مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک‌شدن لایه نازک میوه گلابی و بررسی اثر دما و سرعت هوای خشک کن بر تغییر رطوبت نسبی هوای خروجی

محمد مهدی حیدری[۱]، سید مهدی نصیری[۲*]

۱- دانشجوی ارشد بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه شیراز
۲- استادیار بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه شیراز

(تاریخ دریافت: ۹۱/۸/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۲/۳/۸)

چکیده

در این تحقیق تغییرات رطوبت نسبی هوای خشک کن کابینتی (قفسه ای) در دهانه ورودی و خروجی طی تغییر کردن دما و سرعت هوای خشک کن و رفتار خشک‌شدن نمونه‌های گلابی رقم شاه میوه در خشک‌کن قفسه‌ای بر اساس مدل‌های ریاضی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه سطح دما (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد) و سه سطح سرعت هوای (۰/۵، ۱ و ۱/۵ متربرثانیه) خشک‌کن انجام گرفت. کمترین میزان رطوبت نسبی در دهانه ورودی خشک کن (پس از رسیدن دمای هوا به دمای هوای خشک کن) در دمای خشک کردن ۶۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱/۷۳ درصد و بیشترین آن در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۹/۸۸ درصد بود. هشت مدل ریاضی خشک شدن بر داده‌های آزمایش برازش شد و انتخاب بهترین مدل بر اساس شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2) و مربع کای (χ^2) صورت گرفت. به منظور ارزیابی مدل‌ها از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای سوگیری(MBE) و درصد میانگین خطای نسبی(ARE) محاسبه شده برای داده‌های جدید استفاده شد. مدل تقریب انتشار با بیشترین مقدار ضریب تبیین (۰/۹۹۸) و کمترین مقادیر مربع کای (۰/۰۰۰۱)، ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۰۱)، میانگین خطای سوگیری (۰/۰۰۰۸) و میانگین خطای نسبی (۵/۲٪) بهترین مدل برای بیان رفتار گلابی رقم شاه میوه طی فرآیند خشک شدن بود.

کلید واژگان: رطوبت نسبی هوا، رگرسیون غیرخطی، محتوای رطوبتی، مدل‌سازی ریاضی، میوه گلابی.

*مسئول مکاتبات: nasiri@shirazu.ac.ir

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]

۱- مقدمه

به طور کلی بیشتر میوه‌ها به علت داشتن آب زیاد فساد پذیرند و پس از برداشت باید بلافاصله مصرف شوند و یا اینکه به روش خاصی نگهداری شوند. یکی از این روش‌ها خشک کردن میوه‌ها می‌باشد. خشک کردن میوه‌ها و سبزی‌ها یکی از قدیمی‌ترین روش‌های حفظ مواد غذایی بوده و هم اکنون نیز یک شیوه کاربردی برای افزایش طول عمر نگهداری آن‌ها است. هنگامی که مقدار قابل توجهی رطوبت از یک میوه خارج شود زمان نگهداری آن از طریق مهار کردن رشد میکروبی و کاهش فعالیت آنزیمی افزایش می‌یابد. مزیت دیگر خشک کردن میوه‌ها که می‌توان از آن به عنوان مهم‌ترین مزیت خشک کردن نام برد، افزایش ظرفیت نگهداری ماده خشک است. به عبارت دیگر خشک کردن میوه کاهش اندازه‌ی آن را در برداشته که این امر برای حمل و نقل و ذخیره سازی قابل اهمیت است. از سوی دیگر با خشک کردن میوه‌ها دیگر نیازی به سیستم سردخانه‌ی گران قیمت برای حفظ آن‌ها نیست [۱].

از میان میوه‌ها خشک کردن انگور، انجیر، آلو، زرد آلو و هلو مرسوم و در سطح تجاری انجام می شود و خشک کردن سیب، گلابی، موز و آناناس با توجه به سود آوری آن‌ها اخیراً مورد توجه خاص قرار گرفته است [۲]. روش تجاری خشک کردن میوه‌ها با عبور دادن هوای گرم از روی محصول در خشک‌کن‌های قفسه‌ای صورت می گیرد [۳].

گلابی از جمله مهم‌ترین میوه‌های دانه دار و از تیره‌ی وردسانان می‌باشد. جنس گلابی سا شامل حدود ۲۲ گونه می‌باشد. ایران با داشتن بیش از ۱۰ گونه یکی از منابع ژنتیکی مهم دنیا محسوب می‌شود . ریزش میوه گلابی مخصوصاً رقم شاه میوه قبل از برداشت باعث ایجاد خراش و لکه بر روی میوه شده و از ارزش اقتصادی آن می‌کاهد. بر این اساس می‌توان به جای عرضه مستقیم محصول به بازار، آن را فرآوری نمود تا به شکلی دیگر و با ارزش بالاتر به بازار عرضه شود. یکی از روش‌های فرآوری گلابی خشک کردن آن است. خشک کردن گلابی در ایران به صورت سنتی و با استفاده از تابش خورشید انجام می‌شود. این شیوه خشک کردن دارای مشکلات بهداشتی از قبیل قرار گرفتن در معرض انواع حشرات، کرم‌ها، موش‌ها، پرندگان و گرد و غبار می‌باشد. صرف نظر از مشکلات بهداشتی، این شیوه خشک کردن به میزان زیادی به شرایط آب و هوا وابسته است [۴]، [۵]. بنابراین روش های تجاری ضمن سرعت بخشیدن به عملیات خشک کردن، شرایط بهداشتی قابل قبولی را نیز به ارمغان می آورد. یکنواختی خشک شدن برش های میوه نیز از جمله دیگر مزایای روش های تجاری به شمار می آید. اما بهینه سازی مصرف انرژی و افزایش بهره وری اقتصادی از جمله مواردی است که در تعیین پارامتر های موثر در روش های تجاری دارای اهمیت می باشد.

