

(مقاله پژوهشی)

**مدل سازی سینتیک خشک کردن گلبرگ زعفران با استفاده از روشهای مختلف****خشک کردن بستر سیال و نیمه سیال**موسی الرضا هوشمند دلیر<sup>۱</sup>، حمید توکلی پور<sup>۲\*</sup>، حسین چاجی<sup>۳</sup>، احمد کلباسی اشتری<sup>۴</sup>، پروین شرایعی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری تخصصی علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران.

۲- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران.

۳- استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

۴- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۵- دانشیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۸

**چکیده**

در فرآیند تولید زعفران، گلبرگ ها به عنوان ضایعات دور ریخته می شوند. به طوری که سالانه در ایران رقمی معادل ۷۲۵۷۶۲۵ کیلوگرم گلبرگ زعفران به عنوان محصول فرعی بدست می آید. بنابراین یافتن راه حلی برای بازیافت این حجم عظیم ضایعات از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. این پژوهش با هدف بررسی و تعیین مناسب ترین مدل سینتیکی نیمه تجربی برای توصیف فرآیند خشک کردن گلبرگ زعفران با استفاده از دو روش بستر نیمه سیال و بستر سیال در دماهای ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی گراد انجام شد. بدین منظور ابتدا یک خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی با قابلیت تنظیم درجه حرارت و سرعت جریان هوا و همچنین دارای قابلیت برنامه ریزی جهت توزین نمونه ها در فواصل زمانی مختلف با دقت بسیار بالا ساخته شد و سپس آزمایش تجربی خشک کردن گلبرگ زعفران در دماهای (۴۵ و ۵۵ درجه سانتی گراد) و سرعت هوای خشک کن بستر نیمه سیال و سیال (۰/۷ و ۱/۷ متر بر ثانیه) انجام و رفتار خشک شدن بر اساس داده های آزمایشگاهی مورد برازش قرار گرفت. نتایج نشان داد زمان لازم جهت خشک شدن گلبرگ زعفران با افزایش دمای هوای خشک کردن از ۴۵ به ۵۵ درجه سانتی گراد و سرعت جریان هوا از ۰/۷ به ۱/۷ متر بر ثانیه، کاهش یافت. به طوری که فرآیند خشک کردن گلبرگ زعفران در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد با سرعت سیال ۱/۷ متر بر ثانیه طی زمان ۶۰ دقیقه و با سرعت سیال ۰/۷ متر بر ثانیه طی زمان ۹۶ دقیقه و در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد با سرعت سیال ۱/۷ متر بر ثانیه طی زمان ۳۰ دقیقه و با سرعت ۰/۷ متر بر ثانیه طی زمان ۳۶ دقیقه به پایان رسید. به گونه ای که بیشترین زمان خشک کردن مربوط به جریان هوای ۰/۷ متر بر ثانیه در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد و کمترین زمان مربوط به جریان هوای ۱/۷ متر بر ثانیه در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد می باشد. بررسی میزان دفع رطوبت گلبرگ زعفران طی خشک کردن نشان داد پارامتر ضریب نفوذ موثر رطوبت از  $10^{-10}$  تا  $9/548 \times 10^{-10}$  متر مربع در روش بستر نیمه سیال و  $10^{-9}$  تا  $1/963 \times 10^{-9}$  متر مربع بر ثانیه در روش بستر سیال، انرژی فعال سازی از  $56/83$  کیلوژول بر مول در بستر سیال تا  $78/78$  کیلوژول بر مول در بستر نیمه سیال متغیر بود. در برازش داده ها با ۱۱ مدل نیمه تجربی مشخص شد برای برازش داده های آزمایشگاهی، مدل های دو جمله ای، لگاریتمی و اصلاح شده هندرسون و پایس با داشتن بالاترین ضریب تبیین و کمترین ریشه متوسط خطای داده ها و مجموع مربعات خطا، مدل های مناسب بودند.

**واژه های کلیدی:** گلبرگ زعفران، مدل سازی، سینتیک خشک کردن، ضریب نفوذ، انرژی فعال سازی.

## ۱- مقدمه

در فرآیند تولید زعفران از قسمت کلالة و خامه گل به عنوان زعفران تجارتي استفاده می‌شود و سایر قسمت‌های گل از جمله گلبرگ‌ها به عنوان ضایعات دور ریخته می‌شود که از حجم بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. به طوری که در ایران سالانه رقمی معادل ۷۲۵۷۶۲۵ کیلوگرم گلبرگ زعفران به عنوان محصول فرعی بدست می‌آید. بنابراین یافتن راه حلی برای بازیافت این حجم عظیم ضایعات از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد (۱۹). نشان داده است که گلبرگ‌های جنس کروکوس<sup>۱</sup> که زعفران نیز در آن گروه قرار دارد، دارای انواع زیادی از ترکیبات فلاونوئیدی، گلیکوزیدی و آنتوسیانین می‌باشد (۱۸) از طرفی ارتباط معنی‌دار فعالیت آنتی‌اکسیدانی مواد گیاهی با محتویات ترکیبات فنولیک به اثبات رسیده است (۱۱). با توجه به سطح بالای ترکیبات فلاونوئیدی در گلبرگ زعفران، استفاده از آن به عنوان یک منبع آنتی‌اکسیدانی طبیعی می‌تواند مورد توجه باشد. شاید اولین پیشنهاد جهت حفظ ترکیبات مذکور و جلوگیری از هدر رفتن این محصول ضایعاتی، خشک کردن باشد. تسلیمی و همکاران (۱۳۸۵) اثرات فرآیندهای خشک کردن خورشیدی و آون خلاء بر ویژگی‌های کیفی محصول زعفران و سپس مقایسه آن‌ها را با نتایج روش خشک کردن سنتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های شیمیایی نشان دادند که به لحاظ کروسین<sup>۲</sup> (عامل رنگ) نمونه‌های خشک‌شده به روش خورشیدی و آون خلاء وضعیت مطلوب‌تر نسبت به روش سنتی داشتند. به لحاظ عطر (سافرانال<sup>۳</sup>) تفاوت معناداری بین نمونه‌های سه روش دیده نشد. در ارزیابی حسی رنگ، نمونه‌های خشک‌شده خورشیدی و آون خلاء نسبت به روش سنتی در وضعیت بهتری قرار داشتند، و بین نمونه‌های خشک‌شده خورشیدی و سنتی تفاوت معنادار بود ( $P > 0.05$ ) (۲). بلندی و همکاران (۱۳۸۳) زعفران را به سه روش سنتی

