فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۱۲۲-۱۰۷، پاییز ۱۳۹۶

مطالعه سینتیک خشک‌شدن و چروکیدگی یک نمونه زالزالک در یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی با کنترل رطوبت هوای ورودی

الهام فرزان[1]، محمودرضا رحیمی[2]، وحید مددی اورگانی [3*]

1. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج
2. دانشیار، مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج
3. استادیار، مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

(تاریخ دریافت: 96/2/11، تاریخ بازنگری: 96/4/3، تاریخ پذیرش: 96/4/4)

چکیده

در این پژوهش فرایند خشک کردن و چروکیدگی میوه زالزالک در یک مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. میوه زالزالک در دماهای 50، 60 و 70 درجه سانتی‌گراد با سرعت‌های جابه‌جایی هوای ورودی به میزان 0/92 و 1/06 متر بر ثانیه با فرکانس‌های 6/8 ، 7/5 و 8/2 هرتز در یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی با استفاده از یک سامانه جذب سطحی با بسترهای پر شده از جاذب سیلیکاژل به‌منظور کنترل رطوبت هوای ورودی از حدود 27 به 4 درصد نسبی خشک شد. نتایج نشان داد که زمان خشک شدن میوه زالزالک در یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی با استفاده از یک سامانه جذب سطحی، نسبت به زمان خشک شدن آن در یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی بدون استفاده از سامانه جذب سطحی به‌منظور کاهش رطوبت هوای ورودی به صورت قابل ملاحضه‌ای کاهش یافته است و مقدار این کاهش برای شرایط عملیاتی مختلف متفاوت است. برای مثال در شرایط عملیاتی سرعت جابه‌جایی و دمای هوای ورودی به بستر به‌ترتیب برابر با برابر با 0/92 متر بر ثانیه و 60 °C و ارتعاش دستگاه برابر با 7/5 هرتز، زمان خشک شدن مقدار نمونه در حدود 15 درصد با جذب رطوبت هوای ورودی کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین میزان چروکیدگی میوه زالزالک در طول فرایند خشک کردن تحت تاثیر دما، سرعت جابه‌جایی و رطوبت نسبی هوای ورودی است و اثر سرعت جابه‌جایی هوای ورودی بر میزان چروکیدگی آن در قیاس با دو عامل دیگر کم‌تر است. در بین مدل‌های ارائه شده برای مدل‌سازی خشک شدن میوه‌ها، مناسب‌ترین مدل‌ها جهت بررسی سینتیک خشک شدن و چروکیدگی میوه زالزالک به‌ترتیب مدل‌های لگاریتمی و رتی با بیش‌ترین مقدار R^2 و کم‌ترین مقدار RMSE انتخاب شدند.

واژه‌های کلیدی: سنتیک خشک شدن، چروکیدگی، خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی، زالزالک، سامانه جذب سطحی.

* نویسنده مسئول: v.madadi@yu.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

1- مقدمه

زالزالک درختان یا درختچه‌هایی خزان کننده، متعلق به خانواده گل سرخ می‌باشند. حدود 200 نوع زالزالک در سراسر جهان وجود دارد [1]. ارزش دارویی و غذایی بالایی دارد و برای درمان بیماری‌های مختلف انسان از جمله بیماری‌های قلبی، فشار خون بالا، درد قفسه سینه و سخت شدن رگ‌ها مفید می‌باشد. ترکیبات شیمیایی زالزالک، فلاونوئیدها، اسیدهای تری ترپنی، پروآنتوسپانین‌ها و اسیدهای آلی هستند [2، 3].

یکی از مهم‌ترین فرایندها جهت افزایش ماندگاری مواد غذایی با رطوبت بالا، فرایند خشک کردن است. هدف از فرایند خشک کردن تبخیر مقدار معینی از آب درون محصول می‌باشد. هم‌چنین با استفاده از فرایند خشک کردن دسترسی به مواد غذایی خشک شده آسان‌تر و مدت زمان نگه‌داری مواد غذایی افزایش می‌یابد [4، 5]. خشک شدن مواد جامد به‌وسیله انتقال همزمان جرم و انرژی بین یک سیال خشک کننده (اغلب هوا) و نمونه‌های جامد صورت می‌گیرد [6].

یکی از خشک‌کن‌های مناسب جهت خشک کردن محصولات، خشک‌کن‌های بستر شناور می‌باشند چون انتقال حرارت و جرم در طی خشک کردن به صورت یکنواخت رخ می‌دهد، هزینه‌های عملیاتی کم و هم‌چنین نرخ خشک کردن در این نوع خشک‌کن‌ها بالا است [6، 7].

یکنواختی بستر در نتیجه استفاده از ارتعاش در بستر باعث جلوگیری از کانالیزه شدن جریان درون بستر، یکنواختی سیال درون بستر و بهبود فرایند خشک کردن مواد در خشک‌کن‌های بستر شناور می‌شود [8، 9]. در واقع ارتعاش بستر شناور می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی به‌منظور بهبود کیفیت سیالی شدن مواد درون بستر استفاده شود [10].

همزمان با خارج شدن رطوبت از مواد غذایی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های فیزیکی که رخ می‌دهد کاهش حجم محصول یا همان چروکیدگی می‌باشد [11].

رتی، چروکیدگی سیب زمینی، سیب درختی و هویج را تحت شرایط عملیاتی مختلف در دماهای مختلف هوای ورودی 40، 50 و 60 درجه سانتی‌گراد و سرعت جابه‌جایی هوای 1 تا 5 متر بر ثانیه با رطوبت نسبی 5 تا 50 درصد را مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان دادند که چروکیدگی تنها تابعی از محتوای رطوبت موجود در محصول نیست بلکه به شرایط عملیاتی و هندسه نمونه نیز بستگی دارد. هم‌چنین نتایج نشان دادند که افزایش سرعت جابه‌جایی هوا میزان چروکیدگی سیب درختی و سیب‌زمینی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد، اما دمای هوا، رطوبت نسبی هوا و هندسه نمونه‌ها اثر کم‌تری بر میزان چروکیدگی این نمونه‌ها دارد [12].

حاتمی‌پور و همکارانش اثر عوامل مختلف شامل دما و رطوبت نسبی جریان هوای خشک کن، قطر نمونه، رطوبت اولیه نمونه، وجود ذرات بی‌اثر در درون خشک‌کن و هم‌چنین و سرعت جابه‌جایی جریان هوا را بر میزان چروکیدگی هویج در یک خشک‌کن بستر شناور بررسی کردند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که میزان چروکیدگی هویج به میزان قابل توجهی تحت تاثیر رطوبت اولیه نمونه در طول خشک شدن است. دما و سرعت جابه‌جایی هوا و حضور ذرات بی‌اثر تأثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان چروکیدگی هویج ندارند [13].

آرال و همکارانش یک نوع زالزالک را در یک خشک‌کن همرفتی و در دماهای 50، 60 و 70 درجه سانتی‌گراد و سرعت جابه‌جایی هوا به میزان 0/5، 0/9 و 1/3 متر بر ثانیه خشک کردند و اثر برخی پارامترهای آزمایشگاهی شامل دما و سرعت جابه‌جایی هوای مورد استفاده را بر سینتیک خشک شدن، رنگ و میزان چروکیدگی آن بررسی نمودند. یافته‌های حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که زمان خشک شدن با افزایش دما و سرعت جابه‌جایی هوا کاهش می‌یابد و در بین مدل‌های تحت بررسی، مدل میدلی و همکاران به‌عنوان یک مدل مناسب می‌تواند برای توصیف رفتار خشک شدن زالزالک در شرایط موجود مورد استفاده قرار گیرد [3].

هدف از این مطالعه بررسی اثر دما، رطوبت نسبی و سرعت جابه‌جایی هوای ورودی به بستر و هم‌چنین میزان ارتعاش بستر بر رفتار خشک شدن و میزان چروکیدگی میوه زالزالک در یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی می‌باشد. از طرف دیگر انتخاب یک مدل ریاضی در بین مدل‌های ارائه شده به‌منظور پیش‌بینی سینتیک فرایند خشک شدن و میزان چروکیدگی زالزالک در شرایط عملیاتی مختلف در یک بستر شناور ارتعاشی از دیگر اهداف این مطالعه می‌باشد. یکی از نوآوری‌های علمی و

Archive of SID

www.SID.ir

کاربردی مهم در این مطالعه این است که برای اولین بار از دو نوع سیستم محرک سامانه ارتعاشی استفاده شده در دستگاه و سامانه کنترل رطوبت به منظور افزایش نرخ خشک شدن و کاهش زمان خشک شدن با کنترل همزمان میزان چروکیدگی نمونه استفاده شده است. از طرف دیگر در این مطالعه، اثر همزمان پارامترهای مختلف عملیاتی از جمله دما، رطوبت و سرعت جابه‌جایی هوای ورودی و هم‌چنین میزان ارتعاش دستگاه که در میزان نرخ خشک شدن نمونه‌ها و به تبع زمان خشک شدن نمونه‌ها تاثیر مهمی دارد بررسی شده است.

2- مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از یک نوع میوه زالزالک معروف به کیالک با نام علمی کراتیگس ارونیا موجود در دانشگاه یاسوج واقع در جنوب غرب ایران استفاده شد و به‌منظور استفاده در زمان‌های مختلف، نمونه‌ها در یخچال در دمای 4 درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شدند. حدود دو ساعت قبل از انجام هر آزمایش، مقدار نمونه مورد نیاز از یخچال به محیط آزمایشگاه منتقل شد تا به دمای محیط برسد. آزمایش‌ها در سه سطح دمای هوای ورودی برابر با 50، 60 و 70 درجه سانتی‌گراد و هم‌چنین دو سطح سرعت جابه‌جایی هوای ورودی 0/92 و 1/06 متر بر ثانیه در فرکانس‌های مختلف 6/8، 7/5 و 8/2 هرتز انجام شد. در هر آزمایش مقدار 250 گرم زالزالک به داخل خشک‌کن ریخته شده است که سه عدد از نمونه‌ها به‌عنوان نمونه‌های مورد آنالیز توسط یک توری و نخ نسوز درون بستر و در میان کل نمونه معلق شده است.

برای اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌ها از ترازوی دیجیتالی مدل AND ساخت کشور ژاپن با دقت 0/001 ± گرم استفاده شده است که از مقدار اندازه‌گیری شده در فواصل زمانی مختلف و در حین انجام آزمایش برای محاسبه نرخ خشک شدن استفاده شده است. با استفاده از روش وزنی به این صورت که وزن نمونه‌های مورد آنالیز قبل از شروع آزمایش و در طی فرایند خشک کردن در مدت زمان هر ده دقیقه یادداشت و پس از خشک شدن کامل نمونه‌ها وزن خشک نهایی آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت محتوای رطوبت نمونه‌ها طی فرایند خشک شدن به کمک معادله (1) به‌دست می‌آید.

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (1)$$

در معادله فوق، M_d محتوای رطوبت نمونه بر پایه خشک، W_w وزن نمونه تر و W_d وزن نمونه خشک شده است. پس از اندازه‌گیری محتوای رطوبت نمونه‌ها، نسبت رطوبت بدون بعد از معادله (2) به‌دست می‌آید [14]

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

که در معادله شماره (2)، MR نسبت رطوبت، M_t محتوی رطوبت در زمان t و M_0 محتوی رطوبت اولیه می‌باشد.

برای اندازه‌گیری میزان چروکیدگی محصول، در ابتدا و انتهای هر بازه زمانی آزمایش توسط یک میکرومتر سه بعد عمود بر هم نمونه‌ها اندازه‌گیری و یادداشت شده و با استفاده از معادله (3) قطر متوسط نمونه به‌دست می‌آید. پس از آن حجم محصول قبل از خشک شدن و حجم آن پس از فرایند خشک شدن در فواصل زمانی t به‌ترتیب با استفاده از معادلات 4 و 5 محاسبه می‌شود و در نهایت میزان چروکیدگی محصول با استفاده از معادله (6) تخمین زده می‌شود [15].

$$D = \sqrt[3]{abc} \quad (3)$$

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_0}{2}\right)^3 \quad (4)$$

$$V_t = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_t}{2}\right)^3 \quad (5)$$

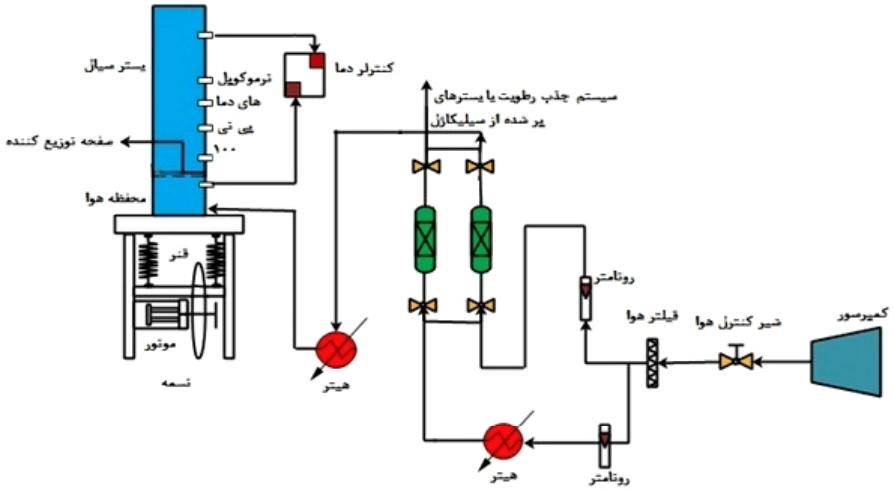
$$Sh = \left(1 - \frac{V_t}{V_0}\right) \quad (6)$$

2-1- دستگاه خشک‌کن

برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی که شکل شماتیک آن در شکل (1) نشان داده شده است، استفاده شده است. دستگاه مذکور توسط نویسندگان مقاله حاضر طراحی و ساخته شده است. هوای لازم از طریق یک دستگاه کمپرسور مجود در آزمایشگاه تامین شده است. با استفاده از شیر تنظیم و دبی‌سنج موجود در دستگاه طراحی

Arhive of SID

www.SID.ir



شکل (1) شماتیک دستگاه خشک‌کن بستر سیال ارتعاشی

شده، دبی مورد نظر برای هوای ورودی تعیین می‌شود. برای انجام آزمایش‌هایی که در آن می‌بایست هوای کاملاً خشک به بستر خشک‌کن وارد شود، از یک سامانه جذب سطحی با بسترهای پر شده از مواد جاذب سیلیکاژل استفاده شد. جریان هوا پس از عبور از دبی‌سنج وارد یکی از برج‌های رطوبت‌گیر شده و رطوبت آن توسط جاذب سیلیکاژل جذب می‌شود و پس از آن، از گرم‌کن عبور کرده و وارد بستر خشک‌کن می‌شود. در حین انجام برخی آزمایش‌ها که مدت زمان انجام آن‌ها کمی طولانی بود، به‌منظور تامین جریان هوای خشک از دو بستر جاذب سیلیکاژل استفاده می‌شده است. بدین صورت که در زمان جذب رطوبت هوای ورودی به خشک‌کن توسط یکی از بسترهای پر شده سیلیکاژل، بستر دوم توسط یک جریان دیگر هوای گرم احیاء شده و برای جذب رطوبت هوا آماده می‌شده است. پس از اشباع بستر رطوبت‌گیر اول، جریان هوا وارد بستر دیگر شده و بستر اول برای استفاده مجدد توسط یک جریان هوای گرم دیگر احیاء می‌شود. پس از عبور هوا از دبی‌سنج، هوا به‌طور مستقیم وارد بستر خشک‌کن می‌شود. حدود بیست دقیقه قبل از شروع فرایند خشک کردن، دستگاه خشک‌کن روشن شده و بر اساس مشخصه‌های هر آزمایش، دمای هوای داخل خشک‌کن و دبی روی مقادیر مورد نظر تنظیم می‌گردد تا این‌که دمای هوای داخل خشک‌کن به مقدار مورد نظر و دستگاه به حالت پایدار برسد و سپس میزان ارتعاش بستر توسط سامانه کنترلی موجود تعیین می‌شود.

