

مدل‌سازی ریاضی خشک‌کردن لایه نازک ورقه‌های برش خورده سیب در یک خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی

رضا طباطبائی کلور^{*1}

چکیده

در این پژوهش، ویژگی‌ها و سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های برش خورده سیب رد دلشز در یک خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی در دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت‌های هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه بررسی شد. تحلیل واریانس برای تعیین اثرات دما و سرعت باد بر روی ویژگی‌های تغییر رنگ، چروکیدگی و شدت جذب مجدد استفاده شد. پنج مدل ریاضی برای توصیف و مقایسه سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های سیب انتخاب شد و ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2)، و RMSE برای ارزیابی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که دما و سرعت هوای خشک‌کردن تأثیر معنی‌داری بر رفتار خشک‌کردن برش‌های سیب داشت. زمان خشک‌کردن با افزایش دما و سرعت خشک‌کردن کاهش یافت. دما و سرعت هوا تأثیر کمی بر تغییرات کل رنگ، نرخ چروکیدگی و شدت جذب مجدد ورقه‌های خشک شده سیب داشتند. در میان مدل‌های ریاضی، مدل پیچ (Page) اصلاح‌شده با کمترین خطا و بیشترین ضریب تعیین بهترین برازش را داشت. انتقال رطوبت از ورقه‌های سیب با اعمال مدل انتشار فیک (Fick) توصیف شد. ضریب نفوذ مؤثر (D_{eff}) با افزایش دمای خشک‌کردن افزایش یافت و در محدوده $10^{-10} \times 2/32$ تا $10^{-10} \times 5/18$ مترمربع بر ثانیه به دست آمد. وابستگی دمای نفوذ مؤثر با رابطه آربنیوس توصیف شد و انرژی فعال‌سازی برای نفوذ رطوبت در برش‌های سیب ۲۸/۴ کیلوژول بر مول تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی ریاضی، پمپ حرارتی، خشک‌کردن، ورقه نازک سیب.

ارجاع: ؟؟؟؟. ۱۴۰۳. مدل‌سازی ریاضی خشک‌کردن لایه نازک ورقه‌های برش خورده سیب در یک خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۰: ۴۵-۵۶. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14337.662>

1- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

* نویسنده مسئول: r.tabatabaei@sanru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۳۰

مقدمه

ایران ششمین تولید کننده سیب درختی در جهان است و سالانه ۴/۳ میلیون تن سیب در کشور تولید می‌شود (FAO, 2020). بخش قابل توجهی از سیب تولیدی، پس از مصرف به صورت تازه خوری و صادرات در صنایع مختلف تبدیلی و تکمیلی از جمله آبمیوه و کمپوت و میوه خشک قابل استفاده است. از آنجا که خشک‌کردن میوه در مقیاس کارگاه‌های کوچک و خانگی قابل انجام است، لذا توسعه خشک‌کن‌های کوچک با بهره‌وری انرژی بسیار اهمیت دارد.

خشک‌کردن یکی از رایج‌ترین روش‌های نگهداری در صنایع کشاورزی و غذایی است. با این حال، روش همرفت معمولی خشک‌کردن دارای معایبی است که باعث کیفیت پایین و آلودگی محصول می‌شود. دمای بالای خشک‌کردن فرآیند عامل حیاتی برای کاهش کیفیت است. بنابراین، کیفیت محصولات خشک‌شده کاهش می‌یابد و دمای خشک‌کردن قابلیت زیادی برای بهبود خواهد داشت (Caldeira et al., 2019). علاوه بر این، خشک‌کردن یک فرآیند انرژی‌بر است و به‌ویژه با کمبود و افزایش قیمت سوخت، صرفه‌جویی در انرژی مهم به نظر می‌رسد. از این رو، با وجود یک سامانه خشک‌کن مناسب انتظار می‌رود که هم بهره‌وری انرژی بالایی داشته و هم کیفیت محصول عالی باشد. مزیت اصلی خشک‌کن‌های پمپ حرارتی، قابلیت صرفه‌جویی در انرژی و همچنین توانایی آنها برای نظارت مستقل بر ویژگی‌های عملیات خشک‌کردن شناخته شده است، به‌ویژه برای محصولات حساس به حرارت مناسباند (Caleb et al., 2012). از دیگر مزایای خشک‌کن‌های پمپ حرارتی نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی معمولی برای خشک‌کردن محصولات غذایی، می‌توان به بازده انرژی بالاتر، کیفیت محصول و طیف گسترده‌ای از شرایط خشک‌کردن (دما در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس) اشاره کرد و به دلیل سازگاری با محیط زیست و عدم انتشار گازها و بخارات به داخل جو به انرژی کم نیاز دارد (Meng et al., 2023).

از دست دادن رطوبت ورقه‌های برش خورده میوه‌ها توسط محققان داخل و خارج از کشور مورد مطالعه قرار گرفته‌است. روش سنتی خشک‌کردن، خشک‌کردن طبیعی است که ساده و ارزان و از نظر انرژی کم‌مصرف

است، اما زمان خشک‌شدن طولانی و کیفیت خشک‌شدن پایین است. در سال‌های اخیر، خشک‌کردن با مادون قرمز (Li et al., 2020)، خشک‌کردن انجمادی (Duan et al., 2020) و خشک‌کردن موج‌بلند (Chen et al., 2017) مورد تحقیق قرار گرفته است. تجهیزات خشک‌کردن موج‌بلند گران بوده و تبدیل انرژی پایینی دارند و اغلب با هوای گرم و خلاء ترکیب می‌شوند. خشک‌شدن با مادون قرمز به راحتی می‌تواند به افزایش بیش از حد دمای داخلی میوه‌ها و سبزیجات منجر شود و در نتیجه بر کیفیت خشک‌کردن تأثیر بگذارد. تجهیزات خشک‌کن انجمادی خلاء به سرمایه‌گذاری و انرژی بالایی نیاز دارند و رشد میکروبی محصولات پس از عملیات خشک‌کردن انجمادی سریع است. همچنین، همه آنها مصرف انرژی بالایی دارند. استفاده از خشک‌کن‌های مجهز به پمپ حرارتی با مزایای حفظ انرژی و حفاظت از محیط زیست به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Song, 2018). نتایج پژوهش‌های مرتبط با خشک‌کردن موز (Tunckal & Doymaz, 2020)، تفاله انگور (Taseri et al., 2018)، کیوی (Mohamadi et al., 2019)، زنجبیل (Chapchaimon et al., 2016) نشان داد که در مقایسه با خشک‌کردن انجمادی و موج‌بلند، مصرف انرژی در پمپ حرارتی تا حد زیادی کاهش یافت. هر چه درجه حرارت خشک‌کردن با پمپ حرارتی بیشتر بود، زمان خشک‌شدن کوتاه‌تر شد. با این حال، با افزایش دما، کیفیت و اجزای غذایی میوه‌ها و سبزیجات پس از خشک‌شدن کاهش یافت. به‌منظور کاهش مصرف انرژی خشک‌کردن پمپ حرارتی، فناوری‌های خشک‌کردن ترکیبی توسعه یافته است.

