



مقاله پژوهشی

اثرات دما، سرعت جابه‌جایی هوا و تابش مادون قرمز بر سینتیک خشک کردن و برخی ویژگی‌های کیفی زعفران

مرتضی محمدزاده مقدم^۱، مسعود تقی زاده^{۲*}، حسن صدرنیا^۳، حمیدرضا پوررضا^۴

۱. دانشجوی دکتری، مهندسی علوم و صنایع غذایی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴. استاد، گروه کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۷، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۱۰/۱، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۴)

چکیده

زعفران، کلاله‌های خشک و قرمز رنگ گیاه *Crocus sativus l.* می‌باشد. این محصول گران‌ترین ادویه شناخته شده دنیا است. خشک کردن یک مرحله مهم در فراوری زعفران است. خشک کردن باعث تغییرات فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی لازم برای رسیدن به ویژگی‌های مطلوب زعفران می‌شود. در این پژوهش سینتیک خشک کردن کلاله‌های زعفران با استفاده از خشک‌کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C و دو سرعت جریان هوای داغ ۰/۳ و ۰/۶ m/s و خشک‌کن هوای داغ با همان شرایط بررسی شد و تاثیر این روش‌ها بر مقدار کروسین، پیکروکروسین و سافرانال و بار میکروبی محصول نهایی بررسی شد. نتایج نشان داد که از ده مدل بررسی شده، مدل میدلی بهترین مدل جهت برازش داده‌های حاصل از دو روش خشک کردن بود. با توجه به نتایج آنالیز واریانس، اثر اصلی دما، سرعت جریان هوا و تابش مادون قرمز و اثر متقابل آن‌ها بر زمان خشک شدن معنی‌دار شد ($p < 0.05$). مقدار ضریب نفوذ از $1/80.3 \times 10^{-8}$ تا $2/383.46 \times 10^{-8}$ m²/s برای روش ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز و $5/07 \times 10^{-9}$ تا 10^{-9} m²/s تا $2/789.2 \times 10^{-9}$ در خشک کردن با هوای داغ به دست آمد. مقدار انرژی فعال‌سازی در روش ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز ۱۰/۴۳ تا ۱۱/۶ KJ/mol متغیر بود و در روش خشک کردن با هوای داغ ۳۴/۱ و ۶۲/۴ KJ/mol به دست آمد. از نظر حفظ قدرت رنگی زعفران، مقدار کروسین تیمارهای مختلف با هم اختلاف معنی‌داری داشتند ($p < 0.05$) و بیشترین کروسین در روش ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز در دمای ۵۰ °C و سرعت ۰/۳ m/s با میانگین $278/5^{1\%} E_{440nm}$ به دست آمد. مطابق استاندارد ملی ایران آزمون‌های میکروبی بر روی تیمارهای مختلف انجام گرفت و هیچ اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مختلف مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: زعفران، سینتیک خشک کردن، مادون قرمز، هوای داغ.



۱. مقدمه

۹۰، ۱۰۰، و ۱۱۰ °C بررسی و به این نتیجه رسیدند که مدل میدلی و کوک بهترین مدلی است که می‌تواند رفتار خشک شدن کلاله‌های زعفران را در یک خشک‌کن مادون قرمز توصیف کند [۹]. خشک‌کردن محصولات کشاورزی مختلف از جمله برش‌های کیوی [۱۰]، قارچ دکمه‌ای [۱۱]، بادمجان [۱۲]، برنج نیم جوش [۱۳] و کدو حلواپی [۱۴] در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز توسط محققین مختلف انجام گرفته است. ولی تاکنون تحقیقی در خصوص بررسی سینتیک انتقال جرم و ضریب نفوذ موثر رطوبت در طی خشک‌کردن کلاله‌های زعفران در خشک‌کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش بررسی اثر دمای خشک‌کن و سرعت جریان هوا و تابش مادون قرمز بر خشک‌کردن کلاله‌های زعفران و مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم و همچنین محاسبه ضریب نفوذ و انرژی فعالسازی آن می‌باشد. همچنین مقایسه برخی ویژگی‌های کیفی زعفران شامل کروستین، پیکروکروستین و سافرانال و بار میکروبی تیمارهای مختلف نیز مد نظر می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

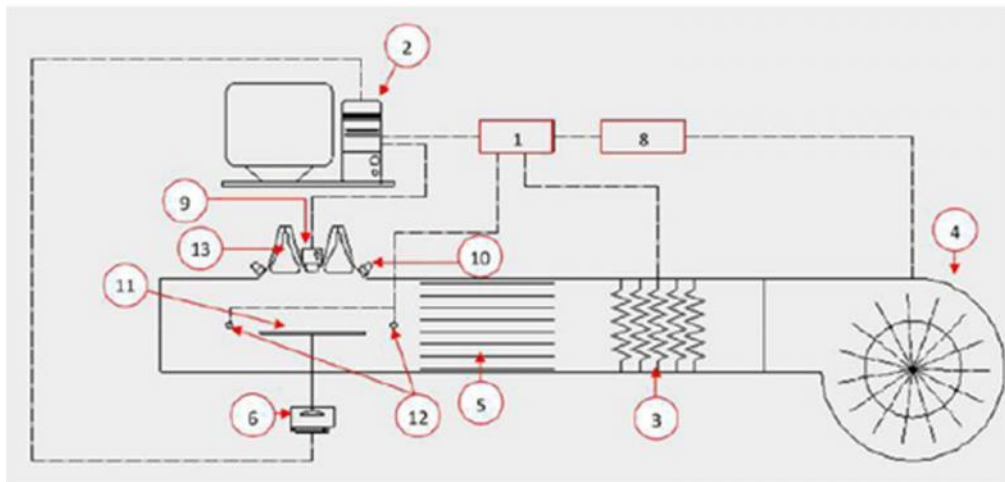
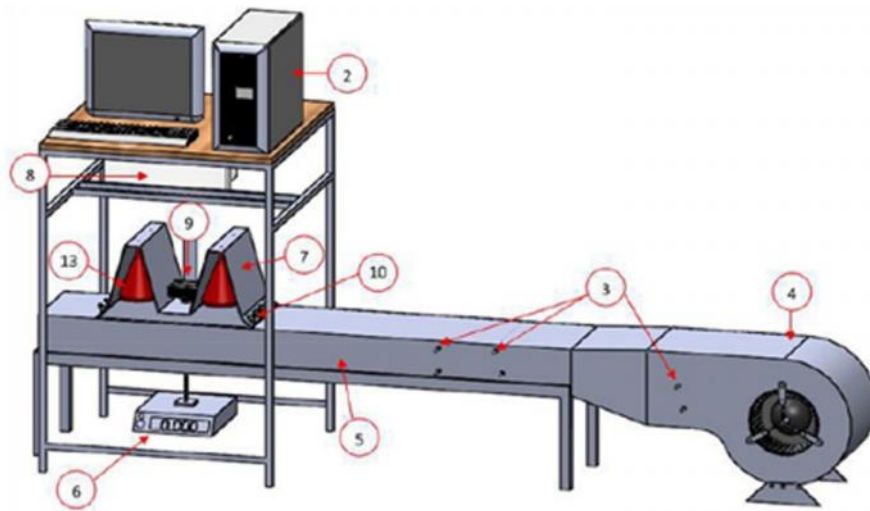
۱.۲. تهیه نمونه

ابتدا نمونه‌های گل زعفران از مزرعه‌ای در گناباد جمع آوری شد و در ادامه گل‌ها ابتدا پرکنی و کلاله‌های قرمز رنگ آن جدا شد. نمونه‌های کلاله در ظروف یکبار مصرف درب بسته تمیز در مکانی سرد و دور از معرض نور مستقیم جمع آوری شد. مقدار رطوبت اولیه نمونه‌ها $83 \pm 3\%$ بر مبنای تر به وسیله آن در دمای 103°C به مدت 960 min تعیین شد [۱۵].