(۲۵°C)، اصلاح شده اسپانیایی (۲۵°C) و با استفاده از آون میکروویو (۳۰۰ وات) خشک کردند و تغییرات شیمیایی آن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که زمان انبارداری و روش خشک کردن بطور معنی‌داری خصوصیات شیمیایی از جمله میزان رنگ، عطر و طعم را ( $P > 0.05$ ) تحت تاثیر قرار داده است. در بین سه روش مذکور نمونه زعفران خشک شده توسط آون میکروویو دارای بالاترین مقدار رنگ و عطر و طعم بود (۱). مظلومی و همکاران (۱۳۸۶) روش‌های خشک کردن زعفران به کمک خلاء، انجماد، میکروویو و خورشیدی با روش سنتی را مقایسه نمودند و مناسب‌ترین روش خشک کردن را معرفی کردند. تحقیق آن‌ها به صورت تجربی انجام گرفت. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که از نظر عامل مولد رنگ (کروسین) روش‌های خورشیدی، آون خلاء و میکروویو با تفاوت معنی‌داری نسبت به سایر روش‌ها قرار داشتند. از نظر عامل مولد عطر (سافرانال) و عامل مولد طعم نمونه‌های خشک شده پیکروکروسین<sup>۴</sup> تفاوت معنی‌داری بین روش‌ها مشاهده نشد. از نظر ویژگی میکروبی بجز نمونه‌های تهیه شده با روش‌های سنتی و انجمادی، بقیه روش‌ها با استاندارد ملی ایران مطابقت داشتند ( $p < 0.05$ ). در نهایت آن‌ها بیان نمودند که با این که هر چهار روش مطالعه در جایگاه والاتری نسبت به روش خشک کردن سنتی قرار داشتند، ولی به طور کلی می‌توان روش خورشیدی را به عنوان یک روش مناسب برای خشک کردن در مناطق روستایی تولید کننده زعفران توصیه کرد (۶). خوش تقاضا و همکاران (۱۳۸۶) بیان کردند که در میان روش‌های جدید خشک کردن، روش بستر سیال از اهمیت خاصی برخوردار است. آن‌ها در مطالعه خود فرآیند خشک کردن شلتوک به روش‌های بستر ثابت و سیال را از نظر راندمان حرارتی، نرخ خشک شدن و میزان دانه مورد مقایسه قرار دادند. بیشترین مقدار راندمان حرارتی ۸۴/۲۲ درصد و کمترین مقدار آن ۳۳/۳ درصد، به ترتیب مربوط به شرایط بستر ثابت در دمای

- 1- Crocus
- 2- Crocin
- 3- Saffronal

4-Picrocrocin

## ۲-۲- روش‌ها

### ۲-۲-۱- فرآیند خشک کردن

آزمایش تجربی خشک کردن گلبرگ زعفران در دو سطح دمای هوای خشک‌کننده ۴۵ و ۵۵ درجه سلسیوس، با استفاده از دو روش بستر نیمه سیال (با سرعت هوای معادل ۰/۷ متر بر ثانیه) و بستر سیال (با سرعت هوای معادل ۱/۷ متر بر ثانیه) انجام شد. دستگاه خشک‌کن مطابق شکل ۱ طراحی و ساخته شد. سیستم گرم‌کننده مجهز به المنت های برقی بوده که این المنت ها بعد از دمنده و قبل از محفظه خشک‌کن، درون کانال قرار گرفته اند. دمنده، هوا را با سرعت قابل تنظیم از بخش تحتانی دستگاه و از طریق یک فیلتروارد محفظه خشک‌کن می نماید. ابتدا دستگاه برنامه ریزی شده و قبل از شروع فرآیند خشک‌کردن، دستگاه خشک‌کن روشن و دمای آن متناسب با دمای مورد نیاز تنظیم می شود تا دمای هوای داخل خشک‌کن به حالت پایدار برسد. همچنین در روش بستر سیال سرعت هوا در حد ۱/۷ متر بر ثانیه (۹۰ درصد سرعت بحرانی سیال سازی)، در روش بستر نیمه سیال سرعت هوا در حد ۰/۷ متر بر ثانیه (حدود ۴۰ درصد سرعت بحرانی سیال سازی) و در روش بستر ثابت سرعت هوا در حد ۰/۲ متر بر ثانیه (حدود ۱۰ درصد سرعت بحرانی سیال سازی) تنظیم گردید. سپس نمونه های گلبرگ زعفران در هر یک از روش‌های خشک‌کردن به طور یکنواخت داخل دستگاه قرار داده شد و کاهش وزن آن‌ها در فواصل زمانی تعیین شده اندازه گیری و ثبت شد. خشک‌کردن نمونه‌ها تا رسیدن به محتوی رطوبت ثابت انجام شد.

۸۰ درجه سانتی‌گراد و سیال کامل در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود. عامل اصلی ترک دانه‌ها، شرایط بستر ثابت تعیین شد، به طوری که بیشترین زمان خشک شدن (۲۸۰ دقیقه) و بیشترین مقدار ترک دانه (۷۸ درصد) مربوط به این حالت و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد اندازه گیری شد. کم‌ترین زمان خشک شدن (۴۰ دقیقه) و همچنین کم‌ترین مقدار ترک دانه (۱۷ درصد) نیز مربوط به حالت بستر نیمه سیال به ترتیب با دماهای ۸۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود (۴). مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن، ارتباط بین متغیرهای زمان و رطوبت را ارائه می‌دهد، که به عنوان راه کار مناسبی برای کنترل زمان و شرایط خشک کردن مورد استفاده قرار می‌گیرد. آهنگ خشک کردن که نشان‌دهنده میزان تغییرات رطوبت در واحد زمان است، تحت تأثیر عوامل مؤثر بر خشک شدن مانند دما، رطوبت نسبی و سرعت سیال خشک‌کننده می‌باشد. برای طراحی خشک‌کن‌ها داشتن اطلاعات کافی از سینتیک خشک کردن ضروری است (۲۹). این پژوهش جهت بررسی و تعیین مناسب‌ترین مدل سینتیکی نیمه تجربی برای توصیف فرآیند خشک کردن گلبرگ زعفران با استفاده از دو روش بستر نیمه سیال و بستر سیال و با هدف یافتن راه حلی مناسب برای حفظ حجم عظیم این محصول ضایعاتی انجام گردید.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد اولیه

گلبرگ زعفران از مزارع کشت زعفران از مزارع موجود در نزدیکی سبزوار واقع در شمال شرق ایران تهیه گردید.

۴- مقاومت خارجی در برابر انتقال رطوبت وجود ندارد.  
 ۵- چروکیدگی محصول طی فرآیند خشک کردن ناچیز در نظر گرفته می شود.

معادله فیک را نیومن ۱ در شرایط مختلف برای مواد دارای اشکال مختلف (تیغه ای، استوانه ای و کروی) حل نموده است. حل این معادله برای تیغه های نامحدود به صورت زیر می باشد:

رابطه (۲)

$$MR = \frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \left[ \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4h^2}\right) + \frac{1}{9} \exp\left(-\frac{9\pi^2 D_{eff} t}{4h^2}\right) + \frac{1}{25} \exp\left(-\frac{25\pi^2 D_{eff} t}{4h^2}\right) + \dots \right] = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4h^2}\right]$$

که MR نسبت رطوبت (بدون بعد)، m متوسط میزان رطوبت بر مبنای وزن خشک (گرم بر گرم) در زمان  $m_0, t$  رطوبت اولیه بر حسب وزن خشک،  $m_e$  میزان رطوبت اولیه تعادلی، t زمان خشک کردن و h نصف ضخامت تیغه است (۲۳ و ۲۷).  
 با فرض ناچیز بودن میزان رطوبت تعادلی، معادله فوق به صورت رابطه ۳ در می آید:

رابطه (۳)

$$MR = \frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4h^2}\right] = \frac{8}{\pi^2} \exp(-Kt)$$

که K ثابت انتشار رطوبت است و رابطه آن با ضریب نفوذ موثر به صورت رابطه ۴ می باشد:

$$D_{eff} = \frac{4 Kh^2}{\pi^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

