

مدل ریاضی خشک کردن لایه نازک کلاله زعفران با هوای داغ (۵۱۹)

کامران عباسی^۱، سیدرضا حسن بیگی^۲، محمدحسین انمهر^۳

چکیده

خصوصیات خشک شدن لایه نازک کلاله زعفران در آزمایشگاه با یک خشک کن بستر ثابت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش های خشک کردن در دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد و با سرعت هوای ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه انجام شدند. مدل های ریاضی متفاوتی بر روی رفتار خشک شدن کلاله زعفران در خشک کن تست گردید. نتایج نشان دادند که تغییرات مدل های رما و همکاران، هندرسون و پابیس اصلاح شده، تقریب پخش، لگاریتمی به ترتیب می توانند بهتر از بقیه انتقال رطوبت را تخمین بزنند. که مدل ورما و همکاران برای خشک کردن لایه نازک کلاله زعفران از بقیه مناسب تر می باشد. وقتی که درجه حرارت و سرعت هوای خشک کردن افزایش می یابد مدت زمان خشک شدن کاهش می یابد و ضریب پخش شدگی موثر افزایش می یابد، که در این دو فاکتور تاثیر درجه حرارت به مراتب بیشتر از تاثیر سرعت هوا است. تمام فرآیند خشک کردن در یک دوره با نرخ نزولی رخ می دهد، که یک رابطه عمومی بین نرخ رطوبت با مدت زمان خشک شدن برای مدل ورما و همکاران برای خشک کردن یک لایه نازک از کلاله زعفران به دست آمد.

کلیدواژه: خشک کردن، کلاله زعفران، انرژی فعال سازی، ضریب پخش مؤثر

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک شین های کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پست الکترونیک: kabbasi366@yahoo.com

۲- استادیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳- استادیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۱. مقدمه

زعفران با نام علمی *Crocus sativus* و نام عمومی saffron گرانبهاترین گیاه زراعی موجود در روی کره زمین است. زعفران از خانواده زنبق است و در منطقه آب و هوایی مدیترانه و غرب آسیا _ از عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۵۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۰ درجه غربی تا ۸۰ درجه شرقی _ در مناطق بسیار کم باران _ توران که دارای زمستان سرد و تابستان گرم هستند گسترش دارد. هر چند انواع دیگر زعفران به دلیل دارا بودن گل‌های زیبا به عنوان گیاهان زینتی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی گونه زراعی آن از نظر اقتصادی جایگاه ویژه‌ای دارد. [۲و۱]

زعفران گیاه زراعی بی‌نظر و منحصر به فرد است که خصوصیات ویژه آن باعث شده است که تکنولوژی تولید آن که در نوع خود از پیچیدگی زیادی نیز برخوردار باشد و در بین کشاورزان سینه به سینه منتقل گردد. از ویژگی‌های بارز این گیاه ظهور گل آن قبل از هر اندام رویشی دیگر، شروع رشد آن در پاییز، انتهای رشد آن در بهار، عدم تولید بذر بارور بر خلاف تولید گل‌های کامل فراوان و ضرورت برداشت گل آن در صبح قبل از گرم شدن هوا می‌باشد. [۲و۱]

زعفران به عنوان گرانترین محصول کشاورزی و دارویی جهان جایگاه ویژه‌ای در بین محصولات صادراتی ایران دارد. در حال حاضر ایران بزرگترین تولید کننده و صادر کننده زعفران در جهان است و بیش از ۹۰ درصد تولید جهانی این محصول گرانبها به ایران اختصاص دارد. میزان تولید ایران در سال ۱۳۸۵ بیشتر از ۲۰۰ تن بوده است که بخش عمده آن صادر شده است. [۳]

زعفران تازه برای نگهداری طولانی تر، باید خشک گردد. خشک کردن اثر زیادی بر کیفیت و ارزش محصول نهایی دارد. در کشورها و مناطق مختلف، زعفران به روش‌های متفاوتی خشک می‌شود در شیوه سنتی ایران پس از جدا سازی کلاله و خامه از گل، زعفرانها به صورت ردیفی بر روی پارچه و کاغذ پهن شده و در سایه خشک می‌گردد. این شیوه خشکانیدن دارای معایبی می‌باشد که عمده‌ترین آن طولانی شدن زمان خشک شدن می‌باشد. افزایش زمان، باعث امکان رشد و تکثیر میکروارگانیسمها و افزایش میزان آلودگی می‌گردد. [۴]