۲.۲. خشک‌کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز

خشک‌کن مورد نظر در گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی طراحی و ساخته شده بود [۱۶]. خشک‌کن شامل یک فن سانتریفیوژ، کانال عبور جریان هوا، رابط برزنتی، المنت‌های حرارتی، لوله‌های مستقیم کننده و محفظه لامپ‌های مادون قرمز است. لامپ‌ها به فاصله 20 cm از سطح سینی تعبیه شده اند. سینی محصولات شامل یک صفحه سوراخ دار دایره‌ای شکل به قطر 25 cm بود. برای اندازه‌گیری دما و رطوبت هوا در داخل و بیرون خشک‌کن، از ۳ سنسور دما و رطوبت نسبی

زعفران، کلاله‌های خشک و قرمز رنگ گیاه *Crocus Sativus L.* می‌باشد. این محصول گران‌ترین ادویه شناخته شده دنیا است که به‌عنوان یک عامل طعم‌دهنده و رنگ‌دهنده مواد غذایی استفاده می‌شود و در طب سنتی نیز کاربرد دارد. ایران بزرگ‌ترین تولیدکننده زعفران در دنیا است. $93/7\%$ تولید جهانی زعفران متعلق به ایران است [۱]. ترکیبات فعال اصلی زعفران استرهای کروستین و کروستین که عهده‌دار قدرت رنگی آن هستند. سافرانال عامل آروما و پیکروکروستین عامل طعم آن است. در سال‌های اخیر به این ادویه گرانبها به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان و ضد سرطان توجه بیشتری می‌شود [۲]. صرفنظر از این‌که عوامل زراعی مانند ویژگی‌های خاک، موقعیت جغرافیایی، سال کاشت و روش‌های کاشت، داشت و برداشت بر کیفیت زعفران تاثیر می‌گذارد، روش‌های خشک‌کردن نیز بر کیفیت آن اثر گذار می‌باشند [۳]. خشک‌کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری است. این فرایند اهمیت بالایی در فراوری گیاهان دارویی دارد. اگر گیاه بلافاصله پس از برداشت خشک شود به حفظ رنگ و مواد معطر گیاه کمک می‌کند [۴]. خشک‌کردن یک مرحله مهم در فرایند زعفران است. خشک‌کردن باعث تغییرات فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی لازم برای رسیدن به ویژگی‌های مطلوب زعفران می‌شود [۵]. روش‌های جدید خشک‌کردن امروزه طراحی و عرضه شده‌اند که روش خشک‌کردن مادون قرمز یکی از این روش‌ها است. که باعث افزایش سرعت خشک‌کردن و کیفیت محصولات می‌شوند. خشک‌کردن مادون قرمز مزایای فراوانی دارد که در این میان می‌توان به سرعت خشک‌کردن بالا، کاهش اتلاف انرژی و افزایش کیفیت محصول اشاره کرد. خشک‌کردن ترکیبی مادون قرمز و هوای داغ در مقایسه با روش خشک‌کردن جابه‌جایی هوای داغ از دماهای پایین‌تر استفاده می‌کند و می‌تواند روش جایگزین مناسب برای محصولات حساس به گرما باشد [۶-۸]. یکی از نکات مهم در فناوری خشک‌کردن، مدل‌سازی فرایند خشک‌کردن است. هدف از مدل‌سازی، به‌دست آوردن بهترین شرایط عملیاتی و مناسب‌ترین روش خشک‌کردن برای محصول می‌باشد. آخوندی و همکاران، اثر خشک‌کردن با مادون قرمز به‌وسیله یک ترازوی رطوبت سنج را روی نمونه‌های کلاله زعفران در دماهای مختلف ۶۰، ۷۰، ۸۰،



شکل (۱) طرحواره خشک کن مورد استفاده

۱- واحدکنترل کننده ۲- کامپیوتر ۳- المنتهای حرارتی ۴- فن ۵- لولههای مستقیم کننده ۶- ترازوی دیجیتال ۷- محفظه لامپهای مادون قرمز ۸- اینورتر ۹- محل نصب دوربین ۱۰- لامپ روشنایی ۱۱- سینی محصول ۱۲- سنسورهای دما و رطوبت داخلی ۱۳- لامپهای مادون قرمز [۱۶]

Fig. 1. The schematic of Experimental dryer

1.Control units, 2.PC, 3.Heating unit, 4.Fan, 5. Straightener 6.balance, 7.Illumination and imaging chamber 8.Inverter, 9.Camera 10.Lighting lamp, 11.Tray, 12.Temperature Sensors, 13.IR lamps

۳.۲. خشک کردن

جهت خشک کردن با استفاده از خشک کن ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز از یک سطح تابش ۱۰۰۰ W و سه سطح دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C و دو سرعت جریان هوای داغ ۰/۳ و ۰/۶ m/s و خشک کن هوای داغ در سه سطح دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C و دو سرعت جریان هوای داغ ۰/۳ و ۰/۶ m/s، استفاده شد. تغییرات وزن نمونه‌ها هر ۵ s توسط ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.01 g ثبت شد. در طی خشک کردن کلاله‌های زعفران، زمان رسیدن

مدل AM2303 ساخت شرکت Aosong چین استفاده گردید. برای اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه‌ها از یک ترازوی دیجیتال ساخت شرکت ژاپنی A&D مدل GF6100 با دقت ± 0.01 g استفاده شد.

نمونه‌ها با ضخامت ۰/۵ cm جهت خشک کردن با دستگاه خشک کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز مورد استفاده قرار گرفتند. در هر آزمایش مقدار ۵ g کلاله تازه استفاده شد (شکل ۱).



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

به رطوبت ۸٪ بر پایه وزن مرطوب به عنوان نقطه پایان فرایند خشک کردن در نظر گرفته شد.

۸.۲. تعیین ضریب نفوذ موثر و انرژی اکتیواسیون

قانون فیک انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرایند خشک کردن را توصیف کند (رابطه ۳).

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} \quad (3)$$

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مینای خشک، t زمان و x شاخص فضایی می باشد. مطالعه انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم در طی دوره سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد. با استفاده از شرایط اولیه و مرزی مناسب معادله فیک برای اشکال مختلف هندسی حل می شود. برای یک تیغه نازک حل معادله فیک از رابطه (۴) به دست می آید [۱۹]:

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

که D_{eff} ضریب نفوذ موثر (m^2/s)، L نصف ضخامت نمونه (m)، t زمان خشک شدن و n عدد صحیح مثبت می باشد. ضریب نفوذ موثر از شیب خط معادله (۵) به دست می آید:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \ln \frac{\pi^2}{4L^2} D_{eff} \cdot t \quad (5)$$

ضریب نفوذ به طور معمول با رسم داده های آزمایشگاهی خشک کردن برحسب $\ln(MR)$ در برابر زمان تعیین می شود. شیب خط به دست آمده در رابطه (۶) گذاشته می شود تا ضریب نفوذ محاسبه شود:

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (6)$$

K_0 شیب خط می باشد و در نهایت میانگین ضرایب نفوذ محاسبه شد.

انرژی اکتیواسیون به وسیله معادله (۷) محاسبه شد:

$$D_{eff} = D_0 \exp - \frac{E_a}{RT} \quad (7)$$

برای محاسبه E_a معادله (۷) را می توان به صورت رابطه (۸) نوشت:

۴.۲. آنالیز رنگ

ترکیبات اصلی زعفران شامل کروسین، پیکروکروسین و سافرانال با استفاده از اسپکتروفتومتر UV-Visible شیمادزو مدل PC 1600 برای محصول نهایی اندازه گیری شد [۱۵].

۵.۲. آنالیز میکروبی

بر روی نمونه خشک شده آزمون میکروبی شامل تشخیص اشرشیاکالی، تشخیص انتروکوک ها، شمارش کلستریدیوم های احیاءکننده سولفیت و شمارش کپک و مخمر انجام گرفت [۱۷].

۶.۲. آنالیز آماری

نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel 2016 ترسیم شد و برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار SPSS 16 در سطح معنی دار ۵٪ استفاده شد.

۷.۲. مدل سازی سینتیکی

برای مدل سازی سینتیکی ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن کلاله های زعفران با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد:

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

MR: نسبت رطوبت، M_t : رطوبت نمونه ها در هر لحظه بر پایه خشک M_e : رطوبت تعادلی نمونه ها M_0 : رطوبت اولیه نمونه ها می باشند [۱۸، ۱۹].

با توجه به رابطه (۱)، نسبت رطوبت به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه ها در هر لحظه در طی خشک شدن وابسته است. برای زمان های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با M_0 و M_t بسیار کوچک می باشد. بنابراین می توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه (۲) ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نیست [۹۱].

$2 \cdot R^2$ و RMSE مدل‌های رگرسیونی مختلف ذکر شده در جدول یک برآزش شدند.

معیار مدل بهتر، مقدار بیشتر R^2 و مقدار کمتر RMSE و 2 بود. بر اساس نتایج به دست آمده و با توجه به خطای کمتر حاصل از برآزش داده‌های آزمایشگاهی در طی خشک کردن کلاله‌های زعفران، مدل میدلی انتخاب شد که نتایج این مدل در جدول (۲) گزارش شده است.

آخوندی و همکاران با ترازوی رطوبت سنج مادون قرمز، کلاله‌های زعفران را در دماهای مختلف خشک کردند و در بین چهار مدلی که با هم مقایسه کردند، مدل میدلی و کوک را به عنوان بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک شدن کلاله‌های زعفران در دامنه حرارتی 60°C تا 110°C با مادون قرمز پیشنهاد کردند.