با توجه به موارد ذکر شده، پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات رطوبت نسبی هوا در دهانه ورودی و خروجی به منظور بهینه نمودن دما و هوای خشک کن برای استفاده از بیشترین پتانسیل هوای خشک کردن انجام گرفت. همچنین سینتیک خشک شدن ورقه‌های گلابی در خشک کن قفسه‌ای و انتخاب مدل مناسب خشک شدن به منظور تعیین زمان رسیدن به محتوای رطوبتی مناسب و جلوگیری از صرف انرژی بیشتر برای خشک شدن بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲- ۱- آماده سازی نمونه

میوه های گلابی شاه میوه از یک باغ واقع در شهرستان خمینی شهر به صورت سبز (اصطلاحاً سرد خانه‌ای) تهیه و در یخچال در دمای ۵-۳ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. میوه‌ها قبل از انجام آزمون به مدت ۲۴ ساعت در ژرمیناتور (ساخت شرکت ژال تجهیز، مدل JTGL 100 ، ساخت ایران) در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۵ درصد قرار داده شدند تا به شرایط تعادل یکسانی برسند. نمونه‌هایی از قسمت بالایی هر میوه گلابی با ابعاد ۲×۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر تهیه شدند. این نمونه‌ها فاقد هسته و پوست بود. انتخاب این ابعاد با این هدف صورت گرفت که میوه نهایی خشک شده دارای ابعادی در حدود یک حبه‌ی قند باشد تا بتوان آن را به صورت مستقیم به بازار

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]

عرضه کرد. برای افزایش سرعت نمونه‌گیری و بدست آوردن نمونه‌های یکنواخت از لحاظ ابعاد، یک دستگاه نمونه‌گیر میوه فکی مجهز به ۵ عدد تیغه (تیغه موکت بر، ساخت کره) که در فواصل ۲/۵ سانتی متری نسبت به هم قرار گرفته بودند، ساخته شد. به منظور جلوگیری از اکسید شدن سطحی نمونه‌ها پس از جداسازی از میوه، نمونه ها به مدت یک دقیقه در محلول ۱٪ سدیم متابی‌سولفیت ($Na_2S_2O_5$) قرار داده شدند [۵]. قبل از قرار دادن نمونه‌ها در خشک کن، رطوبت سطحی ناشی از قرار گرفتن نمونه‌ها در محلول به کمک فیلتر کاغذی از سطح آن‌ها گرفته شد. از تعداد ۳۰ نمونه بریده شده برای تعیین رطوبت اولیه استفاده شد.

۲ -۲- خشک کردن

به منظور بررسی اثر هوای خشک‌کن بر محصول سه دما و سه سرعت هوا برای خشک کردن گلابی در خشک کن کابینتی انتخاب شد. دمای هوای خشک کن با توجه به پژوهش‌های انجام شده، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار گرفت [۶]، [۷]. عملا این محدوده دمایی امکان استفاده از خشک کن های تجاری مجهز به منبع حرارتی خورشیدی را نیز ممکن می سازد. سرعت هوای مورد استفاده برای خشک کردن نیز ۰/۵، ۱ و ۱/۵متر بر ثانیه تنظیم گردید. این محدوده‌ی سرعت هوا در تحقیقات گذشته نیز استفاده و پیشنهاد گردیده بود [۴]، [۸].

برای انجام آزمایش‌ها یک خشک‌کن کابینتی آزمایشگاهی (شکل ۱) در بخش مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شیراز ساخته شد و مورد استفاده قرار گرفت. تعداد ۶ قطعه آماده شده به عنوان تکرار های آزمایش بر روی سینی توری شکل خشک کن قرار داده شد. این توری به صورت معلق در فضای خشک کن به زیر ترازوی دیجیتال (A&D مدل GF600 با دقت ۰/۰۰۱± گرم) آویزان شد تا امکان توزین نمونه ها بدون خارج کردن آن ها از داخل خشک کن را میسر سازد. برای کنترل دمای هوای خشک کن از یک کنترل کننده دما (آتبین سری SINUS، ساخت ایران) استفاده شد. حسگر این کنترل کننده از نوع ترموکوپل مدل PT100 با دقت ۰±/۱ درجه سانتی‌گراد بود. تغییر سرعت هوا نیز با تغییر گردش دمنده با استفاده از دستگاه الکتریکی کنترل دور (اینورتور) (هیوندای مدل N50، ساخت کشور کره) صورت گرفت. به منظور اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوا از دو حسگر روترونیک (مدل HC2-s ، ساخت کشور سوییس) استفاده شد که یکی از این حسگرها در دهانه ورودی خشک‌کن و بعد از تونل گرم‌کن و دیگری در دهانه خروجی خشک‌کن قرار داده شد. دقت این حسگر برای دما ۰/۱± درجه سانتی‌گراد و برای رطوبت نسبی ۰/۸± درصد بود. برای دریافت خروجی آنالوگ این حسگرها و تبدیل و ثبت آن‌ها با مقادیر دما و رطوبت نسبی، از ضبط کننده داده (Data Taker مدل DT80G ، ساخت کشور استرالیا) استفاده شد. اندازه گیری رطوبت نسبی در دهانه ورودی و خروجی با این حسگر هایج در هر دقیقه از شروع خشک شدن صورت گرفت. در طی خشک شدن وزن نمونه‌ها از طریق اتصال مستقیم ترازوی دیجیتال به رایانه در هر ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری و ثبت شد. در هر بار قرائت وزن به مدت ۳۰ ثانیه حدود ۱۵ داده وزن، ثبت گردید. وزن خشک نمونه‌ها با قرار دادن آن‌ها در داخل آون با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت بدست آمد. در نهایت رطوبت نمونه‌ها با معادله (۱) محاسبه شد.

$$M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \qquad (۱)$$

که M_d رطوبت نمونه‌های گلابی بر پایه خشک (درصد) ، W_w وزن نمونه‌های گلابی در طی خشک شدن و W_d وزن خشک نمونه‌ها می‌باشد. برای مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک شدن لایه نازک گلابی از نسبت رطوبت در طی خشک شدن توده استفاده شد. نسبت رطوبت که مشخص کننده فرآیند خشک کردن است با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک شدن با رابطه (۲) محاسبه گردید.

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e} \qquad (۲)$$

که MR نسبت رطوبت، M_d رطوبت توده در لحظه

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]

حاضر بر پایه خشک، M_e رطوبت تعادلی و M_0 رطوبت اولیه توده محصول است. براساس تحقیقات انجام شده برای محصولات با رطوبت زیاد معادله (۲) به صورت معادله (۳) ساده می‌گردد [۹]. در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست.

$$MR=\frac{M_d}{M_0} \quad (۳)$$

مدل‌های رگرسیون تغییرات رطوبت برازش شده برای ۷۰ درصد از داده‌ها در طی خشک شدن براساس متغیر مستقل زمان به وسیله نرم‌افزار SPSS ۱۶ استخراج شد. از دو معیار ضریب تبیین (R^2) و مربع کای (χ^2) برای سنجش بهترین مدل استفاده شد.

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

که $M_{exp,i}$ رطوبت اندازه‌گیری گلابی و $M_{pre,i}$ رطوبت متناظر پیش‌بینی شده گلابی توسط مدل، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و n تعداد ثابت‌های به کار رفته در معادله است.

به منظور ارزیابی مدل‌ها (جدول ۱) از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای سوگیری (MBE) و میانگین خطای نسبی (ARE%) محاسبه شده برای ۳۰ درصد باقیمانده‌ی دادها استفاده شد.