خشک کردن مواد غذایی یکی از قدیمی ترین روش‌های نگهداری آنها برای استفاده‌های بعدی می‌باشد. خشک کردن باعث خروج آب از مواد غذایی می‌شود، بطوریکه باکتری‌ها و عوامل بیماری‌زا قادر به رشد نبوده و از فساد ماده غذایی جلوگیری می‌شود. همچنین خشک شدن باعث کاهش فعالیت آنزیم‌هایی می‌شود که موجب رسیدن طبیعی میوه می‌شوند، اما فعالیت آنها را متوقف نمی‌کند. از آنجا که خشک شدن باعث خروج رطوبت می‌شود، بنابراین اندازه و وزن میوه کم شده و هنگام استفاده، آب خارج شده به میوه برگردانده شده و میوه به شکل اولیه خود باز می‌گردد. هدف از خشک کردن مواد غذایی، ذخیره طولانی مدت مواد غذایی، حداقل کردن نیازهای انبارداری و بسته بندی و کاهش هزینه های حمل و نقل می باشد. عملیات خشک کردن تاثیر زیادی بر روی کیفیت محصول و قیمت آن می گذارد. کیفیت محصولات غذایی به میزان تغییرات فیزیکی و بیوشیمیایی که در طول فرآیند خشک کردن در آن رخ می دهد بستگی دارد. [۵]

همچنین خشک کردن مواد مرطوب یک فرآیند پیچیده می‌باشد که شامل انتقال جرم و حرارت همزمان می‌باشد [۶] بطور معمول سه نوع مدل خشک کردن لایه نازک وجود دارد که برای توصیف پدیده خشک کردن محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد که شامل (۱) مدل تئوری که فقط مقاومت داخلی را نسبت به انتقال رطوبت بین محصول و هوای گرم کننده مد نظر قرار می‌دهد. (۲) مدل نیمه تئوری (۳) مدل تجربی که در این مدل فقط مقاومت خارجی توجه می‌شود [۷و۸].

مدل تئوری نیاز به فرضیات هندسی نمونه، ضریب پخش جرم نمونه، قابلیت هدایت نمونه، را دارد [۹و۱۰]. مدل تجربی فرآیندهای اساسی خشک کردن را نادیده می‌گیرد و یک رابطه مستقیم بین میانگین رطوبت و زمان خشک کردن بوسیله آنالیز رگرسیون بیان می‌کند [۱۱و۱۲]. و مدل نیمه تئوری بینابین مدل تجربی و تئوری قرار دارد که نتیجه شده از ساده سازی قانون دوم فیک درباره انتشار یا از تغییر شکل دادن مدل ساده شده که در بسیاری موارد از قبیل مدل پیچ، نیوتن، هندرسون وغیره که در (جدول ۱) آمده است استفاده می‌شود.

جدول (۱). مدل های خشک کردن به روش لایه نازک

ردیف	نام مدل	مدل	مرجع
۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	Westerman et al., 1973
۲	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	Guarte, 1996
۳	هندرسون و پاییس	$MR = a \exp(-kt)$	Yagcioglu et al., 1999
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yaldiz and Ertekin, 2001
۵	دوجمله ای	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1 t)$	Rahman et al., 1998
۶	دوجمله ای نمایی	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_1 t)$	Yaldiz et al., 2001
۷	تقریب پخش	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_1 t)$	Yaldiz and Ertekin, 2001
۸	رما و همکاران	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Yaldiz and Ertekin, 2001
۹	هندرسون و پاییس اصلاح شده	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Karathanos, 1999
۱۰	میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al., 2002

بعلت اینکه اطلاعات مفصلی درباره مدل خشک کردن کلاله زعفران در دسترس نیست، در این مطالعه توجه ما به بررسی خصوصیات خشک کردن یک لایه نازک از کلاله زعفران در یک خشک کن بستر ثابت و مدل سازی فرآیند های خشک شدن در یک رنج درجه حرارت و سرعت هوای عریض معطوف شده است.

۲. مواد و روش ها

۱-۲ وسایل آزمایش

در این آزمایش از یک خشک کن حرارتی آزمایشگاهی بستر ثابت برای خشک کردن کلاله زعفران استفاده شده است (شکل ۱). این خشک کن قابلیت این را دارد که برای هر دمایی از ۲۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی گراد با دقت بالا تنظیم شود، که شامل اجزا زیر است: (۱) توری سیمی (۲) سنسورهای اندازه گیری دما (۳) محفظه یا اتاقک خشک کن که ابعاد آن قابل تنظیم می باشد (۴) پایه خشک کن (۵) واحد گرمایش (۶) ای تور^۱ (تنظیم کننده دور الکتروموتور) (۷) الکتروموتور (۸) فن (۹) کنترل اتوماتیک. واحد گرمایش شامل یک گرم کن الکتریکی (۳ کیلو وات) است که در داخل یک کانال قرار گرفته است. اتاقک یا محفظه خشک کن از شیشه ساخته شده که محصول بر روی یک توری نازک آلومینیومی در داخل آن قرار می گیرد. درجه حرارت هوای خشک کن در اتاقک بطور مستقیم با ترموکوپل اندازه گیری شده و بوسیله گرمایش مقاومت الکتریکی بدست آورده می شود، و همچنین بوسیله واحد کنترل اتوماتیک با ± 0.5 درجه حرارت در دمای مورد نظر و سرعت هوای خروجی در یک سانتی متری بالای سطح توری در مقدار خواسته شده با ± 0.3 متر بر ثانیه ثابت باقی می ماند. که تنظیم سرعت هوای خروجی توسط اینورتر که به الکتروموتور متصل است انجام می شود. همچنین سرعت با سرعت سنج دیجیتالی و درجه حرارت با ترموکوپل نوع T با دقت ± 1 درجه سانتی گراد مورد اندازه گیری قرار می گیرد. و از یک ترازوی دیجیتالی با دقت ± 0.001 گرم برای اندازه گیری جرم استفاده شده است.