مرتضی پور و همکاران سینتیک خشک شدن و ویژگی‌های کیفی زعفران را در یک خشک‌کن خورشیدی فتوولتائیک- گرمایی مجهز به پمپ حرارتی را در سه سطح دمایی 40°C ، 50°C و 60°C مورد بررسی قرار دادند. از یازده مدل ریاضی، مدل دو جمله‌ای به عنوان بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک شدن زعفران از میان سایر مدل‌ها انتخاب گردید [۲۸]. نتایج حاصل از برآزش با مدل دو جمله‌ای (جدول ۳) در روش خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز بسیار نزدیک به مدل میدلی بود ولی بعلافت اینک ضرایب RMSE و 2 آن بالاتر بود، مدل میدلی انتخاب شد. نتایج آماری به دست آمده از برآزش داده‌های آزمایشگاهی به وسیله خشک‌کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز با سایر مدل‌ها در جدول (۴) گزارش شده است.

نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل میدلی در شکل (۲) آورده شده که نشان دهنده این است که داده‌ها بسیار به هم نزدیک و برهم منطبق می‌باشند. پس این مدل می‌تواند داده‌های آزمایشگاهی را به خوبی پیش بینی کند.

۲.۳. تاثیر نوع و دمای خشک کردن بر زمان فرایند خشک کردن

با توجه به جدول (۵) دمای هوای داغ و سرعت جریان هوای داغ و روشن بودن لامپ مادون قرمز و هم چنین اثر متقابل آن‌ها در سطح 5% معنی دار شد.

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (8)$$

که E_a انرژی اکتیواسیون است (kJ/mol)، R ثابت جهانی گازهاست (8.314 kJ/mol.k)، T دمای مطلق هواست (K)، D_0 فاکتور پیش‌نمایی معادله (m^2/s) است. با رسم نمودار $\ln(D_{eff})$ در برابر $1/T$ یک خط راست با شیب k_2 به دست می‌آید که انرژی اکتیواسیون می‌تواند از رابطه (۹) محاسبه شود [۱۹]:

$$k_2 = \frac{E_a}{R} \quad (9)$$

برای بررسی سینتیک و پیش بینی روند خشک شدن کلاله‌های زعفران از معادله و مدل‌های تجربی مختلف استفاده شد که در جدول یک نمایش داده شده اند. در این تحقیق برای برآزش داده‌های تجربی خشک کردن با مدل‌های تجربی و به دست آوردن ثابت‌های هر یک از مدل‌ها، از نرم افزار Matlab R2016b استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. مدل سازی سینتیک خشک کردن

مدل سازی ریاضی خشک کردن لایه نازک برای پیش گویی عملکرد سیستم خشک کردن مهم است. در طی خشک کردن مواد غذایی می‌تواند واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی مختلف رخ دهد. خیلی از تغییرات تابع رطوبت، دما و زمان خشک کردن است. اگر دما و رطوبت توزیع شده در ماده غذایی به عنوان تابعی از زمان خشک کردن بطور دقیقی تخمین زده شوند، اثرات نامطلوب بهتر کنترل می‌شوند. کاربرد پرتودهی با مادون قرمز برای خشک کردن سابقه طولانی دارد ولی مطالعات مربوط به این روش خشک کردن در 20 سال گذشته اهمیت پیدا کرده است. نتایج حاصل از مدل سازی در خشک کردن ترکیبی مادون قرمز و هوای داغ، می‌تواند قدم مهمی در انتقال این روش به صنعت و طراحی خشک‌کن‌های جدید باشد [۸].

آزمایش‌های خشک کردن کلاله‌های تازه زعفران در سه سطح دمایی 40°C ، 50°C و 60°C و دو سرعت جریان هوای ورودی 0.3 و 0.6 m/s در دو حالت روشن بودن مادون قرمز و خاموش بودن مادون قرمز، در سه تکرار انجام گرفت. با توجه به مقادیر



بادمجان در دمای 80°C و توان لامپ مادون قرمز 375 W ، 15 min گزارش کردند [۱۲]. هبار و همکاران از یک خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز با هوای داغ در سه حالت ترکیبی، مادون قرمز به تنهایی و هوای داغ به تنهایی، برای خشک کردن سیب زمینی و هویج استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که زمان خشک کردن هردو محصول با سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم هوای داغ 48% کاهش می‌یابد [۳۰]. تقی نژاد و همکاران (۱۳۹۶) تاثیر خشک کردن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز را بر ویژگی‌های کیفی برنج نیم جوش بررسی کردند و گزارش کردند که زمان خشک کردن با افزایش دما از 40 به 60°C و افزایش شدت تابش مادون قرمز کاهش چشمگیری داشت [۱۴]. جدول (۵) نشان می‌دهد که افزایش سرعت جریان هوای داغ تاثیر معنی‌داری بر زمان خشک کردن زعفران دارد. کرمی و همکاران (۱۳۹۶) گزارش دادند که افزایش سرعت جابه‌جایی هوا از 1 تا 2 m/s سبب کاهش مدت زمان خشک کردن گیاه پونه شد [۳۱].

مطابق جدول (۶) کمترین زمان خشک کردن مربوط به روش ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز، دمای 60°C و سرعت 0.6 m/s بود. روشن بودن لامپ مادون قرمز باعث افزایش دمای خشک کردن می‌شود و باعث افزایش جذب رطوبت هوا و گرم شدن سریعتر محصول و تخییر بهتر آب از آن می‌شود. البته آزمون دانکن مشخص کرد که بین تیمارهای مختلف خشک کردن با روش ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز از نظر زمان خشک کردن اختلاف معنی‌داری وجود نداشت ($p < 0.05$). زمان مورد نیاز برای خشک کردن در روش هوای داغ در دمای 60°C و سرعت 0.6 m/s حدود 9 برابر طولانی‌تر از روش ترکیبی هوای داغ و مادون قرمز در دما و سرعت مشابه بود. همچنین در روش خشک کردن با هوای داغ با افزایش دما از 40 به 60°C و افزایش سرعت جریان هوا از 0.3 به 0.6 m/s ، زمان خشک شدن 4 برابر کاهش نشان داد. سرعت بالای خشک شدن با مادون قرمز برای سایر محصولات، مانند پسته [۲۹]، لیمو ترش [۲۲]، قارچ [۱۱] و بادمجان [۱۲] نیز گزارش شده است. صالحی و همکاران (۱۳۹۴) زمان خشک کردن برش‌های

جدول (۱) مدل‌های کاربردی برای تطابق با داده‌های تجربی.

Table 1 Applied models to fit the experimental data

مرجع Reference	معادله Equation	نام مدل Model name
[19]	$MR = \exp(-kt)$	نیوتن Newton
[19]	$MR = \exp(-kt^n)$	پیج Page
[19]	$MR = a \exp(-k_0 t^n) + b \exp(-k_1 t)$	دو جمله ای Two-term
[20]	$MR = a \exp(-kt)$	هندرسون و پابیس Henderson and Pabis
[19]	$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی Logarithmic
[25]	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	میدلی و همکاران Midilli et al.
[19]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	تقریب انتشار Approximation of diffusion
[26]	$MR = 1 + at + bt^2$	ونگ و سینگ Wang and Sing
[19]	$MR = \exp(-kt)^n$	پیج اصلاح شده Modified Page
[27]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	ورما و همکاران Werma et al.

جدول (۲) مقادیر ثابت و ضرایب مدل میدلی به تفکیک دمای خشک کردن و سرعت جریان هوای داغ با خشک کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز.

Table 2 Fixed values and midli model coefficients differentiated by drying temperature and hot air flow rate with combination of hot air-infrared dryer.

2	RMSE	R ²	n	b	a	k	سرعت هوا u (m/s)	دما (°C) Temperature
0.00004852	0.007983	0.9995	1.538	-0.00011	0.9873	0.000188	0.3	40
0.00004656	0.00683	0.9996	1.544	-0.000043	1.007	0.000194	0.6	40
0.00004857	0.008091	0.9995	1.506	-0.000057	0.9914	0.000284	0.3	50
0.00001247	0.004037	0.9999	1.474	-0.000250	0.9963	0.0003055	0.6	50
0.00001783	0.005167	0.9998	1.507	-0.000191	0.9983	0.000322	0.3	60
0.000035285	0.007774	0.9996	1.455	-0.00027	1.003	0.000434	0.6	60

جدول (۳) مقادیر ثابت و ضرایب مدل دو جمله‌ای به تفکیک دمای خشک کردن و سرعت جریان هوای داغ با خشک کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز.

Table 3 Fixed values and two term model coefficients differentiated by drying temperature and hot air flow rate with combination of hot air-infrared dryer.