2-2- مدل‌سازی سینیتیکی فرایند خشک کردن و چروکیدگی میوه زالزالک

جهت ارائه مدلی که سینتیک فرایند خشک کردن و میزان چروکیدگی میوه زالزالک را تشریح کند، مطالعات زیادی صورت گرفته است. در واقع هدف از فرایند مدل‌سازی، همان‌طور به پیش‌تر نیز به آن اشاره شده است، انتخاب یک مدل ریاضی مناسب از بین مدل‌های ارئه شده به‌منظور پیش بینی رفتار خشک شدن و میزان چروکیدگی میوه زالزالک در شرایط عملیاتی مختلف است. مدل مناسب، مدلی است که در شرایط آزمایشگاهی انجام شده پیش‌بینی دقیق‌تری از فرایند خشک شدن ماده مورد نظر را داشته باشد. بنابراین با انتخاب مناسب‌ترین مدل که سینتیک خشک شدن ماده مورد نظر را توصیف کند، می‌توان روند تغییرات میزان رطوبت درون ماده را طی فرایند خشککردن مورد بررسی قرار داد. یکی از مزایای مهم به‌دست آوردن مدل مربوط به سینتیک خشک شدن مواد این است که در صورت تعیین مدل سینتیک مناسب مربوط به ماده مورد نظر، رفتار ماده در شرایط غیر از شرایط آزمایش شده نیز قابل پیش‌بینی است. در این مطالعه، از چهار مدل شناخته شده نیوتن، هندرسون و پابیس، پیج و لگاریتمی که کاربرد زیادی در خشک کردن محصولات مختلف دارند برای توصیف سینتیک خشک کردن نمونه مورد مطالعه استفاده شده است (جدول 1). هم‌چنین از سه مدل شناخته شده مایور و سرنو، رتی و مولت و همکاران، که کاربرد زیادی در پیش‌بینی

Arhive of SID

www.SID.ir

میزان چروکیدگی محصولات مختلف دارند، برای توصیف میزان چروکیدگی نمونه استفاده شده است (جدول 2). در این مدل‌ها منحنی‌های خشک کردن از رسم تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان خشک‌کردن و منحنی‌های چروکیدگی بسته به مدل مورد استفاده از رسم چروکیدگی بر حسب محتوای رطوبت و یا نسبت رطوبت حاصل شده‌اند و ضرایب مدل‌ها با برازش داده‌های آزمایشگاهی به کمک نرم‌افزار LAB Fit تعیین شدند.

در مدل‌های ارائه شده در جدول (1)، k، n، a و MR به‌ترتیب ثابت‌های مدل‌ها و نسبت رطوبت می‌باشند.

در مدل‌های ارائه شده در جدول (2)، k_1-k_{15} ثوابت مدل‌ها و Sh پارامتر چروکیدگی می‌باشند. چروکیدگی پارامتری بدون بعد است.

3-2- آنالیز آماری

برای انتخاب مناسب‌ترین مدل از بین مدل‌های ارائه شده موجود، از پارامترهای آماری مربع ضریب همبستگی (R^2)، ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) و خی دو (χ^2) استفاده گردیده است که معادلات آن‌ها به‌ترتیب در زیر بیان شده است. هر چه مقدار (R^2) به یک نزدیک‌تر و مجموع مربعات خطا کوچک‌تر باشد، مدل مربوطه برازش بهتری بر داده‌های آزمایشگاهی دارد و می‌تواند پیش‌بین‌های دقیق‌تری برای هدف مورد نظر ارئه دهد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(P_{pred,i} - P_{\exp,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\overline{P}_{pred,i} - P_{\exp,i}\right)^2} \quad (7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(P_{\exp,i} - P_{pred,i}\right)^2}{N - Z} \quad (8)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N}\left(P_{\exp,i} - P_{pred,i}\right)^2\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

در معادلات 7، 8 و 9، N تعداد مشاهدات، Z تعداد ثابت‌های هر مدل، P_{exp} پارامتر آزمایشگاهی مورد مطالعه، نسبت رطوبت یا میزان چروکیدگی و P_{pred} نسبت رطوبت یا میزان چروکیدگی پیش‌بینی شده توسط هر مدل می باشند [16-19].

3- نتایج و بحث

نتایج موجود در شکل‌های 2 و 3 نشان می‌دهند که به‌ترتیب با افزایش دمای هوا، سرعت جابه‌جایی هوای ورودی به خشک‌کن، نرخ خشک شدن افزایش و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. همان‌طور که از نتایج ارائه شده در این اشکال مشخص است، اثر افزایش دمای هوای ورودی به خشک‌کن بر روی نرخ خشک شدن میوه زالزالک و به تبع زمان خشک شدن

جدول(1) مدل‌های ریاضی ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف جهت تعیین سینتیک خشک شدن

ردیف	نام مدل	معادله ارائه شده برای مدل	مراجع
1	نیوتن	MR=exp(-kt)	[23]
2	هندرسون و پابیس	MR=aexp(-kt)	[24]
3	پیج	$MR=\exp(-kt^n)$	[25]
4	لگاریتمی	MR=aexp(-kt)+c	[26]

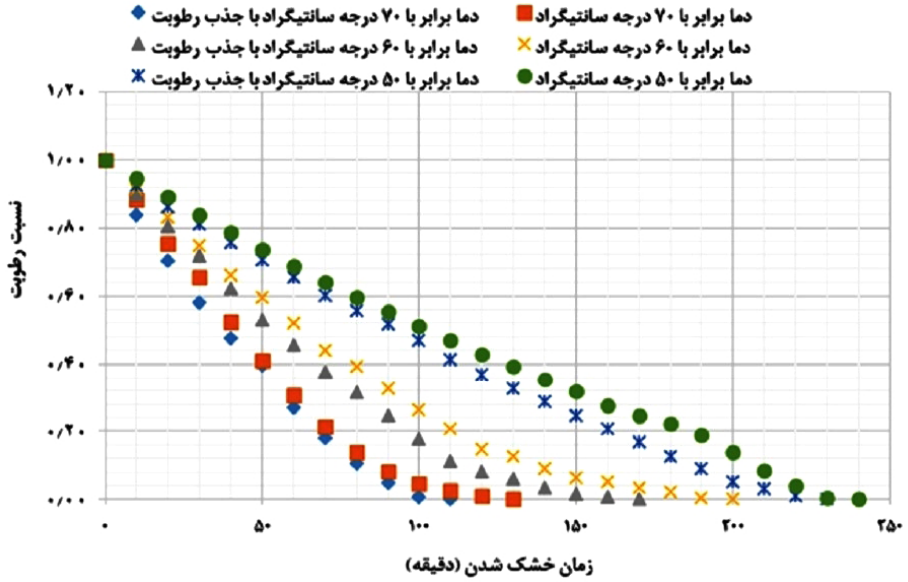
جدول (2) مدل‌های ریاضی ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف جهت تعیین تغییرات چروکیدگی

ردیف	نام مدل	معادله ارائه شده برای مدل	مراجع
1	مایور	$Sh = k_1 + k_2\frac{M_t}{M_0} + k_3\left(\frac{M_t}{M_0}\right)^2$	[27]
2	رتی	$Sh = k_4 + k_5 M_t + k_6 M_t^2 + k_7 M_t^3$	[12]
3	مولت	$Sh = k_8 + k_9\left(\frac{M_t}{1+M_t}\right) + \exp\left(k_{10}\frac{M_t}{1+M_t}\right)$	[27]

