

خشک کردن لایه نازک ورقه‌های گوجه‌فرنگی با استفاده از خشک کن تلفیقی فروسرخ-خلأ

فخرالدین صالحی^{۱*}، مهدی کاشانی نژاد^۲

۱- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲- استاد، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۵/۱۵)

چکیده

در این پژوهش، سینتیک خشک شدن ورقه‌های نازک گوجه‌فرنگی در یک خشک‌کن ترکیبی فروسرخ-خلأ بررسی شد. تأثیر توان لامپ فروسرخ در سه سطح (۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ وات) و فشار آون خلأ در سه سطح (۶، ۱۶ و ۲۶ کیلوپاسکال) بر زمان خشک شدن و ضریب انتشار رطوبت در طی فرآیند خشک شدن ورقه‌های نازک گوجه‌فرنگی بررسی شد. نتایج نشان‌داد تأثیر توان لامپ فروسرخ و فشار بر فرآیند خشک شدن گوجه‌فرنگی معنی‌دار بود ($P < 0/05$). با افزایش توان لامپ فروسرخ از ۳۰۰ به ۴۰۰ وات، زمان خشک شدن گوجه‌فرنگی ۴۲/۸۶ درصد کاهش یافت. علاوه بر این، کاهش فشار آون خلأ از ۲۶ به ۶ کیلوپاسکال باعث کاهش ۴۰/۰ درصدی زمان خشک‌کردن شد. اثر توان حرارتی فروسرخ و فشار آون خلأ بر تغییرات ضریب انتشار مؤثر گوجه‌فرنگی نیز بررسی شد و نتایج به دست آمده نشان‌داد که با افزایش توان منبع حرارتی و کاهش فشار مقدار ضریب انتشار مؤثر افزایش یافت. ضریب انتشار مؤثر رطوبت گوجه‌فرنگی بین $5/00 \times 10^{-10}$ تا $2/38 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه محاسبه شد. در برازش داده‌های فرآیند خشک‌کردن گوجه‌فرنگی مدل درجه دوم نسبت به سایر مدل‌ها با بزرگ‌ترین مقدار ضریب تعیین (R^2) و کوچک‌ترین خطا، نتایج نزدیک‌تری به داده‌های آزمایش را داشت. با توجه نتایج به دست آمده در این مطالعه، استفاده از این خشک کن جهت خشک کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی توصیه می‌شود.

کلید واژگان: خشک کردن، خلأ، سینتیک، ضریب انتشار مؤثر، گوجه‌فرنگی، فروسرخ.

*مسئول مکاتبات: F.Salehi@Basu.ac.ir

۱- مقدمه

برداشت اکثر محصولات کشاورزی در رطوبتی صورت می‌گیرد که مناسب انبارداری نمی‌باشد. در نتیجه، برای جلوگیری از فساد، عملیات خشک کردن بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد. تولید ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک‌شده یکی از راه‌های کاهش ضایعات زیاد گوجه‌فرنگی تازه در کشور محسوب می‌شود. اکبری و همکاران (۲۰۹) سینتیک افت رطوبت و مقایسه کیفیت ورقه‌های گوجه‌فرنگی در مرحله خشک شدن با سه روش مختلف شامل خشک کردن خورشیدی، آفتابی سنتی و هوای خشک را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که سرعت خشک شدن در خشک‌کن خورشیدی بین ۱۷ تا ۴۵ درصد بیشتر از روش سنتی است [۱]. زمان خشک کردن با روش‌های متداول و سنتی طولانی بوده و باعث کاهش کیفیت محصول نهایی می‌شود. لذا بررسی روش‌های نوین جهت خشک کردن این محصول ضروری می‌باشد [۲]. خشک‌کن‌های مادون قرمز به دلیل مصرف انرژی کم، بازده زیاد و کیفیت بالای محصول خشک‌شده، امکان کنترل شرایط عملیات خشک کردن و مستقل بودن از شرایط محیطی به صورت گسترده برای خشک کردن میوه‌ها، سبزیجات و مواد بیولوژیکی مورد توجه قرار گرفته است [۳-۵]. خشک‌کردن به وسیله اشعه فروسرخ به ویژه به شکل لایه نازک روش مناسبی است. در این روش، حرارت در محصول بدون ایجاد تغییرات نامطلوب ایجاد می‌شود. در نتیجه، کیفیت ساختاری محصول نهایی افزایش و هزینه‌های فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد. همچنین، ضایعات محصول به حداقل می‌رسد [۶، ۷]. اشعه فروسرخ سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم روی محصول می‌شود که نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود، سریع‌تر است و راندمان بالاتری دارد [۸]. بیشتر اشعه فروسرخ توسط مولکول‌های سطحی جذب می‌شود. این پدیده سبب گرم شدن سریع محصول شده و سبب کاهش تنش‌های حرارتی در محصول و در نتیجه، حفظ کیفیت آن می‌شود [۹، ۱۰]. دویماز (۲۰۱۱) در پژوهشی اثر سطوح مختلف تابش مادون قرمز را بر سینتیک خشک شدن و قابلیت جذب آب مجدد برش‌های سیب‌زمینی شیرین مورد بررسی قرار داد. در این بررسی از چهار سطح توان تابشی ۱۰۴، ۱۲۵، ۱۴۶ و ۱۶۷ وات و سه ضخامت ورقه ۳، ۵ و ۸ میلی‌متر استفاده شد. نتایج

