

مقاله پژوهشی

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

رضا طباطبائی کلور^{*۱}

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} تا $2/32 \times 10^{-10}$ 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: طباطبائی کلور ر. 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>

۱- دانشجویار 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 می شود (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 خشک کردن میوه در مقیاس کارگاه های کوچک و خانگی قابل انجام است، لذا توسعه خشک کن های کوچک با بهره وری انرژی بسیار اهمیت دارد.

خشک کردن یکی از رایج ترین روش های نگهداری در صنایع کشاورزی و غذایی است. با این حال، روش همرفت معمولی خشک کردن دارای معایبی است که باعث کیفیت پایین و آلودگی محصول می شود. دمای بالای خشک کردن فرآیند عامل حیاتی برای کاهش کیفیت است. بنابراین، کیفیت محصولات خشک شده کاهش می یابد و دمای خشک کردن قابلیت زیادی برای بهبود خواهد داشت (Caldeira et al., 2019). علاوه بر این، خشک کردن یک فرآیند انرژی بر است و به ویژه با کمبود افزایش قیمت سوخت، صرفه جویی در انرژی مهم به نظر می رسد. از این رو، با وجود یک سامانه خشک کن مناسب انتظار می رود که هم بهره وری انرژی بالایی داشته و هم کیفیت محصول عالی باشد. مزیت اصلی خشک کن های پمپ حرارتی، قابلیت صرفه جویی در انرژی و همچنین توانایی آنها برای نظارت مستقل بر ویژگی های عملیات خشک کردن شناخته شده است، به ویژه برای محصولات حساس به حرارت مناسباند (Caleb et al., 2012). از دیگر مزایای خشک کن های پمپ حرارتی نسبت به خشک کن های همرفتی معمولی برای خشک کردن محصولات غذایی، می توان به بازده انرژی بالاتر، کیفیت محصول و طیف گسترده ای از شرایط خشک کردن (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 ورقه های برش خورده میوه ها توسط محققان داخل و خارج از کشور مورد مطالعه قرار گرفته است. روش سنتی خشک کردن، خشک کردن طبیعی است که ساده و ارزان و از نظر انرژی کم مصرف

است، اما زمان خشک شدن طولانی و کیفیت خشک شدن پایین است. در سال های اخیر، خشک کردن با مادون قرمز (Li et al., 2020)، خشک کردن انجمادی (Duan et al., 2020) و خشک کردن موج بلند (Chen et al., 2017) مورد تحقیق قرار گرفته است. تجهیزات خشک کردن موج بلند گران بوده و تبدیل انرژی پایینی دارند و اغلب با هوای گرم و خلاء ترکیب می شوند. خشک شدن با مادون قرمز به راحتی می تواند به افزایش بیش از حد دمای داخلی میوه ها و سبزیجات منجر شود و در نتیجه بر کیفیت خشک کردن تأثیر بگذارد. تجهیزات خشک کن انجمادی خلاء به سرمایه گذاری و انرژی بالایی نیاز دارند و رشد میکروبی محصولات پس از عملیات خشک کردن انجمادی سریع است. همچنین، همه آنها مصرف انرژی بالایی دارند. استفاده از خشک کن های مجهز به پمپ حرارتی با مزایای حفظ انرژی و حفاظت از محیط زیست به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Song, 2018). نتایج پژوهش های مرتبط با خشک کردن 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 خشک کن انجمادی و موج بلند، مصرف انرژی در پمپ حرارتی تا حد زیادی کاهش یافت. هر چه درجه حرارت خشک کردن با پمپ حرارتی بیشتر بود، زمان خشک شدن کوتاه تر شد. با این حال، با افزایش دما، کیفیت و اجزای غذایی میوه ها و سبزیجات پس از خشک شدن کاهش یافت. به منظور کاهش مصرف انرژی خشک کردن پمپ حرارتی، فناوری های خشک کردن ترکیبی توسعه یافته است. در حال حاضر، فناوری های ترکیبی انرژی خورشیدی-پمپ حرارتی (Jiang et al., 2022)، پمپ حرارتی-موج بلند (Demir et al., 2014) و پمپ حرارتی-مادون قرمز (Aktas et al., 2017) وجود دارد. اگرچه فناوری های خشک کردن ترکیبی پمپ می تواند تا حدی در مصرف انرژی صرفه جویی کند، آنها هنوز هم دارای معایبی مانند انرژی کم و کیفیت خشک کردن غیریکنواخت هستند. از نظر مواد مغذی، خشک کردن با پمپ حرارتی منجر به حفظ مواد مغذی و رنگ میوه ها و سبزیجات می شود (Paul & Martynen, 2021). کیفیت خشک کردن تحت تأثیر تغییرات دمای خشک کردن و سرعت هوا قرار می گیرد و از نظر مصرف انرژی، میانگین

کیلوگرم بر کیلووات ساعت و $23/78\%$ به دست آمد (Ayub Hossain et al., 2013).