2	RMSE	R ²	K ₁	n	b	a	K ₀	سرعت هوا u (m/s)	دما (°C) Temperature
0.00004689	0.008236	0.9995	0.000138	1.506	-0.0800	1.068	0.000214	0.3	40
0.00006167	0.007838	0.9996	0.8003	1.578	-0.0065	1.007	0.0001671	0.6	40
0.00007923	0.01005	0.9993	-0.00023	1.555	-0.0030	0.997	0.0002274	0.3	50
0.0003383	0.00434	0.9999	-0.00010	1.445	-0.1298	1.126	0.0003383	0.6	50
0.00001994	0.005523	0.9998	0.0003278	1.474	-0.1075	1.107	0.0003648	0.3	60
0.0000332	0.007787	0.9996	0.003027	1.147	-2.537	3.537	0.001663	0.6	60

جدول (۴) نتایج آماری به دست آمده از برازش داده‌های آزمایشگاهی با سایر مدل‌ها با خشک کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز.

Table 4 The statistical results obtained from the fitting of experimental data with other models by the combination of hot air-infrared dryer.

لگاریتمی Logarithmic		هندرسون و پابیس Henderson and Pabis		پیج Page		نیوتن Newton		نام مدل Model name	
R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	سرعت Velocity (m/s)	دما (°C) Temperature
0.9953	0.022	0.9523	0.0695	0.9953	0.0217	0.9269	0.0856	0.3	40
0.994	0.0261	0.9442	0.0791	0.9975	0.0166	0.9022	0.1041	0.6	40
0.9929	0.0281	0.9499	0.0743	0.9978	0.0155	0.9165	0.0953	0.3	50
0.9953	0.0226	0.9533	0.0704	0.9971	0.0175	0.9227	0.09	0.6	50
0.9964	0.0196	0.9452	0.076	0.996	0.0205	0.9099	0.0968	0.3	60
0.9936	0.0273	0.9474	0.0778	0.9961	0.0213	0.9145	0.0985	0.6	60
ورما و همکاران Werma et al.		پیج اصلاح شده Modified Page		ونگ و سینگ Wang and Sing		تقریب انتشار Approximation of diffusion		نام مدل Model name	
R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	سرعت Velocity (m/s)	دما (°C) Temperature
0.9887	0.0341	0.9269	0.086	0.9935	0.0256	0.9893	0.0331	0.3	40
0.9484	0.0765	0.9022	0.1047	0.9867	0.0386	0.9888	0.0357	0.6	40
0.954	0.0717	0.9165	0.096	0.9879	0.0365	0.9913	0.0313	0.3	50
0.9572	0.0679	0.9227	0.0906	0.9915	0.0301	0.9913	0.0307	0.6	50
0.9498	0.0733	0.9099	0.0975	0.9924	0.0283	0.9922	0.0289	0.3	60
0.9521	0.0748	0.9145	0.0992	0.9889	0.0357	0.9815	0.0465	0.6	60

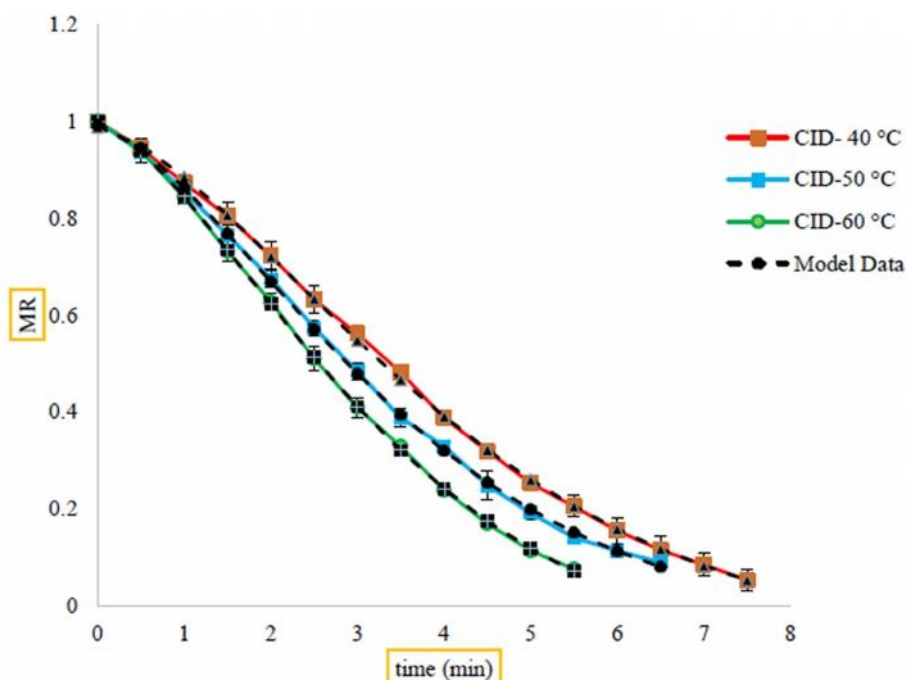


۳.۳. محاسبه ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال سازی

مطابق جدول (۶) ضریب نفوذ به دست آمده در خشک کردن ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز در مقایسه با روش هوای داغ بیشتر به دست آمد و با افزایش دما و سرعت جریان هوا در هر دو روش خشک کردن روند افزایشی داشت. در دامنه حرارتی از ۴۰ تا ۶۰ °C و با افزایش سرعت جریان هوا در خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز، مقدار ضریب نفوذ از $1/8003 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $2/38346 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ به علت افزایش جنبش مولکولی و مکش سطحی روند صعودی داشت. نادیان و همکاران ضریب انتشار موثر در نمونه های کیوی خشک شده در ضخامت های مختلف با خشک کن هیبریدی هوای داغ-مادون قرمز در دماهای بین ۵۰ تا ۷۰ °C از $70 \text{ m}^2/\text{s}$ در روش $3/82 \times 10^{-8}$ تا $6/756 \times 10^{-8}$ گزارش کرد [۳۲]. در روش خشک کردن با هوای داغ مقدار ضریب نفوذ موثر در دامنه حرارتی ۴۰ تا ۶۰ °C و با افزایش سرعت جریان هوا، از 10^{-10}

$5/07 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $2/7892 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تغییر و افزایش داشت. افزایش دما باعث افزایش ضریب نفوذ می شود که برای محصولات مثل بادمجان [۱۲]، ذرت [۳۳]، لیمو ترش [۲۲] گزارش شده است.

انرژی فعال سازی برای زعفران در سرعت $0/3$ و $0/6 \text{ m/s}$ با خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز به ترتیب $10/43$ و $11/6 \text{ KJ/mol}$ (جدول ۷). انرژی فعال سازی برای زعفران در سرعت $0/3$ و $0/6 \text{ m/s}$ با خشک کردن هوای داغ به ترتیب $62/4$ و $34/1 \text{ KJ/mol}$ (جدول ۸). مقدار انرژی فعال سازی در خشک کردن ذرت $27/61 \text{ KJ/mol}$ [۳۴]، خرما می مضافتی $22/3$ تا $27/42 \text{ KJ/mol}$ [۳۵] و برای بادام در یک خشک کن پیوسته نیمه صنعتی، بین $10/295$ تا $28/151 \text{ KJ/mol}$ [۳۶] گزارش شده است.



شکل (۲) تغییر رطوبت در طی زمان خشک کردن با داده های حاصل از نتایج آزمایشگاهی و مدل میدلی با خشک کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز (سرعت $0/3 \text{ m/s}$)

Fig. 2. Changes in moisture content during drying time with data from experimental results and Midly's model with combination of hot air-infrared dryer ($u=0.3 \text{ m/s}$)

جدول (۵) آنالیز واریانس اثر متغیرهای دمای هوای داغ و سرعت جریان باد و تابش مادون قرمز بر زمان خشک شدن زعفران.

Table 5 Analysis variance data of hot air temprature, air velocity and IR radiation of saffron.

معنی دار Sig.	F	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	مجموع مربعات Type III Sum of Squares	منابع تغییرات Source of variation
.000*	250.121	59967685.475	11	659644540.222 ^a	Corrected Model
.000*	2022.277	484851040.444	1	484851040.444	Intercept
.000*	131.508	31529638.194	2	63059276.389	Temperature (دما)
.000*	230.173	55185088.444	1	55185088.444	Speed (سرعت)
.000*	1612.728	386659786.778	1	386659786.778	IR Lamp (لامپ مادون قرمز)
.000*	42.896	10284497.528	2	20568995.056	Temp × speed دما × سرعت
.000*	122.797	29441156.694	2	58882313.389	Temp × IR دما × مادون قرمز
.000*	227.352	54508689.000	1	54508689.000	speed × IR سرعت × مادون قرمز
	43.337	10390195.583	2	20780391.167	temp * speed * IR دما × سرعت × مادون قرمز
		239755.056	24	5754121.333	Error
			36	1150249702.000	Total
			35	665398661.556	Corrected Total

جدول (۶) مقادیر زمان خشک شدن و ضریب نفوذ موثر در شرایط مختلف خشک کردن.