در حال حاضر، فناوری‌های ترکیبی انرژی خورشیدی-پمپ حرارتی (Jiang et al., 2022)، پمپ حرارتی-موج‌بلند (Demir et al., 2014) و پمپ حرارتی-مادون قرمز (Aktas et al., 2017) وجود دارد. اگرچه فناوری‌های خشک‌کردن ترکیبی پمپ می‌تواند تا حدی در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند، آنها هنوز هم دارای معایبی مانند انرژی کم و کیفیت خشک‌کردن غیریکنواخت هستند. از نظر مواد مغذی، خشک‌کردن با پمپ حرارتی منجر به حفظ مواد مغذی و رنگ میوه‌ها و سبزیجات می‌شود (Paul & Martynen, 2021). کیفیت خشک‌کردن تحت تأثیر تغییرات دمای خشک‌کردن و

نرخ خروج رطوبت ویژه و بازده خشک‌کردن ۴۵/۵، ۴۸/۰ کیلوگرم بر کیلووات ساعت و ۲۳/۷۸٪ به دست آمد (Ayub Hossain et al., 2013).

سینتیک و خواص کیفی خشک‌کردن زعفران در یک خشک‌کن ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی خورشیدی مجهز به پمپ حرارتی در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از پمپ حرارتی ۴۰٪ زمان خشک‌کردن گل‌های زعفران را کاهش داد. همچنین ویژگی‌های استحکام، رنگ و مواد معطر با افزایش دما و استفاده از پمپ حرارتی بهبود یافت (Mortezapour et al., 2014).

بررسی پژوهش‌های محققان نشان داد که خشک کردن با پمپ حرارتی نه تنها دمای خشک کردن و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، بلکه کیفیت خشک کردن میوه‌ها و سبزی‌ها را نیز بهبود می‌بخشد. آگاهی از ویژگی‌های سینتیک خشک کردن/سینتیک برای طراحی، بهینه سازی و نظارت سامانه خشک‌کن ضروری است. با این حال، بر اساس پژوهش‌های منتشر شده، اطلاعات کمی در مورد خشک کردن ورقه‌های سیب با استفاده از خشک‌کن‌های پمپ حرارتی در دسترس است. بنابراین، هدف از این مطالعه ۱- تعیین اثر دما و سرعت هوا بر سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های برش خورده سیب در یک خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی و ویژگی‌های کیفی (تفاوت کل رنگ، چروکیدگی و نرخ جذب مجدد رطوبت) محصولات خشک‌شده، ۲- برآزش داده‌های تجربی به دست آمده با پنج مدل خشک‌کن لایه نازک و ۳- تخمین نفوذ رطوبت مؤثر و انرژی فعال‌سازی در فرآیند خشک‌کردن.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

سیب درختی رقم رد دلشیز از باغ‌های شهر دماوند تهیه شد. ابتدا سیب‌ها در آب شسته شده و بعد از پوست کندن و برش دادن توسط یک ورقه‌ساز به ضخامت ۴ میلی‌متر و طول و عرض ۳×۳ سانتیمتر برش داده شد. کلیه نمونه‌ها قبل از خشک‌کردن با وزن اولیه ۸ گرم آماده شدند. وزن نمونه‌ها توسط یک ترازوی رقمی (AND-EK-600G) با دقت 0.1 gr ± اندازه‌گیری شد.

سرعت هوا قرار می‌گیرد و از نظر مصرف انرژی، میانگین انرژی خشک‌کردن با هوای گرم ۴۸/۶۶ برابر میانگین مصرف انرژی با پمپ حرارتی بود. همین‌طور پژوهشگرانی نشان دادند که در روش خشک‌کردن با پمپ حرارتی مصرف انرژی کاهش یافته و کیفیت خشک کردن بهبود می‌یابد (Elmizadeh et al., 2017).

ویژگی‌های خشک کردن برش‌های سیب‌زمینی با استفاده از پمپ حرارتی-الکتروهدرودینامیک ترکیبی تحت شرایط دمای خشک‌کردن ۵۰-۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ تا ۳ متر بر ثانیه بررسی شد. نتایج نشان داد که خشک کردن ترکیبی در مقایسه با حالتی که فقط از گرمای پمپ استفاده شود، به طور مؤثری دمای خشک‌کردن را کاهش می‌دهد. مصرف انرژی ویژه در خشک‌کردن ترکیبی تقریباً ۲۷/۸٪ کاهش یافت. برای صرفه جویی در مصرف انرژی می‌توان سرعت هوا را کاهش داد. از طریق تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مدل، مدل پیچ^۱ با داده‌های تجربی سازگارتر است (Meng et al., 2023).

سینتیک خشک‌کردن و کیفیت ورقه‌های خشک-شده پیاز در ۴ دمای ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس با استفاده از پمپ حرارتی بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل پیچ برآزش خوبی با داده‌های آزمایشی دارد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از پمپ حرارتی سبب کیفیت بهتر محصولات خشک شده شامل تغییرات کمتر رنگ و مقادیر بیشتر اسید آسکوربیک و اسید پروویک بود (Sahoo et al., 2012).

در تحقیقی انرژی خشک شدن برگ‌های نعنا در یک خشک‌کن بستر سیال ارتعاشی مجهز به پمپ حرارتی ارزیابی شد. آزمایش‌های خشک کردن در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و در دو حالت استفاده و عدم استفاده از پمپ حرارتی و سه دامنه ارتعاشی انجام گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب عملکرد، نرخ تبخیر رطوبت ویژه و انرژی مصرفی در حالت عدم استفاده از پمپ حرارتی بیشتر از حالت استفاده از پمپ حرارتی بود (Ataei Ardestani et al., 2015).