۲-۲ مواد آزمایش

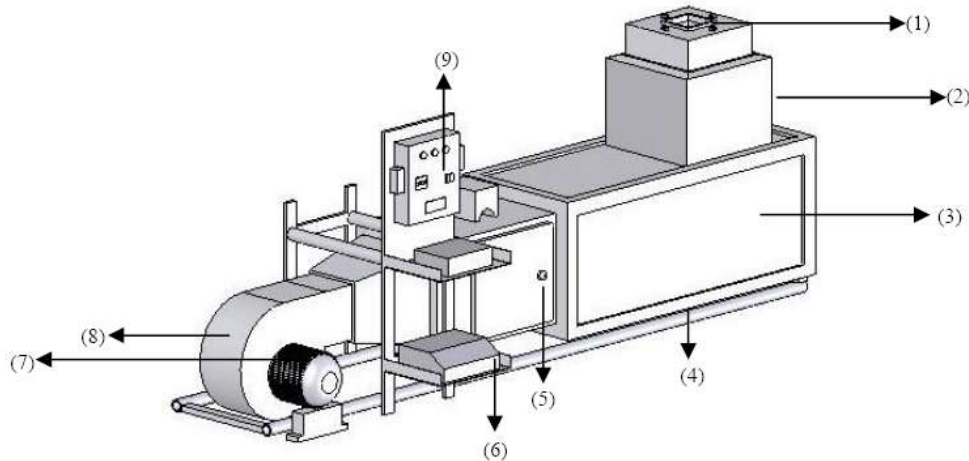
به منظور تهیه زعفران مورد نیاز مقدار ۱۰ کیلو گرم گل زعفران در فصل برداشت، از مزرعه ای واقع در چند کیلومتری شهرستان کاشمر که حدود ۰/۲ هکتار وسعت داشت تهیه و پس از انتقال به آزمایشگاه کلاله ها به همراه حدود ۳ میلی متر از خامه از سایر اجزاء گل جدا گردید و درون نایلون فریزری در یخچال در دمای حدود ۴ درجه سانتی گراد تا شروع آزمایشات نگهداری گردید.

1- inverter

محتوای رطوبتی زعفران با روش آون در درجه حرارت $20 \pm 100^\circ\text{C}$ و در ۳ تکرار تعیین شد، ملاک زمان باقی ماندن نمونه‌ها در آون، و ثابت شدن وزن نمونه‌ها خواهند بود. با استفاده از فرمول (۱) درصد محتوای رطوبتی کلاله زعفران تعیین شد.

$$100 \cdot \left[\frac{\text{وزن ثابت شده در آون} - \text{وزن کل}}{\text{وزن کل}} \right] = \text{درصد رطوبت}$$

براساس رابطه فوق محتوای رطوبتی کلاله زعفران 75 ± 0.5 بدست آمد.



شکل (۱). خشک کن بستر ثابت

۳-۲ روش آزمایش

آزمایشهای خشک کردن در دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد و سرعت هوای ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه با خشک کن بستر ثابت انجام شد. که ضخامت نمونه حدود ۳ میلی متر و وزن آن حدود ۱/۵ گرم می‌باشد برای اندازه‌گیری وزن نمونه در حین آزمایش، توری حاوی نمونه از اتاقک خشک کن خارج می‌گردد و با استفاده از یک ترازوی دیجیتال وزن می‌گردد و دوباره به اتاقک برگردانده می‌شود. ترازوی دیجیتال خیلی نزدیک به واحد خشک کن می‌باشد. هر فرآیند اندازه‌گیری وزن نمونه حدود ده ثانیه طول می‌کشد. فرآیند خشک کردن تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که محتوای رطوبت نمونه به حدود 1 ± 10 درصد کاهش یابد. یعنی تقریباً وقتی که محتوای رطوبت دیگر تغییر نکند. هر اجرای آزمایش سه بار تکرار می‌شود.

۴-۲ ملاحظات تئوری

۴-۱-۴ مدل سازی منحنی‌های خشک کردن لایه نازک:

برای بررسی خصوصیات خشک کردن کلاله زعفران مهم است که بطور موثری خشک کردن را مدل سازی کنیم. در این مطالعه داده‌های خشک کردن کلاله زعفران که در درجه حرارت‌ها و سرعت‌های مختلف بطور تجربی بدست آمده‌اند را بطور معمول با ده مدل ارائه شده خشک کردن لایه نازک در (جدول ۱) فیت می‌شوند.

