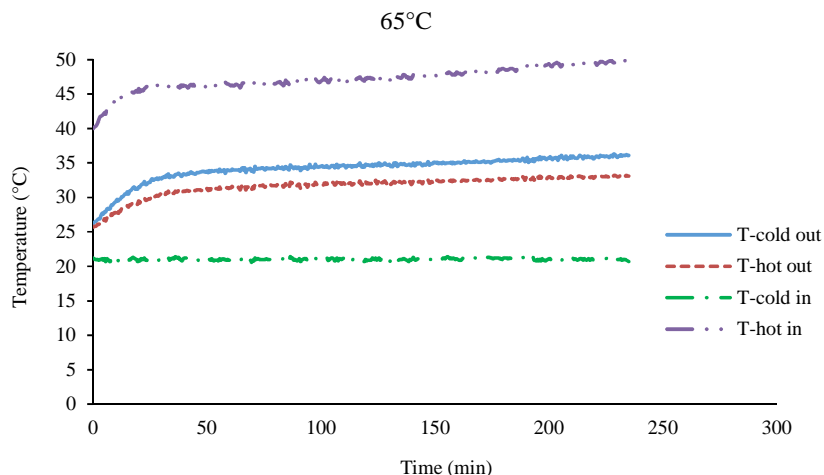
سرعت هوا باعث افزایش متوسط درصد دمای تأمین شده توسط مبدل شده است. به عبارت دیگر، در سرعت هوای یک متر بر ثانیه و در هر سه سطح دما، مبدل حدود ۳۱٪ گرمای مورد نیاز را برای خشک کردن از طریق بازیافت گرمای تلف شده نسبت به حالت بدون استفاده از مبدل، تأمین کرده است؛ در حالی که در سرعت دو متر بر ثانیه و در هر سه سطح دما، مبدل حدود ۳۶٪ گرمای مورد نیاز را برای خشک کردن از طریق بازیافت گرمای تلف شده نسبت به حالت بدون استفاده از مبدل، تأمین کرده است؛ دلیل



شکل ۴- تأثیر شرایط مختلف خشک کردن بر روی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای سرعت چرخش ۶ rpm

جدول ۵- انرژی فعال سازی برای خشک شدن لایه نازک ورقه‌های سیب در شرایط مختلف خشک کردن

سرعت هوا (m/s)	سرعت چرخش سینی (rpm)	ثابت ضریب نفوذ D_0 (m ² /s) × 10 ⁻⁶	انرژی فعال سازی E_a (kJ/mol)	R ²	
۰	۳/۴۲۲۹۸	۱۸/۷۷۶	۱		با مبدل حرارتی
۶	۴/۷۴۲۲	۱۹/۵۸۵	۰/۹۹۹۵	۱	
۱۲	۱/۵۵۰۴	۱۶/۴۰۹	۰/۹۹۸۶		
۰	۵/۴۶۵۸	۱۹/۶۴۶	۰/۹۹۹۷		
۶	۱۲/۶۳۵۵	۲۱/۷۲	۰/۹۹۹۹	۲	
۱۲	۱۶/۳۰۵۶	۲۲/۲۵۳	۰/۹۹۹۹		
۰	۲/۹۷۵۸	۱۸/۴۴۹	۰/۹۹۵۴		بدون مبدل حرارتی
۶	۱۰/۱۸۰۹	۲۱/۵۱۱	۰/۹۹۳۹	۱	
۱۲	۱/۸۵۶۱۶	۱۶/۸۶۷	۰/۹۲۳۳		
۰	۲۷/۷۸۵۴	۲۴/۱۵۹	۰/۹۹۹۱		
۶	۲۱/۷۶۹۵	۲۱/۰۹	۰/۹۹۷	۲	
۱۲	۸/۱۲۹۵۹	۲۰/۲۱	۰/۹۹۷۸		



شکل ۵- تغییرات دماهای ورودی و خروجی به مبدل حرارتی در دمای ۶۵°C و برای سرعت ۱m/s و سرعت چرخش ۶ rpm