Table 6 Drying time and effective moisture diffusivity in different drying conditions.

زمان خشک شدن (min) Drying time	ضریب نفوذ (m ² /s) effective moisture diffusivity	تابش مادون قرمز IR radiation	دما (°C) Temperature	سرعت (m/s) Velocity
222.3 ± 5.5	5.07×10 ⁻¹⁰	خاموش OFF	40	0.3
92.25 ± 6.3	1.2678×10 ⁻⁰⁹	خاموش OFF	40	0.6
186.3 ± 23.76	7.61×10 ⁻¹⁰	خاموش OFF	50	0.3
81.95 ± 9.2	1.77492×10 ⁻⁰⁹	خاموش OFF	50	0.6
62.12 ± 12.2	2.1553×10 ⁻⁰⁹	خاموش OFF	60	0.3
49.7 ± 0.12	2.7892×10 ⁻⁰⁹	خاموش OFF	60	0.6
7.45 ± 0.2	1.8003×10 ⁻⁰⁸	روشن ON	40	0.3
7.7 ± 0.38	1.82563×10 ⁻⁰⁸	روشن ON	40	0.6
6.7 ± 0.55	2.02×10 ⁻⁰⁸	روشن ON	50	0.3

ادامه جدول (۶) مقادیر زمان خشک شدن و ضریب نفوذ موثر در شرایط مختلف خشک کردن.

Table 6 Drying time and effective moisture diffusivity in different drying conditions.

زمان خشک شدن (min) Drying time	ضریب نفوذ موثر (m ² /s) effective moisture diffusivity	تابش مادون قرمز IR radiation	دما (°C) Temperature	سرعت (m/s) Velocity
6 ± 0.16	2.206×10 ⁻⁰⁸	روشن ON	50	0.6
5.7 ± 0.24	2.29049×10 ⁻⁰⁸	روشن ON	60	0.3
5.4 ± 0.26	2.38346×10 ⁻⁰⁸	روشن ON	60	0.6

جدول (۷) مقادیر انرژی فعالسازی و ضریب تعیین برای سرعت های مختلف با خشک کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز.

Table 7 Activation energy values and coefficient of determination for different speeds with combination of hot air-infrared dryer.

انرژی فعالسازی Ea(Kj/mol)	R ²	سرعت (m/s) Velocity
10.43	0.9981	0.3
11.6	0.9525	0.6

جدول (۸) مقادیر انرژی فعالسازی و ضریب تعیین برای سرعت های مختلف با خشک کن هوای داغ.

Table 8 Activation energy values and coefficient of determination for different speeds with hot air dryer.

انرژی فعالسازی Ea(Kj/mol)	R ²	سرعت (m/s) Velocity
62.4	0.9309	0.3
34.1	0.9896	0.6

تیمارهای ۶۰ °C در سرعت های ۰/۳ و ۰/۶ m/s و ۵۰ °C در سرعت ۰/۳ m/s با همین روش خشک کردن داشتند و کمتر از این تیمارها بودند. نتایج آنالیز واریانس یکطرفه تاثیر متغیرها بر مقدار کروسین، سافرانال و پیکروکروسین در جدول (۹) آورده شده است.

در مورد سافرانال نیز نوع روش خشک کردن تاثیر معنی داری بر مقدار سافرانال داشت. کمترین مقدار سافرانال (شکل ۴) مربوط به خشک کردن با هوای داغ در دمای ۴۰ °C و سرعت جریان ۰/۳ m/s با میانگین $^{1\%}E_{330}$ ۲۷/۵۹ به دست آمد. مقادیر سافرانال در روش خشک کردن با هوای داغ و روش خشک کردن ترکیبی در دمای ۴۰ °C و هر دو سرعت جریان هوا، همچنین در روش هوای داغ با دماهای ۵۰ و ۶۰ °C و سرعت هوای داغ ۰/۳ m/s با هم دیگر اختلاف معنی داری نداشتند و از سایر تیمارها، مقادیر سافرانال آنها کمتر به دست آمد.

۴.۳. تاثیر نوع و دمای خشک کردن بر مواد موثره زعفران
نوع روش خشک کردن و دما تاثیر معنی داری بر کروسین داشتند ($p < 0.05$). در خشک کردن با هوای داغ به تنهایی در دمای ۴۰ °C و سرعت جریان ۰/۳ m/s کمترین مقدار کروسین به دست آمد. مقدار کروسین با میانگین $^{1\%}E_{440}$ در روش ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز در دمای ۵۰ °C و سرعت ۰/۳ m/s مقدار ۲۷۸/۵ به دست آمد. در روش خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز و در دمای ۴۰ °C و سرعت ۰/۳ m/s، مقدار کروسین با میانگین $^{1\%}E_{440}$ ۲۶۴/۶ به دست آمد که با تیمارهای ۵۰ °C در سرعت ۰/۳ و ۰/۶ m/s و ۶۰ °C در سرعت ۰/۳ و ۰/۶ اختلاف معنی داری بود و کمتر از تیمارهای ذکر شده بود. در روش خشک کردن با هوای داغ در دمای ۴۰ °C و سرعت ۰/۳ و ۰/۶ m/s، مقدار کروسین با میانگین $^{1\%}E_{440}$ به ترتیب مقادیر ۲۵۴/۸ و ۲۵۹ به دست آمد که اختلاف معنی دار با

روش‌های سنتی منطقه Castille-La Mancha اسپانیا با سه منبع مختلف حرارتی بخاری زغال سنگی، گاز خوراک پزی و المنت برقی صورت گرفت. زمان بین ۲۸ و ۵۵ min و دمای میانگین بین ۵۳ °C و ۸۳ °C برای روش خشک کردن سنتی اسپانیایی برقرار شد. بیشترین قدرت رنگی (کروسین) زمانی به دست آمد که زعفران در دمای بالا و زمان کم فرایند شد [۳۷].

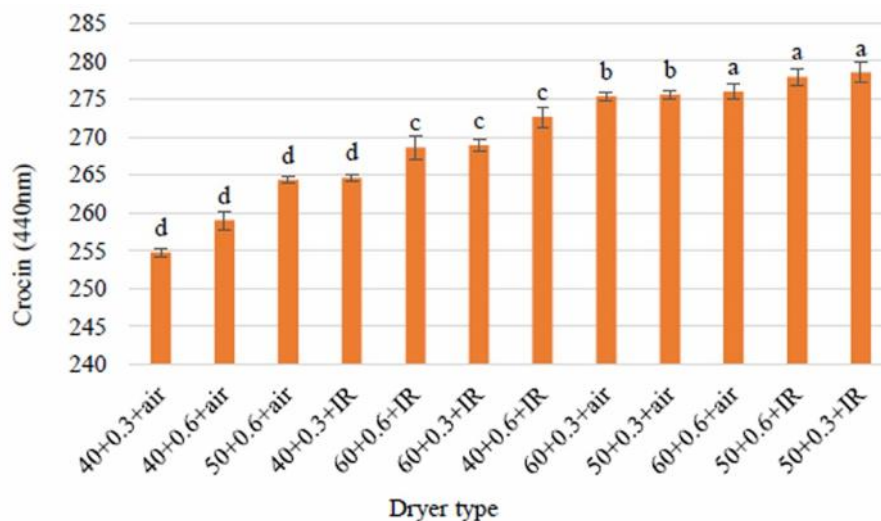
آقایی و همکاران تاثیر چند روش خشک کردن را بر کروسین، پیکروکروسین و سافرانال زعفران بررسی کردند. روش شیشه پیرکس از سایر روش‌ها بهتر بود. کمترین مقدار کروسین مربوط به خشک کردن با آون و دمای ۶۰ °C بود. در دمای ۸۰ °C کمترین مقدار پیکروکروسین به دست آمد. کمترین مقدار سافرانال مربوط به روش خشک کردن سنتی و آون، به ترتیب در دمای ۲۵ و ۶۰ °C بود [۳۸].

دل کامپو و همکاران تاثیر سه نوع شرایط دمایی شامل ۱۸ تا ۲۰ °C به مدت ۱۴۴۰ min و ۴۰ تا ۵۰ °C به مدت ۷۵ min و ۵۵ °C به مدت ۷۵ min روی پارامترهای کیفی زعفران شامل قدرت رنگی، پیکروکروسین و سافرانال بررسی کردند. بیشترین قدرت رنگی مربوط به خشک کردن در دمای ۴۰ °C بود که البته اختلاف معنی داری با خشک کردن در دمای ۵۵ °C نداشت.