در این مدل‌ها، MR نشان دهنده نسبت رطوبت بدون بعد می‌باشد. $MR = (M - M_e) / (M_0 - M_e)$ که پارامترهای این رابطه عبارتند از: M = محتوای رطوبت محصول در هر لحظه. M_0 = محتوای رطوبت اولیه در محصول. M_e = محتوای رطوبت تعادلی. مقدار M_e در مقایسه با M یا M_0 برای مدت زمان‌های طولانی خشک کردن نسبتاً کوچک است بنابراین $MR = (M - M_e) / (M_0 - M_e)$ می‌تواند به $MR = M / M_0$ ساده شود [۱۳ و ۱۴].

۲-۴-۲ ضرایب همبستگی و آنالیز خطا:

و کای دو (RMSE) انحراف از معیار R^2 میزان انطباق مدل‌های ریاضی تست شده با داده‌های تجربی با ضریب همبستگی χ^2 ارزیابی می‌شوند. هرچه مقدار R^2 بیشتر باشد و مقادیر (RMSE) و χ^2 کمتر باشد میزان انطباق بیشتر است. χ^2 و از طریق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - m}$	(۱)
$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	(۲)

در این رابطه ها $i = MR_{exp,i}$ امین نرخ رطوبت آزمایشگاهی، $i = MR_{pre,i}$ امین نرخ رطوبت تخمین زده شده، $N =$ تعداد مشاهدات، $Z =$ تعداد ثابت ها.

در این مطالعه آنالیز رگرسیونی خطی و غیر خطی با نرم افزار MATLAB و EXCEL انجام شده است.

۲-۴-۳ محاسبه ضریب پخش موثر :

خصوصیات خشک کردن محصولات کشاورزی در یک دوره با نرخ نزولی با استفاده از معادله انتشار فیک توصیف می شود راه حل این معادله توسط (CRANK 1975) ارائه شد که برای اجسام با شکل منظم مانند مستطیل، استوانه و محصولات کروی قابل استفاده است و معادله (۳) برای ذراتی با هندسه لایه نازک قابل استفاده است، با این فرض که رطوبت بطور یکنواخت توزیع شده باشد.

$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D t}{4a^2}\right]$	(۳)
---	-----

D_{eff} = ضریب پخش شدگی موثر (m^2 / s)

L_0 = نیمی از ضخامت لایه نازک m

برای دوره های طولانی خشک کردن، معادله (۳) می تواند بصورت زیر ساده شود [۱۵].

$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L_0^2}$	(۴)
---	-----

ضریب پخش شدگی از طریق رسم کردن داده های آزمایشگاهی خشک کردن بر حسب $\ln MR$ در مقابل زمان خشک کردن t در معادله (۴) تعیین می شود، زیرا این ترسیم یک خط مستقیم با شیب زیر را می دهد.

$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L_0^2}$	(۵)
--	-----

۲-۴-۴ محاسبه انرژی فعال سازی :

وابستگی درجه حرارت به ضریب پخش شدگی موثر می تواند توسط رابطه آربنیوس بصورت زیر توصیف شود [۱].

$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$	(۶)
--	-----

D_0 = عامل نمایی تابع آربنیوس (m^2 / s)

$$E_a = \text{انرژی فعال سازی (kJ/molK)}$$

$$T = \text{درجه حرارت مطلق (K)}$$

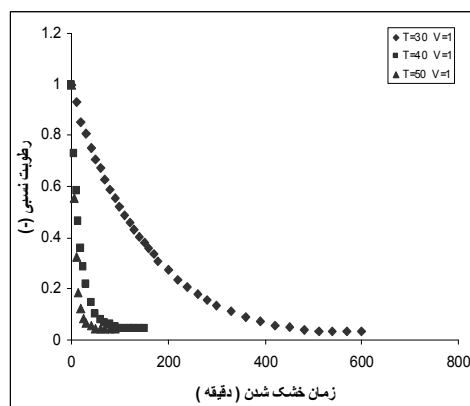
با استفاده از شیب خط مستقیم $\ln D_{eff}$ در مقابل معکوس T ، انرژی فعال سازی می تواند محاسبه شود.

۳. نتایج و آنالیزها

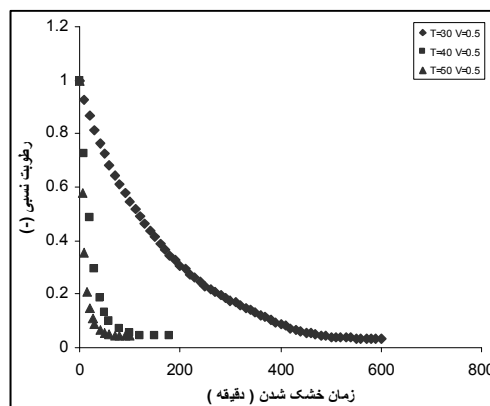
۳-۱ آنالیز خصوصیات خشک کردن کلاله زعفران :

کلاله زعفران در دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ و با سرعت هوای ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه در خشک کن بستر ثابت مدل آزمایشگاهی بصورت لایه نازک و با ضخامت حدود ۳ میلی متر خشک می شود. محتوای رطوبت اولیه کلاله زعفران حدود $0/1 \pm 0/08$ کیلوگرم آب در هر کیلوگرم ماده خشک و زمانی که تغییری در وزن نمونه مشاهده نشد محتوای رطوبت تعادلی $0/01 \pm 0/12$ کیلوگرم آب در هر کیلوگرم ماده خشک بدست آمد.