ریشه مربعات خطا: (۵)

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(M_{exp}-M_{pre})^2}$$

میانگین خطای سوگیری: (۶)

$$MBE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(M_{exp}-M_{pre})$$

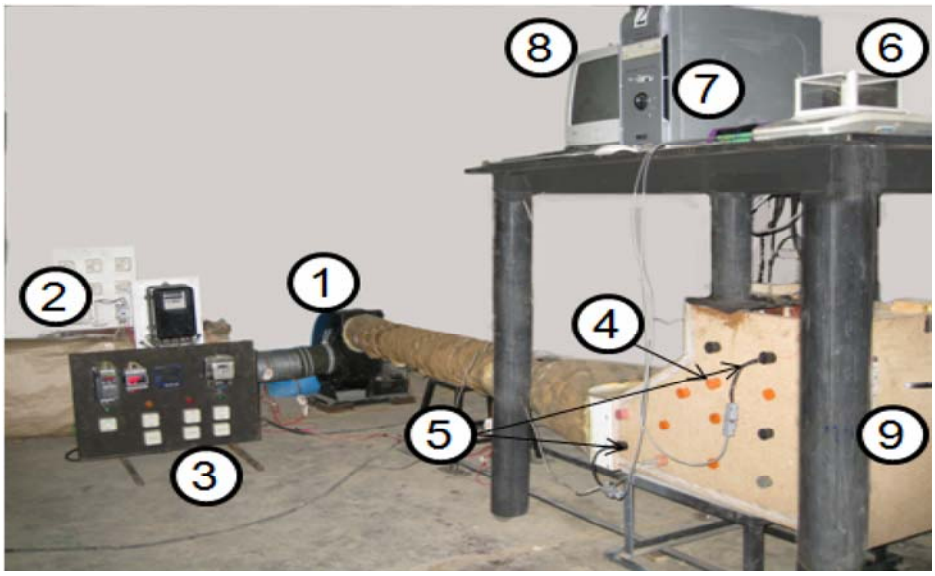
میانگین خطای نسبی: (۷)

$$ARE=\frac{100}{N}\times\sum\frac{|M_{exp}-M_{pre}|}{M_{exp}}$$

جدول ۱ مدل های ریاضی برازش شده بر روی داده های خشک کردن لایه نازک

نام مدل	رابطه ریاضی
نیوتون [۱۰]	$MR=\exp(-kt)$
پیج [۱۱]	$MR=\exp(-kt^n)$
مدل اصلاح شده پیج [۱۲]	$MR=a\exp(-kt^n)$
هندرسون و پابیس [۱۳]	$MR=a\exp(-kt)$
لگاریتمی [۱۴]	$MR=a\exp(-kt)+c$
وانگ و سینگ [۹]	$MR=1+at+bt^2$
دو جمله نمایی [۱۵]	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$
تقریب انتشار [۱۶]	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kbt)$

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]



شکل ۱ سامانه خشک کن: اجزای این خشک کن شامل ۱- دمنده ۲- تونل گرم کن هوا ۳- سیستم کنترل سرعت و دمای خشک کن ۴- اتاقک خشک کن ۵- سنسور های اندازه گیری دما و رطوبت نسبی در دهانه ورودی و خروجی ۶- ترازو ۶-دیتالاگر ۸-کامپیوتر ۹۰- در خشک کن.

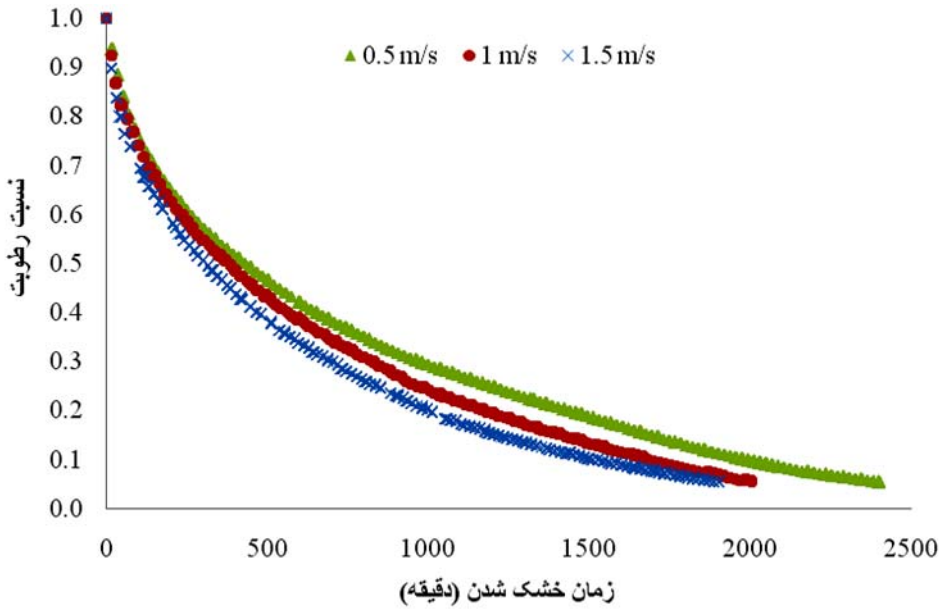
۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی خشک شدن لایه نازک گلابی

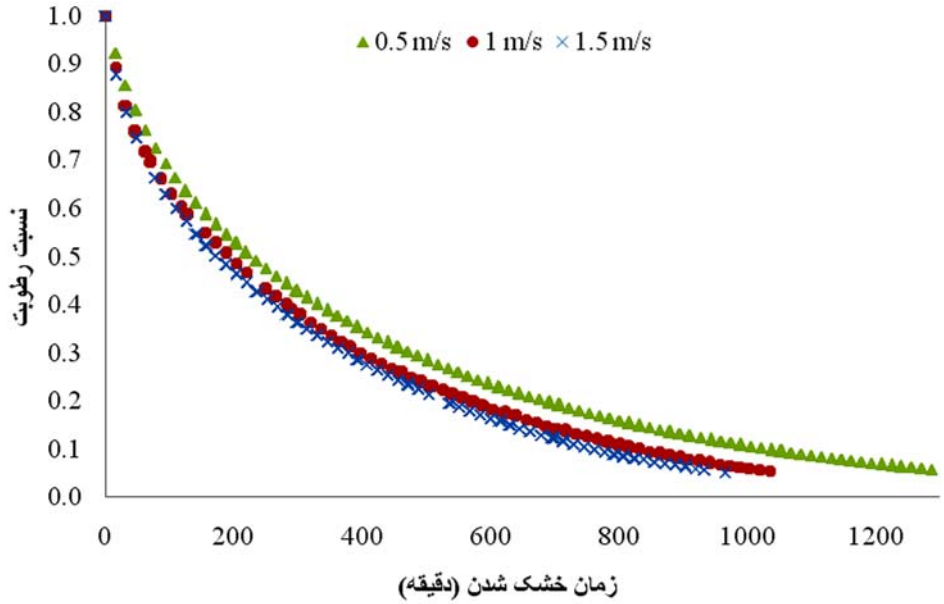
میزان محتوای رطوبتی اولیه نمونه‌ها میانگین ۳۰ نمونه تصادفی برابر با ۱±۸۲ درصد بر پایه تر محاسبه گردید. خشک شدن تا زمان رسیدن به محتوای رطوبتی ۲۰ درصد بر پایه تر ادامه یافت. این میزان با توجه به تحقیق انجام شده توسط Guine (۲۰۰۶) انتخاب شد. این محقق نشان داد که فعالیت آبی در این محتوای رطوبتی در حدی است که فعالیت آنزیمی و میکروبی گلابی را کاهش داده و گلابی خشک شده کیفیت خود را از دست نمی‌دهد.