نوع روش خشک کردن و دما تاثیر معنی داری بر مقدار پیکروکروسین داشت. کمترین مقدار پیکروکروسین مطابق شکل (۵) مربوط به دو روش خشک کردن با هوای داغ در دمای ۴۰ °C و سرعت ۰/۳ m/s با میانگین $^{16}E_{257}$ ۸۷/۸ و خشک کردن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ در دمای ۶۰ °C و سرعت ۰/۶ m/s، مقدار ۸۹/۹۸ به دست آمد. بیشترین مقدار پیکروکروسین مربوط به روش خشک کردن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ در دمای ۴۰ °C و سرعت ۰/۶ m/s با میانگین $^{16}E_{257}$ ۹۷/۸۲ به دست آمد.

مرتضی پور و همکاران ویژگی‌های کیفی زعفران را در یک خشک کن خورشیدی فتوولتائیک- گرمایی مجهز به پمپ حرارتی را در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C مورد بررسی قرار دادند. نتایج ارزیابی کیفیت زعفران خشک شده نشان داد که افزایش دمای هوای خشک کننده و پمپ حرارتی سبب بهبود رنگ زعفران یا کروسین گردیدند و افزایش دما کاهش عطر زعفران یا سافرانال را بدنبال داشت. اما تغییرات دما و روش خشک کردن نتوانست سبب ایجاد تغییر معنی داری در ویژگی طعم زعفران یا پیکروکروسین شود [۳۸].

کارمونا و همکاران سه نوع رفتار خشک کردن را برای زعفران بررسی کردند: خشک کردن در دمای اتاق، خشک کردن با هوای داغ در دماهای مختلف ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ °C و خشک کردن مطابق



شکل (۳) تغییرات مقدار کروسین در تیمارهای مختلف خشک کردن

(بازه‌های خطا معرف انحراف استاندارد و حروف لاتین غیر مشابه نمایانگر وجود اختلاف معنی دار ($p < 0.05$) در بین تیمارها است)

Fig. 3. Changes of Crocin levels in different drying treatments

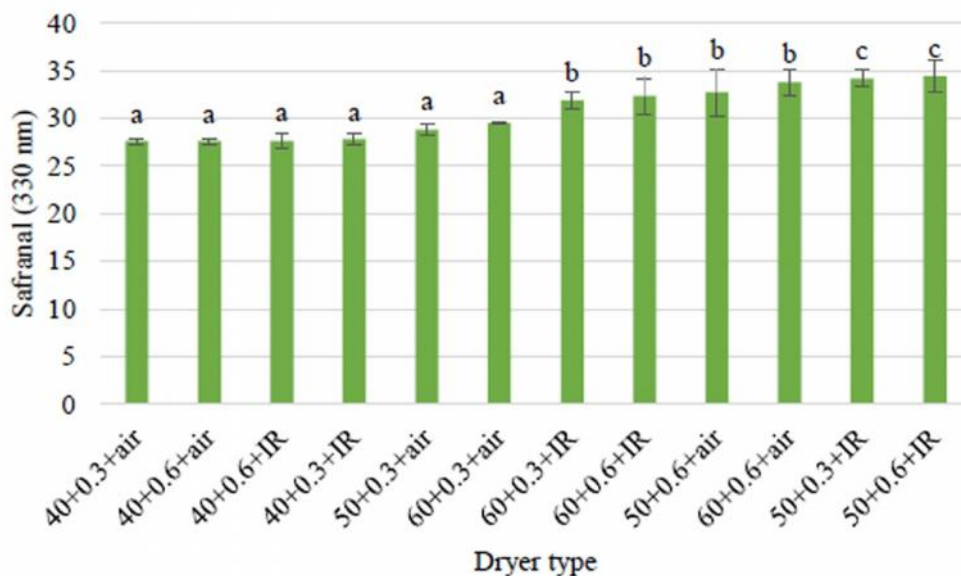
(Error bras indicate standard deviation; different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between treatments)

افزایش دمای خشک کردن محصول می‌شود. که با گزارش مرتضی پور، کارمونا، آقایی، دل کامپو و گرگوری که در بالا ذکر شد همخوانی دارد [۲۸، ۴۰-۳۷]. همچنین با توجه به نمودار (۴) بیشترین مقدار سافرانال مربوط به روش خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز در دمای 50°C به دست آمد. که با نتایج گرگوری و دل کامپو و آقایی که ذکر کردند که افزایش دما و کاهش زمان خشک کردن باعث حفظ بهتر مقدار سافرانال می‌شود همخوانی دارد [۴۰-۳۸]. از طرفی سرعت جریان هوای داغ به کار رفته در این روش خشک کردن مقادیر کمی انتخاب شده که می‌تواند در حفظ سافرانال تاثیر داشته باشد، انتخاب شده است. همچنین بر اساس نتایجی که برای پیکروکروسین در نمودار (۵) گزارش شده است، بیشترین مقدار پیکروکروسین مربوط به روش خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز در دمای 40°C و سرعت 0.6 m/s و کمترین مقدار پیکروکروسین مربوط به دو روش خشک کردن با هوای داغ در دمای 40°C و سرعت 0.3 m/s و خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز در دمای 60°C و سرعت 0.6 m/s بود که با نتایج آقایی و دل کامپو همخوانی دارد [۳۸، ۳۹].

کمترین مقادیر استرهای کروسین در نمونه‌هایی که در دمای 18°C تا 20°C خشک شده بودند گزارش شد. با افزایش دمای خشک کردن در نمونه‌ها، مقدار پیکروکروسین نیز افزایش را نشان داد. بیشترین مقدار سافرانال مربوط به نمونه‌هایی بود که در دمای 55°C به مدت 75 min خشک شدند. البته با افزایش دما ترکیب فرار ایزوفرون روند کاهشی داشت [۳۹].

گرگوری و همکاران تاثیر دمای خشک کردن و جریان هوا را بر متابولیت‌های ثانویه زعفران بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقدار سافرانال در روشی که ابتدا زعفران به مدت 20 min در دمای بین 80°C و 90°C حرارت داده شد و سپس در دمای 43°C خشک شد، 25 برابر بیشتر از زعفرانی است که در دمای پایین خشک شد. همچنین آن‌ها گزارش کردند که جریان هوا باعث کاهش مقدار سافرانال می‌شود و دمای بالا به نسبت دمای متوسط خشک کردن 46°C تا 58°C موجب حفظ بیشتر رنگدانه کروسین می‌شود [۴۰].

قدرت رنگی (کروسین) نمونه‌ها در روش خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز در هر سه دمای 40°C ، 50°C و 60°C اختلاف معنی‌داری ($p < 0.05$) با روش خشک کردن هوای داغ در دو دمای 40°C و 50°C داشت. استفاده از مادون قرمز باعث

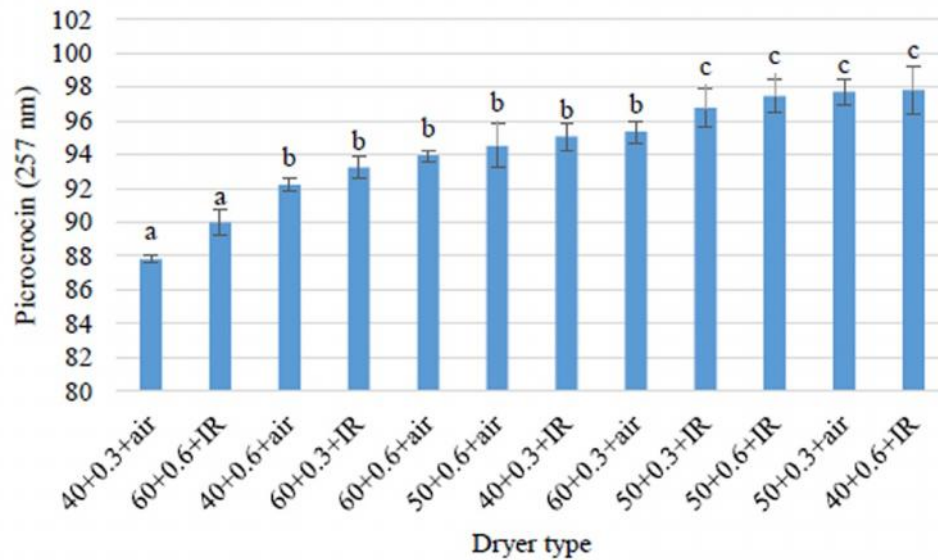


شکل (۴) تغییرات مقدار سافرانال در تیمارهای مختلف خشک کردن

(بازه‌های خطا معرف انحراف استاندارد و حروف لاتین غیر مشابه نمایانگر وجود اختلاف معنی‌دار ($p < 0.05$) در بین تیمارها است)

Fig. 4. Changes of Safranal levels in different drying treatments

(Error bras indicate standard deviation; different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between treatments)



شکل (۵) تغییرات مقدار پیکروکروسین در تیمارهای مختلف خشک کردن

(بازه‌های خطا معرف انحراف استاندارد و حروف لاتین غیر مشابه نمایانگر وجود اختلاف معنی‌دار ($p\text{-value} < 0.05$) در بین تیمارها است)

Fig. 5. Changes of Picrocrocin levels in different drying treatments

(Error bras indicate standard deviation; different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between treatments)

جدول (۹) آنالیز واریانس یکطرفه تاثیر متغیرها بر مقدار کروسین، پیکروکروسین و سافرانال ($p < 0.05$)Table 9 Analysis of variance for variables effects on Crocin, Picrocrocin and Safranal ($p\text{-value} < 0.05$).