نشان داد که با افزایش شدت تابش اشعه مادون قرمز، زمان خشک شدن کاهش یافت [۱۱]. در پژوهشی دیگر، لین و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی تغییرات رنگی و میزان آبیگری مجدد ورقه‌های سیب‌زمینی شیرین در یک خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-انجمادی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از مادون قرمز در روش خشک کردن انجمادی سبب کوتاه شدن زمان خشک شدن شد. از سوی دیگر افزایش ضخامت ورقه و کاهش دما موجب طولانی شدن زمان خشک کردن شد [۱۲]. جهت افزایش سرعت فرآیند خشک کردن بدون تأثیر بر کیفیت محصول باید فرآیند خشک کردن را در دمای پایین‌تر انجام داد. خشک کردن تحت خلأ یک روش برای رسیدن به این هدف است. همچنین، خشک کردن در خلأ باعث تولید محصول خشک با کیفیت فوق‌العاده می‌شود. این امر نیز به خاطر دمای پایین خشک کردن و سطح پایین‌تر واکنش‌های اکسیداتیو می‌باشد. لذا ایجاد خلأ در یک خشک‌کن مادون قرمز می‌تواند به بهبود کیفیت محصول خشک‌شده و کاهش زمان خشک کردن شود [۵]. تغییرات رنگ در شرایط مادون قرمز تحت خلأ نسبت به سایر روش‌های خشک کردن کمتر بوده، همچنین میزان تخلخل و باز جذب آب افزایش می‌یابد [۵].

مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک‌کردن برای طراحی، بهبود سیستم‌های خشک‌کن موجود و حتی کنترل فرآیند استفاده می‌شود [۱۳]. اخیراً مطالعات زیادی برای توصیف رفتار خشک شدن میوه‌ها و سبزی‌ها مختلف جهت یافتن بهترین مدل تجربی صورت گرفته است. در مطالعه‌ای برازش داده‌های نسبت رطوبت گوجه‌فرنگی با مدل‌های مختلف در طی خشک کردن لایه نازک با استفاده از هوای داغ بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل میدیلی، بهترین کارایی را داشت [۱۴]. ساسیلیک و همکاران (۲۰۰۶) گوجه‌فرنگی را به صورت ورقه‌های نازک در دمای ۷۰ درجه سلسیوس با استفاده از خشک‌کن خورشیدی خشک کردند. مدل تقریب انتشار^۱ به دلیل دارا بودن بیش‌ترین میزان R^2 به عنوان بهترین مدل برای خشک کردن ورقه‌های نازک گوجه‌فرنگی با استفاده از خشک‌کن خورشیدی پیشنهاد شد [۱۵].

با توجه به بررسی منابع منتشرشده مشخص شد که تاکنون پژوهشی در خصوص برازش داده‌های سینتیک انتقال جرم و

از نمونه‌ها ۱۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتال^۲ با دقت ± 0.1 گرم که در خشک‌کن تعبیه شده بود، ثبت گردید.