### ۳-۲- مدل سازی ریاضی سینتیک خشک کردن گلبرگ زعفران

برای مدل سازی ریاضی سینتیک خشک شدن توده گلبرگ زعفران در دو روش ذکر شده بستر نیمه سیال و بستر سیال، از



شکل ۱- خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی

### ۲-۲-۲- سینتیک افت رطوبت

مکانیسم افت رطوبت بسیار پیچیده است و تئوری های مختلفی در زمینه انتقال رطوبت در فرآیند خشک کردن ارائه شده است که از جمله مهمترین آن ها می توان به مکانیسم نفوذ مولکولی، حرکت در لوله های موئین، نفوذ مایع در خلل و فرج ماده جامد، نفوذ بخار در منافذ حاوی هوا و جریان هیدرودینامیکی اشاره کرد. از آنجایی که تفکیک هر مکانیسم و اندازه گیری میزان انتقال جرم هر یک به طور جداگانه کار دشواری است، قانون دوم فیک (رابطه ۱) برای توصیف سینتیک انتشار رطوبت در مواد غذایی حرارت دیده مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \nabla(D_{eff}(\nabla M)) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که m محتوای رطوبتی (گرم بر گرم ماده خشک)، t زمان (ثانیه) و  $D_{eff}$  ضریب نفوذ موثر رطوبت است. حل ساده تر این معادله مستلزم فرضیات ذیل است:

۱- توزیع رطوبت و دمای اولیه در نمونه ها یکنواخت است. به عبارت دیگر، محصول اولیه، ماده ای ایزوتروپیک و ایزوترمال است.

۲- انتقال جرم و حرارت در ماده غذایی به صورت تک بعدی در نظر گرفته می شود.

۳- انرژی حرارتی مورد نیاز برای واکنش های شیمیایی بسیار کمتر از انرژی لازم برای تبخیر رطوبت است.

در جدول ۱ نشان داده شده است. در این مدل‌ها منحنی‌های خشک کردن از رسم تغییرات نسبت رطوبت (MR) بر حسب زمان خشک کردن حاصل می‌شود (۹ و ۱۶).

تغییرات نسبت رطوبت توده محصول طی فرآیند خشک شدن استفاده شد. متداول‌ترین مدل‌های تجربی را که در اغلب پژوهش‌ها برای برازش داده‌های آزمایشگاهی به کار می‌رود

جدول ۱- مدل‌های رگرسیون خشک شدن توده بستر سیال مورد استفاده در مدل‌سازی

ردیف	نام مدل	مدل*	منبع
۱.	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	وسترمن و همکاران، ۱۹۷۳
۲.	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	گوارته، ۱۹۹۶
۳.	هندرسون و پابیس	$MR = a \exp(-kt)$	زانگ و لیچفیلد، ۱۹۹۱
۴.	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	یالدیز و ارتکین، ۲۰۰۱
۵.	دو جمله‌ای	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	رحمان و همکاران، ۱۹۹۸
۶.	دو جمله‌ای نمایی	$MR = a \exp(-kt) + \exp(-mt)$	هندرسون، ۱۹۷۴
۷.	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	اوزدمیر و دورس، ۱۹۹۹
۸.	تقریب پخش	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	یالدیز و ارتکین، ۲۰۰۱
۹.	هندرسون و «پابیس اصلاح شده»	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	کاراتانوس، ۱۹۹۹
۱۰.	میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	یالدیز و ارتکین، ۲۰۰۱
۱۱.	سیلوا	$MR = \exp(-at - b\sqrt{t})$	سیلوا و نبرا، ۱۹۹۷

RM: نسبت رطوبت، t: زمان (دقیقه) و a، b، c و ضرایب h، g، k و m ثابت‌های مدل است.

در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست. مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت طی خشک شدن بر اساس متغیر مستقل زمان به وسیله جعبه ابزار نرم‌افزار MATLAB R2016b ورژن (8.6.0.267246) استخراج شد و ضرایب آن‌ها (a، b، c، k، n) تعیین گردید. برای انتخاب بهترین مدل از سه معیار ضریب تبیین<sup>۱</sup> (R<sup>2</sup>)، ریشه متوسط خطای داده‌ها<sup>۲</sup> و مجموع مربعات خطا<sup>۳</sup> استفاده

نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده محصول در هر لحظه طی خشک شدن به وسیله رابطه ۵ محاسبه می‌شود (۷).

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه، MR نسبت رطوبت، M<sub>d</sub> رطوبت نمونه در لحظه جاری بر پایه وزن خشک، M<sub>e</sub> رطوبت تعادلی نمونه بر پایه وزن خشک و M<sub>0</sub> رطوبت اولیه نمونه بر پایه وزن خشک می‌باشد. در محصولات با رطوبت بالا می‌توان معادله فوق را به شکل زیر ساده‌سازی کرد:

$$MR = \frac{M_d}{M_0} \quad \text{رابطه (۶)}$$

1-R<sup>2</sup>  
2-RMSE  
3-SSE

تا رسیدن به رطوبت تعادلی کاهش یافت. در آغاز فرآیند خشک کردن، کاهش رطوبت سریع تر است (۳۷ و ۳۸)، اما با گذشت زمان به سبب این که رطوبت باید از قسمت های داخلی ماده به سطح بیرونی رسیده و سپس تبخیر گردد، کاهش رطوبت کندتر انجام می شود. زمان لازم جهت خشک شدن گلبرگ زعفران با افزایش دمای هوای خشک کردن از ۴۵ به ۵۵ درجه سانتی گراد و سرعت جریان هوا از ۰/۷ (بستر نیمه سیال) به ۱/۷ (بستر سیال)، کاهش یافت. به طوری که فرآیند خشک کردن گلبرگ زعفران از رطوبت اولیه  $2 \pm 85\%$  تا رطوبت نهایی  $1 \pm 10\%$  (در مبنای مرطوب) با سرعت جریان هوای (۱/۷ و ۰/۷ متر بر ثانیه) در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد به ترتیب طی زمان های (۶۰ و ۹۶) دقیقه و در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد طی زمان های (۳۰ و ۳۶) دقیقه به پایان رسید. به گونه ای که بیشترین زمان خشک کردن مربوط به جریان هوای ۰/۷ متر بر ثانیه در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد و کمترین زمان مربوط به جریان هوای ۱/۷ متر بر ثانیه در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد می باشد. این پدیده احتمالاً به دلیل افزایش انرژی آب موجود در گلبرگ زعفران و یا افزایش پتانسیل انتقال حرارت بین هوا و گلبرگ می باشد که گرمای نهان تبخیر لازم برای تبخیر آب از گلبرگ را تامین می کند و در نتیجه باعث خروج بیشتر آب و در نتیجه کاهش میزان رطوبت می شود. نتایج مشابهی توسط سایر محققان بر روی سبزیجات مختلف گزارش شده است (۲۰، ۲۶، ۳۰، ۳۴، ۳۳، ۳۱).