در پژوهشی برخی از خصوصیات خشک‌کردن و مدل ریاضی برای گیاهان معطر با استفاده از پمپ حرارتی بررسی شد. نتایج نشان داد که به ترتیب ضریب عملکرد،

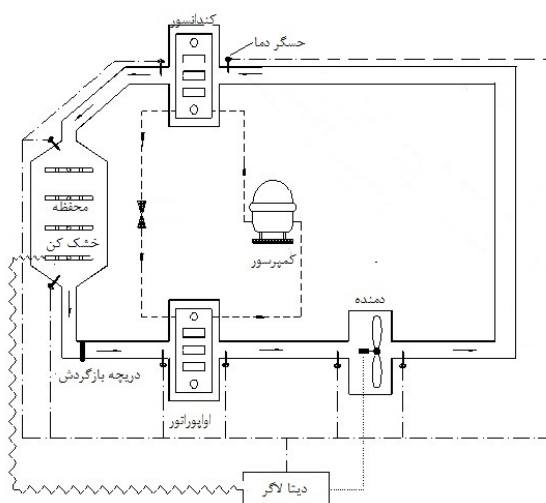
داخل چگالنده استفاده شد. سینی در محفظه خشک‌کن، از فولاد ضد زنگ ساخته شد. سامانه مجهز به مبدل‌هایی برای اندازه‌گیری وزن، دما و رطوبت نسبی است. از دماسنج نوع K و بادسنج رقمی (مدل AR826، Qingdao Intelli Instruments Co. Ltd., Qingdao, China) برای اندازه‌گیری سرعت هوا استفاده شد. داده‌های جمع‌آوری شده به یک حافظه رقمی سامانه جمع‌آوری داده منتقل گردید که قابلیت اتصال به رایانه را دارد. نمای خشک‌کن در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- نما و تصویر حقیقی نمونه ساخته شده خشک‌کن پمپ حرارتی مورد استفاده در آزمایش

خشک‌کن پمپ حرارتی

برای خشک‌کردن نمونه‌ها از یک خشک‌کن ترکیبی خورشیدی-پمپ حرارتی آزمایشگاهی با غیرفعال کردن بخش خورشیدی استفاده شد. این خشک‌کن در قالب یک طرح تحقیقاتی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری طراحی و ساخته شد. خشک‌کن دارای یک سامانه پمپ حرارتی و یک محفظه خشک‌کردن مجهز به نیروسنج برای سنجش تغییرات وزن است. از یک دمنده گریز از مرکز برای عبور هوا از تبخیرکننده و ورود آن به



روش خشک کردن

ورقه‌های برش خورده با ضخامت ۴ میلی‌متر روی سینی محفظه خشک‌کن در یک لایه قرار گرفت و تیمارهای آزمایشی برای خشک‌کردن لایه نازک سیب برش خورده شامل دمای خشک‌کردن از ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس، با افزایش ۱۰ درجه سلسیوس و سرعت هوا از ۱ تا ۲ متر بر ثانیه، با افزایش ۰/۵ متر بر ثانیه انجام شد. پس از روشن کردن خشک‌کن پمپ حرارتی، دما و سرعت هوا در تیمار مورد نظر تنظیم شده سپس فرآیند خشک‌کردن آغاز شد. خشک‌شدن تا زمان ثابت شدن تقریبی وزن ورقه‌های نازک سیب ادامه داشت و داده‌های جمع‌آوری شده به ازای هر ده دقیقه ثبت گردید. از طرح آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده گردید.

مدلسازی ریاضی

نسبت رطوبت (MR) ورقه‌های سیب در حین خشک‌شدن توسط پمپ حرارتی با استفاده از معادله (۱) به دست می‌آید:

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

که در آن M_t و M_0 میزان رطوبت در زمان t و مقدار اولیه بر پایه خشک است. M_e مقدار رطوبت تعادلی است، که در مقایسه با M_t و M_0 نسبتاً کوچک است. بنابراین MR می‌تواند به $MR = M_t/M_0$ ساده شود (Ayub Hussain et al., 2013).

نرخ خشک‌شدن (DR) برش‌های سیب در طول آزمایش‌های خشک‌کردن پمپ حرارتی با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد:

$$DR = -\frac{dM_d}{dt} = -\frac{M_{d,i+1} - M_{d,i}}{t_{i+1} - t_i} \quad (2)$$

R^2 ، مربع کای کاهش یافته (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده توسط محاسبات مورد آزمایش قرار گرفت. مقادیر R^2 بالاتر و مقادیر کمتر χ^2 و RMSE نشان دهنده برازش مناسب‌تر این ویژگی‌ها است.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})(MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2}} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-n} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در آن M_d مقدار رطوبت (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک)، $M_{d,i}$ رطوبت در زمان t_i ، $M_{d,i+1}$ رطوبت در زمان t_{i+1} (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک) t زمان خشک‌شدن (h) است. منحنی‌های خشک‌کردن بر روی پنج مدل که به طور گسترده در اکثر مواد آلی و زیستی استفاده می‌شود برازش شد. مدل‌های انتخاب شده شامل نیوتن، پیچ اصلاح شده، هندرسون و پاییس، لگاریتمی و میدیلی و همکاران است. تجزیه و تحلیل رگرسیون مدل-های خطی و غیر خطی با استفاده از نرم افزار آماری SPSS2022 انجام شد. برای برآورد ضرایب مدل‌های داده شده برازش ویژگی‌های آماری مربوط، مانند ضریب تعیین

جدول ۱- مدل‌های ریاضی خشک کردن به روش لایه نازک

شماره	مدل	رابطه مدل	منبع
۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	Meng et al. (2023)
۲	پیچ اصلاح شده	$MR = \exp(-kt)n$	Shi et al. (2011)
۳	هندرسون و پاییس	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis (1961)
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul and Pehlivan (2002)
۵	میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-ktn) + bt$	Midilli et al (2002)

خشک شدن، معادله بالا را می‌توان بیشتر ساده کرد و به صورت لگاریتمی با معادله (۷) بیان نمود:

$$\ln MR = \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \right] - \left[\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \right] t \quad (7)$$

D_{eff} با استفاده از روش شیب برآورد شد. از منحنی‌های خشک‌کردن لگاریتمی، میانگین D_{eff} را می‌توان در دماهای مختلف به دست آورد.

محاسبه انرژی فعال‌سازی

وابستگی دمایی ضریب نفوذ مؤثر را می‌توان با معادله آرنیوس (۸) توصیف کرد (Jafarian et al., 2017).