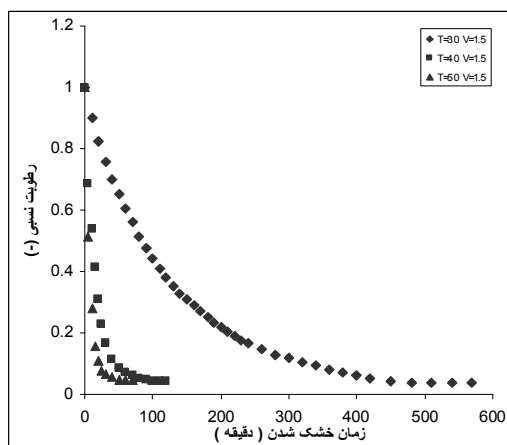
میزان رطوبت نسبی در مقابل مدت زمان خشک کردن برای کلاله زعفران در درجه حرارت ها و سرعت های انتخاب شده در شکل (۲)، شکل (۳)، شکل (۴) و شکل (۵) نشان داده شده است. مدت زمان خشک کردن برای رسیدن به محتوای رطوبت تعادلی برای کلاله زعفران در جدول (۲) نشان داده شده است. با افزایش درجه حرارت و سرعت هوا به فرآیند خشک کردن سرعت می بخشد بنابراین مدت زمان خشک کردن کم می شود. وقتی درجه حرارت به اندازه ۱۰ درجه سانتی گراد با فاصله های یکسان از ۳۰ تا ۵۰ افزایش پیدا می کند مدت زمان خشک کردن هم متقابلاً به میزان یکسان کاهش نمی یابد بلکه کاهش زمان از دمای ۳۰ به ۴۰ به مراتب تاثیر بیشتری دارد.



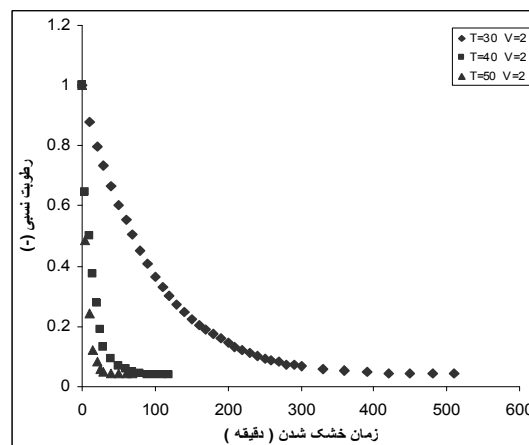
شکل (۳) نمودار زمان خشک شدن بر حسب رطوبت نسبی $v = 1$



شکل (۲) نمودار زمان خشک شدن بر حسب رطوبت نسبی $v = 0.5$



شکل (۵) نمودار زمان خشک شدن بر حسب رطوبت نسبی $v = 1.5$



شکل (۴) نمودار زمان خشک شدن بر حسب رطوبت نسبی $v = 2$

جدول (۲). مدت زمان خشک شدن برای دماها و سرعت های مختلف

T (درجه سانتی گراد)	V(m/s)	t دقیقه
30	0.5	550
30	1	510
30	1.5	480
30	2	420
40	0.5	120
40	1	110
40	1.5	100
40	2	90
50	0.5	70
50	1	60
50	1.5	50
50	2	40

وقتی دما از ۳۰ به ۴۰ درجه سانتی گراد و سرعت هوا از ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه افزایش پیدا می کند کاهش مدت زمان خشک شدن به اندازه $78/5 \pm 0/5$ درصد می باشد، یعنی در واقع می توان گفت که تغییر سرعت هوا تاثیر چندانی نداشته است. ولی زمانی که دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سانتی گراد و سرعت هوا از ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه افزایش پیدا می کند کاهش مدت زمان خشک شدن به ترتیب $43/66$ ، $45/46$ ، 50 و $55/56$ درصد می باشد، یعنی تغییر سرعت هوا در این بازه دمایی افزایشی می باشد.
۳-۲ فیت کردن منحنی های خشک کردن:

داده های مربوط به محتوای رطوبت که در آزمایش خشک کردن کلاله زعفران بدست آمد به رطوبت نسبی MR تبدیل می شوند و با ده مدل که در جدول (۱) ارائه شد فیت می شوند نتایج آماری مدل های مختلف که شامل ضرائب مدل خشک کردن و معیارهای مقایسه که برای ارزیابی انطباق خوب مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از R^2 ، χ^2 ، (RMSE) که در جدول (۲) لیست شده اند. در همه موارد مقادیر R^2 بیشتر از $0/983$ و مقادیر χ^2 و (RMSE) به ترتیب کمتر از $0/000331629$ و $0/037998$ هستند. مقادیر R^2 در مدل های ورما و همکاران، هندرسون و پاییس اصلاح شده، تقریب پخش و لگاریتمی بیشتر از $0/994$ و مقادیر χ^2 ، (RMSE) به ترتیب کمتر از $0/00045324$ و $0/024146$ می باشد که نشان می دهد این چهار مدل با داده های آزمایشگاهی بطور خیلی خوب فیت شده اند. همچنین جدول (۳) مقایسه بین نسبت رطوبت آزمایشگاهی در درجه حرارت ها و سرعت های مختلف خشک کردن و نسبت رطوبت تخمین زده شده توسط چهار مدل نامبرده را نشان می دهد که از این مقایسه می توان نتیجه گرفت که مدل ورما و همکاران توانسته انطباق خوبی بین داده های آزمایشگاهی و محاسبه شده را بیان کند. بنابراین مدل ما و همکاران به عنوان یک مدل مناسب برای توصیف خصوصیات خشک کردن یک لایه نازک از کلاله زعفران می باشد. به منظور وارد کردن تاثیر درجه حرارت و سرعت های خشک کردن بر روی ضرائب و ثابت های مدل ورما و همکاران یعنی k ، g ، a (جدول (۳)) از آنالیز رگرسیون استفاده می شود تا روابط بین این پارامترها در مقابل درجه حرارت و سرعت را ایجاد کند، که به شرح زیر می باشد.

مدل ورما و همکاران	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
رابطه (۷)	$a = 3.088E - 18 \cdot V^{0.897} \cdot \exp\left(\frac{12283.922}{T}\right)$
رابطه (۸)	$g = 1.3527E + 35 \cdot V^{-4.687} \cdot \exp\left(\frac{-25978.4}{T}\right)$
رابطه (۹)	$k = 5.746E - 26 \cdot V^{2.77} \cdot \exp\left(\frac{16807.56}{T}\right)$

۳-۳ تعیین ضریب پخش موثر :

نتایج نشان می دهد که مقاومت درونی انتقال جرم مدت زمان خشک کردن را کنترل می کند، که بعلاوه حضور یک نرخ نزولی در دوره خشک کردن می باشد. بنابراین مقادیر ضریب پخش شدگی موثر (D_{eff}) در درجه حرارت ها و سرعت های مختلف خشک کردن می تواند با استفاده از رابطه (۴) و (۵) بدست آید.

مقادیر متوسط ضرایب پخش شدگی موثر کلاله زعفران در یک فرآیند خشک کردن در درجه حرارت ها و سرعت های متفاوت در جدول (۴) آمده است. همان طور که انتظار می رفت برحسب نتایج مقادیر (D_{eff}) با افزایش درجه حرارت و سرعت هوای خشک کردن افزایش می یابد. ولی تاثیر افزایش درجه حرارت بمراتب بیشتر از افزایش سرعت می باشد.

۴-۳ تعیین انرژی فعال سازی:

با ترسیم لگاریتم طبیعی (D_{eff}) بصورت تابعی در مقابل معکوس درجه حرارت یک رابطه خطی را بوجود می آورد که از رابطه (۶) یعنی معادله آرنیوس منتج می شود. بواسطه بدست آوردن شیب این رابطه خطی مقادیر انرژی فعال سازی برای نرخ نزولی خشک کردن کلاله زعفران به این قرار است. برای دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰، درجه سانتی گراد با سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه برابر ۱۰۵/۶۹۹ $(kJ/molK)$ ، برای دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰، درجه سانتی گراد با سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه برابر ۱۰۶/۹۸۸ $(kJ/molK)$ ، برای دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰، درجه سانتی گراد با سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه برابر ۱۰۶/۱۸۱ $(kJ/molK)$ ، برای دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰، درجه سانتی گراد با سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه برابر ۹۸/۹۰۶ $(kJ/molK)$ می باشد.

۴. نتیجه

خصوصیات کلاله زعفران با ضخامت ۳ میلی متر در یک خشک کن بستر ثابت مورد مطالعه قرار گرفت، و خشک کردن این لایه نازک کلاله زعفران آنالیز شد. همچنین در ۱۰ مدل ریاضی رایج خشک کردن لایه نازک بر روی داده های آزمایشگاهی فیت شدند. نتایج نشان می دهد که چهار مدل ورما و همکاران، هندرسون و پایس اصلاح شده، تقریب پخش و لگاریتمی بهتر از بقیه بر روی داده ها فیت می شوند، که مدل ورما و همکاران برای خشک کردن لایه نازک کلاله زعفران از بقیه مناسب تر می باشد. وقتی که درجه حرارت و سرعت هوای خشک کردن افزایش می یابد مدت زمان خشک شدن کاهش می یابد و ضریب پخش شدگی موثر افزایش می یابد، که در این دو فاکتور تاثیر درجه حرارت بمراتب بیشتر از تاثیر سرعت هوا است. تمام فرآیند خشک کردن در یک دوره با نرخ نزولی رخ می دهد.