تغییرات نسبت رطوبتی نمونه‌های گلابی طی روش‌های مختلف خشک شدن لایه نازک در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها مشخص شده در دمای ثابت هوای خشک کن، با افزایش سرعت هوا مدت زمان خشک شدن به طور معنی داری کاهش یافته است. در شکل ۵ نیز به منظور نمایش تغییرات دمای هوای خشک کن در روند خشک شدن گلابی، خشک کردن در دماهای مختلف و در سرعت ۱ متر در ثانیه برای نمونه آورده شده است.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]

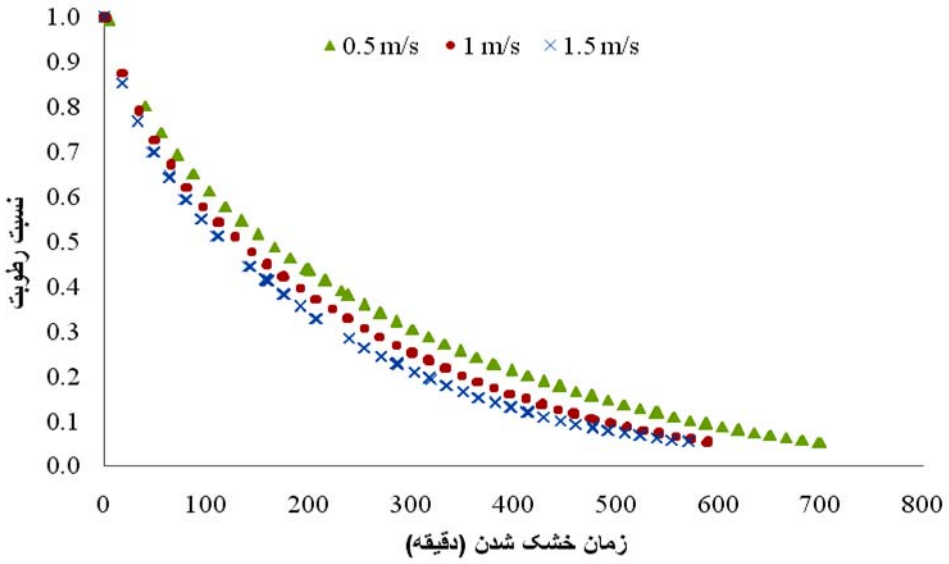


شکل ۲ نمودار تغییرات نسبت رطوبت به زمان در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت‌های مختلف

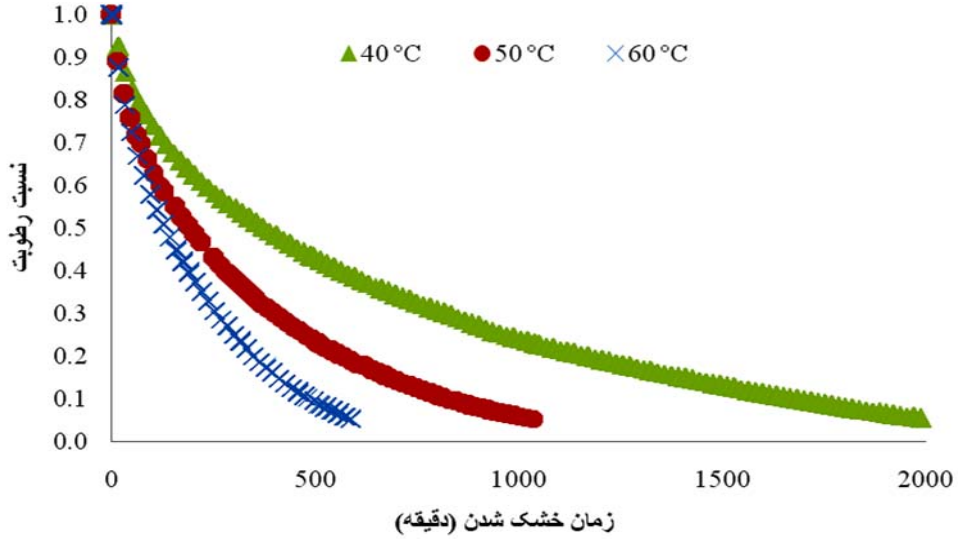


شکل ۳ نمودار تغییرات نسبت رطوبت به زمان در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت‌های مختلف

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]



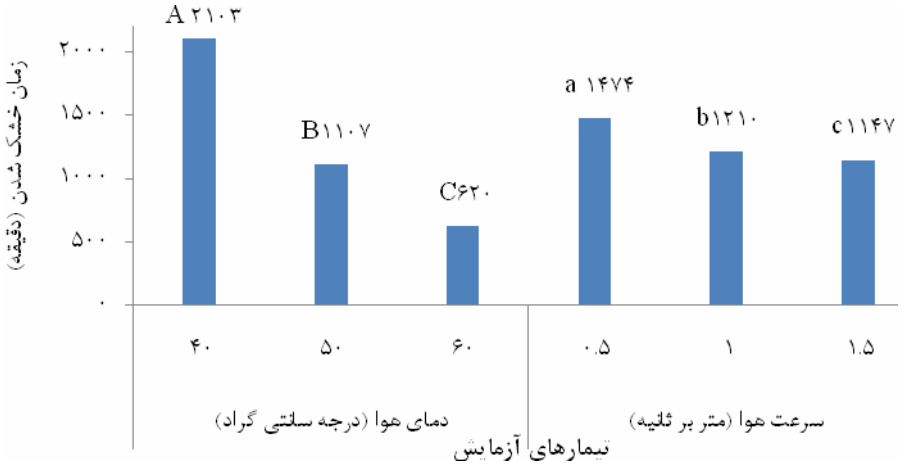
شکل ۴ نمودار تغییرات نسبت رطوبت به زمان در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت‌های مختلف