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{R(T+273.15)} \right) \quad (8)$$

که در آن D_0 ضریب پیش‌نمایی معادله آرنیوس (m^2/s)؛ E_a انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)؛ T دمای هوای خشک شدن ($^{\circ}C$)، و R ثابت گاز جهانی ($8.314 \times 10^{-3} kJ mol^{-1} K^{-1}$) است. معادله (۸) را می‌توان به شکل معادله (۹) بازآرایی کرد:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R(T+273.15)} \quad (9)$$

نمودار $\ln(D_{eff})$ به عنوان تابعی از متقابل مطلق دمای $(1/(T + 273.15))$ یک خط مستقیم با شیب برابر با $(-E_a/R)$ ، که ویژگی‌های E_a را می‌توان از آن تخمین زد.

تعیین نفوذ رطوبت مؤثر

خشک‌شدن عمدتاً در دوره نزولی رخ می‌دهد و انتقال رطوبت در طول خشک‌شدن مواد جامد با انتشار داخلی نظارت می‌شود. نفوذ رطوبت مؤثر در فرآیندهای خشک کردن مواد غذایی و مدل‌سازی سایر مواد مهم است و تابعی از دما و رطوبت است. ضریب نفوذ مؤثر ورقه‌های سیب در طول خشک‌شدن پمپ حرارتی با استفاده از مدل انتشار فیک^۱ ساده شده تفسیر می‌شود. حل سری دوم قانون فیک در کروی، با مفروضات مهاجرت رطوبت هماهنگ است از طریق انتشار، چروکیدگی ناچیز، ضرایب انتشار ثابت و دما که به صورت معادله (۶) در زیر آورده شده است (Chapchaimoh et al., 2016).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left(- \frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (6)$$

که در آن D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m^2/s) و L ضریب نفوذ مؤثر است. ضخامت نمونه‌ها (m)، n عدد صحیح مثبت و t زمان خشک‌شدن است. برای دوره‌های طولانی

تغییرات رنگ

مقادیر رنگ هر نمونه با استفاده از یک رنگ سنج هانتربل^۱ اندازه‌گیری شد. تغییرات در هر کدام از ویژگی‌های رنگ با معادلات (۱۰) و (۱۱) محاسبه شدند:

$$\Delta L = L^* - L_0^* \quad \Delta a = a^* - a_0^* \quad \Delta b = b^* - b_0^* \quad (10)$$

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

نتایج و بحث

بررسی سینتیک خشک شدن

تأثیر دمای هوا

شکل ۲ منحنی خشک کردن ورقه‌های برش خورده سیب را در دماهای مختلف و سرعت ثابت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، رطوبت به طور مداوم با زمان خشک شدن کاهش یافت. بدیهی است که دمای خشک شدن نقش مهمی در کل فرآیند خشک کردن دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان خشک شدن با افزایش دما از ۳۰ به ۷۰ درجه سلسیوس به طور چشم‌گیری کاهش یافت. با بالا رفتن دمای خشک کردن گرادیان حرارتی در داخل جسم افزایش می‌یابد و در نتیجه سرعت تبخیر رطوبت محصول بیشتر می‌شود. در سرعت هوای ثابت ۱/۵ متر بر ثانیه، برای رسیدن به نسبت رطوبت ۰/۱، زمان لازم خشک شدن با افزایش دما از ۳۰ به ۵۰ درجه سلسیوس حدود ۱۱٪ کاهش یافت. با افزایش دما به ۷۰ درجه سلسیوس، زمان خشک شدن حدود ۶۱٪ کاهش یافت. نتایج مشابهی توسط Tabatabaekoloor *et al.* (2022) برای چغندر قرمز، Seremet *et al.* (2016) و Meng *et al.* (2023) برای سیب‌زمینی به دست آمد.

شکل ۳ تغییرات شدت خشک شدن را به عنوان تابعی از میزان رطوبت بر مبنای خشک در دماهای مختلف و سرعت ثابت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. واضح است که شدت خشک کردن به طور پیوسته با زمان خشک کردن کاهش یافت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش دمای خشک کردن موجب افزایش در نرخ خشک کردن و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن شد. با افزایش دمای خشک کردن و در اثر تشدید سرعت انتقال حرارت، مولکول‌های آب سریع‌تر حرکت کرده و موجب سرعت بخشیدن به انتقال آب از داخل محصول می‌شود. نرخ خشک شدن بیشتر در طول دوره اولیه خشک شدن ایجاد شد که به دلیل مقاومت خارجی کم‌تر و انتقال بیشتر آب به داخل است. با این

نرخ چروکیدگی (S_R)

تغییرات حجم در اثر از دست دادن رطوبت در محیط خشک‌کن را چروکیدگی می‌نامند. روش جایگزین جامد برای ارزیابی نرخ چروکیدگی ورقه‌های سیب در خشک‌کن پمپ حرارتی استفاده شد و به صورت درصدی از حجم نمونه در مقایسه با حجم اولیه توسط معادله (۱۲) بیان شد (Shi *et al.*, 2011).

$$S_R \% = \frac{(V_2 - V_1) - (V_4 - V_3)}{V_2 - V_1} \times 100 \quad (12)$$

که در آن V_1 و V_2 به ترتیب حجم شن کوارتز و نمونه‌ها قبل و بعد از خشک شدن؛ V_3 و V_4 حجم کل کوارتز و نمونه‌ها قبل و بعد از خشک شدن است. مقادیر متوسط S_R نمونه‌ها در سه تکرار ثبت شدند.

نرخ بازجذب (R_R)

ظرفیت بازجذب با استفاده از نرخ جذب رطوبت بیان می‌شود که با نسبت وزن نمونه بازجذب شده (W_R) به وزن نمونه خشک (W_D) با معادله (۱۳) بیان شد (Jafarian *et al.*, 2017).

$$R_R = \frac{W_R}{W_D} \quad (13)$$

نمونه‌های خشک‌شده در آب مقطر با دمای ۴۵ درجه سلسیوس غوطه‌ور شده و بعد از یک ساعت بیرون آورده و آب اضافی حذف و تغییرات وزن ثبت شدند. همچنین تیمارها در سه تکرار بودند.