سینتیک و خواص کیفی خشک‌کردن زعفران در یک خشک‌کن ترکیبی فتولتائیک-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- برازش 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 3×3 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 $\pm$ اندازه‌گیری شد.

انرژی خشک‌کردن با هوای گرم $48/66$ 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-الکتروهیدرودینامیک 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 $27/8\%$ 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 برازش 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، نرخ خروج رطوبت ویژه و بازده خشک‌کردن $45/5$ ، $38/0$

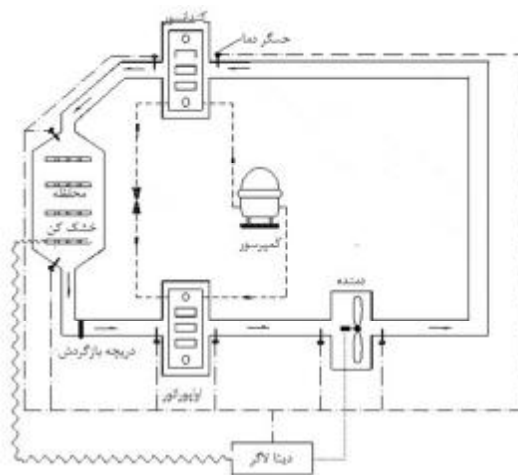
خشک کن پمپ حرارتی

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

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



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



مدل سازی ریاضی

نسبت رطوبت (MR) ورقه های سیب در حین خشک شدن توسط پمپ حرارتی با استفاده از معادله (۱) به دست می آید:

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

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 می تواند به $MR = M_t/M_0$ ساده شود (Ayub et al., 2013).

نرخ خشک شدن (DR) برش های سیب در طول آزمایش های خشک کردن پمپ حرارتی با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد:

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

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

روش خشک کردن

ورقه های برش خورده با ضخامت ۴ میلی متر روی سینی محفظه خشک کن در یک لایه قرار گرفت و تیمارهای آزمایشی برای خشک کردن لایه نازک سیب برش خورده شامل دمای خشک کردن 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 خشک کن پمپ حرارتی، دما و سرعت هوا در تیمار مورد نظر تنظیم شده سپس فرآیند خشک کردن آغاز شد. خشک شدن تا زمان ثابت شدن تقریبی وزن ورقه های نازک سیب ادامه داشت و داده های جمع آوری 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 داده ها استفاده گردید.

توسط محاسبات مورد آزمایش قرار گرفت. مقادیر R^2 بالاتر و مقادیر کمتر χ^2 و RMSE نشان دهنده برازش مناسب‌تر این ویژگی‌ها است.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})(MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2}} \quad (۳)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-n} \quad (۴)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۵)$$

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 مدل‌های 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 R^2 ، مربع کای کاهش یافته (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده

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)

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).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (۶)$$

که در آن D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m^2/s) و L ضریب نفوذ مؤثر است. ضخامت نمونه ها (m)، n عدد صحیح مثبت و t زمان خشک‌شدن است. برای دوره های طولانی خشک شدن، معادله بالا را می‌توان بیشتر ساده کرد و به صورت لگاریتمی با معادله (۷) بیان نمود:

$$\ln MR = \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \right] - \left[\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \right] t \quad (۷)$$

D_{eff} با استفاده از روش شیب برآورد شد. از منحنی-های 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).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (۸)$$

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:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R(T+273.15)} \quad (۹)$$

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.

تغییرات رنگ

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

$$\Delta L = L^* - L^*_0, \Delta a = a^* - a^*_0, \Delta b = b^* - b^*_0 \quad (10)$$

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

نرخ چروکیدگی (S_R)

تغییرات حجم در اثر از دست دادن رطوبت در محیط خشک کن را چروکیدگی می نامند. روش جایگزین جامد برای ارزیابی نرخ چروکیدگی ورقه های سیب در خشک کن 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 نمونه ها قبل و بعد از خشک شدن؛ V_3 و V_4 حجم کل کوارتز و نمونه ها قبل و بعد از خشک شدن است. مقادیر متوسط S_R نمونه ها در سه تکرار ثبت شدند.