معنی دار Sig.	F	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of Squares	مواد موثره زعفران Effective ingredients of saffron
.000*	5.284	178.365	11	1962.012	Between Groups
		33.754	24	810.087	Within Groups
			35	2772.099	Total
.000*	16.150	23.346	11	256.808	Between Groups
		1.446	24	34.694	Within Groups
			35	291.503	Total
.000*	14.806	29.462	11	324.086	Between Groups
		1.990	24	47.758	Within Groups
			35	371.844	Total

معنی‌داری بین تیمارهای مختلف مشاهده نشد (جدول ۱۰) و نتایج میکروبی تمام نمونه‌ها در حد مجاز استاندارد بود. تسلیمی و همکاران گزارش کردند که در نمونه‌های زعفران خشک شده با آن خلاء و خورشیدی شمارش کلی میکروارگانیسم‌ها و شمارش کلی فرم‌ها در حد مجاز بودند ولی شمارش مزبور در نمونه‌های خشک‌شده با روش سنتی با استاندارد مطابقت

۵.۳. تاثیر نوع و دمای خشک کردن بر نتایج میکروبی

زعفران

مطابق استاندارد ملی ایران آزمونهای میکروبی شامل شناسایی اشرشیاکلی، شناسایی انتروکوک‌ها، شناسایی کلسترییدیوم‌های احیاء کننده سولفیت و شمارش کپک و مخمر بر روی تیمارهای مختلف انجام گرفت [۱۷]. هیچ اختلاف

جدول (۱۰) نتایج آنالیز واریانس یکطرفه تاثیر متغیرها بر شمارش کپک و مخمرها.

Table 10 Analysis of variance for variables effects on Molds and Yeasts count .

معنی دار Sig.	F	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of Squares	پارامترهای میکروبی Microbial parameters
0.790 ^{ns}	0.648	4148989.899	11	45638888.889	Between Groups
		5250000.000	24	126000000.000	Within Groups
			35	171638888.889	Total
		0.000	11	0.000	Between Groups
		0.000	24	0.000	Within Groups
			35	0.000	Total

ns عدم معنی داری

و 60°C انتخاب شد. در این دامنه حرارتی مقدار ضریب نفوذ از $1/8003 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $2/38346 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ برای روش ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز و $5/07 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $2/7892 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ در خشک کردن با هوای داغ به دست آمد. با افزایش دما ضریب نفوذ موثر افزایش یافت که به علت سرعت زیاد تبخیر و نفوذ سریع تر حرارت به داخل نمونه می باشد. همچنین مقدار انرژی فعال سازی در روش ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز $10/43$ تا $11/6 \text{ KJ/mol}$ متغیر بود. مقدار انرژی فعال سازی در روش خشک کردن با هوای داغ بین $34/1$ و $62/4 \text{ KJ/mol}$ متغیر بود که بیان کننده مقدار انرژی لازم برای شروع فرایند خشک کردن می باشد. ترکیبات اصلی موثره زعفران شامل کروسین، پیکروکروسین و سافرانال در تیمارهای خشک کردن مقادیر مختلفی داشتند. بیشترین مقدار کروسین در دمای 50°C و سرعت هوای $0/3 \text{ m/s}$ با خشک کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز به دست آمد. نتایج میکروبی تمام تیمارها در حد مجاز استاندارد ملی ایران بود که نشان دهنده شرایط خوب پس از برداشت و تاثیر سریع خشک کردن بر نتایج میکروبی می باشد.

نداشت [۴۱]. عاطفی و همکاران بار میکروبی، شمارش کلی فرم و شمارش کپک و مخمر نمونه های زعفران خشک شده با روش انجامادی را کمتر از نمونه های خشک شده با سایه گزارش کردند [۴۲]. در این تحقیق گل های تازه جمع آوری شده از مزرعه در شرایط خنک و بدون انباشتگی، نگهداری شد و کلاله ها، سریع از سایر اجزای گل جداسازی شد. آذر پژوه و همکاران (۱۳۹۵) گزارش کردند که نگهداری گل زعفران در دمای پایین و نزدیک 0°C برای حداکثر حفظ ترکیبات شیمیایی زعفران و کمترین توسعه آلودگی میکروبی طی الزامی است [۴۳]. با توجه به اینکه کلاله های زعفران تیمارهای مختلف در شرایط یکسان جمع آوری شده و در پلیت های یکبار مصرف استریل جمع آوری شدند و پس از خشک کردن، دوباره در پلیت های یکبار مصرف استریل نگهداری شدند، از انتقال آلودگی های ثانویه تا حد امکان جلوگیری شد. همچنین خشک شدن نمونه ها نسبت به روش های سنتی بسیار سریع تر بود، این باعث جلوگیری از فراهم شدن رشد مناسب برای رشد میکروارگانیسمها شده و اهمیت مدت زمان خشک شدن و فرایند صحیح پس از برداشت زعفران را نشان می دهد.

۴. نتیجه گیری

بر اساس شاخص های آماری R^2 ، ۲ و RMSE مدل میدلی و همکاران بهترین مدل جهت بررسی سینتیک و پیش بینی روند خشک شدن کلاله زعفران با روش ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز و همچنین روش هوای داغ در سه دمای 40° ، 50°

منابع

- [13] Hosseini Ghaboos, S.H., Seyedian Ardabili, S.M., Kashaninejad, M., Asadi, G., and Alami, M. (2016). Mass transfer kinetics of combined infrared - hot air drying of Pumpkin. *J. Food Tech. Nutrition*, 13, 5-16 [In Persian].
- [14] Taghinezhad, E., Rasooli S., Vali. (2017). The effect of combination dryer of hot air – infrared and microwave on some quality properties of parboiled rice. *Innovative Food Technologies*, 5(1), 25-38 [In Persian].
- [۱۵] نادیان، ح. (۱۳۹۵). طراحی، ساخت و ارزیابی خشک‌کن هیبریدی هوای داغ- مادون قرمز برای فرایند خشک کردن لایه نازک کیوی مبتنی بر ماشین بینایی و منطق فازی. پایان نامه دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم. دانشگاه فردوسی مشهد.
- [16] ISO 3632-2, 2010. Saffron (*Crocus sativus* L.): Test Methods (2003 revised 2010). Switzerland: Geneva, International Standards Organization
- [۱۷] استاندارد ملی ایران، شماره ۵۶۸۹، (۱۳۸۸). میکروبیولوژی زعفران-ویژگی‌ها، انتشارات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.
- [18] Bengang W., Haile M., Wenjuan Q., Bei W., Xin Z., Peilan W., Juan W., Griffiths G. A., Zhongli P. (2014). Catalytic infrared and hot air dehydration of carrot slices. *J. Food Proc. Eng.*, 37(2), 111-121.
- [19] Alaei, B., Chayjan, Amiri, R. (2015). Modelling of nectarine drying under near infrared-Vacuum conditions. *Acta Scientiarum Polonorum. Technologia Alimentaria*, 14(1), 15-27.
- [20] Henderson, S.M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASABE.*, 17, 1167-1172.
- [21] Guarte, R.C. (1996). Modelling the drying behaviour of copra and development of a natural convection dryer for production of high quality copra in the Philippines. Ph.D. dissertation, 287. Hohenheim University, Stuttgart, Germany.
- [22] Ali R., Yousefi, Ghasemian, N., Salari, A. (2017). Infrared drying kinetics study of lime slices using hybrid GMDH-neural networks. *Innovative Food Technologies*, 5(1), 91-105 [In Persian].
- [23] Ertekin, C., Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J. Food Eng.*, 63(3), 349-359.
- [24] Karathanos, V.T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *J. Food Eng.*, 39, 337-344.
- [25] Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. *Drying Tech.*, 20(7), 1503-1513.
- [26] Wang, C. Y., Singh, R. P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. *ASABE.*, pp. 78- 3001.
- [27] Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., Wraton, F. T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions ASAE.*, 28: 296-301.
- [1] Masi, E., Taiti, C., Heimler, D., Vignolini, P., Romani, A., Mancuso, S. (2016). PTR-TOF-MS and HPLC analysis in the characterization of saffron (*Crocus sativus* L.) from Italy and Iran. *Food Chem.*, 192, 75-81.
- [2] Gresta, F., Avola, G., Lombardo, GM., Siracusa, L, Ruberto, G. (2009). Analysis of flowering, stigmas yield and qualitative traits of saffron (*Crocus sativus* L.) as affected by environmental conditions. *Scientia Horticulturae*, 119(3), 320-324.
- [3] Mazloumi, MT., Taslimi, A., Jamshidi, E., Atefi, M., Ahmadian, Seyyed, Falahatpishe, HR., Hadian, Z. (2008). Comparison of the Effects of Drying Processes: Vacuum Oven, Freeze, Solar and Microwave with Traditional Method on the Qualitative Characteristics of the Iranian Saffron. *Pajoohandeh J.*, 13(3), 213-223.
- [۴] امیدبیگی، ر. (۱۳۹۰). تولید و فراوری گیاهان دارویی، جلد سوم. انتشارات آستان قدس رضوی، ص ۴۰۰-۱.
- [5] Husaini, A. M., Kamili, A. N, Wani, MH, Teixeira da Silva, JA., Bhat, GN. (2010). Sustainable Saffron (*Crocus sativus* L. Kashmirianus) Production: technological and policy interventions for Kashmir. *Functional Plant Sci. Biotech.*, 4, 116-127.
- [6] Kumar, DG., Praveen, Hebbar, H., Umesh, Ramesh, MN. (2006). Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices. *LWT-Food Sci. Tech.*, 39(6), 700-705
- [7] Mongpraneet, S., Abe, T., Tsurusaki, T. (2002). Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. *J. Food Eng.*, 55(2), 147-156
- [8] Pan, Z., Atungulu, Griffiths G. (2010). Infrared Heating for Food and Agricultural Processing, *Inf. Heat. Food Agri. Proc.*, CRC Press, 53-76.
- [9] Akhondi, E., Kazemi, A., Maghsoodi, V. (2011). Determination of a suitable thin layer drying curve model for saffron (*Crocus sativus* L) stigmas in an infrared dryer. *Scientia Iranica*, 18(6), 1397-1401.
- [10] Nadian, M. H., Abbaspour-Fard, M. H., Sadrnia, H., Golzarian, M. R., Tabasizadeh, M., Martynenko, A. (2016). Improvement of Kiwifruit Drying using Computer Vision System (CVS) and ALM Clustering Method. *Drying Tech.* (just-accepted).
- [11] Salehi, F., Kashaninejad, M., Sadeghi Mahoonak, A., Ziaifar, A.M. (2017). Kinetics Modeling of Thin-Layer Drying of Button Mushroom in Combined Infrared-Hot Air Dryer. *J. Food Sci. Tech.*, 13, 99-109 [In Persian].
- [12] Salehi, F., Kashaninejad, M., and Asadi, A. (2016). Investigation of Mass Transfer Kinetics in Combined Infrared-Hot Air Dryer for Eggplant slices. *Food Innovative Technologies*, 7, 53-60 [In Persian].