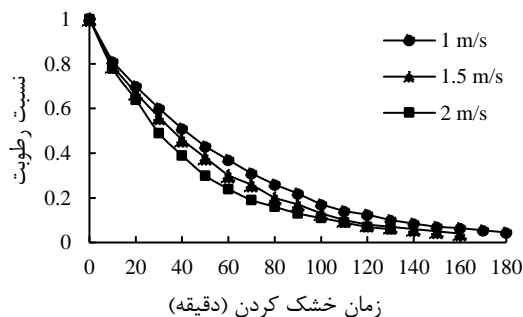
روش‌های آماری

تحلیل واریانس ($ANOVA^2$) برای تعیین اثرات دما و سرعت هوا بر روی ویژگی‌های تغییر رطوبت، چروکیدگی و تغییر رنگ استفاده شد. آزمون دانکن (Duncan) در سطح احتمال ۹۵ درصد ($P < 0.05$) برای تعیین تفاوت معنی‌داری بین تیمارها براساس آزمون فاکتوریل در قالب

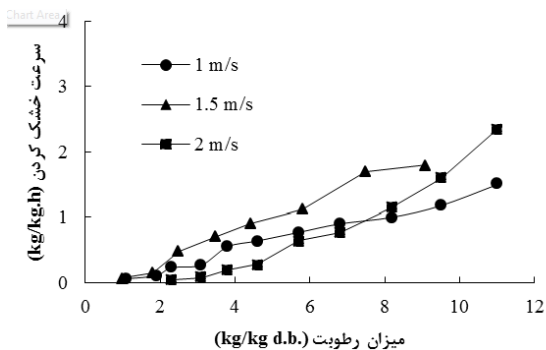
1- Hunterlab

2- Analysis of Variance

از آن کاهش یافت. بدیهی است که زمان رسیدن برش‌های سیب به نقطه پایان خشک شدن با سرعت باد تغییر می‌کند. این امر نشان می‌دهد که سرعت هوا بر زمان خشک شدن تأثیر می‌گذارد. شکل ۵ تغییرات نرخ خشک کردن را به عنوان تابعی از رطوبت نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵، سرعت خشک شدن با سرعت باد افزایش می‌یابد. می‌توان گفت که سرعت هوا بیش‌تر، نرخ تبخیر آب بیش‌تری را در سطح برش‌های سیب به همراه دارد. در مرحله اولیه خشک کردن، رطوبت پایه بر مبنای خشک زیاد است و با افزایش سرعت هوا سرعت تبخیر آب سریع‌تر شده و در نتیجه سرعت خشک شدن بیش‌تر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که انتشار داخلی به احتمال زیاد سازوکار فیزیکی حاکم بر حرکت رطوبت در حین خشک کردن با پمپ حرارتی است. نتایج مشابه برای خشک شدن خرمالو (Doymaz, 2012) و چغندر قرمز (Tabatabaekolour et al., 2022) گزارش شده است. در مرحله بعدی خشک کردن، سرعت خشک شدن بین سرعت‌های مختلف هوا تغییر زیادی نمی‌کند. بنابراین می‌توان سرعت هوا را کاهش داد تا مصرف انرژی کاهش یابد و در هزینه‌ها در این مرحله صرفه‌جویی شود.

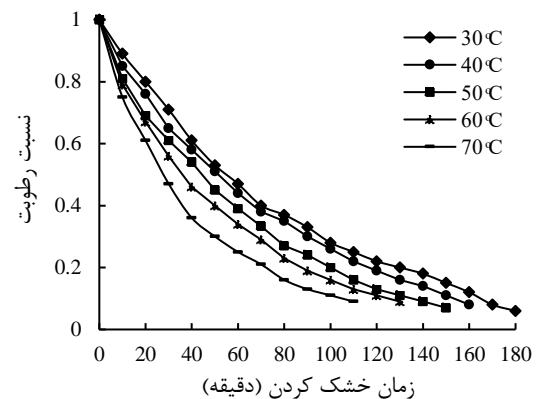


شکل ۴- نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک کردن برش‌های سیب در سرعت‌های مختلف (دمای خشک کردن، ۵۰°C)

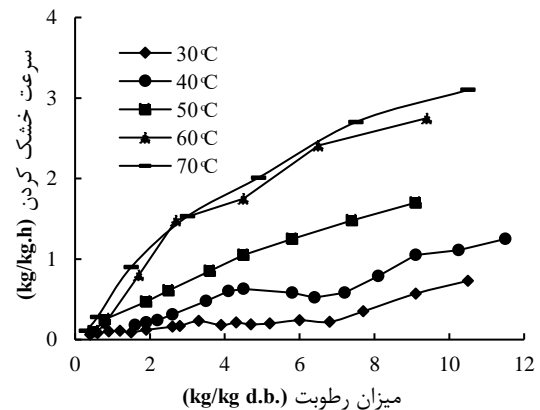


شکل ۵- نمودار نرخ خشک کردن در مقابل رطوبت برش‌های سیب در سرعت‌های مختلف (دمای خشک کردن، ۵۰°C)

حال، نرخ خشک شدن کم‌تر در آخرین مراحل خشک کردن مشاهده شد که ممکن است به انتشار رطوبت بسیار کم در طول دوره خشک شدن نسبت داده شود. عمدتاً، فرآیند خشک کردن کلی در دوره نزولی رخ داده است، که نشان می‌دهد نرخ خشک شدن بر اساس فرآیند نظارت انتقال جرم با پدیده انتشار داخلی نظارت می‌شود (Kashaninejad et al., 2007). نتایج قابل مقایسه برای محصولات کشاورزی مختلف گزارش شده است (Meng et al., 2023).



شکل ۲- نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک کردن برش‌های سیب دماهای مختلف (سرعت هوا، 1 m/s)



شکل ۳- نمودار نرخ خشک کردن در مقابل رطوبت برش‌های سیب در دماهای مختلف (سرعت هوا 1 m/s)

تأثیر سرعت هوا

شکل ۴ منحنی خشک شدن را در سرعت‌های مختلف هوا نشان می‌دهد. از شکل ۴ می‌توان دریافت که وقتی سرعت هوا ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه بود، زمان رسیدن نمونه‌ها به نقطه پایانی خشک شدن به ترتیب ۱۸۰ دقیقه، ۱۶۰ دقیقه و ۱۳۰ دقیقه طول کشید. همچنین، میزان حذف رطوبت در مرحله اولیه خشک کردن بیش‌تر بود که پس

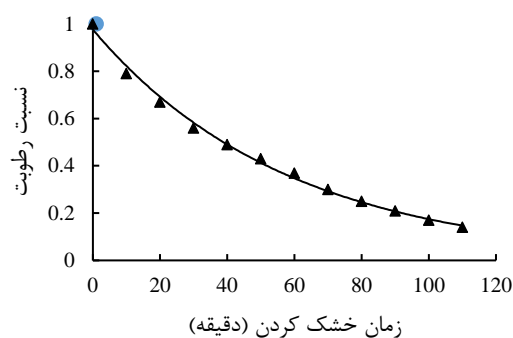
کردن و نیز سرعت هوا در ارتباط با ویژگی‌های مورد اشاره مشاهده نشد. این نتایج نشان داد که خشک کردن با روش پمپ حرارتی یک فرآیند ملایم دفع رطوبت است و برای محصولات حساس به حرارت مناسب است.