نرخ بازجذب (R_R)

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

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

نمونه های خشک شده در آب مقطر با دمای ۴۵ درجه سلسیوس غوطه ور شده و بعد از یک ساعت بیرون آورده و آب اضافی حذف و تغییرات وزن ثبت شدند. همچنین تیمارها در سه تکرار بودند.

روش های آماری

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

طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت. از نرم افزار SPSS (version 22.0.0, IBM Institute Inc, USA) برای تحلیل داده ها استفاده شد و مقادیر به صورت میانگین گزارش شد.

نتایج و بحث

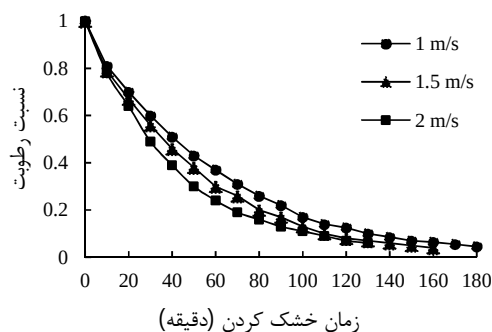
بررسی سینتیک خشک شدن

تأثیر دمای هوا

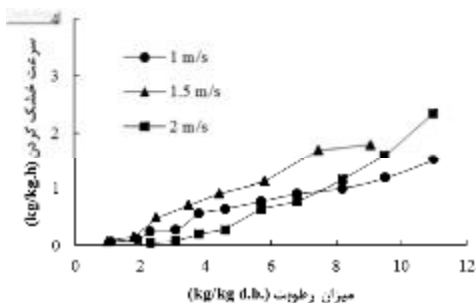
شکل ۲ منحنی خشک کردن ورقه های برش خورده سیب را در دماهای مختلف و سرعت ثابت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه نشان می دهد. همان طور که انتظار می رفت، رطوبت به طور مداوم با زمان خشک شدن کاهش یافت. بدیهی است که دمای خشک شدن نقش مهمی در کل فرآیند خشک کردن دارد. همان طور که مشاهده می شود، زمان خشک شدن با افزایش دما از ۳۰ به ۷۰ درجه سلسیوس به طور چشم گیری کاهش یافت. با بالا رفتن دمای خشک کردن گرادیان حرارتی در داخل جسم افزایش می یابد و در نتیجه سرعت تبخیر رطوبت محصول بیشتر می شود. 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 سیب زمینی 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 می دهد. واضح است که شدت خشک کردن به طور پیوسته با زمان خشک کردن کاهش یافت. همان طور که مشاهده می شود، 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، مولکول های آب سریع تر حرکت کرده و موجب سرعت بخشیدن به انتقال آب از داخل محصول می شود. 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

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 (Tabatabaekoloor 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.

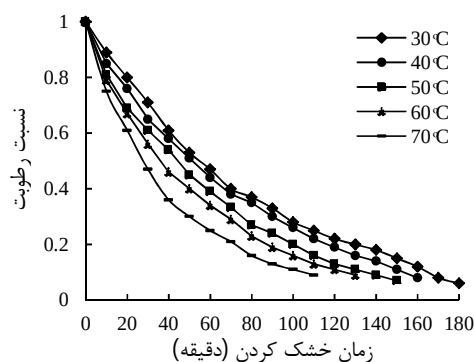


شکل ۴ - نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک کردن برش‌های سیب در سرعت‌های مختلف (دمای خشک کردن، ۵۰°C)

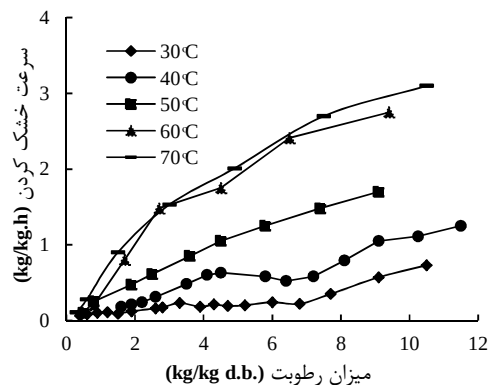


شکل ۵ - نمودار نرخ خشک کردن در مقابل رطوبت برش‌های سیب در سرعت‌های مختلف (دمای خشک کردن، ۵۰°C)