شکل ۵ نمودار تغییرات نسبت رطوبت به زمان در سرعت ۱ متر بر ثانیه و دماهای مختلف

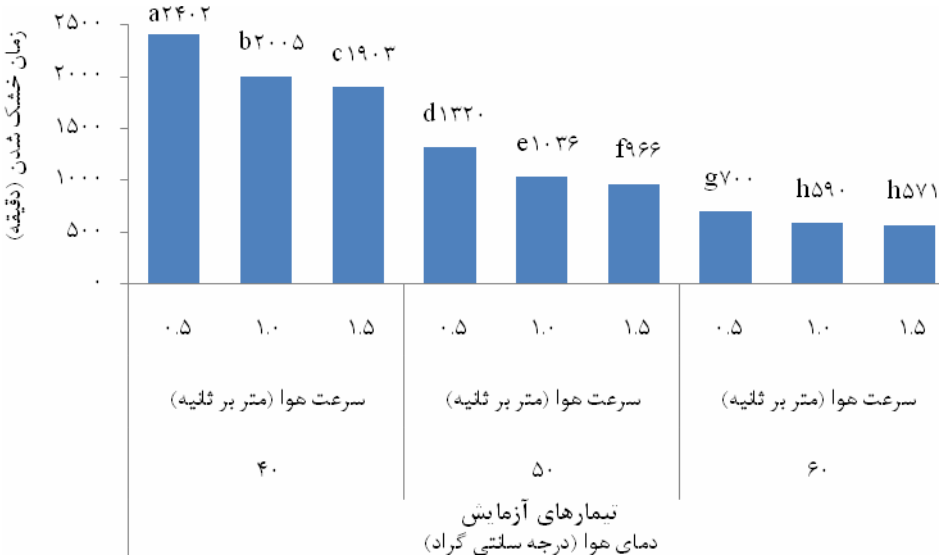
مقایسه میانگین اثرات دما و سرعت هوا بر روی مدت زمان خشک شدن با آزمون توکی در شکل ۶ نشان می دهد هر سه سطح دما و سرعت هوا در سطح ۱ درصد دارای اختلاف معنی دار می‌باشند. این نمودار همچنین نشان می‌دهد که تغییر یک واحد در سرعت هوای خشک کن نسبت به دمای آن تاثیر بیشتری بر تغییر مدت زمان خشک شدن دارد. این مقدار تغییرات ۳۲۷ دقیقه به ازائ یک واحد تغییر در سرعت هوا در مقابل ۷۴ دقیقه به ازاء یک واحد تغییر در دمای هوای خشک کن است. همچنین مقایسه میانگین بین تیمارهای مختلف خشک شدن با آزمون توکی در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس شکل تمام تیمارها به جز دو تیمار ۶۰ درجه سانتی گراد و سرعت های ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه اختلاف معنی‌داری (سطح ۱٪) در مدت زمان خشک شدن دارند.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]



شکل ۶ مقایسه میانگین اثرات فاکتورهای اصلی دما و سرعت هوا در مدت زمان خشک شدن

(حروف لاتین متفاوت در هر تیمار نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ ٪ می‌باشد)

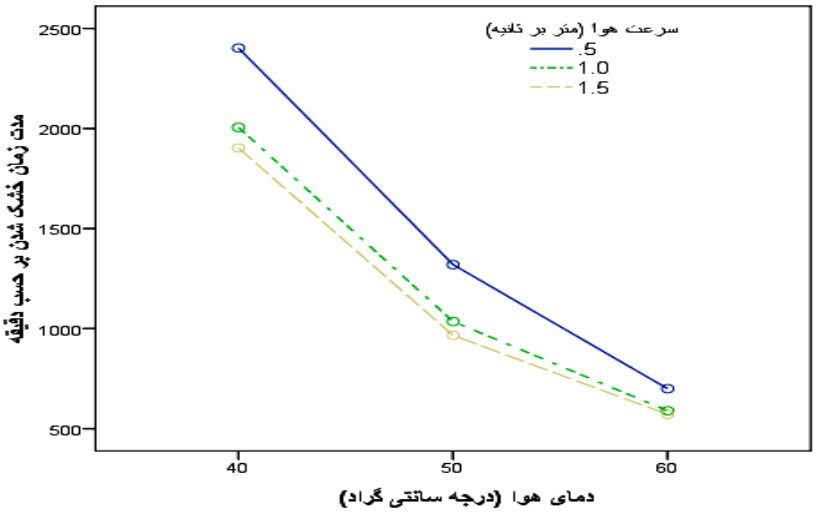


شکل ۷ مقایسه میانگین بین تیمارهای مختلف خشک شدن در مدت زمان خشک شدن

(حروف لاتین متفاوت در هر تیمار نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ ٪ می‌باشد)

شکل ۸ نمودار اثرات متقابل دما و سرعت هوای خشک کن را نشان می‌دهد. از شکل می توان برداشت نمود که دمای ۵۰ درجه سانتی گراد دمای مرزی است به طوری که در دماهای بالاتر از این دما تغییرات زمان خشک کردن کاهش یافته و در دماهای پایین‌تر تغییرات افزایش می یابد. این امر نشان می‌دهد که افزایش سرعت هوا در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تاثیر قابل ملاحظه ای در کاهش مدت زمان خشک شدن ندارد و در دمای۴۰ درجه سانتی‌گراد تاثیرات افزایش یا کاهش سرعت بر مدت زمان خشک شدن مشهود و اختلافی افزایشی داشته است.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]