می شود. برای هر مدل  $R^2$  بیشتر و SSE و RMSE کمتر، یک مزیت به حساب می آید.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (MR_{expi} - MR_{predi})^2 \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{expi} - MR_{predi})^2}{n}} \quad (8)$$

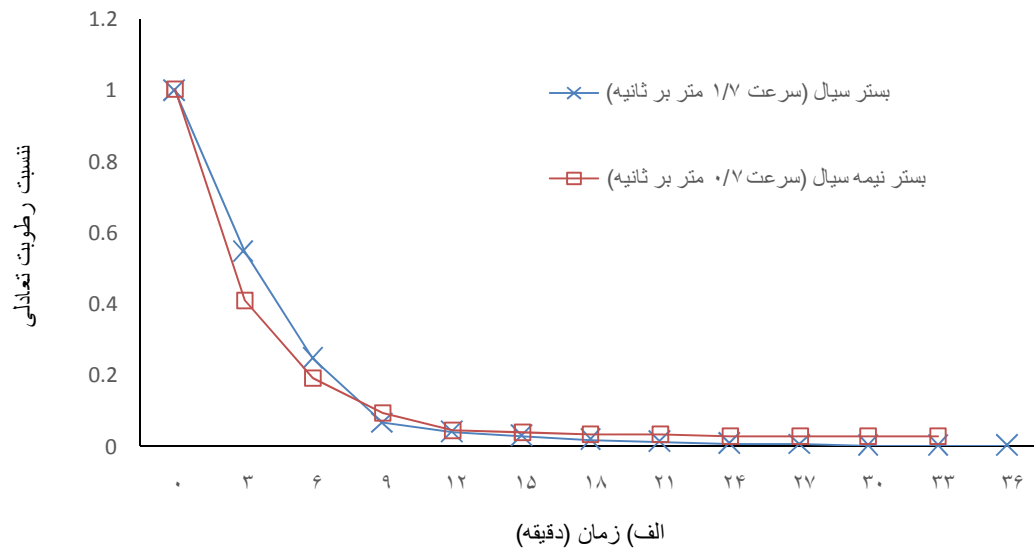
در رابطه های ۷ و ۸؛  $MR_{expi}$ ، نسبت رطوبت مشاهده شده؛  $MR_{predi}$ ، نسبت رطوبت پیش بینی شده؛  $n$ ، تعداد مشاهدات می باشد.

### ۳- نتایج و بحث

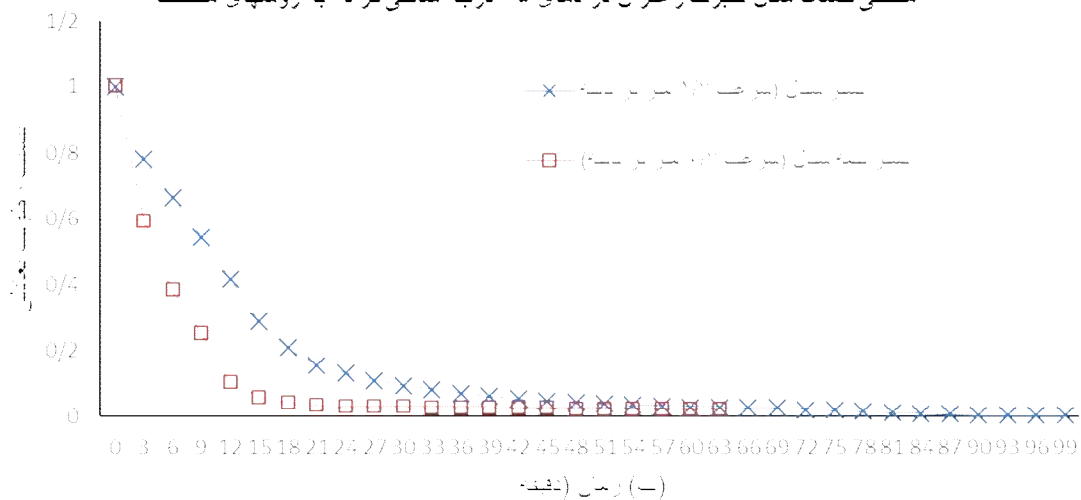
#### ۳-۱- تاثیر دما و سرعت هوای خشک کن بر زمان خشک کردن و آهنگ خشک شدن

مطالعه سینتیک افت رطوبت برای رسیدن به اطلاعاتی درباره زمان مورد نیاز برای خشک کردن صحیح محصول ضروری می باشد. سینتیک افت رطوبت در مواد غذایی مختلف به عوامل متعددی مانند دما، رطوبت اولیه محصول، سرعت هوا و غیره وابسته است و با تغییر شرایط فرایند سینتیک افت رطوبت نیز تغییر می کند (۱۳). تاثیر دما و سرعت هوای خشک کن (روش خشک کردن) بر روی مدت خشک شدن در شکل های ۲ نشان داده شده است. این شکل ها، نسبت رطوبت (MR) را در مقابل زمان بر حسب دقیقه برای سطوح مختلف دما و سرعت هوای خشک کن نشان می دهند. میزان رطوبت نمونه ها با افزایش زمان خشک کردن به صورت نمایی

منحنی روند خشک شدن گلبرگ زعفران در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد به روشهای مختلف



منحنی خشک شدن گلبرگ زعفران در دمای ۶۵ درجه سانتی گراد به روشهای مختلف



شکل ۲- نسبت رطوبت در مقابل زمان برای سطوح مختلف دما و سرعت هوای خشک کن

کردن برای گلبرگ های زعفران که در دمای بالاتری خشک شده بودند نسبت به گلبرگ های زعفران که در دمای پائین تری خشک شده بودند بیشتر بود در نتیجه زمان خشک کردن در دماهای بالاتر کمتر است چون رطوبت نسبی هوا با افزایش

آهنک خشک کردن بر حسب میزان رطوبت در مبنای خشک در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود آهنک خشک کردن به طور پیوسته با کاهش میزان رطوبت یا افزایش زمان خشک کردن، کاهش می یابد. آهنک خشک

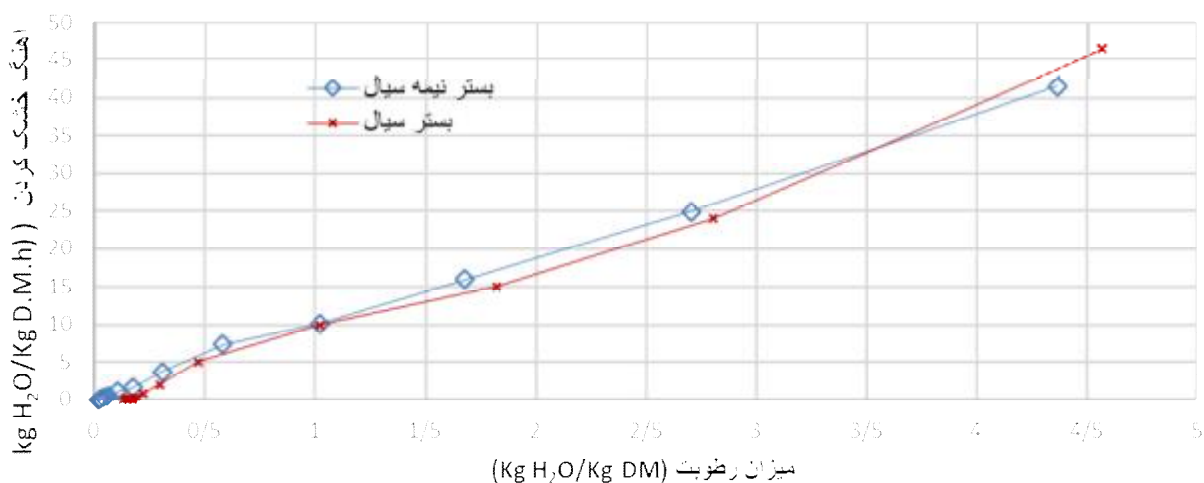
مقایسه شکل ۳ (الف و ب) نشان می‌دهد که با کاهش درجه حرارت سرعت انتقال رطوبت از بافت ماده به سطح و سپس تبخیر آن کاهش یافته در نتیجه سرعت خشک کردن در دماهای پایین کمتر است. با این وجود باید توجه داشت که آهنگ خشک کردن در هر دو روش بستر سیال و بستر نیمه سیال در دمای ۴۵ درجه تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند.