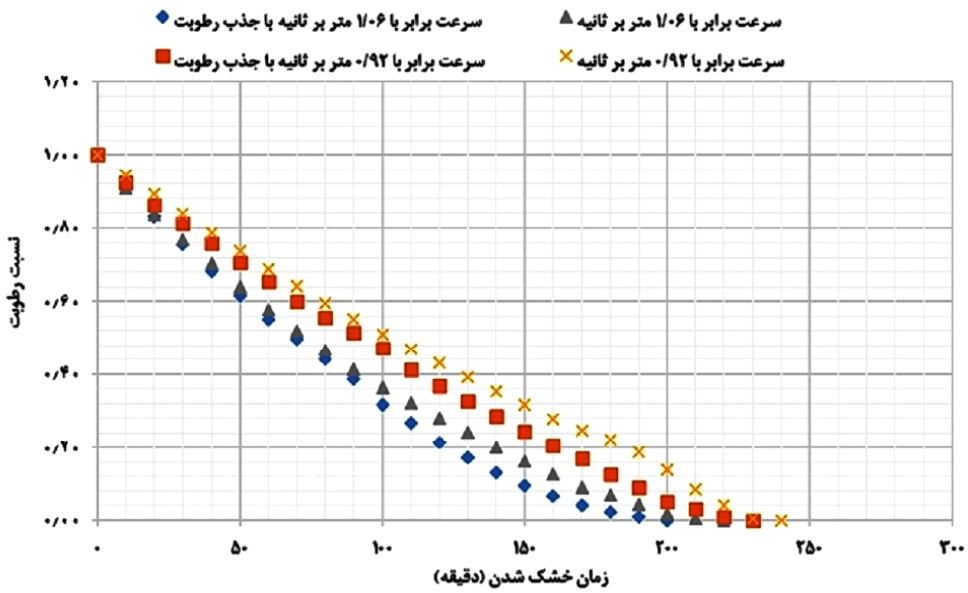
Archive of SID

www.SID.ir

آن نسبت به اثر سرعت جابه‌جایی هوای ورودی بیش‌تر است. این نتایج با نتایج حاصل از کار تحقیقاتی آرال [3] که بر روی نوعی میوه زالزالک انجام شده است و هم‌چنین و نتایج حاصل از کار استاکیس و همکارانش [9] که بر روی گونه‌های دیگری از محصولات کشاورزی انجام شده است، تطابق بسیار خوبی دارد. نتایج موجود در شکل (4) نشان می‌دهند که با افزایش میزان ارتعاش دستگاه، نرخ خشک شدن افزایش و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد و این نتایج با نتایج حاصل از کار انجام شده توسط صادقی و همکارانش [20] که از خشک کردن چای استخراج شده است و هم‌چنین کار مارینگ [21] که از خشک شدن نشاسته سیب‌زمینی استخراج شده است، مطابقت دارد. نتایج موجود در شکل‌های 7-5 نشان می‌دهند که با افزایش دمای هوای ورودی، سرعت جابه‌جایی هوای ورودی به خشک‌کن و افزایش فرکانس دستگاه، به‌ترتیب

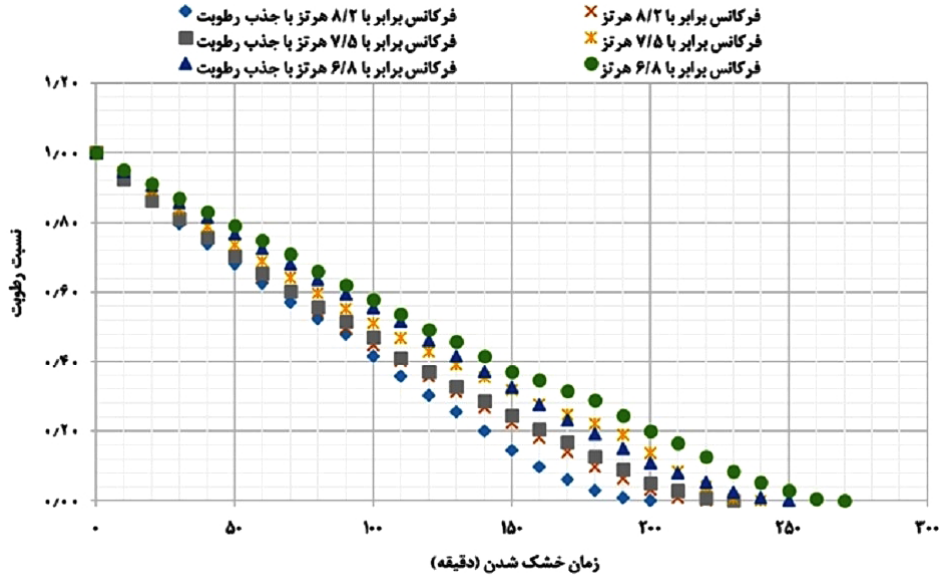


شکل(2) تغییرات نسبت رطوبت زالزالک با زمان در دماهای مختلف هوای ورودی (سرعت جابه‌جایی هوای ورودی 0/92 متر بر ثانیه و فرکانس 7/5 هرتز)

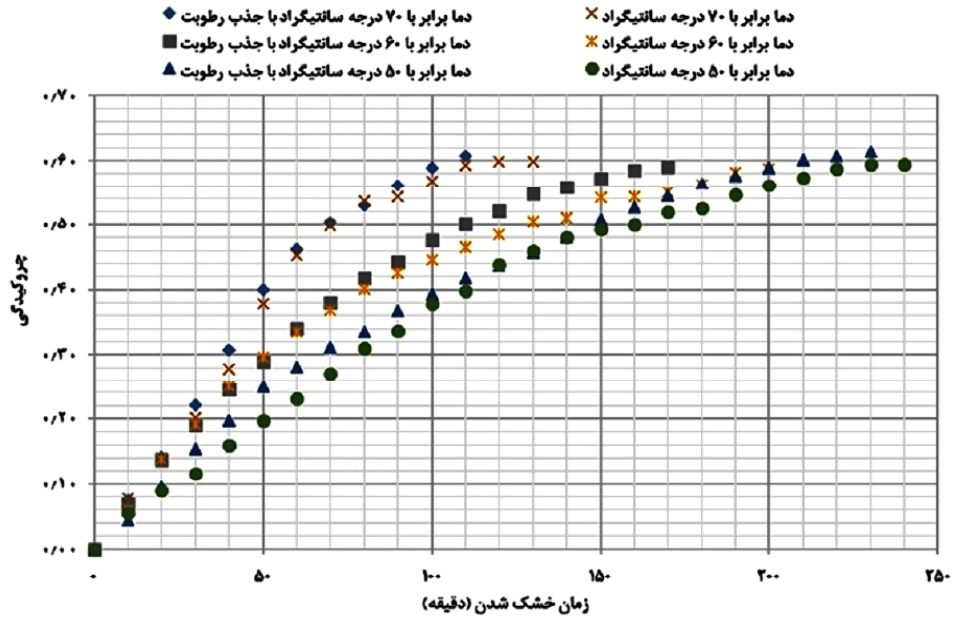


شکل (3) تغییرات نسبت رطوبت زالزالک با زمان در سرعت‌های مختلف هوای ورودی(دمای هوای ورودی 50 درجه سانتی‌گراد و فرکانس 7/5 هرتز)

www.SID.ir



شکل(4) تغییرات نسبت رطوبت زالزالک با زمان در فرکانس‌های مختلف (دمای هوای ورودی 50 درجه سانتی‌گراد و سرعت جابه‌جایی هوای ورودی 0/92 متر بر ثانیه)



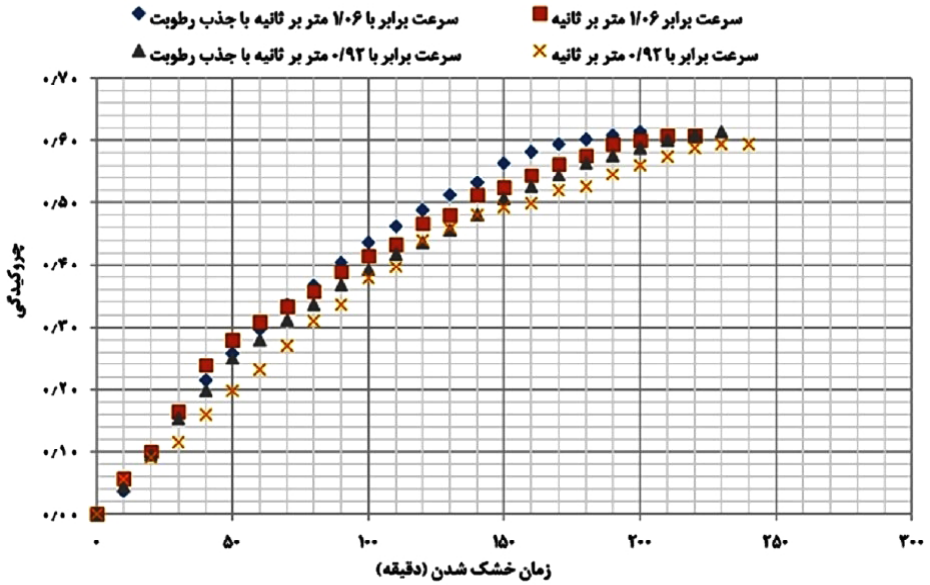
شکل (5) تغییرات چروکیدگی زالزالک با زمان در دماهای مختلف هوای ورودی (سرعت جابه‌جایی هوای ورودی 0/92 متر بر ثانیه و فرکانس 7/5 هرتز)

میزان چروکیدگی میوه زالزالک افزایش و زمان رسیدن به میزان چروکیدگی نهایی کاهش می‌یابد. این نتایج با نتایج آرال [3] که از خشک شدن نوعی از زالزالک استخراج شده است و هم‌چنین نتایج یداللهی و همکارانش [22] که از خشک شدن سیب‌زمینی به‌دست آمده است، مطابقت دارد. هم‌چنین نتایج ارائه شده در تمامی نمودارها نشان می‌دهند که کاهش رطوبت نسبی هوای ورودی به بستر خشک‌کن و مورد استفاده در فرایند خشک کردن میوه زالزالک، باعث افزایش نرخ خشک شدن و افزایش میزان چروکیدگی و کاهش زمان چروکیدگی نهایی می‌گردد.