فصلنامه علوم و صنایع غذایی ایران، شماره ۶۵، دوره ۱۴، ص

۱۳۸ - ۱۲۹.

[39] Del Campo, C P., Carmona, M., Maggi, Luana, K., Charalabos D., Anastasaki, Eirini G., Tarantilis, Petros A., Alonso, Gonzalo L. (2010). Effects of mild temperature conditions during dehydration procedures on saffron quality parameters. *J. Sci. Food Agr.*, 90(4), 719-725.

[40] Gregory, Matthew J., Menary, Robert C., Davies, Noel W. (2005). Effect of drying temperature and air flow on the production and retention of secondary metabolites in saffron. *J. Agr. Food Chem.*, 53(15), 5969-5975.

[۴۱] تسلیمی، ا. و همکاران. (۱۳۸۵) مقایسه اثرات فرایندهای

خشک کردن خورشیدی و خلاء با روش سنتی بر ویژگی‌های

زعفران. فصلنامه علوم و صنایع غذایی ایران، شماره ۳، دوره ۳،

ص ۱۷ - ۹.

[42] Atefi, M., Taslimi, A., Hassas, MR., Mazloumi, MT. (2004). Effects of Freeze-drying processes on the qualitative characteristics of Iranian saffron, 1(2), 41-49.

[43] Azarpazhooh, E., Ehtiati, A., Sharayei, P. (2016). Modelling the Chemical and Microbial Changes of Saffron Flower during Storage Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithm. *Saffron Agronomy Tech.*, 4(4), 279-289.

[28] Morteza pour, H., Ghobadian, B., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H. (2012). Saffron drying with a heat pump-assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer. *Drying Technology*, 30(6), 560-566.

[29] Amiri Chayjan, R., Tabatabaei Bahrabad, S.M., Rahimi S.F. (2013). Modeling infrared-convective drying of pistachio nuts under fixed and fluidized bed conditions. *J. Food Process. Preserv.*, pp 12083.

[30] Hebbbar, H.U., Vishwanathan, K.H., Ramesh, M.N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *J. Food Eng.*, 65, 557-563.

[31] Karami, H., Rasekh, M., Darvishi, Y. (2017). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics and organo essential oil extraction efficiency in a hybrid dryer. *Innovative Food Technologies*, 5(1), 65-75 [In Persian].

[32] Nadian, M. H., Abbaspour-Fard, M.H., Sadrnia, H., Golzarian, M. R., Tabasizadeh, M. (2016). Optimal pretreatment determination of kiwifruit drying via online monitoring. *J. Sci. Food Agr.*, 96(14), 4785-4796.

[33] Abbasi, S., Minaei, S. Khoshtaghaza, M. H. (2014). Investigation of kinetics and energy consumption thin layer drying of corn. *J. Agri. Machinery*. 4(1), 98-107 [In Persian].

[34] Tolaba, MP., Suarez, C. (1988). Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusional model. *Le-W Tech. Food Sci. Tech.* 21(2) 83-86.

[35] Ansari Far, M. H., Agh Khani, M.H., Golzarian, M. R., Tabasi Zadeh, M. (2016). Investigation of Mazafati Dates Species Drying Kinetics and Effective Moisture Diffusivity under the Cabinet Solar Dryer. *Food Sci. Tech.*, 13(56), 125-141.

[۳۶] صفری، م؛ امیری چایجان، ر؛ علائی، ب. (۱۳۹۶)

مدل‌سازی برخی ویژگی‌های مغز بادام در خشک‌کن پیوسته

نیمه‌صنعتی. فصلنامه علوم و صنایع غذایی ایران، شماره ۶۵،

دوره ۱۴، ص ۳۷ - ۲۵.

[37] Carmona, M., Zalacain, A., Pardo, J. E., López, E., Alvarruiz, A., Alonso, G. L. (2005). Influence of different drying and aging conditions on saffron constituents. *J. Agr. Food Chem.*, 53(10), 3974-3979.

[۳۸] آقائی، ز. و همکاران. (۱۳۹۶) تأثیر روش‌های مختلف

خشک‌کردن بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و حسی زعفران.

*Research Article***The Effects of temperature, air speed and IR radiation on drying kinetics and some qualities saffron**

**Morteza Mohamadzadeh Moghadam¹, Masoud Taghizadeh^{2*}, Hassan Sadrnia³,
Hamid Reza Pourreza⁴**

1. Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
4. Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Abstract

Saffron is a dry, red color of the *Crocus Sativus L.* It is the most expensive spice in the world. Drying is an important step in saffron processing. Drying causes physical, chemical and biochemical changes to achieve the desired properties of saffron. In this study, the kinetics of drying saffron stigma using a combined hot air-infrared dryer at three temperature levels of 40, 50 and 60 °C and two hot air flow speeds of 0.3 and 0.6 m/s as well as an ordinary hot-air dryer using the same conditions were studied. The effect of the studied parameters on the amount of crocin, picocrocinn and safranal and the microbial load of the final product were also investigated. The results showed that, the Midley model was found to be the best model in fitting data of both drying methods. According to the results of analysis of variance, the main effect of temperature, air flow rate and infrared irradiation and their interaction on drying time was significant ($p < 0.05$). The infiltration coefficient ranged from 1.8003×10^{-08} to 2.38346×10^{-08} m²/s for the hot air-infra-red method and 5.07×10^{-10} to 2.7892×10^{-09} m²/s for hot air drying. The amount of activation energy in the combination method of hot air-infrared varied from 10.43 kJ/mol to 11.6 kJ/mol, and was obtained at 34.1 kJ/mol and 62.4 kJ/mol in hot-air drying. In terms of maintaining the color strength of saffron, the amount of Crocin was significantly different between treatments ($p < 0.05$) and the highest Crocin was obtained when the combination of hot air-infrared at 50 °C and 0.3 m/s was used with an average of $^{1\%}E_{440nm}$ 278.5. According to the national standard of Iran, microbial tests were carried out on different treatments. No significant differences were observed between the treatments.

Keywords: Saffron, Drying kinetics, IR radiation, Hot-air.

* Corresponding author: mtaghizadeh@um.ac.ir