درجه حرارت خشک کردن، کاهش می‌یابد (۲۱). با توجه به این شکل، خشک کردن گلببرگ‌ها تا رطوبت  $0.25 \text{ (KgH}_2\text{O/KgDM)}$  دارای آهنگ نزولی است و از  $0.25 \text{ (KgH}_2\text{O/KgDM)}$  به پایین تر آهنگ خشک کردن تقریباً ثابت شده است که احتمالاً مقاومت انتقال جرم داخلی کنترل کننده فرآیند خشک کردن گلببرگ‌ها می‌باشد.

الف) در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد



ب) در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۳- آهنگ خشک کردن گلببرگ زعفران بر حسب رطوبت در مبنای خشک



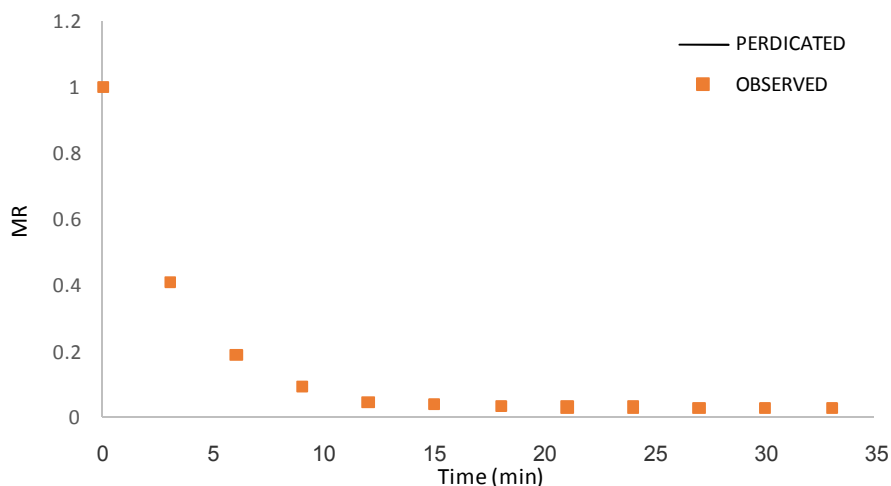
## ۳-۲- مدل سازی سینتیک خشک کردن

نتایج برازش ۱۰ مدل دینامیکی نیمه تجربی (مشخص شده در جدول ۱)، بر داده‌های آزمایشی خشک کردن گلبرگ زعفران در دماهای ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۰/۷ و ۱/۷ متر بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت و نهایتاً مدل مناسب برای هر روش براساس بیشترین ضریب تبیین و کمترین مقدار SSE و RMSE انتخاب گردید. ضرایب و ثابت مدل‌هایی که بهترین برازش را بر روی داده‌های حاصل از خشک کردن گلبرگ در شرایط مختلف دارا بودند، در جدول ۲ نشان داده شده است. مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن برای طراحی، بهبود سیستم‌های خشک کن موجود و حتی کنترل فرآیند استفاده می‌شود (۱۴). همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، مطالعات زیادی به منظور مدل‌سازی میوه و سبزیجات مختلف جهت یافتن بهترین مدل ریاضی برای توصیف رفتار خشک شدن صورت گرفته است (۱۴؛ ۳۳؛ ۵؛ ۱۶؛ ۳۵؛ ۲۵؛ ۴۰؛ ۳۲). بر اساس جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود که در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد بهترین مدل نیمه تجربی برازش شده برای روش خشک کردن بستر نیمه سیال (با سرعت سیال ۰/۷ متر بر ثانیه) مدل دو جمله‌ای و برای روش خشک کردن بستر سیال (با سرعت سیال ۱/۷ متر بر ثانیه) مدل لگاریتمی بوده است. اما در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد برای روش خشک کردن بستر نیمه سیال مدل دو جمله‌ای و برای خشک کردن بستر سیال مدل اصلاح شده هندرسون و پاییس بهترین مدل‌ها با کمترین میزان SSE و RMSE و بیشترین ضریب

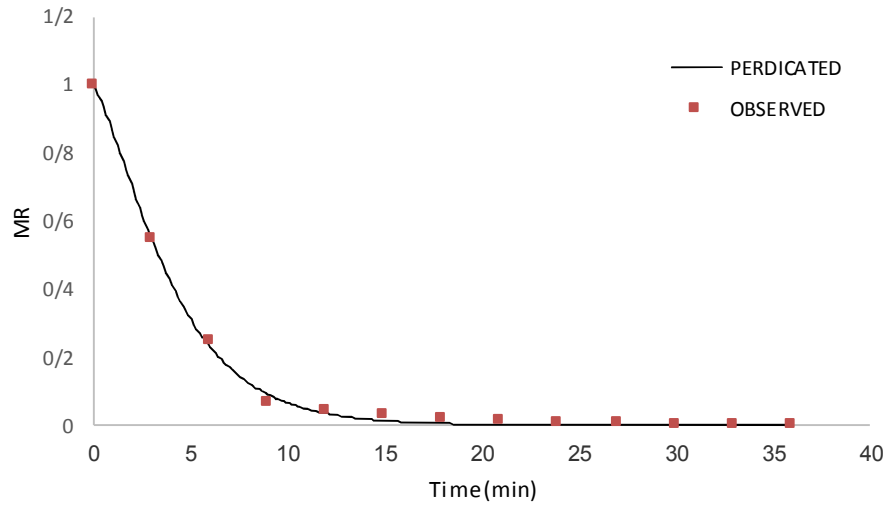
تبیین ( $R^2$ ) بوده اند. توکلی‌پور و همکاران (۱۳۹۰)، ویژگی‌های خشک کردن لایه نازک برگ‌های ریحان را با استفاده از روش خورشیدی و آفتابی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در بین هفت مدل برازش داده شده، مدل هندرسون اصلاح شده در هر دو روش تطابق بهتری با داده‌های آزمایشی داشت (۳). دویماز (۲۰۰۴)، لایه‌های نازک هویج به ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر را در چهار دمای ۵۰، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس با سرعت هوای ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه به وسیله خشک‌کن آزمایشگاهی خشک و گزارش نمود مدل پیچ نسبت به مدل هندرسون و پاییس نتیجه بهتری نشان داد (۱۳). زمردیان و مرادی (۲۰۱۰)، مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک شدن لایه نازک زیره سبز را در یک خشک‌کن خورشیدی در دو حالت تابش (مختلط و غیر مستقیم) و شرایط مختلف خشک کردن بررسی کردند و در نهایت اعلام نمودند که مدل تقریب پخش برای تابش مختلط و مدل میدلی برای تابش غیر مستقیم بهترین برازش را با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده است (۴۰). زیلینسکا و مارکوسکی<sup>۱</sup> (۲۰۱۰)، با بررسی شرایط خشک کردن روی قطعات مکعبی هویج با افزایش دما از ۶۰ الی ۹۰ درجه سلسیوس و مدل‌سازی داده‌های حاصل از فرآیند خشک کردن با چهار مدل ریاضی معتبر نشان دادند که مدل دو جمله‌ای بهترین نتیجه را نسبت به سایر مدل‌ها دارد (۳۹). در شکل‌های شماره ۴، ۵، ۶ و ۷ مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و مدل‌های پیشنهادی در روش‌های مختلف فرآیند خشک کردن و درجه حرارت خشک کردن صورت پذیرفته است.