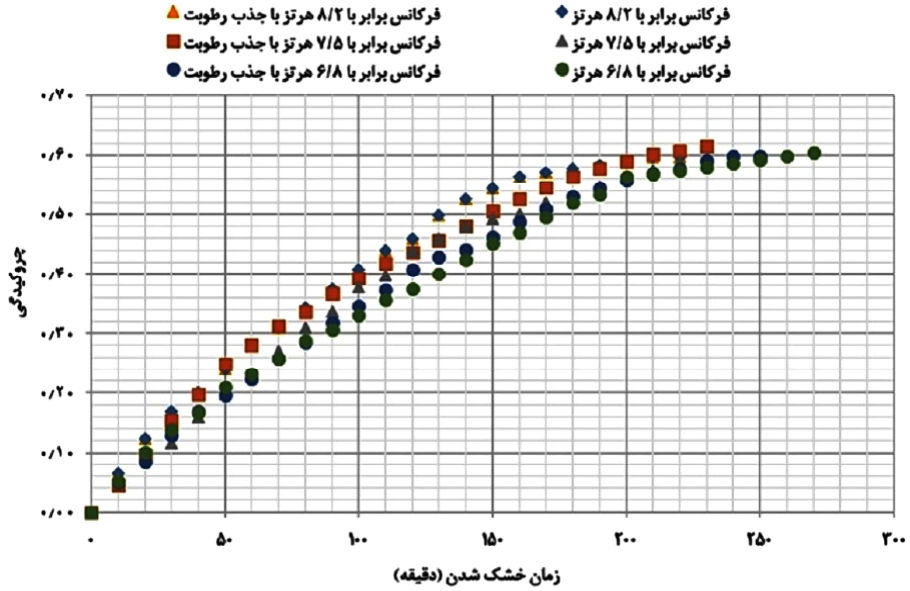
3-1- سینتیک خشک شدن زالزالک

شکل‌های 4-2 تغییرات نسبت رطوبت میوه زالزالک را بر حسب زمان به‌ترتیب برای دماها، سرعت‌های جابه‌جایی هوای

www.SID.ir



شکل (6) تغییرات چروکیدگی زالزالک با زمان در سرعت‌های مختلف هوای ورودی (دمای هوای ورودی 50 درجه سانتی‌گراد و فرکانس 7/5 هرتز)



شکل (7) تغییرات چروکیدگی زالزالک با زمان در فرکانس‌های مختلف (دمای هوای ورودی 50 درجه سانتی‌گراد و سرعت جابه‌جایی هوای ورودی 0/92 متر بر ثانیه)

ورودی و فرکانس‌های تحت بررسی نشان می‌دهند. در شکل (2) سایر شرایط عملیاتی (سرعت جابه‌جایی هوای ورودی و فرکانس) در دماهای مختلف هوای ورودی، در شکل (3) سایر شرایط عملیاتی (دمای هوای ورودی و فرکانس) در سرعت‌های جابه‌جایی مختلف هوای ورودی و در شکل (4) سایر شرایط عملیاتی (دمای هوای ورودی و سرعت جابه‌جایی هوای ورودی) در فرکانس‌های مختلف، ثابت می‌باشند. همان‌گونه که در شکل (2) ملاحظه می‌شود با افزایش دمای هوای ورودی به خشک‌کن، در یک زمان خاص نسبت رطوبت نمونه کم‌تر شده است و این اثر را می‌توان این‌گونه توصیف کرد که با افزایش دمای هوای ورودی به خشک‌کن نیرو محرکه انتقال انرژی و جرم بیش‌تر شده و در نتیجه نرخ خشک شدن افزایش می‌یابد. برای مثال با استفاده از

www.SID.ir

نتایج موجود در شکل (2) برای سرعت هوای خشک‌کن ورودی به بستر برابر با 0/92 متر بر ثانیه و میزان ارتعاش دستگاه برابر با 7/5 هرتز، با افزایش دمای هوای ورودی به خشک‌کن از 50 درجه سانتی‌گراد به 70 درجه سانتی‌گراد، زمان خشک شدن در حدود 50 درصد کاهش می‌یابد. از طرف دیگر در شرایط ذکر شده برای دمای هوای ورودی به خشک‌کن برابر با 50 درجه سانتی‌گراد، زمان خشک شدن نمونه برای حالتی که هوای خشک وارد خشک‌کن می‌شود نسبت به حالتی که هوای مرطوب معمولی وارد خشک‌کن می‌شود در حدود 5 درصد کاهش پیدا می‌کند در حالی که میزان این کاهش برای دمای هوای ورودی به خشک‌کن برابر 60 درجه سانتی‌گراد برابر با 15 درصد و برای دمای 70 درجه سانتی‌گراد برابر با 16 درصد است. این نتایج نشان می‌دهد که اثر کاهش رطوبت هوای ورودی به خشک‌کن بر افزایش سرعت خشک‌شدن برای دماهای بالاتر هوای گرم ورودی به خشک‌کن بیش‌تر است.

همان‌گونه که از نتایج نشان داده شده در شکل (3) نیز مشخص است، با افزایش سرعت جابه‌جایی هوای ورودی، نسبت رطوبت نمونه کاهش یافته است، با افزایش سرعت هوای ورودی ضریب انتقال جرم و انرژی افزایش می‌یابد و در نتیجه با افزایش میزان تبخیر رطوبت موجود در جامد، ذرات در زمان‌های کم‌تری خشک می‌شوند. نتایج در شکل (4) نشان می‌دهند که با افزایش شدت ارتعاش، نسبت رطوبت نمونه کاهش یافته است. این رفتار را می‌توان این‌طور توجیه کرد که به‌واسطه ایجاد ارتعاش در بستر خشک‌کن، سطح تماس مفید دو فاز (گاز- جامد) افزایش یافته و در نتیجه نرخ انتقال حرارت از جریان هوای خشک‌کن به ذرات و هم‌چنین نرخ انتقال جرم از ذرات به جریان هوای خشک‌کن در اثر افزایش ظرایب انتقال حرارت و انتقال جرم افزایش پیدا کرده که این اثر باعث افزایش سرعت خشک شدن محصول می‌شود. برای مثال با استفاده از نتایج موجود در شکل (3)، برای شرایط دمای هوای ورودی به خشک‌کن برابر با 50 درجه سانتی‌گراد و میزان ارتعاش دستگاه برابر با 7/5 هرتز، با افزایش سرعت هوای ورودی از 0/92 متر بر ثانیه به 1/06 متر بر ثانیه، زمان خشک شدن در حدود 9 درصد کاهش می‌یابد. هم‌چنین برای حالتی که سرعت هوای ورودی برابر با 0/92 متر بر ثانیه است، زمان خشک شدن نمونه در شرایط هوای خشک ورودی به خشک‌کن نسبت به شرایط هوای مرطوب ورودی به خشک‌کن در حدود 4 درصد کاهش می‌یابد. این در حالی است که اگر سرعت هوای ورودی به بستر برابر با 1/06 متر بر ثانیه باشد، زمان خشک شدن نمونه در شرایط هوای خشک ورودی به خشک‌کن نسبت به هوای مرطوب ورودی به خشک‌کن در حدود 10 درصد کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج تشریح شده می‌توان نتیجه گرفت که اثر کاهش رطوبت هوای ورودی به خشک‌کن در سرعت‌های بالاتر هوای ورودی به خشک‌کن بر زمان خشک‌شدن نمونه‌ها محسوس‌تر است.