تأثیر دمای خشک کردن و سرعت هوا بر کیفیت ویژگی‌های ورقه‌های خشک شده سیب (ΔE , S_R و R_R) بررسی و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ بین تیمارهای دمای خشک

جدول ۲- تأثیر دما و سرعت هوا بر شاخص‌های تغییر رنگ، چروکیدگی و نرخ جذب ورقه‌های سیب

دمای خشک کردن (°C)	تغییرات رنگ ΔE	چروکیدگی $S_R(\%)$	نرخ جذب R_R
۳۰	۲۹/۴۷ ^a	۸۱/۲۴ ^a	۴/۲۶ ^a
۴۰	۲۸/۱۷ ^a	۷۵/۵۰ ^a	۴/۰۷ ^a
۵۰	۲۶/۹۷ ^a	۷۴/۶۱ ^a	۴/۲۷ ^a
۶۰	۲۹/۱۲ ^a	۷۹/۴۶ ^a	۴/۷۶ ^a
۷۰	۲۷/۳۴ ^a	۷۷/۶۷ ^a	۴/۵۵ ^a
سرعت هوا (m/s)			
۱	۲۳/۴۵ ^a	۷۹/۱۴ ^a	۴/۶۸ ^a
۱/۵	۲۵/۱۷ ^a	۷۵/۶۱ ^a	۴/۲۷ ^a
۲	۲۵/۰۹ ^a	۵۷/۳۴ ^a	۴/۸۴ ^a

شرایط آزمایشی دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه در شکل ۶ نشان داده شده است. درجه تناسب بین مقدار آزمایشی و مقدار پیش‌بینی بالا است. از این مدل می‌توان به خوبی برای توصیف تغییر رطوبت استفاده کرد.



شکل ۶- تأیید مدل پیچ اصلاح شده

انتشار رطوبت مؤثر و انرژی فعال‌سازی

در طول دوره خشک شدن با نرخ نزولی، انتقال جرم در اثر مقاومت داخلی انجام می‌گیرد و انتقال رطوبت در حین خشک شدن توسط انتشار داخلی نظارت می‌شود. در این مورد، قانون دوم فیک می‌تواند برای تخمین نفوذ مؤثر رطوبت استفاده شود. مقادیر تعیین شده انتشار رطوبت مؤثر برای تمام شرایط خشک کردن، در جدول ۶ ارائه شده است و مشخص شد که دامنه تغییرات آن از 10^{-10} تا $2/32 \times 10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه است. همان‌طور

برازش مدل‌های خشک کردن

از پنج مدل ریاضی خشک کردن برای برازش داده‌های نسبت رطوبت در دماها و سرعت‌های هوای مختلف استفاده شد. مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE برای شرایط مختلف خشک کردن به روش تحلیل رگرسیون غیر خطی تعیین شد که در جدول ۳ ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که در بین این معادلات سه مدل ریاضی پیچ اصلاح شده، لگاریتمی و میدلی و همکاران با ضریب تبیین بالاتر از ۰/۹۹ به خوبی می‌توانند قانون تغییر رطوبت را توصیف کنند. در این میان مدل پیچ اصلاح شده دارای بالاترین R^2 و کمترین χ^2 و RMSE است. می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیچ اصلاح شده بهترین مدل برای توصیف خشک کردن ورقه‌های برش خورده سیب در خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی است. (Reis et al., 2012) سینتیک خشک شدن برش‌های یاکون را در خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی با خلاء بررسی کردند و با برازش بر روی مدل‌های مختلف خشک‌کن لایه نازک دریافتند که مدل پیچ اصلاح شده بهترین تطابق را با داده‌های تجربی نشان داد (Reis et al., 2012). هم‌چنین، نتایج مشابهی برای سیب‌زمینی شیرین، بادمجان و قارچ به دست آمد (Artnaseaw et al., 2010; Meng et al., 2023; Singh & Pandey, 2012).

به منظور اعتبارسنجی مدل پیچ اصلاح شده، مقدار تجربی با مقدار پیش‌بینی شده مقایسه شد. نتایج در

که انتظار می‌رفت، مقادیر D_{eff} با افزایش دمای خشک کردن افزایش یافت که این امر به دلیل افزایش فشار بخار داخل نمونه‌ها بوده و منجر به حرکت سریع آب در دمای بالا شده است. مقادیر D_{eff} به دست آمده در مطالعه حاضر با داده‌های محققان دیگر تا حد قابل ملاحظه‌ای همخوانی دارد (Kamal et al., 2020; Meng et al., 2023; Taseri)

et al., 2018). تفاوت‌ها ممکن است به دلیل این واقعیت باشد که اثر نفوذ رطوبت در محصولات کشاورزی که مواد زیستی محسوب می‌شوند بر حسب ویژگی‌های آنها، نوع نمونه، ترکیب و هندسه، دمای هوا، رطوبت و پیش تیمارها متفاوت است.