جدول ۲- مدل های نیمه تجربی مناسب برازش داده شده بر داده های آزمایشی خشک کردن گلبرگ زعفران در دما و سرعت هوای متفاوت

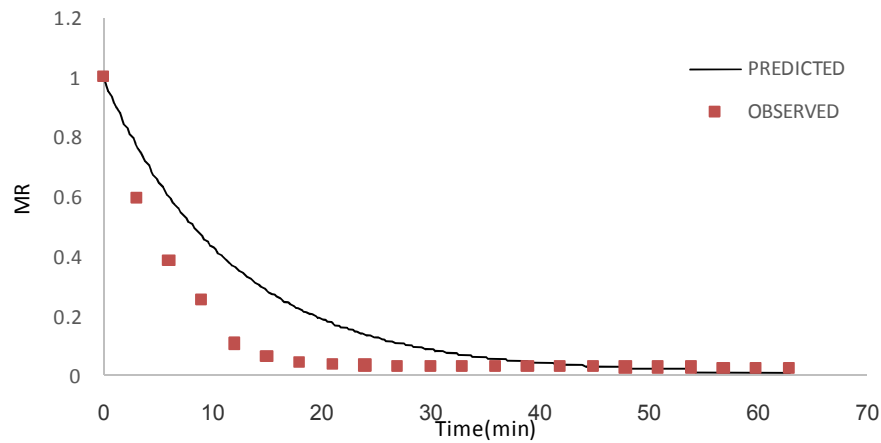
RSME	AdjR <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	SSE	ضرایب							نام مدل	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)
				k	h	g	d	c	b	a			
۰/۰۰۶۲۸۱	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۱۱۸۳	۰/۱۳۱۰	-	-	۰/۰۱۷۳۳	-	۰/۰۲۴۳۵	۰/۹۸۱۶	دوجمله ای	۰/۷	۴۵
۰/۰۰۶۲۸۱	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۳	۰/۰۰۱۱۸۳	۰/۰۴۶۷۵	-	-	۰/۰۰۰۰۰۰	-	۰/۰۰۰۰۰	۰/۹۹	لگاریتمی	۱/۷	
۰/۰۰۶۲۸۱	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۱۱۸۳	۰/۰۲۷۸۰	-	-	۰/۰۳۱۰	-	۰/۰۷۷۸۰	۰/۸۲۰۵	دو جمله ای	۰/۷	۵۵
۰/۰۰۲۴۴	۰/۹۹۹۹	۱	۰/۰۰۱۱۸۳	۰/۰۷۵۱۰	۰/۰۶۱۷۰	۰/۰۳۸۰	-	۰/۰۷۲۲۰	۰/۰۱۲۲۹	۰/۸۷۵۳	اصلاح شده هندرسون و پاییس	۱/۷	



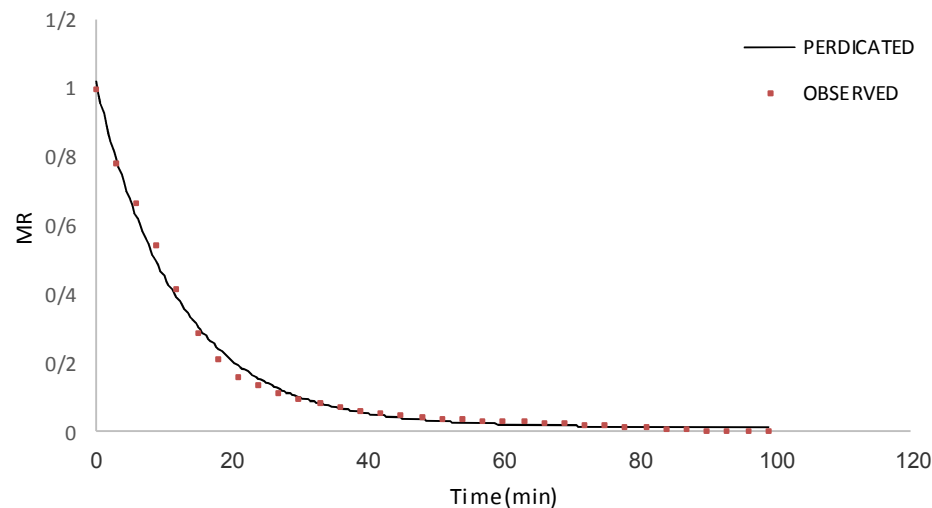
شکل ۴- منحنی نسبت رطوبت به زمان خشک کردن و مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی هندرسون و پاییس اصلاح شده در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد و سرعت سیال ۱/۷ متر بر ثانیه



شکل ۵- منحنی نسبت رطوبت به زمان خشک کردن و مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی دوجمله ای در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد و سرعت سیال ۰/۷ متر بر ثانیه



شکل ۶- منحنی نسبت رطوبت به زمان خشک کردن و مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی لگاریتمی در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد و سرعت سیال ۱/۷ متر بر ثانیه



شکل ۷ - منحنی نسبت رطوبت به زمان خشک کردن و مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی دو جمله ای در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد و سرعت سیال ۰/۷ متر بر ثانیه

### ۳-۳- ضریب نفوذ موثر رطوبت

با توجه به روابطه ارائه شده در بخش قبل مقادیر میانگین ضریب نفوذ موثر رطوبت برای گلبرگ زعفران خشک شده تحت شرایط آزمایش در جدول ۳ نشان داده شده است. بررسی میزان دفع رطوبت از گلبرگ های زعفران طی فرآیند خشک کردن نشان داد پارامتر ضریب نفوذ موثر رطوبت  $(D_{eff})$  تحت تاثیر دما و سرعت هوای خشک کنانز  $10^{-10} \times 9/548$  تا  $10^{-9} \times 9/548$  متر مربع در روش بستر نیمه سیال و  $10^{-9} \times 1/963$  تا  $10^{-9} \times 1/114$  متر مربع بر ثانیه در روش بستر سیال، متغیر بود. نتایج نشان داد که با افزایش دما و سرعت خشک کردن، مقدار این ضریب افزایش یافت. که احتمالاً علت آن افزایش فشار بخار آب هم زمان با افزایش دما و سرعت حرکت سیال بوده است و در نتیجه باعث افزایش حرکت و یا انتقال آن از منافذ مویینه ماده شده است. البته بر

اساس نتایج حاصله مشخص می شود میزان ضریب نفوذ موثر رطوبت در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد با افزایش سرعت سیال خشک کننده از ۰/۷ به ۱/۷ متر بر ثانیه کاهش یافته است که ممکن است دلیل آن خشک شدن سریع سطح گلبرگ ها و ایجاد لایه سخت در سطح آن ها بوده باشد. محققین مختلفی مقادیر  $D_{eff}$  تقریباً مشابهی برای سایر سبزیجات و میوهجات خشک شده با روش های مختلف و در دامنه های دمایی متفاوت گزارش کرده اند. به طور مثال ضرایب نفوذ رطوبت برای گوجه فرنگی خشک شده در دامنه دمایی ۴۵ تا ۷۵ درجه سانتی گراد  $10^{-9} \times 3/72 - 12/27$  متر مربع بر ثانیه (۳۳)؛ برای سیب زمینی خشک شده در دامنه دمایی ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی گراد،  $10^{-10} \times 4/2 - 2$  متر مربع بر ثانیه (۸)؛ و برای سیر خشک شده در دامنه دمایی ۵۰ تا ۹۰ درجه سانتی گراد،  $10^{-10} \times 7/65 - 5/65$  (۲۲) گزارش شده است.