شکل (4) اثر میزان ارتعاش دستگاه بر نرخ خشک شدن نمونه‌ها در شرایط دمای هوای ورودی به خشک‌کن برابر با 50 درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ورودی برابر با 0/92 متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. در شرایط ذکر شده با افزایش میزان ارتعاش دستگاه از 6/8 به 8/2 هرتز، در صورتی که هوای مرطوب وارد خشک‌کن شود، زمان خشک شده در حدود 18 درصد و در صورتی که هوای خشک وارد خشک‌کن شود در حدود 20 درصد کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که اثر میزان ارتعاش بر کاهش زمان خشک شدن برای هوای خشک ورودی به خشک‌کن بیش‌تر از هوای مرطوب ورودی به خشک‌کن است. از طرف دیگر وقتی که از هوای خشک جهت خشک‌کردن در دستگاه استفاده می‌شود نسبت به هوای مرطوب، در فرکانس دستگاه برابر با 6/8 هرتز زمان خشک شدن در حدود 8 درصد، برای فرکانس 7/5 هرتز در حدود 9 درصد و برای فرکانس 8/2 هرتز در حدود 10 درصد کاهش می‌یابد. این بدان معنا است که اثر کاهش میزان رطوبت هوای ورودی به خشک‌کن بر میزان کاهش زمان خشک شدن نمونه‌ها در فرکانس‌های بالاتر دستگاه محسوس‌تر است. از مقایسه نتایج موجود در این شکل‌ها برای هر دو حالت هوای مرطوب و خشک ورودی به خشک‌کن می‌توان گفت که با کاهش رطوبت هوای ورودی به بستر خشک‌کن و در نتیجه افزایش نیرو محرکه انتقال جرم، نرخ خشک شدن افزایش و در نتیجه زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش میزان ارتعاش دستگاه و افزایش دما و سرعت هوای ورودی به خشک‌کن زمان خشک شدن نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

Arhive of SID

www.SID.ir

2-3- چروکیدگی زالزالک

تغییرات چروکیدگی میوه زالزالک بر حسب زمان خشک شدن در شرایط عملیاتی مختلف به‌ترتیب در شکل‌های 5-7 نشان داده شده است. شکل (5) تغییرات چروکیدگی با زمان خشک شدن را در دماهای مختلف هوای ورودی و ثابت ماندن دیگر شرایط عملیاتی (سرعت جابه‌جایی هوای ورودی و فرکانس)، شکل (6) تغییرات چروکیدگی با زمان خشک شدن را در سرعت‌های جابه‌جایی مختلف هوای ورودی و ثابت ماندن دیگر شرایط عملیاتی (دمای هوای ورودی و فرکانس) و شکل (7) تغییرات چروکیدگی با زمان خشک شدن را در فرکانس‌های مختلف و ثابت ماندن دیگر شرایط عملیاتی (دمای هوای ورودی و سرعت جابه‌جایی هوای ورودی) نشان می‌دهند. همان‌گونه که از نتایج نشان داده شده در این شکل‌ها قابل مشاهده است، میزان چروکیدگی در انتهای فرایند خشک شدن برای همه شرایط عملیاتی تقریبا یکسان است و شرایط عملیاتی مختلف فقط زمان رسیدن به میزان چروکیدگی نهایی را تغییر می‌دهند. بدین صورت که با افزایش دمای هوای ورودی به خشک‌کن به‌دلیل افزایش در نیرو محرکه انتقال جرم و انرژی و در نتیجه افزایش نرخ خشک شدن، میزان چروکیدگی افزایش و زمان رسیدن به چروکیدگی نهایی کاهش می‌یابد و با افزایش در سرعت هوای ورودی به خشک‌کن ضریب انتقال انرژی و جرم افزایش یافته که بدین ترتیب میزان چروکیدگی افزایش و زمان رسیدن به چروکیدگی نهایی کاهش می‌یابد. هم‌چنین افزایش فرکانس باعث افزایش سطح تماس و افزایش نرخ انتقال حرارت از هوا به ذرات می‌شود که باعث افزایش میزان چروکیدگی و کاهش زمان رسیدن به چروکیدگی نهایی می‌شود. این نتایج برای حالتی که بخشی از رطوبت موجود در هوای ورودی توسط جاذب سیلیکاژل گرفته می‌شود در شکل‌های 5-7 نشان داده شده است. برای حالتی که هوای ورودی به خشک‌کن با رطوبت کم‌تری وارد بستر خشک‌کن شود چروکیدگی افزایش و زمان رسیدن به چروکیدگی نهایی کاهش می‌یابد.

3-3- مدل‌سازی سینتیکی فرایند خشک شدن و میزان چروکیدگی میوه زالزالک

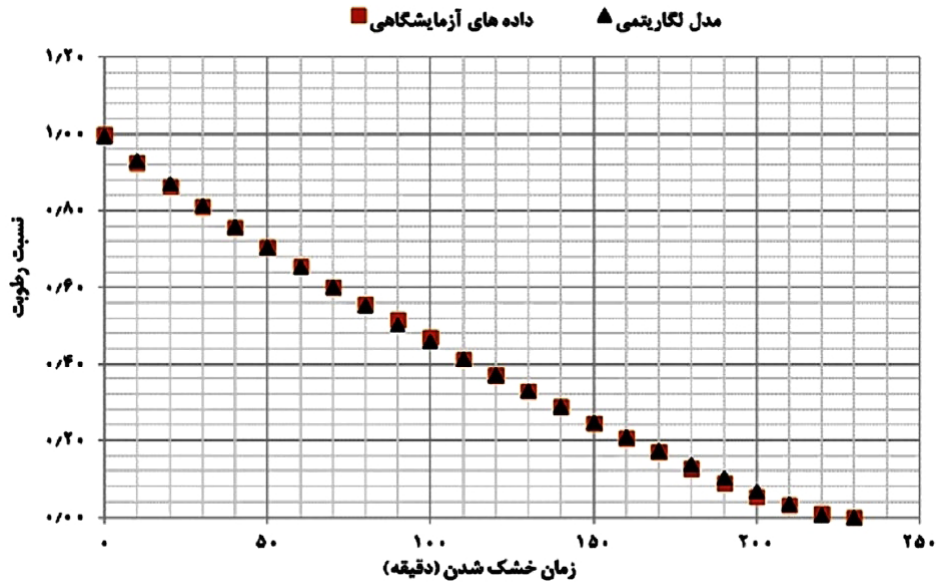
نتایج آماری حاصل از برازش داده‌ها برای سینتیک خشک خشک کردن و تغییرات میزان چروکیدگی به‌ترتیب در جدول‌های 3-6 نشان داده شده است. با توجه به مشخصه‌های آماری (R^2، RMSE، χ^2) می‌توان گفت که برای سینتیک خشک کردن میوه زالزالک مدل لگاریتمی به‌عنوان بهترین مدل با مقادیر R^2 =0/999144، RMSE =0/008959 و χ^2 =0/0000917 و هم‌چنین به‌منظور پیش‌بینی میزان چروکیدگی میوه زالزالک مدل رتی به‌عنوان بهترین مدل با مقادیر R^2 =0/999646، RMSE =0/008379 و χ^2 =0/0000867 پیشنهاد می‌شود. مدل‌های پیشنهادی داده‌های آزمایشگاهی را با دقت قابل قبولی برازش کرده و در تمام محدوده شرایط عملیاتی آزمایشات انجام شده تطابق خوبی با داده‌های تجربی مشاهده شده است. شکل‌های 8 و 9 نتیجه حاصل از برازش این مدل‌ها را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