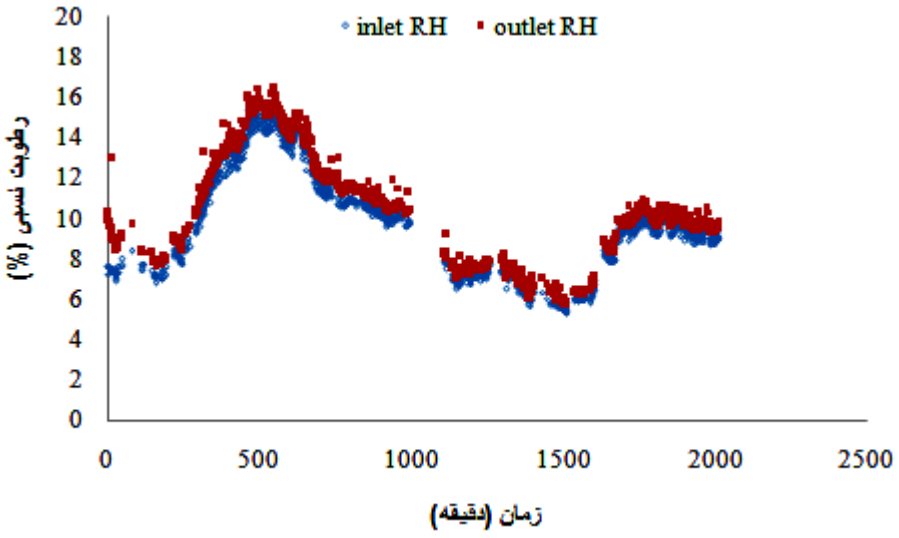


شکل ۸ نمودار اثرات متقابل دما و سرعت هوای خشک کن بر مدت زمان خشک شدن

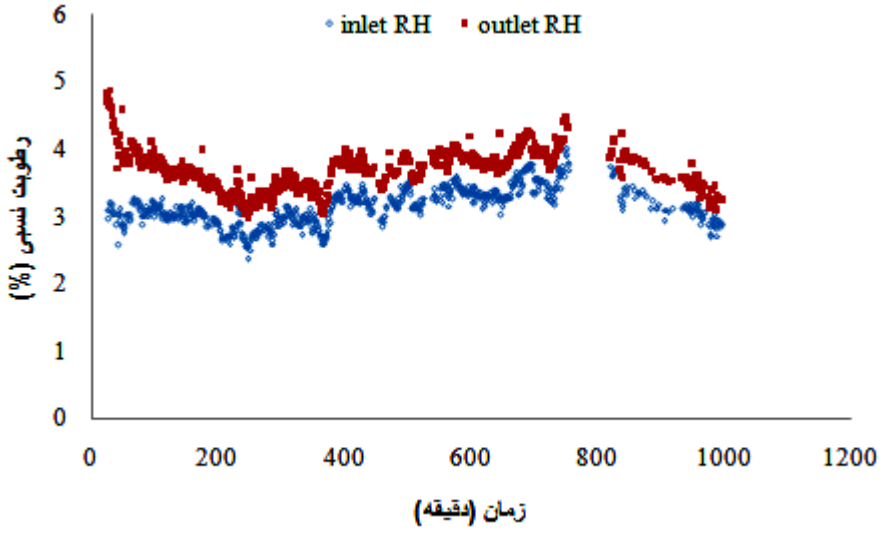
۳-۲- تغییرات رطوبت نسبی

در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ میزان تغییرات رطوبت نسبی هوا در دهانه ورودی و خروجی خشک کن طی فرآیند خشک شدن در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه نشان داده شده است. inlet RH نشان دهنده رطوبت نسبی در دهانه ورودی خشک کن (پس از رسیدن دمای هوا به دمای خشک کن) و RH outlet نشان دهنده رطوبت نسبی هوای خروجی از خشک کن است. تغییرات رطوبت نسبی در دهانه ورودی در نمودارهای مختلف به علت تغییرات رطوبت نسبی هوا در طول روزهای مختلف انجام آزمایش‌ها است. کمترین میزان رطوبت نسبی در دهانه ورودی در دمای خشک کردن ۶۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱/۷۳ درصد و بیشترین آن در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۹/۸۸ درصد بود. میانگین رطوبت نسبی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز برابر با ۳/۴۵ درصد محاسبه گردید. تغییرات رطوبت نسبی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و دو سرعت هوای ۱ و ۰/۵ متر بر ثانیه به منظور نمایش اثرات سرعت در یک دمای ثابت در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است. ساعت شروع و پایان خشک کردن در هر تیمار به منظور نشان داده تغییرات نسبی در دهانه ورودی خشک‌کن و همچنین خروجی آن، در جدول ۲ بیان شده است. در این جدول همچنین میانگین رطوبت نسبی در دهانه ورودی و خروجی در تیمارهای مختلف خشک کردن آورده شده است و همچنین با استفاده از آزمون توکی، مقایسه میانگین بین این مقادیر در دماهای یکسان و سرعت های مختلف خشک کردن به منظور مقایسه اثر زمانی شروع خشک کردن انجام گرفت. همانطور که از مقادیر جدول مشخص است برای دمای ۴۰ درجه که مدت زمان خشک شدن برای تیمار های مختلف که بیش از ۲۴ ساعت به طول می انجامد میانگین رطوبت نسبی در دهانه‌ی ورودی تفاوتی نسبت به هم نشان نمی‌دهد همچنین در دمای ۶۰ درجه و سرعت های ۱ و ۰/۵ متر بر ثانیه با توجه به اینکه شروع خشک شدن در هر دو تیمار یکسان بوده و تنها مدت زمان خشک شدن در سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه در حدود ۹۰ دقیقه بیشتر به طول می‌انجامد نیز مقادیر رطوبت نسبی در دهانه ورودی تفاوتی نسبت به هم نشان نمی دهند. به منظور بررسی تاثیر سرعت هوای خشک کردن در میزان افزایش رطوبت نسبی در دهانه خروجی و دماهای یکسان مقایسه میانگین بین اختلاف رطوبت نسبی ورودی و خروجی در جدول ۲ آورده شده است. همانطور که این مقادیر نشان می دهد در دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد در سرعت های مختلف خشک کردن تفاوت معنی داری در افزایش رطوبت نسبی خروجی مشاهده نشده است، در حالی که در سرعت ۴۰ درجه سانتی گراد با افزایش سرعت هوا میزان افزایش رطوبت نسبی خروجی کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان افزایش مدت زمان رطوبت گیری هوای خشک کن در سرعت پایین در این دما دانست.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]

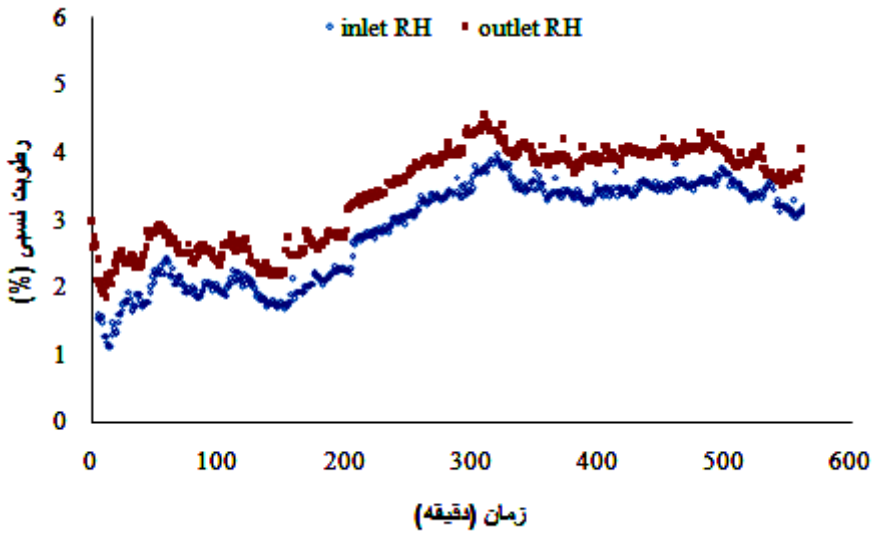


شکل ۹ تغییرات رطوبت نسبی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱/۵ متر در ثانیه