جدول ۳- میانگین ضریب نفوذ موثر رطوبت گلبرگ زعفران خشک شده در دما و سرعت هوای مختلف

دما (درجه سلسیوس)	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	ضریب نفوذ موثر ( $D_{eff}$ )، متر مربع بر ثانیه	زمان خشک کردن (دقیقه)
۳۵	۰/۷	$3/7583 \times 10^{-10}$	۱۳۵
۳۵	۱/۷	$5/0826 \times 10^{-10}$	۱۳۵
۴۵	۰/۷	$9/5484 \times 10^{-10}$	۹۹
۴۵	۱/۷	$1/1144 \times 10^{-9}$	۶۳
۵۵	۰/۷	$2/4552 \times 10^{-9}$	۳۶
۵۵	۱/۷	$1/9636 \times 10^{-9}$	۳۳

## ۳-۴- انرژی فعال سازی

در جدول ۴ مقادیر میانگین انرژی فعال سازی ( $E_a$ ) در خشک کردن گلبرگ زعفران در شرایط دماهایی ۳۵ تا ۵۵ درجه سانتی گراد و با سرعت هوای ۰/۷ و ۱/۷ نشان داده شده است. مقادیر انرژی فعال سازی تحت تاثیر سرعت هوای

خشک کن از ۵۶/۸۳ کیلوژول بر مول در بستر سیال تا ۷۸/۷۸ کیلوژول بر مول در بستر نیمه سیال متغیر می باشد. انرژی فعال سازی به عنوان مقدار انرژی لازم برای شروع واکنش شیمیایی محسوب می شود، به طوری که با داشتن انرژی فعال سازی می توان ضریب نفوذ را برای دماهای مختلف تخمین زد.

جدول ۴- میانگین انرژی فعال سازی ( $E_a$ ) در فرآیند خشک کردن گلبرگ زعفران با بستر نیمه سیال و سیال در محدوده دمایی ۳۵ تا ۵۵ درجه سانتی گراد

سرعت هوا (متر بر ثانیه)	۰/۷	۱/۷
انرژی فعال سازی ( $E_a$ )، (کیلوژول بر مول)	۷۸/۷۸	۵۶/۸۳

## ۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصله از این پژوهش مشخص شد درجه حرارت خشک کردن تاثیر بیشتری در کاهش زمان خشک کردن دارد و استفاده از جریان هوا می تواند باعث کاهش بیشتر زمان فرآیند خشک کردن شود. استفاده از حرارت ۵۵ درجه سانتی گراد و جریان سیال ۱/۷ متر بر ثانیه با داشتن پارامترهای بهتر فرآیند خشک کردن نظیر زمان کمتر، انرژی فعال سازی پایین تر و ضریب نفوذ موثر رطوبت بیشتر می تواند نتایج بهتری را در حفظ ترکیبات مفید گلبرگ زعفران

به دنبال داشته باشد. در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد بهترین مدل نیمه تجربی برازش شده برای روش خشک کردن بستر نیمه سیال (با سرعت سیال ۰/۷ متر بر ثانیه) مدل دو جمله ای و برای روش خشک کردن بستر سیال (با سرعت سیال ۱/۷ متر بر ثانیه) مدل لگاریتمی بوده است. اما در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد برای روش خشک کردن بستر نیمه سیال مدل دو جمله ای و برای خشک کردن با بستر سیال مدل اصلاح شده هندرسون و پایس بهترین مدل ها با کمترین میزان SSE و RMSE و بیشترین ضریب تبیین ( $R^2$ ) بوده اند.

۵- منابع

- pretreatments before microwave-assisted dehydration of apple and potato. *International Journal of Food Science and Technology*, 38: 411-420
9. Akpınar, E.K., Bicer, Y. and Yildiz, C. 2003. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59:99-104.
  10. Brennan, J. G. and Grandison, A. S. 2006. Food processing handbook: John Wiley online library.
  11. Chimi, H., Cillard, J., Cillar, P., and Rahmani, M. 1991. The peroxy and hydroxyl radical scavenging activity of some natural phenolic antioxidant. *Journal of the American Oil Chemists Society* 68: 307.
  12. Delgado, J.M.P.Q. and Silva, M. V. 2014. Food Dehydration: Fundamentals, Modelling and Applications. In *Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials*, 69-94: Springer
  13. Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61: 359-364.
  14. Doymaz, I. 2004. Drying kinetics of whitemulberry. *Journal of Food Engineering*, 61: 341-346
  15. El-Beltagy, A., Gamea, G., and Essa, A. A. 2007. Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 456-464.
  16. Ertekin, C and Yaldiz, O. 2004. Drying of eggplant & selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63: 349-359.
  17. Fernandes, F., Rodrigues, S., Gaspareto, O., and Oliveira, E. 2006. Optimization of osmotic dehydration of papaya followed by air-drying. *Food Research International*, 39(4):492-498.
  18. Gil, M.I., Tomás-Barberán, F.A., Hess-Pierce, B. and Kader, A.A. 2002. Antioxidant capacities, phenolic compounds, carotenoids, and vitamin C contents of nectarine, peach, and plum cultivars from California. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50: 4976-4982.
۱. بلندی، م. و همکاران ۱۳۸۳. بررسی تاثیر روش های خشک کردن و نور بر ویژگیهای زعفران در طول دوره نگهداری. *مجله علوم و صنایع کشاورزی*، دوره ۱۸، شماره ۲، صفحه ۱۹۷-۲۰۴.
  ۲. تسلیمی، ا. و همکاران ۱۳۸۵. مقایسه اثرات فرآیندهای خشک کردن خورشیدی و خلاء با روش سنتی بر ویژگی های زعفران. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی ایران*، دوره ۳، شماره ۳، ۱۷-۹.
  ۳. توکلی پور، ح. و همکاران ۱۳۹۰. مدلسازی ریاضی خشک کردن لایه نازک ریحان به د روش آفتابی و خورشیدی. *همایش ملی صنایع غذایی*. قوچان: دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان.
  ۴. خوش تقاضا، م. و همکاران ۱۳۸۶. بررسی فرآیند خشک کردن شلتوک در شرایط بستر ثابت و سیال. *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، سال ۱۴، شماره ۲، صفحه ۱۲۷.
  ۵. رفیعی، ش. و مقصدلو، ی. ۱۳۸۴. شبیه سازی مدل خشک کردن دانه گندم (رقم تجن). *مجله علوم و صنایع غذایی ایران*، سال ۲، شماره ۳، صفحه ۵۸-۴۹.
  ۶. مظلومی، م. و همکاران ۱۳۸۶. مقایسه اثرات روشهای خشک کردن به کمک خلاء، انجماد، خورشید، میکروویو با سنتی بر ویژگیهای زعفران قائن. *مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران*، دوره ۲، شماره ۱، صفحه ۷۶-۶۹.
  7. Aghbashlo, M., M. Kianmehr and H. Samimi-Akhijahani. 2009. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetick of barberries (*barberries vulgaris*). *Journal of Food Process Engineering*, 32 (2): 278-293.
  8. Ahrne', L., Prothon, F., and Funebo, T. 2003. Comparison of drying kinetics and texture effects of two calcium