می‌کنند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر شرایط مختلف خشک‌کردن روی ورقه‌های سیب، در یک خشک‌کن دوار سینی‌دار مورد بررسی قرار گرفت. مدل میدلی و همکاران توانست رفتار خشک‌شدن لایه نازک ورقه‌های سیب را به‌طور رضایت‌بخشی توصیف کند. به‌طور کلی، بیشترین تأثیر در کاهش زمان خشک‌شدن را دما، سپس سرعت هوا و در نهایت سرعت چرخش سینی دارد. همچنین، اثر افزایش سرعت چرخش سینی بر مدت زمان خشک‌شدن لایه نازک محصول مورد مطالعه در دماهای پایین بیشتر بود. بیشترین ضریب نفوذ مؤثر ($10^{-9} \times 37 \times 8$ مترمربع بر ثانیه) در بالاترین دما، بالاترین سرعت هوا و بیشترین سرعت چرخش سینی به‌دست آمد. مقدار انرژی لازم برای فعال‌سازی در شرایط مورد بررسی، از ۲۰ تا ۲۳/۷۹ کیلو ژول بر مول و ثابت ضریب نفوذ از $5/53 \times 10^{-6}$ تا $22/01 \times 10^{-6}$ مترمربع بر ثانیه متغیر بود. مبدل حرارتی استفاده‌شده توانسته است در شرایط مختلف خشک‌کردن، دمای هوای محیط را به‌طور میانگین بین ۹/۳ تا ۲۱/۱ درجه سلسیوس گرم کند. به‌عبارت دیگر، حدود ۳۳٪ گرمای مورد نیاز را برای خشک‌کردن از طریق بازیافت گرمای تلف‌شده، تأمین کرده است.

سپاس‌گزاری

مؤلفان از گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی و فناوری دانشگاه تهران برای تأمین وسایل و امکانات مورد نیاز در انجام تحقیق تشکر و قدردانی

منابع

1. Aghbashlo, M. Kianmehr, M. H. and 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 (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49: 2865-2871.
2. Aghbashlo, M. Kianmehr, M. H. Khani, S. and Ghasemi, M. 2009. Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. *International Agrophysics*, 23: 313-317.
3. Anonymous. 2014. Anonymous. <http://fa.wikipedia.org/WIKI/>.
4. Bozkır, O. 2006. Thin-layer drying and mathematical modelling for washed dry apricots. *Journal of Food Engineering*, 77(1): 146-151.
5. Ertekin, C. and Yaldiz O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63: 349-359.
6. Ghasemkhani, H. Keyhani, A. Aghbashlo, M. Rafiee, S. and Mujumdar, A. S. 2016. Improving exergetic performance parameters of a rotating-tray air dryer via a simple heat exchanger. *Applied Thermal engineering*, 93: 13-23.
7. Kaya, A. and Aydın, O. 2009. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management*, 50: 118-124.
8. Markowski, A. S. and Mujumdar, A. S. 2006. *Safety Aspects of Industrial Dryers*. Handbook of Industrial Drying, Third Edition, CRC Press.

- with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering*, 80: 536-544.
22. Zlatanović, I. and Komatina, M. Antonijević, D. 2013. Low-temperature convective drying of apple cubes. *Applied Thermal Engineering*, 53: 114-123.
 9. Menges, H. O. and Ertekin, C. 2006. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77: 119-125.
 10. Misha, S. Mat, S. Ruslan, M. Sopian, K. and Salleh, E. 2013. Review on the application of a tray dryer system for agricultural products. *World Applied Sciences Journal*, 22(3): 424-433.
 11. Oğulata, R. T. 2004. Utilization of waste-heat recovery in textile drying. *Appl Energ*;79(1): 41-49.
 12. Orikasa, T. Wu, L. Shiina, T. and Tagawa, A. 2008. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 85: 303-308.
 13. Patel, K.K. and Kar, A. 2012. Heat pump assisted drying of agricultural produce—an overview. *Journal of Food Science and Technology*; 49(2): 142-160.
 14. Sacilik, K. and Elicin, A. K. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73: 281-289.
 15. Santos-Sánchez, N. F. Valadez-Blanco, R. Gómez-Gómez, M. S. Pérez-Herrera, A. and Salas-Coronado, R. 2012. Effect of rotating tray drying on antioxidant components, color and rehydration ratio of tomato saladette slices. *LWT - Food Science and Technology*, 46: 298-304.
 16. Sarsilmaz, C. and Yildiz, C. and Pehlivan, D. 2000. Drying of apricots in a rotary column cylindrical dryer (RCCD) supported with solar energy. *Renewable Energy*, 21: 117-127.
 17. Seiiedlou, S. Ghasemzadeh, H. R. Hamdami, N. Talati, F. and Moghaddam, M. 2010. Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters. *International journal of agriculture and biology*, 12: 171-178.
 18. Strumiłło, C. Jones, P. L. and Żyła, R. 2006. Energy Aspects in Drying. In *Handbook of Industrial Drying*; Mujumdar, A.S., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, 1075-1099.
 19. Vega-Galvez, A. Miranda M. Bilbao-Sainz, C. Uribe, E. and Lemus-Mondaca, R. 2008. Empirical modeling of drying process for apple (cv. Granny Smith) slices at different air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32: 972-986.
 20. Velić, D. Planinić, M. Tomas, S. and Bilić, M. 2004. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64: 97-102.
 21. Wang, Z. Sun, J. Chen, F. Liao, X. and Hu, X. 2007. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace