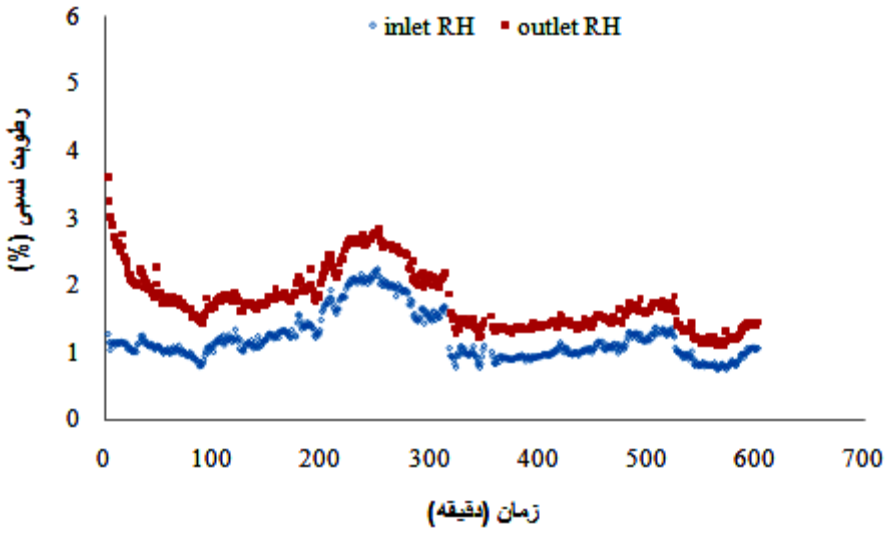


شکل ۱۰ تغییرات رطوبت نسبی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱/۵ متر در ثانیه

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]

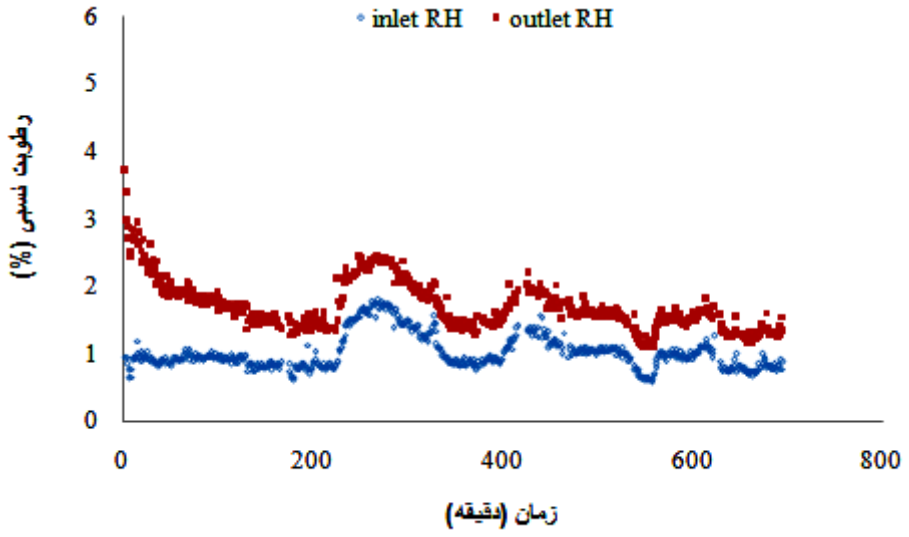


شکل ۱۱ تغییرات رطوبت نسبی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱/۵ متر در ثانیه



شکل ۱۲ تغییرات رطوبت نسبی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱ متر در ثانیه

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]



شکل ۱۳ تغییرات رطوبت نسبی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۰/۵ متر در ثانیه

جدول ۲ مقایسه میانگین رطوبت نسبی ورودی و خروجی هوای خشک کن در تیمار های مختلف

دمای هوای خشک کردن		سرعت هوای خشک کردن		
		0.5	1	1.5
	زمان شروع خشک کردن	25/09/10; 22:00	21/09/10; 20:00	18/09/10; 16:00
	زمان پایان خشک کردن	27/09/10; 14:30	23/09/10; 03:30	19/09/10; 24:00
40	میانگین RH٪ ورودی	9.80[a]	9.98[a]	9.87[a]
	میانگین RH٪ خروجی	11.05[a]	10.71[b]	10.47[b]
	اختلاف RH٪ ورودی , RH٪خروجی	1.25[a]	0.73[b]	0.60[c]
	زمان شروع خشک کردن	16/09/10; 23:00	13/09/10; 15:00	11/09/10; 20:00
	زمان پایان خشک کردن	16/09/10; 21:00	14/09/10; 08:30	12/09/10; 12:15
50	میانگین RH٪ ورودی	3.47[b]	3.74[a]	3.15[c]
	میانگین RH٪ خروجی	4.01[b]	4.30[a]	3.68[c]
	اختلاف RH٪ ورودی , RH٪خروجی	0.54[a]	0.56[a]	0.53[a]
	زمان شروع خشک کردن	10/09/10; 15:00	09/09/10; 15:00	07/09/10; 18:00
	زمان پایان خشک کردن	11/09/10; 02:45	10/09/10; 01:00	08/09/10; 03:30
60	میانگین RH٪ ورودی	1.28[b]	1.23[b]	2.93[a]
	میانگین RH٪ خروجی	1.85[b]	1.81[b]	3.49[a]
	اختلاف RH٪ ورودی , RH٪خروجی	0.57[a]	0.58[a]	0.56[a]

(حروف لاتین متفاوت در هر سطر نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ ٪ می‌باشد)

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]

۳-۳- مدل ریاضی خشک کردن لایه نازک گلابی

مقادیر ضریب تبیین و مربع کای مدل های ریاضی برازش شده جدول ۱ برای ۷۰ درصد از داده ها و همچنین شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای سوگیری و درصد میانگین خطای نسبی محاسبه شده برای ۳۰ درصد باقیمانده‌ی دادها به منظور ارزیابی مدل در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به این مقادیر مدل تقریب انتشار با داشتن بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین مقادیر مربع کای، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای سوگیری و درصد میانگین خطای نسبی بهترین مدل برای بیان رفتار گلابی طی فرآیند خشک شدن لایه نازک است. در تحقیق Guine و همکاران (۲۰۰۷) نیز مدل یاد شده بهترین برازش را بر داده های گلابی خشک شده نشان داد [۱۷]. ضرایب مدل بدست آمده در این مطالعه به قرار زیر می‌باشند:

مدل تقریب انتشار:

$$MR = a\,exp(-kt) + (1-a)\,exp(-kbt)$$

$$a = ۰/۸۸۷۸ - ۰/۱۷۸۲\,Ln(T) + ۰/۰۳۱۱۳\,Ln(V)$$

$$b = -۰/۲۹۳۲ + ۰/۰۹۸٤\,Ln(T) + ۰/۰۱٦۷\,Ln(V)$$

$$k = -۰/۱۵۵۱ + ۰/۰٤٦۷\,Ln(T) + ۰/۰۰۰۲\,Ln(V)$$

که در این روابط T و V به ترتیب مقدار دما (بر حسب درجه سانتی گراد) و سرعت هوای خشک کن (بر حسب متر بر ثانیه) می‌باشد.

جدول ۳: شاخص‌های آماری محاسبه شده برای مدل‌های ریاضی خشک شدن لایه نازک گلابی

مدل	R^2	χ^2	RMSE	MBE	ARE
نیوتون	۰/۹۵۶	۰/۰۰۲۱	۰/۰۵	۰/۰۰۷۶	۱۵/۱
پیج	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۷/۴
مدل اصلاح شده پیج	۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۶/۳
هندرسون و پابیس	۰/۹۸۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۵	۰/۰۰۰۴	۱۰/۲
لگاریتمی	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰۱۵	۷/۱
وانگ و سینگ	۰/۸۶۰	۰/۰۰۶۷	۰/۰۹	۰/۰۴۰۶	۳۴/۲
دو جمله نمایی	۰/۹۸۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۳	-۰/۰۰۱۵	۸/۵
تقریب انتشار	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۰۸	۵/۲

۴- نتیجه‌گیری کلی

بررسی تغییرات رطوبت نسبی در دهانه ورودی و خروجی نشان داد که اختلاف رطوبت نسبی ورودی و خروجی در دمای پایین (۴۰ درجه سانتی گراد) با افزایش سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین توصیه می‌شود، به منظور بهینه کردن مصرف انرژی و استفاده از بیشترین پتانسیل هوای خشک کن، سرعت هوا در این دما کاهش یابد. مدل تقریب انتشار با داشتن بیشترین مقدار ضریب تبیین (۰/۹۹۸)، کمترین مقادیر مربع کای (۰/۰۰۰۱)، ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۰۱)، میانگین خطای سوگیری (۰/۰۰۰۸) و درصد میانگین خطای نسبی (۵/۲) بهترین مدل برای بیان رفتار گلابی طی فرآیند خشک کردن لایه نازک بدست آمد.

۵- منابع

[1] Moradi, M., & Zomorodian, A. (2009). Thin later drying of Cuminum Cyminum Grain by means of Solar Cabinet Dryer. *American-Eurasian Journal of*

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[2] Woods, J., & Phoungchandang, S. (2000). Solar drying of bananas:Mathematical model, laboratory simulation, and field data compared. *Journal of Food Science, 65(6)*, 990-996.

[3] Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., & Cagatay, F. (1999). Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In:Bascetincelik A, editor. Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy. Turkey.

[4] Guine, R. (2006). Influence of drying method on density and porosity of pears. *Food and Bioproducts Processing, 84(C3)*, 179-185.

[5] Khin, M. M., Zhou, W., & Yeo, S. Y. (2007). Mass transfer in the osmotic dehydration of coated apple cubes by using maltodextrin as the coating material and their textural properties. *Journal of Food Engineering, 81*, 514-522.

[6] Guine, R. (2009). Sorption isotherms of pears using different models. *International Journal of Fruit Science, 9*, 11-22.

[7] Togrul, I., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering , 55*, 209–216.

[8] Akpinar, E., Midilli, A., & Bicer, Y. (2003). Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management, 44*, 1689-1705.

[9] Wang, C., & Singh, R. (1978). A single layer drying equation for rough rice. ASAE Paper No. 78-3001, USA.

[10] Mujumdar, A. (1987). *Handbook of industrial drying.* New York: Marcel Dekker.

[11] Diamante, L., & Munro, P. (1993). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy, 51*, 271-6.

[12] White, G., Bridges, T., Gewer, O., & IJ, R. (1978). Seed coat devage in thin layer drying of soybeans as affected by drying. ASAE Paper No. 3052. USA.

[13] Zhang, Q., & Litchfield, J. (1991). An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technolgy*, 9, 383–95.

[14] Zomorodian, A. A., & Amanlou. (2010). Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. *Journal of Food Engineering* , 101, 8-15.

[15] Sharaf-Eldeen, Y., Blaisdel, l. J., and Hamdy, M. (1980). A model for ear corn drying. *Transaction of the ASAE; 23*:1261-71.

[16] Yaldız, O., & Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technolgy*, 19, 583–96.

[17] Guine, R., Rodrigues, A., & Figueiredo, M. (2007). Modelling and simulation of pear drying. *Applied Mathematics and Computation, 192*, 69-77.

Agricultural & Environmental Sciences, 5(3):409-413.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]

Mathematical modeling of pear fruit thin layer drying and study on the effects of drying air temperature and velocity on variation of exhaust air relative humidity

Heydari, M. M. [1], Nassiri, S. M. [2*]

1. Msc. student, Department of Mechanics of Agricultural Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.
2. Assistant professor, Department of Mechanics of Agricultural Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

(Received: 91/8/16 Accepted: 92/3/8)

In the present study variation of air relative humidity at the inlet and outlet of a cabinet dryer as well as drying kinetic of pear fruit in thin layer were studied. The experiments were conducted at three temperature levels of 40, 50 and 60°C and three air velocity levels of 0.5, 1 and 1.5 m/s. It was observed that the difference between input and output air relative humidity increased when drying temperature was increased. This difference followed declining trend at the same level of drying temperature when air velocity was increased. If drying at lower air temperature and higher velocity is desired, for optimum use of energy, a closed loop drying method is appropriate. Otherwise, increasing in air temperature and decreasing in air velocity is recommended. Eight mathematical models were fitted on drying data and the best one was selected according to coefficient of determination (R^2) and Chi-square (χ^2) statistics for 70 percent of data. The model then validated by statistics of root mean square of error (RMSE), mean bias of error (MBE) and mean relative error (ARE) for 30 percent of remaining data. The approximation of diffusion model with highest R^2 (0.998), and lowest χ^2 (0.0001), RMSE (0.01), MBE (0.0008) and ARE (5.2%) was found an appropriate model for estimating the kinetics of thin layer drying of pear cubes ~~drying~~ in a cabinet dryer.

Keywords: Air relative humidity, Mathematical modeling, Moisture content, Non-linear regression, Pear fruit.

* Corresponding Author E-Mail Address: nasiri@shirazu.ac.ir

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-10-12]