جدول ۳- نتایج آماری ویژگی‌های مدل خشک کردن ورقه‌های برش خورده سیب

مدل	شرایط خشک کردن	ثابت‌ها	R^2	χ^2	RMSE
نیوتن	۳۰°C-۱/۵ m/s	$k=0.028$	۰/۹۸۲	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۳۵۷
	۴۰°C-۱/۵ m/s	$k=0.038$	۰/۹۷۶	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۳۶۰
	۵۰°C-۱/۵ m/s	$k=0.042$	۰/۹۸۹	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۱۹۸
	۶۰°C-۱/۵ m/s	$k=0.036$	۰/۹۹۰	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۳۸۵
	۷۰°C-۱/۵ m/s	$k=0.043$	۰/۹۸۴	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۳۱۰
	۵۰°C-۱ m/s	$k=0.050$	۰/۹۸۶	۰/۰۰۰۷۳	۰/۰۲۳۵
	۵۰°C-۲ m/s	$k=0.028$	۰/۹۷۸	۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۲۱۵
پیچ اصلاح شده	۳۰°C-۱/۵ m/s	$k=0.019; n=0.996$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۱۳۷
	۴۰°C-۱/۵ m/s	$k=0.026; n=1.005$	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۲۰۸
	۵۰°C-۱/۵ m/s	$k=0.037; n=1.103$	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۱۵۶
	۶۰°C-۱/۵ m/s	$k=0.029; n=1.163$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۲۱۵
	۷۰°C-۱/۵ m/s	$k=0.033; n=1.128$	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۱۵۰
	۵۰°C-۱ m/s	$k=0.042; n=1.179$	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۲۰۳
	۵۰°C-۲ m/s	$k=0.025; n=1.192$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۱۸۷
هندرسون و پاییس	۳۰°C-۱/۵ m/s	$a=0.9905; k=0.025$	۰/۹۷۷	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۳۴۸
	۴۰°C-۱/۵ m/s	$a=0.989; k=0.026$	۰/۹۸۸	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۳۲۹
	۵۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.002; k=0.042$	۰/۹۶۶	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۴۶۸
	۶۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.019; k=0.051$	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۳۷۵
	۷۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.017; k=0.046$	۰/۹۷۷	۰/۰۰۰۷۱	۰/۰۳۰۵
	۵۰°C-۱ m/s	$a=1.034; k=0.028$	۰/۹۸۶	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۲۳۸
	۵۰°C-۲ m/s	$a=1.028; k=0.036$	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۳۲۷
لگاریتمی	۳۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.095; k=0.151; c=-0.17$	۰/۹۹۲	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۳۵۷
	۴۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.043; k=0.234; c=-0.09$	۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۳۶۰
	۵۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.052; k=0.242; c=-0.07$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۱۹۸
	۶۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.089; k=0.357; c=-0.24$	۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۳۸۵
	۷۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.087; k=0.149; c=-0.28$	۰/۹۹۴	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۳۱۰
	۵۰°C-۱ m/s	$a=1.054; k=0.185; c=-0.53$	۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۲۳۵
	۵۰°C-۲ m/s	$a=1.032; k=0.244; c=-0.26$	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۲۱۵
میدیلی و همکاران	۳۰°C-۱/۵ m/s	$a=0.995; k=0.035; n=0.678; b=0.004$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۳۵۷
	۴۰°C-۱/۵ m/s	$a=0.989; k=0.036; n=1.084; b=0.003$	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۷۶	۰/۰۳۲۸
	۵۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.002; k=0.042; n=1.138; b=0.008$	۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۱۷۸
	۶۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.009; k=0.051; n=1.197; b=0.005$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۳۹	۰/۰۳۶۴
	۷۰°C-۱/۵ m/s	$a=1.017; k=0.046; n=1.289; b=0.002$	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۲۹۸
	۵۰°C-۱ m/s	$a=1.034; k=0.028; n=1.245; b=0.007$	۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۲۴۶
	۵۰°C-۲ m/s	$a=1.028; k=0.036; n=1.186; b=0.002$	۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۱۹۸

بهترین مدل برای توصیف خشک کردن ورقه‌های برش خورده سیب در خشک‌کن مجهز به پمپ حرارتی است. مقادیر D_{eff} با افزایش دمای خشک کردن افزایش یافت که این امر به دلیل افزایش فشار بخار داخل نمونه‌ها بوده و منجر به حرکت سریع آب در دمای بالا شده است. انرژی فعال‌سازی برای انتشار رطوبت از معادله آرنیوس $28/4$ کیلو ژول بر مول به دست آمد.

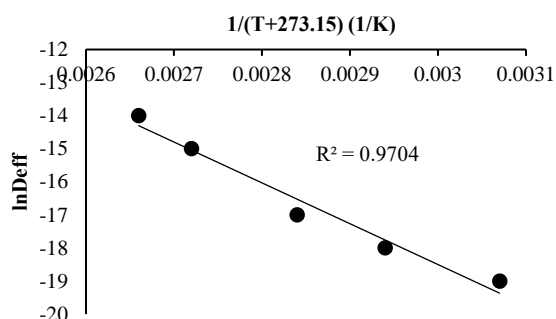
سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در قالب طرح با کد ۰۲-۱۴۰۲-۰۲ انجام گرفته است که بدین وسیله قدردانی می‌شود.

منابع

- Aktas, M., Khanlari, A., Amini, A., & Evik, S. (2017). Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology, *Energy Convers. Manag.* 132: 327-338.
- Anukiruthika, T., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Electrohydrodynamic drying of foods: principle, applications, and prospects, *J. Food Eng.* 295: 110449.
- Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., & Benjapiyaporn, C. (2010). Drying characteristics of mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying. *Food Bioprod Process.* 88: 105-114.
- Ataei Ardestani, S. M., Beheshti, B., Sadeghi, M., & Minaee, S. (2015). Energy analysis and kinetics of mint leaves dehydration using vibro-fluidized bed heat pump dryer. *Journal of Agricultural Machinery*, 5: 154-162.
- Ayub Hossain, M., Gottschalk, K., & Shoeb Hassan, M. (2013). Mathematical model for a heat pump dryer for aromatic plant. *Procedia Engineering*, 56: 510-520.
- Caldeira, C., De Laurentiis, V., Corrado, S., van Holsteijn, F., & Sala, S. (2019). Quantification of food waste per product group along the food supply chain in the European Union: a mass flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 149: 488-498.
- Caleb, O. J., Opara, U., & Witthuhn, C. R. (2012). Modified atmosphere packaging of pomegranate fruit and arils: a review. *Food and bioprocess technology*, 5(1): 15-30.

انرژی فعال‌سازی به صورت لگاریتم D_{eff} به عنوان تابعی از عکس دمای مطلق در شکل ۷ ترسیم شد و یک رابطه خطی را نشان می‌دهد که از معادله آرنیوس به دست آمده است. از شیب خط مستقیم که از معادله آرنیوس استخراج شده است، انرژی فعال‌سازی (E_a) ۲۸ کیلوژول بر مول محاسبه شد. این مقدار بالاتر از انرژی فعال‌سازی برخی محصولات و پایین‌تر از انرژی فعال‌سازی برخی دیگر از محصولات است که توسط محققان در محدوده ۱۶ الی ۳۹ کیلوژول بر مول گزارش شده است (Chapchaimoh *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2009; Aktas *et al.*, 2017; Anukirathika *et al.*, 2021).