جدول (۳). نتایج فیت کردن چهار مدل ریاضی بر روی خشک کردن لایه نازک کلاله زعفران

X ^۲	R ^۲	RMSE	تابتهای مدل					سرعت	دما	شماره		
			a	b	c	H	g				k	
1E-05	0.999255	0.007297	0.9764					2.966	0.0972	0.5	30	1
8.42E-06	0.99903	0.009311	4.051					0.1301	0.1246	1	30	
1.73E-06	0.999528	0.005928	0.7025					0.2797	0.1006	1.5	30	
1.4E-06	0.999559	0.005693	0.9691					2.20E-09	0.1774	2	30	
3.24E-05	0.995415	0.023411	0.03339					0.6895	3.71E-09	0.5	40	
2.21E-06	0.999016	0.009234	0.9418					0.03893	0.9589	1	40	
6.02E-06	0.998149	0.013042	0.916					0.1064	1.175	1.5	40	
1.53E-05	0.996962	0.016476	0.9234					0.1183	1.32	2	40	
2.89E-08	0.999848	0.0037	0.06665					1.986	0.08333	0.5	50	
1.63E-08	0.999883	0.003345	0.0468					2.092	0.01504	1	50	
3.56E-09	0.999942	0.002522	0.9445					0.03348	2.393	1.5	50	
1.24E-08	0.999893	0.003447	0.03973					2.604	8.50E-08	2	50	
4.77E-05	0.998418	0.01092	0.7169	0.146	0.1404	0.09233		0.2209	0.08987	0.5	30	2
3.34E-06	0.999418	0.007576	0.6999	0.2531	0.03628	0.2364		0.1048	0.1053	1	30	
2.61E-07	0.999825	0.003773	0.09868	0.04252	0.8588	0.1412		2.044	0.0421	1.5	30	
1.19E-05	0.998771	0.009945	0.1491	0.4535	0.3943	0.1914		0.1963	0.06613	2	30	
5.16E-05	0.99528	0.029093	0.9886	0.03649	0.00078	0.7278		0.0056	0.7112	0.5	40	
1.86E-06	0.999187	0.009316	0.1925	0.7555	0.04128	0.00078		1.028	0.6041	1	40	
4.92E-06	0.998532	0.012628	0.8439	0.1052	0.04392	0.00335		3	0.995	1.5	40	
1.08E-05	0.997761	0.01538	0.1621	0.03634	0.7931	1.062	2.22E-14		3	2	40	
3.98E-08	0.999848	0.004343	0.2581	0.0656	0.6766	2.066	0.08004		1.781	0.5	50	
1.68E-07	0.999687	0.006552	0.9364	0.00023	0.06462	0.1129	2.21		2.159	1	50	
5.86E-09	0.999941	0.003213	0.8032	0.05428	0.1426	2.047	0.02777		2.456	1.5	50	
6.88E-08	0.9998	0.005947	0.7742	0.03888	0.1861	2.603	0.00491		2.562	2	50	
1E-05	0.999255	0.007297	0.02377	0.03449					2.817	0.5	30	3
1.73E-06	0.99956	0.006273	0.02062	0.04203					2.537	1	30	
1.73E-06	0.999528	0.005927	0.2932	0.3575					0.2822	1.5	30	
2.68E-06	0.99939	0.006606	0.9691	6.53E-08					0.1774	2	30	

4.53E-05	0.994581	0.024146	0.9666	3.05E-09	0.6895	0.5	40
2.21E-06	0.999016	0.009234	0.9418	0.04079	0.9591	1	40
6.02E-06	0.998149	0.013042	0.9161	0.09036	1.175	1.5	40
1.53E-05	0.996962	0.016476	0.9236	0.0893	1.32	2	40
2.89E-08	0.999848	0.0037	0.9333	0.04196	1.986	0.5	50
1.63E-08	0.999883	0.003345	0.9532	0.007188	2.092	1	50
4.77E-09	0.999933	0.002713	0.05937	40.63	0.05929	1.5	50
4.63E-08	0.999793	0.004789	0.0437	73.35	0.03575	2	50
8.35E-06	0.999321	0.006969	0.9865	0.01	0.09474	0.5	30
2.65E-06	0.999456	0.006976	0.9857	0.00054	0.1077	1	30
3.77E-06	0.999304	0.007201	0.9433	0.02916	0.136	1.5	30
2.29E-06	0.999435	0.006444	0.9636	0.0297	0.1755	2	30
3.36E-05	0.995333	0.023621	0.9907	0.03512	0.71	0.5	40
1.6E-06	0.999164	0.008511	0.9416	0.04423	0.9221	1	40
5.88E-06	0.99817	0.012967	0.9372	0.04679	1.09	1.5	40
1.4E-05	0.997096	0.016111	0.9393	0.04088	1.219	2	40
1.65E-07	0.999636	0.005725	0.95	0.04797	1.912	0.5	50
1.75E-08	0.999879	0.003406	0.9551	0.04431	2.08	1	50
5.58E-09	0.999927	0.002822	0.9492	0.05038	2.369	1.5	50
2.3E-08	0.999854	0.004021	0.9618	0.03978	2.608	2	50