جهت برازش داده‌های فرآیند خشک شدن، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن گوجه‌فرنگی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید [۱۶]:

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

MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t : رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه ماده خشک (d.b)، M_e : رطوبت تعادلی نمونه‌ها (d.b) و M_0 : رطوبت اولیه نمونه‌ها (d.b) می‌باشند. با توجه به رابطه ۱، نسبت رطوبت به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طی خشک شدن وابسته است. برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_0 و M_t بسیار کوچک می‌باشد. بنابراین، می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست [۱۶].

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

۲-۲- تعیین ضریب انتشار مؤثر رطوبت

انتقال جرم معمولاً برحسب انتشار فشاری، انتشار اجباری و انتشار معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه‌بندی می‌شود. قانون دوم انتشار فیک برای شرایط ناپایا می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند:

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

که در آن X مقدار رطوبت موضعی بر مبنای وزن خشک، t زمان و x شاخص فضایی می‌باشد [۱۷]. برای بکار بردن قانون فیک فرض می‌گردد که فرآورده غذایی تک‌بعدی است، رطوبت اولیه یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت عمده در برابر انتقال رطوبت است. حل معادله فیک برای یک نمونه تیغه‌ای شکل به صورت رابطه ۴ می‌باشد:

ضریب انتشار مؤثر رطوبت در طی خشک کردن گوجه‌فرنگی در خشک‌کن ترکیبی فرورسرخ-خلاء صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر توان لامپ پرتودهی فرورسرخ و فشار آون خلاء بر خشک کردن گوجه‌فرنگی و انتخاب بهترین مدل تجربی (از بین مدل‌های موجود در منابع علمی) بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خشک کردن

برای انجام فرآیند خشک کردن، ابتدا گوجه‌فرنگی‌های (*Solanum lycopersicum*) رقم کیمیا با ظاهر و اندازه یکسان، و قطر ۴ سانتی متر به صورت روزانه از استان گلستان تهیه گردید. رقم کیمیا، به وزن متوسط ۱۷۰ گرم، سفت، درشت و به رنگ قرمز شفاف بوده و برای مصارف تازه‌خوری و تولید فرآورده‌های صنعتی مناسب است. رطوبت اولیه گوجه فرنگی‌ها ۹۳/۵ درصد بر پایه مرطوب بود. گوجه‌فرنگی‌ها به صورت عرضی به قطعاتی با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر توسط کاتر برش داده شدند. برش‌های گوجه‌فرنگی بلافاصله پس از برش جهت پرتودهی توسط خشک‌کن فرورسرخ-تحت خلاء^۱ استفاده شدند (شکل ۱).

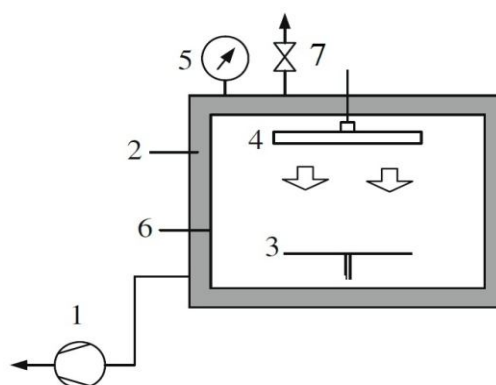


Fig 1 A schematic diagram of the infrared-vacuum dryer: (1) vacuum pump; (2) insulator; (3) sample tray; (4) infrared lamp; (5) pressure gauge; (6) drying chamber; (7) vacuum break-up valve.

جهت خشک کردن نمونه‌های برش خورده با خشک‌کن فرورسرخ-تحت خلاء از متغیرهایی شامل توان لامپ فرورسرخ (فیلیپس، ژاپن) در سه سطح ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ وات و فشار سیستم ۶، ۱۶ و ۲۶ کیلوپاسکال استفاده گردید. جهت تنظیم توان مورد نیاز از دستگاه واریابل استفاده گردید. فاصله لامپ

2. Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)

1. Vacuum oven, Memmert Universal, Schwabach, Germany

SSE^4 : مجموع توان دوم خطاها زمانی که از متغیرهای مستقل (X ها) استفاده می‌کنیم.