شکل ۷- رابطه آرنیوس بین انتشار مؤثر رطوبت و عکس دمای مطلق در سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه

جدول ۴- ضریب انتشار رطوبت مؤثر در شرایط مختلف خشک کردن

دما	ضریب انتشار D_{eff} (m^2/s)
۳۰°C	$2/32E-10$
۴۰°C	$2/94E-10$
۵۰°C	$3/12E-10$
۶۰°C	$4/42E-10$
۷۰°C	$5/18E-10$

نتیجه‌گیری

استفاده از پمپ حرارتی در خشک‌کن برای خشک کردن ورقه‌های برش خورده سیب مورد آزمایش قرار گرفت و با استفاده از مدل‌های ریاضی بهترین مدل برای برازش داده‌های آزمایش و پیش‌بینی رفتار خشک کردن ارائه شد. افزایش دما و سرعت جریان هوا هر دو موجب تسریع در فرآیند خشک شدن می‌شوند. در این میان مدل پیچ اصلاح شده دارای بالاترین R^2 و کمترین χ^2 و RMSE است. می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیچ اصلاح شده

- drying methods on Chinese yam: changes in physicochemical properties, bioactive components, antioxidant properties and microstructure, *Int. J. Food Eng.* 16: 542-558.
- Meng, Z., Chu, X., Zhang, H., Liu, Y., Wang, Z. & Zhang, F. (2023). Study on drying characteristics of yam slices under heat pump-electrohydrodynamics combined drying. *Case Studies in Thermal Engineering*, 41: 102601.
- Midilli, A., Kucuck, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Dry Technology*, 20(7): 1503-1513.
- Mohammadi, I., Tabatabaekolour, R. & Motevali, A. (2019). Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices. *Energy*, 170: 149-158.
- Mortezapour, H., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M. H., & Minaei, S. (2014). Drying kinetics and quality characteristics of saffron dried with a heat pump assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer. *Journal of Agricultural Sciences and Technology*, 16: 33-45.
- Paul, A., & Martynen, A. 2021. Electrohydrodynamic drying: effects on food quality, *Dry. Technol.* 39: 1745-1761,
- Reis, F. R., Lenzi, M. K., Bolzon, G. I., Nigsoki, S., & Masson, S. (2012). Vacuum drying characteristics of yacon and the effect of process conditions on fractal dimensions and rehydration capacity. *Drying Technology*, 30: 13-19.
- Sahoo N. R., Pal, U. S., Dash S. K., & Khan, M. K. (2012). Drying kinetics and quality aspects during heat pump drying of onion (*Allium cepa* L.). *International Journal of Food Studies*, 1: 159-167.
- Seremet, L., Botez, E., Nistor, O. V., Andronoiu, D. G., & Mocanu, G. D. 2016. Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry*, 195: 104-109.
- Shi Q. L., Zhao Y., & Zheng, Y. Q. (2011). Drying of yacon by hot air and microwave combination. *Food Science*, 32(12):150-5.
- Shi, Q. L., Zheng, Y. Q., & Zhao, Y. (2013). Mathematical modeling of thin layer heat pump drying of yacon slices. *Energy Conversion and Management*. 71: 208-216.
- Singh, N. J., & Pandey, R. K. (2012). Convective air drying characteristics of sweet potato cube. *Food Bioprod Process*, 90: 317-322.
- Song, X. (2018). Quality analysis of microwave dried iron yam chips controlled by infrared thermal imaging, *Food Sci. Tech-Brazil* 38: 345-350.
- Chapchaimoh, K., Poomsa-ad, N., Wiset, L., & Morris, J. (2016). Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying. *Appl. Therm. Eng.* 95: 491-498.
- Chen, X., Li, X., Mao, X., Huang, H., Wang, T., & Qu, Z. (2017). Effects of drying processes on starch-related physicochemical properties, bioactive components and antioxidant properties of yam flours. *Food Chem.* 224-232.
- Demir, H. (2014). Experimental study on a novel microwave-assisted adsorption heat pump, 45: 35-43.
- Doymaz, I. (2012). Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.). *Energy Conv. Manag.*, 56: 199-205.
- Duan, L., Duan, X. & Ren G. (2020). Structural characteristics and texture during the microwave freeze drying process of Chinese yam chips, *Dry. Technol.* 38: 928-939.
- Elmizadeh, A., Shahedi, M., & Hamdami, N. (2017). Comparison of electrohydrodynamic and hot-air drying of the quince slices, *Innov. Food Sci. Emerg.* 43:130-135.
- FAO. (2020). Statistics: Faostat-Agriculture, Production, <http://www.faostat.fao.org/>.
- Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying. 1. Temperature effect on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3): 169-174.
- Jafarian, H., Tabatabaekolour, R., & Mousavi, S. R. (2017). Effects of different drying conditions on powder density and rehydration characteristics of coriander. *J. of Food Science and Technology*, 48: 191-199.
- Jiang, Y., Zhang, H., Zhao, R., Wang, Y., Liu, M., & You, S. (2022). Energy, exergy, economic and environmental assessment of the triangular solar collector assisted heat pump, *Solar Energy*, 236: 280-293.
- Kamal, M. M., Ali, M. R., Shishir, R. I., & Mandal, S. C. (2020). Thin layer drying kinetics of yam slices physicochemical and functional attributes of yam flour. *J. Food Process Eng.*, 43: doi.org/1001111/Jfpe.13448
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., & Tabil, L.G. (2007). Thin layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78: 98-108.
- Lee, J. H., Kim, H. J., & Wand, L. (2009). Drying characteristics of onion slices in hot air dryer. *Journal of Food Science and Nutrition*. 13: 225-230.
- Li, Q., Xia, L., Wang, F., Guo, S., Zou, J., & Su, X. (2020). Comparison of different

- Tabatabaekoloor, R., Fathabadi, M., & Motevali, A. (2022). Investigation of drying kinetics of red beet in different drying methods. *14 the National Congress of Mechanical Engineering of Biosystems*, 6-8 Sep. 2022, Kermanshah, Iran.
- Taseri, L., Aktas, M., Sevik, S., Gulgu, M., Uysel G., Secum, G., & Aktekeli, B. (2018). Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. *Food Chemistry*, 260: 152-159.
- Togrul, T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modeling of solar drying of apricots in the layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3): 209-216.
- Tunckal, C., & Doymaz, I. (2020). Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system, *Renew. Energy*, 150: 918-923.