4- نتیجه‌گیری

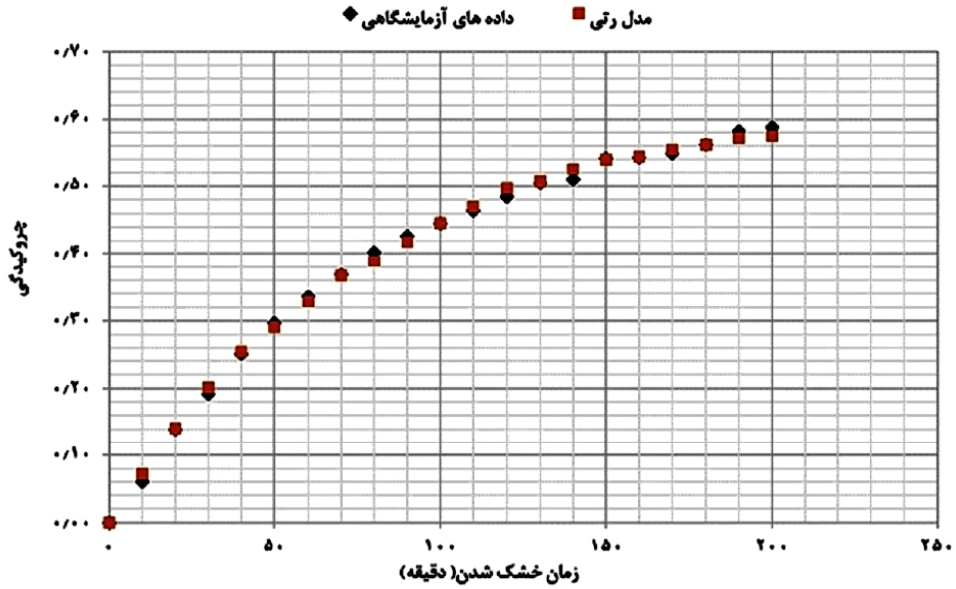
در این مطالعه اثر پارامترهای عملیاتی مختلف از جمله دما، سرعت جابه‌جایی و رطوبت هوای ورودی به خشک‌کن و میزان ارتعاش دستگاه بر نرخ خشک شدن و هم‌چنین میزان چروکیدگی میوه زالزالک در یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان کرد که افزایش پارامترهای عملیاتی شامل دما و سرعت جابه‌جایی هوای ورودی به خشک‌کن و هم‌چنین افزایش میزان ارتعاش دستگاه نرخ خشک شدن و میزان چروکیدگی میوه زالزالک را افزایش و زمان خشک شدن و زمان رسیدن به چروکیدگی نهایی را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر کاهش رطوبت نسبی هوای ورودی به خشک‌کن نرخ خشک شدن و میزان چروکیدگی میوه زالزاک را افزایش و زمان خشک شدن و زمان رسیدن به چروکیدگی نهایی را کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اثر کاهش رطوبت هوای ورودی به خشک‌کن بر افزایش سرعت خشک‌شدن برای دماهای بالاتر هوای گرم ورودی به خشک‌کن بیش‌تر است. از طرف دیگر اثر کاهش رطوبت هوای ورودی به خشک‌کن در سرعت‌های بالاتر هوای ورودی به خشک‌کن بر زمان خشک‌شدن نمونه‌ها محسوس‌تر است. هم‌چنین اثر کاهش میزان رطوبت هوای ورودی به خشک‌کن بر میزان کاهش زمان خشک شدن نمونه‌ها در

Archive of SID

www.SID.ir



شکل(8) پیش‌بینی تغییرات نسبت رطوبت با زمان برای زالزالک توسط مدل لگاریتمی و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی (دما 50 درجه سانتی‌گراد، سرعت 0/92 متر بر ثانیه و فرکانس 7/5 هرتز)



شکل (9) پیش‌بینی تغییرات چروکیدگی با زمان برای زالزالک توسط مدل رتی و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی (دما 60 درجه سانتی‌گراد، سرعت 0/92 متر بر ثانیه و فرکانس 7/5 هرتز)

فرکانس‌های بالاتر دستگاه محسوس‌تر است. افزایش فرکانس باعث افزایش سطح تماس و افزایش نرخ انتقال حرارت از هوا به ذرات می‌شود که باعث افزایش میزان چروکیدگی و کاهش زمان رسیدن به چروکیدگی نهایی می‌شود. در نهایت، در بین مدل‌های ریاضی ارائه شده، مدل لگاریتمی و مدل رتی به‌ترتیب برای پیش‌بینی رفتار خشک شدن میوه زالزالک و میزان چروکیدگی آن در یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی به عنان مناسب‌ترین مدل‌ها پیشنهاد می‌شود.

www.SID.ir

جدول (3) نتایج آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های ریاضی (مدل نیوتن، پیج، هندرسون و پابیس و لگاریتمی) برای سینتیک خشک شدن زالزالک بدون کنترل رطوبت

مدل	دما (°C)	فرکانس (HZ)	سرعت (m/s)	R^2	χ^2	RMSE
نیوتن	70	7/5	0/92	0/951375	0/005462	0/071401
پیج	70	7/5	0/92	0/996826	0/000492	0/020526
هندرسون و پابیس	70	7/5	0/92	0/962169	0/004968	0/065254
لگاریتمی	70	7/5	0/92	0/991708	0/001185	0/030516
نیوتن	60	7/5	0/92	0/962433	0/004009	0/061787
پیج	60	7/5	0/92	0/99566	0/000488	0/021003
هندرسون و پابیس	60	7/5	0/92	0/972552	0/002793	0/05285
لگاریتمی	60	7/5	0/92	0/995562	0/00526	0/021235
نیوتن	50	7/5	0/92	0/944399	0/005192	0/070592
پیج	50	7/5	0/92	0/982227	0/001733	0/039235
هندرسون و پابیس	50	7/5	0/92	0/953484	0/004272	0/062694
لگاریتمی	50	7/5	0/92	0/998842	0/000118	0/01019
نیوتن	50	8/2	0/92	0/944169	0/005604	0/073214
پیج	50	8/2	0/92	0/986291	0/001443	0/036299
هندرسون و پابیس	50	8/2	0/92	0/955552	0/004511	0/064178
لگاریتمی	50	8/2	0/92	0/999388	0/000067	0/007662
نیوتن	50	6/8	0/92	0/927809	0/007169	0/083147
پیج	50	6/8	0/92	0/984729	0/001577	0/038266
هندرسون و پابیس	50	6/8	0/92	0/946976	0/0056029	0/072124
لگاریتمی	50	6/8	0/92	0/999087	0/000098	0/009353
نیوتن	50	7/5	1/06	0/92754	0/007272	0/083403
پیج	50	7/5	1/06	0/945607	0/005728	0/072316
هندرسون و پابیس	50	7/5	1/06	0/930773	0/007003	0/079965
لگاریتمی	50	7/5	1/06	0/947291	0/005921	0/071753

جدول (4) نتایج آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های ریاضی (مدل نیوتن، پیج، هندرسون و پابیس و لگاریتمی) برای سینتیک خشک شدن زالزالک با کنترل رطوبت

مدل	دما (°C)	فرکانس (HZ)	سرعت (m/s)	R^2	χ^2	RMSE
نیوتن	70	7/5	0/92	0/959115	0/0047	0/065635
پیج	70	7/5	0/92	0/988305	0/001481	0/035128
هندرسون و پابیس	70	7/5	0/92	0/964315	0/004518	0/061362
لگاریتمی	70	7/5	0/92	0/997084	0/00041	0/017525
نیوتن	60	7/5	0/92	0/957283	0/004748	0/066965

Arhive of SID

www.SID.ir

ادامه جدول (4) نتایج آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های ریاضی(مدل نیوتن، پیج، هندرسون و پابیس و لگاریتمی) برای سینتیک خشک شدن زالزالک با کنترل رطوبت

مدل	دما (°C)	فرکانس (HZ)	سرعت (m/s)	R^2	χ^2	RMSE
پیج	60	7/5	0/92	0/994839	0/00061	0/023281
هندرسون و پابیس	60	7/5	0/92	0/967685	0/003823	0/058294
لگاریتمی	60	7/5	0/92	0/994885	0/000644	0/023171
نیوتن	50	7/5	0/92	0/947113	0/005173	0/070409
پیج	50	7/5	0/92	0/984564	0/00158	0/038063
هندرسون و پابیس	50	7/5	0/92	0/954597	0/004385	0/063401
لگاریتمی	50	7/5	0/92	0/999144	0/0000917	0/008959
نیوتن	50	8/2	0/92	0/934419	0/006804	0/080501
پیج	50	8/2	0/92	0/982565	0/001907	0/041538
هندرسون و پابیس	50	8/2	0/92	0/947557	0/005736	0/072042
لگاریتمی	50	8/2	0/92	0/997907	0/000241	0/014382
نیوتن	50	6/8	0/92	0/920454	0/00828	0/089229
پیج	50	6/8	0/92	0/984393	0/001695	0/039555
هندرسون و پابیس	50	6/8	0/92	0/935908	0/006581	0/07794
لگاریتمی	50	6/8	0/92	0/997546	0/000278	0/015672
نیوتن	50	7/5	1/06	0/95975	0/004146	0/062834
پیج	50	7/5	1/06	0/991072	0/000969	0/029603
هندرسون و پابیس	50	7/5	1/06	0/968539	0/00309	0/05591
لگاریتمی	50	7/5	1/06	0/998019	0/000227	0/013938

جدول(5)نتایج آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های ریاضی(مدل مایور، رتی، مولت) برای تغییرات چروکیدگی زالزالک بدون کنترل رطوبت