- Dehydration and Ultrasonic. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36(5): 383-392.
29. Pahlavanzadeh, H. 1999. Drying: Principles, Application and Design. Tarbiat Modares University, Tehran. 321
  30. Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L. and Sarvahandia, P.N. 1999. Effect of dipping pretreatment on drying kinetics of thompsonseedles grapes. *Journal of Food Engineering*, 39:211-216.
  31. Parker, J.C. 1999. Developing Herb and Spice Industry in Callide Valley, Queensland. A report for the Rural Industries Research and Development Corporation, RIRDC Publication No: 99/45, RIRDC Project No: DAQ-194A. Available online at <http://www.rirdc.gov.au>.
  32. Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S. and Siriamornpun, S. 2011. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. food and bioproducts processing. 238.
  33. Sacilik, K., Keskin, R. and Elicin, A.K. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73:231-238.
  34. Sacilik, K. and Elicin, A. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73:281-289.
  35. Simal, S., Femenia, A., Garau, M.C., and Rossello, C. 2005. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Jornal of Food Engineering*, 66:323-328.
  36. Togrul, İ. T. and Pehlivan, D. 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58(1): 23-32.
  37. Yaldiz, O. and Ertekin, C. 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19: 583-596.
  38. Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H. I. 2001. Mathematical modeling of thin layer drying of sultana grapes. *Energy*, 26: 457-465.
  19. HemmatiKakhki, A. and Rahimi, S.K. 1994. Extraction of anthocyanin from petals of saffron (*Crocus sativus* L.) and its stability in a model beverage. Iranian Research Organization for Science.
  20. Katsube, t., Tsurunaga, Y., Sugiyama, M., Furuno, T. and Yamasaki, Y. 2009. Effect of air-drying temperature on antioxidant capacity and stability of polyphenolic compounds in mulberry (*Morus alba* L.) leaves. *Food Chemistry*, 113: 964-969.
  21. Kaleemullah, S. Kailappan, R. 2007. Monolayermoisture, free energy change and fractionation of bound water of red chillies. *Journal of Stored Products Research*, 43: 104-110.
  22. Madamba, P. S., Driscoll, R. H. and Buckle, K. A. 1996. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29: 75-97.
  23. Math, R.G., Velu, V., Nagender, A. and Rao, D. G. 2004. Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papad. *Journal of Food Engineering*, 64: 429-434.
  24. Mortazavi, S.A., ShaffafeiZenoian, M., Arianfar, A., Niyazmand, R. and Asadinazhad, Sh. 2008. Dehydration of foods. Ferdowsi University. 272.
  25. Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H., Kazemi, M. and Nikbakht, A.M. 2010. Drying of pomegranate arils: comparison of predictions from mathematical models and neural networks. *Journal of Food Engineering*, 6(3): 1556-3758.
  26. Mwithiga, G. and Olwal, J.O. 2005. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *Journal of Food Engineering*, 71: 373-378.
  27. Newman, P. 1931. The drying of porous solids diffusion calculations. American Institute of Chemical Engineering, Transactions, 27: 310-333.
  28. Noshad, M., Mohebbi, M., Shahid, F. and Mortazavi, S.A. 2012. Kinetic Modeling of Rehydration in Air-Dried Quinces Pretreated with Osmotic

*cuminumcyminum*. *Journal of Agricultural Sciences and Technology*, 12: 401-408.

39. Zielinska, M. and Markowski, M. 2010. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chemical Engineering and Processing*, 49: 212–218.
40. Zomorodian, A. and Moradi, M. 2010. Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for



(Original Research Paper)

## Modeling the Drying Kinetics of Saffron Petals Using Different Methods of Fluid and Semi-fluid Substrate Drying

Moosarreza Houshmand-Dalir<sup>1</sup>, Hamid Tavakkolipour<sup>1\*</sup>, Hossein Chaji<sup>2</sup>, Ahmad Kalbasi-Ashtari<sup>3</sup>, Parvin Sharayeei<sup>4</sup>

1-Ph.D Student of Food Science and Technology, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran.

2- Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran.

3- Assistant professor, Department of Technical Research and Agricultural Engineering, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization, Mashhad, Iran.

4- Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

5- Associate professor, Department of Technical Research and Agricultural Engineering, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization, Mashhad, Iran.

Received:03/02/2019

Accepted:09/11/2019

### Abstract

In the process of producing saffron, petals are discarded as waste materials. As a result, in Iran, annually, 7257625 kg saffron petals are obtained as a sub-product. So finding a solution for recycling this huge amounts of waste is very important. This study conducted to find the most appropriate models for saffron petal dehydration with the use of semi-fluidized drier (SFD) and fluidized bed drier (FBD). For this purpose, a fluidized bed drier was designed to measure the temperature and air flow velocity, and also with the ability of weighing the samples at different intervals with high precision and then. The airflow and temperatures ranges used in SFD and FBD were 0.7-1.7 ms<sup>-1</sup> and 45-55 °C, respectively. When the air temperature and airflow respectively increased from 45 to 55°C and 0.7 to 1.7 ms<sup>-1</sup>, the dehydration time in SFD or FBD decreased significantly. At air temperature of 45°C and similar conditions, the SFD and FBD could dehydrate saffron petals in airflow and drying times of 0.7 ms<sup>-1</sup> for 96 min and 1.7 ms<sup>-1</sup> for 30 min, respectively. However, at equal temperature of 55°C and airflow of 0.7 ms<sup>-1</sup>, the petal dehydration time of SFD and FBD changed to 36 and 96 min, respectively. The effective moisture diffusivity coefficient in SFD and FBD systems varied from 9.548 × 10<sup>-10</sup> to 2.455 × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> and from 1.114 × 10<sup>-9</sup> to 1.963 × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>, respectively. The calculated activation energy in SFD was ranged from 56.83 to 78.78 KJ/mol. Among eleven semi-experimental models tested for the saffron petals dehydration, only two models including logarithmic and modified form of Henderson and Pabis formula were found appropriate to fit the obtained data and show the actual trend of changing moisture ratio versus drying time of saffron petals. Because these models showed highest determination coefficients, lowest root mean squared and minimum sum-squared errors with the actual data.

**Keywords:** Saffron Petal; Dehydration Modelling; Diffusivity Coefficient; Activation Energy.

---

\*Corresponding Author: [h.tavakolipour@gmail.com](mailto:h.tavakolipour@gmail.com)