جدول (۴). نتایج ضریب پخش شدگی در دماها و سرعت های مختلف

دما (درجه سانتیگراد)	سرعت (متر بر ثانیه)	ضریب پخش شدگی
30	0.5	9.50241E-08
30	1	1.01231E-07
30	1.5	1.04609E-07
30	2	1.39935E-07
40	0.5	6.12956E-07
40	1	6.57227E-07
40	1.5	7.5928E-07
40	2	9.24135E-07
50	0.5	1.25932E-06
50	1	1.38511E-06
50	1.5	1.39944E-06
50	2	1.56584E-06

منابع

- 1_ ابریشمی، م.ج. ۱۳۷۶. زعفران ایران، شناخت تاریخی، فرهنگی و کشاورزی. انتشارات آستان قدس رضوی.
- 2_ سبزواری. ۱۳۷۴. زعفران طلای سرخ کویر. بانک کشاورزی شماره ۴۶.
- 3_ ترکمانی، ج. ۱۳۷۹. تولد و بازاریابی و عوامل موثر بر صادرات زعفران موءسسسه پژوهشهای برنامه ریزی و اقتصادی کشاورزی.
- 4_ بی نام. ۱۳۸۰. گزارشات داخلی سازمان مدیریت طرح و برنامه، سازمان جهاد کشاورزی خراسان.
5. Raina, B.L., S.G. Agarwal, A.K. Bhatia and S.G. Gaur, 1996. Change in pigments and volatiles of saffron (*Crocus sativus* L.) during processing and storage, J. Sci, Food Agric. 71:27-32
6. Yibas, B. S., Hussain, M. M., & Dincer, I. (2003). Heat and moisture diffusion in slab products to convective boundary condition. Heat and mass Trasfer, 39, 471-476.
7. Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z.A. (2003) Newmodel for single-layer drying. Drying Technology, 20(7), 1503-1513.
8. Panchariya, P. C., Popovic, D., & Sharma, A. L. (2002). Thin-layer modeling of black tea drying process. Journal of Food Engineering, 52, 349-357
9. Demirtas, C., Ayhan, T., & Kaygusuz, K. (1998). Drying behavior of hazelnuts. Journal of the Science of Food and Agriculture, 76, 559-564.
10. Ece, M. C., & Cihan, A. (1993). A liquid diffusion model for drying rough rice. Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 36, 837-840
11. Ozdemir, M., & Devres, Y. O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. Journal of Food Engineering, 42, 225-233.



12. Wang, C. Y., & Singh, R.P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in modeling. Transactions of American Society of Agricultural Engineer, 11, 668-672.
13. Akgun, N. A., & Doymaz, I. (2005). Modeling of olive cake thin-layer drying process. Journal of Food Engineering, 68, 455-461
14. Thakor, N. J., Sokhansanj, S., Sosulski, F. W., & Yannacopoulos, S. (1999). Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying. Journal of Food Engineering, 40, 153-160.
15. Tutuncu, M. A., & Labuza, T. P. (1996). Effect of geometry on the effective moisture transfer diffusion coefficient. Journal of Food Engineering, 30, 433-447.
16. Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). The thin layer drying characteristics of garlic slices. Journal of Food Engineering, 29, 75-97.
17. Sanjuan, N., Lozano, M., Garcia-Pascal, P., & Mulet, A. (2003). Dehydration kinetics of red pepper (*Capsicum annum* L var Jaranda). Journal of the Science of Food and Agriculture, 83, 697-701.

Mathematical modeling on hot air drying of thin layer crocus sativus

Kamran Abbasi, S. R. Hasan-Beygi, M. H. Kianmehr *

Abstract

The hot air convective drying characteristics of thin layer crocus sativus were evaluated in a laboratory scale dryer. The drying experiments were carried out at 30, 40 and 50°C and at the air velocity of 0.5, 1, 1.5 and 2 m/s. Different mathematical models were tested with the drying behavior of crocus sativus in the dryer. The results indicated that the verma et al, Henderson and Pabis, Approximation of diffusion and Logarithmic model can present better predictions for the moisture transfer than others; increasing temperature and velocity lead to decrease drying time and increase Effective diffusivity.

the drying process took place in one falling rate periods, the general relationship of moisture ratio against drying duration in the thin-layer convective drying of crocus sativus were found.

Keywords: Crocus sativus; Hot air convective drying; Effective diffusivity; Activation energy.

*Dept. Agricultural Technical Engineering, Aboureyhan University College, University of Tehran, Tehran, Iran