مدل	دما (°C)	فرکانس (HZ)	سرعت (m/s)	R^2	χ^2	RMSE
مایور	70	7/5	0/92	0/995382	0/000244	0/013849
رتی	70	7/5	0/92	0/999472	0/000159	0/010648
مولر	70	7/5	0/92	0/87632	0/006899	0/073623
مایور	60	7/5	0/92	0/994481	0/000189	0/012738
رتی	60	7/5	0/92	0/999646	0/0000867	0/008379
مولر	60	7/5	0/92	0/702274	0/013464	0/101283
مایور	50	7/5	0/92	0/99591	0/000157	0/011772
رتی	50	7/5	0/92	0/998518	0/0000598	0/007085
مولر	50	7/5	0/92	0/723997	0/010618	0/096665
مایور	50	8/2	0/92	0/996613	0/000132	0/010709
رتی	50	8/2	0/92	0/99802	0/0000812	0/008189

Archive of SID

www.SID.ir

ادامه جدول(5) نتایج آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های ریاضی(مدل مایور، رتی، مولت) برای تغییرات چروکیدگی زالزالک بدون کنترل رطوبت

مدل	دما (°C)	فرکانس (HZ)	سرعت (m/s)	R^2	χ^2	RMSE
مولر	50	8/2	0/92	0/754902	0/010606	0/091106
مایور	50	6/8	0/92	0/995975	0/000144	0/011581
رتی	50	6/8	0/92	0/995968	0/000148	0/011509
مولر	50	6/8	0/92	0/761311	0/008844	0/088864
مایور	50	7/5	1/06	0/99585	0/000156	0/011665
رتی	50	7/5	1/06	0/996725	0/00013	0/010363
مولر	50	7/5	1/06	0/823108	0/007412	0/076163

جدول (6) نتایج آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های ریاضی(مدل مایور، رتی، مولت) برای تغییرات چروکیدگی زالزالک با کنترل رطوبت

مدل	دما (°C)	فرکانس (HZ)	سرعت (m/s)	R^2	χ^2	RMSE
مایور	70	7/5	0/92	0/991288	0/00048	0/018967
رتی	70	7/5	0/92	0/995827	0/00023	0/013126
مولر	70	7/5	0/92	0/852614	0/004057	0/020349
مایور	60	7/5	0/92	0/997756	0/000083	0/008615
رتی	60	7/5	0/92	0/998806	0/000050	0/006284
مولر	60	7/5	0/92	0/872421	0/004919	0/021186
مایور	50	7/5	0/92	0/998132	0/0000688	0/007943
رتی	50	7/5	0/92	0/998495	0/000058	0/007120
مولر	50	7/5	0/92	0/787412	0/008205	0/08473
مایور	50	8/2	0/92	0/999075	0/0000325	0/00543
رتی	50	8/2	0/92	0/999101	0/0000341	0/005352
مولر	50	8/2	0/92	0/761634	0/008398	0/087167
مایور	50	6/8	0/92	0/999252	0/0000283	0/005009
رتی	50	6/8	0/92	0/999411	0/0000233	0/004444
مولر	50	6/8	0/92	0/781111	0/008228	0/014396
مایور	50	7/5	1/06	0/998625	0/00005648	0/007149
رتی	50	7/5	1/06	0/998641	0/00005893	0/007108
مولر	50	7/5	1/06	0/853791	0/006008	0/07372
لگاریتمی	50	7/5	1/06	0/947291	0/005921	0/071753

Archive of SID

www.SID.ir

نمادها

A, B, C	m	قطرها در سه جهت
V_0	m^3	حجم اولیه نمونه
V_t	m^3	حجم نمونه در هر لحظه
D_0	m	قطر اولیه نمونه
D_t	m	قطر نمونه در هر لحظه
sh	بدون بعد	چروکیدگی
M_d	kg water/ kg dry solid	محتوی رطوبت نمونه بر مبنای خشک
M_t	kg	رطوبت در هر لحظه
M_0	kg	رطوبت اولیه
MR	بدون بعد	نسبت رطوبت
W_w	kg	وزن محصول تر
W_d	kg	وزن محصول خشک
R^2	بدون بعد	ضریب همبستگی
χ^2	بدون بعد	کای اسکور
$RMSE$	بدون بعد	ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها
N	بدون بعد	تعداد آزمایشات
Z	بدون بعد	تعداد ثوابت مدل
$P_{exp,i}$	بدون بعد	نسبت رطوبت یا چروکیدگی آزمایشی
$P_{pred,i}$	بدون بعد	نسبت رطوبت یا چروکیدگی پیش‌بینی شده

منابع

[1] Unal, H.G., Sacilik, K. (2011). Drying characteristics of hawthorn fruits in a convective hot-air dryer. *J. Food Process. Preserv.* 35(2), 272-279.

[2] Guo, R., Pittler, M.H., Ernst, E. (2008). Hawthorn extract for treating chronic heart failure. The Cochrane Library.

[3] Aral, S., Beşe, A.V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (Crataegus spp.): effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chem*. 210, 577-584.

[4] Ochoa, M., et al., (2002). Shrinkage during convective drying of whole rose hip (*Rosa rubiginosa L.*) fruits. *LWT-Food Sci. Technol.* 35(5), 400-406.

[5] Koyuncu, T., Pinar, Y., Lule, F. (2007). Convective drying characteristics of azarole red (Crataegus monogyna Jacq.) and yellow (Crataegus aronia Bosc.) fruits. *J. Food Eng.* 78(4), 1471-1475.

[6] Debaste, F., et al., (2008). A new modeling approach for the prediction of yeast drying rates in fluidized beds. *J. Food Eng.* 84(2), 335-347.

[7] Białobrzewski, I., et al., (2008). Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles–Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 51(19), 4704-4716.

[8] Moreno, R., Rios, R., Calbucura, H. (2000). Batch vibrating fluid bed dryer for sawdust particles: experimental results. *Drying Technol*. 18(7), 1481-1493.

[9] Stakić, M., Urošević, T. (2011). Experimental study and simulation of vibrated fluidized bed drying. *Chem. Eng. Process.* 50(4), 428-437.

[10] Jaraiz, E., Kimura, S., Levenspiel, O. (1992). Vibrating beds of fine particles: estimation of interparticle forces from expansion and pressure drop experiments. *Powder Technol*. 72(1), 23-30.

[11] de Lima, A., Queiroz, M., Nebra, S. (2002). Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. *Chem. Eng. J.* 86(1), 85-93.

[12] Ratti, C., (1994). Shrinkage during drying of foodstuffs. *J. Food Eng*. 23(1), 91-105.

[13] Hatamipour, M. and D. Mowla, (2002). Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *J. Food Eng.* 55(3), 247-252.

[14] Chayjan, R.A., Alizade, H.H.A., Shadidi, B. (2012). Modeling of some pistachio drying characteristics in fix, semi fluid and fluid bed dryer. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal.* 14(2), 143-154.

Archive of SID

www.SID.ir

[15] Amiri Chayjan, R., Kaveh, M. (2014). Physical parameters and kinetic modeling of fix and fluid bed drying of terebinth seeds. *J. Food Process. Preserv*. 38(3), 1307-1320.

[16] Doymaz, İ., (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Chem. Eng. Process*. 47(5), 914-919.

[17] Hii, C., Law, C., Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *J. Food Eng*. 90(2), 191-198.

[18] Ertekin, C., Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J. Food Eng.* 63(3), 349-359.

[19] Menges, H.O., Ertekin, C. (2006). Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energy Convers. Manage*. 47(15), 2337-2348.

[20] Sadeghi, M., Khoshtaghaza, M. (2012). Vibration effect on particle bed aerodynamic behavior and thermal performance of black tea in fluidized bed dryers. *J. Agr.Sci. Technol.* 14(4), 781-788.

[21] Marring, E., Hoffmann, A., Janssen, L. (1994). The effect of vibration on the fluidization behaviour of some cohesive powders. *Powder Technol*. 79(1), 1-10.

[22] Yadollahinia, A., Jahangiri, M. (2009). Shrinkage of potato slice during drying. *J. Food Eng*. 94(1), 52-58.

[23] Ayensu, A., (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Sol. Energy*. 59(4), 121-126.

[24] Diamante, L.M., Munro, P.A. (1993). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Sol. Energy.* 51(4), 271-276.

[25] Zhang, Q., Litchfield, J. (1991). An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technol*. 9(2), 383-395.

[26] Akpinar, E.K., Bicer, Y., Midilli, A. (2003). Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. *J. Food. Process. Eng.* 26(6), 515-541.

[27] Mayor, L., Sereno, A. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *J. Food Eng*. 61(3), 373-386.

Arhive of SID

www.SID.ir