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 ۶ - نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک کردن برش‌های سیب دماهای مختلف (سرعت هوا، ۱ m/s)



شکل ۷ - نمودار نرخ خشک کردن در مقابل رطوبت برش‌های سیب در دماهای مختلف (سرعت هوا ۱ 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

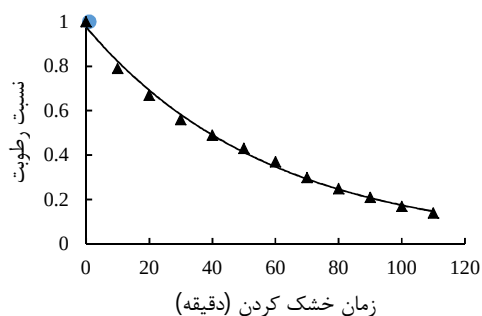
کردن و نیز سرعت هوا در ارتباط با ویژگی های مورد اشاره مشاهده نشد. این نتایج نشان داد که خشک کردن با روش پمپ حرارتی یک فرآیند ملایم دفع رطوبت است و برای محصولات حساس به حرارت مناسب است.

تأثیر دمای خشک کردن و سرعت هوا بر کیفیت ویژگی های ورقه های خشک شده سیب (R_R و S_R ، ΔE) بررسی و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. تفاوت معنی داری در سطح ۵٪ بین تیمارهای دمای خشک

جدول ۲- تأثیر دما و سرعت هوا بر شاخص های تغییر رنگ، چروکیدگی و نرخ جذب ورقه های سیب

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

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 پیش بینی بالا است. از این مدل می توان به خوبی برای توصیف تغییر رطوبت استفاده کرد.



شکل ۶- تأیید مدل پیچ اصلاح شده

انتشار رطوبت مؤثر و انرژی فعال سازی

در طول دوره خشک شدن با نرخ نزولی، انتقال جرم در اثر مقاومت داخلی انجام می گیرد و انتقال رطوبت در حین خشک شدن توسط انتشار داخلی نظارت می شود. در این مورد، قانون دوم فیک می تواند 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^{-11} تا $2/32 \times 10^{-11}$ مترمربع بر ثانیه است. همان طور

برازش مدل های خشک کردن

از پنج مدل ریاضی خشک کردن برای برازش داده های نسبت رطوبت در دماها و سرعت های 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. می توان 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 می توانند قانون تغییر رطوبت را توصیف کنند. در این میان مدل پیچ اصلاح شده دارای بالاترین R^2 و کمترین χ^2 و RMSE است. می توان نتیجه گرفت که مدل پیچ اصلاح شده بهترین مدل برای توصیف خشک کردن ورقه های برش خورده سیب در خشک کن مجهز به پمپ حرارتی است. (Reis et al., 2012) سینتیک خشک شدن برش های یاکون را در خشک کن مجهز به پمپ حرارتی با خلاء بررسی کردند و با برازش بر روی مدل های مختلف خشک کن لایه نازک دریافتند که مدل پیچ اصلاح شده بهترین تطابق را با داده های تجربی نشان داد (Reis et al., 2012). همچنین، نتایج مشابهی برای سیب زمینی 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 پیش بینی 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، تنوع نمونه، ترکیب و هندسه، دمای هوا، رطوبت و پیش تیمارها متفاوت است.

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

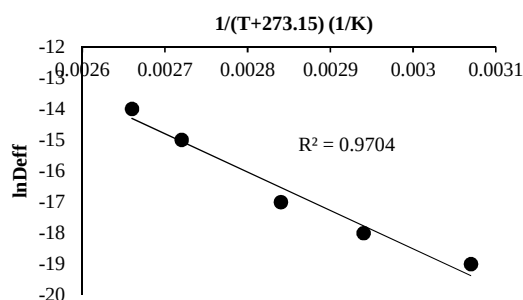
مدل	شرایط خشک کردن	ثابت‌ها	R^2	χ^2	RMSE
نیوتن	۳۰°C-۱/۵ m/s	$k = -0.28$	۰/۹۸۲	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۳۵۷
	۴۰°C-۱/۵ m/s	$k = -0.38$	۰/۹۷۶	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۳۶۰
	۵۰°C-۱/۵ m/s	$k = -0.42$	۰/۹۸۹	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۱۹۸
	۶۰°C-۱/۵ m/s	$k = -0.36$	۰/۹۹۰	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۳۸۵
	۷۰°C-۱/۵ m/s	$k = -0.43$	۰/۹۸۴	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۳۱۰
	۵۰°C-۱ m/s	$k = -0.50$	۰/۹۸۶	۰/۰۰۰۷۳	۰/۰۲۳۵
	۵۰°C-۲ m/s	$k = -0.28$	۰/۹۷۸	۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۲۱۵
پیچ اصلاح شده	۳۰°C-۱/۵ m/s	$k = -0.19; n = 0.996$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۱۳۷
	۴۰°C-۱/۵ m/s	$k = -0.26; n = 1.005$	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۲۰۸
	۵۰°C-۱/۵ m/s	$k = -0.37; n = 1.103$	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۱۵۶
	۶۰°C-۱/۵ m/s	$k = -0.29; n = 1.163$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۲۱۵
	۷۰°C-۱/۵ m/s	$k = -0.33; n = 1.128$	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۱۵۰
	۵۰°C-۱ m/s	$k = -0.42; n = 1.179$	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۲۰۳
	۵۰°C-۲ m/s	$k = -0.25; n = 1.192$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۱۸۷
هندرسون و پابیس	۳۰°C-۱/۵ m/s	$a = 0.9905; k = 0.35$	۰/۹۷۷	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۳۴۸
	۴۰°C-۱/۵ m/s	$a = 0.989; k = 0.36$	۰/۹۸۸	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۳۲۹
	۵۰°C-۱/۵ m/s	$a = 1.002; k = 0.42$	۰/۹۶۶	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۴۶۸
	۶۰°C-۱/۵ m/s	$a = 1.019; k = 0.51$	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۳۷۵
	۷۰°C-۱/۵ m/s	$a = 1.017; k = 0.46$	۰/۹۷۷	۰/۰۰۰۷۱	۰/۰۳۰۵
	۵۰°C-۱ m/s	$a = 1.034; k = 0.28$	۰/۹۸۶	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۲۳۸
	۵۰°C-۲ m/s	$a = 1.028; k = 0.36$	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	$a = 1.087; k = 0.149; c = 0.38$	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	$a = 0.995; k = -0.35; n = 0.678; b = -0.04$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۳۵۷
	۴۰°C-۱/۵ m/s	$a = 0.989; k = -0.36; n = 1.084; b = -0.03$	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۷۶	۰/۰۳۲۸
	۵۰°C-۱/۵ m/s	$a = 1.002; k = -0.42; n = 1.138; b = -0.08$	۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۱۷۸
	۶۰°C-۱/۵ m/s	$a = 1.009; k = -0.51; n = 1.197; b = -0.05$	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۳۹	۰/۰۳۶۴
	۷۰°C-۱/۵ m/s	$a = 1.017; k = -0.46; n = 1.289; b = -0.02$	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۲۹۸
	۵۰°C-۱ m/s	$a = 1.034; k = -0.28; n = 1.245; b = -0.07$	۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۲۴۶
	۵۰°C-۲ m/s	$a = 1.028; k = -0.36; n = 1.186; b = -0.02$	۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۱۹۸

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

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.
- 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

انرژی فعال سازی به صورت لگاریتم D_{eff} به عنوان تابعی از عکس دمای مطلق در شکل ۷ ترسیم شد و یک رابطه خطی را نشان می دهد که از معادله آرنیوس به دست آمده است. از شیب خط مستقیم که از معادله آرنیوس استخراج شده است، انرژی فعال سازی (E_a) ۲۸ کیلوژول بر مول محاسبه شد. این مقدار بالاتر از انرژی فعال سازی برخی محصولات و پایین تر از انرژی فعال سازی 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	$5/18E-10$

نتیجه گیری

استفاده از پمپ حرارتی در خشک کن برای خشک کردن ورقه های برش خورده سیب مورد آزمایش قرار گرفت و با استفاده از مدل های ریاضی بهترین مدل برای برازش داده های آزمایش و پیش بینی رفتار خشک کردن ارائه شد. افزایش دما و سرعت جریان هوا هر دو موجب تسریع در فرآیند خشک شدن می شوند. در این میان مدل پیچ اصلاح شده دارای بالاترین R^2 و کمترین χ^2 و RMSE است. می توان نتیجه گرفت که مدل پیچ اصلاح شده

- 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., Tabatabaekoloor, 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 potovoltaic-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.
- 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). 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., Tabatabaekoloor, R., & Mousavi, S. R. (2017). Effects of different drying conditions on powder density and rehydration characteristics of coriandrum. *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 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

- 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.