بنابراین:

$$SSR = SST - SSE \quad (7)$$

SSR^5 را مجموع توان دوم خطاها به خاطر استفاده از متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. هر چه SSR بزرگ‌تر باشد بهتر است و اگر $SSR = 0$ باشد، رابطه رگرسیونی اصلاً کاربرد نداشته است. می‌دانیم SSR کاهش تغییرپذیری (خطا) به خاطر استفاده از متغیرهای مستقل است. نسبت این کاهش را با R^2 نشان داده و ضریب تعیین (معادله ۸) می‌نامیم. مقادیری که R^2 می‌تواند اختیار کند بین صفر و یک می‌باشد [۱۸، ۱۹].

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (8)$$

خطای استاندارد با استفاده از معادله ۹ محاسبه شد. در این معادله S انحراف معیار و n تعداد نمونه می‌باشد.

$$SE = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

در این مطالعه به منظور برازش داده‌های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها، از نرم‌افزار Curve Expert نسخه ۱/۳۴ استفاده شد. این نرم افزار همچنین ضریب تبیین (R) و خطای استاندارد (SE) مربوط به هر مدل را محاسبه و جهت مقایسه مدل‌ها در اختیار محقق قرار می‌دهد. مدل دارای بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطاء، به عنوان بهترین مدل انتخاب و گزارش شد. آزمایش‌ها در سه تکرار و در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند. برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel (۲۰۰۷) و برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار Minitab 16 در سطح معنی‌داری ۰.۵٪ استفاده شد.

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

در اینجا، L نصف ضخامت تیغه (برحسب متر)، n تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک شدن (S) و D_{eff} ضریب انتشار مؤثر ($m^2 s^{-1}$) می‌باشند. ضریب انتشار مؤثر از طریق محاسبه شیب معادله ۵ به دست می‌آید:

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (5)$$

ضریب انتشار معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک کردن برحسب لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت ($LnMR$) نسبت به زمان تعیین می‌گردد. هنگامی که نمودار مقدار $LnMR$ نسبت به زمان رسم گردد، شیب خط به دست آمده را در معادله ۶ قرار داده تا ضریب انتشار مؤثر به دست آید:

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

K_0 شیب خط می‌باشد. برای هر تیمار، از ضریب انتشارهای به دست آمده میانگین گرفته و نتیجه اعلام شد. به منظور بررسی سببیتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن گوجه‌فرنگی، از مدل‌های مختلف خشک کردن استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای برازش داده‌های فرآیند خشک کردن گوجه‌فرنگی در جدول ۱ نشان داده شده است [۱۶، ۱۷]. مدلی که بیشترین مقدار ضریب تعیین R^2 و کمترین خطای استاندارد SE را داشته باشد، به عنوان بهترین مدل انتخاب و گزارش می‌شود.

ضریب تعیین قدرت توضیح دهندگی مدل را نشان می‌دهد. ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود. تغییرات کل متغیر وابسته برابر است با تغییرات توضیح داده شده توسط رگرسیون بعلاوه تغییرات توضیح داده نشده. با توجه به اینکه SST^3 مجموع توان دوم خطاها زمانی که از متغیرهای مستقل (X ها) استفاده نمی‌کنیم.

4. Sum of Squares for Error
5. Sum of Squares for Regression

1. Coefficient of Determination
2. Standard Error
3. Sum of Squares for Total

Table 1 Applied experimental models to study the infrared-vacuum drying process of tomato.

Equation	Model
$MR=1+at+bt^2$	Wang and Singh
$MR= a+bt+ct^2$	Quadratic
$MR=a\exp(-kt)$	Henderson and Pabis
$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Approximation of diffusion
$MR = \exp(-kt^n)$	Page
$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$	II-Modified Page
$MR = \exp(-kt)$	Newton
$MR = a\exp(-kt^n) + bt$	Midilli
$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic

MR: Moisture Ratio, t: time (min) and n, k, b, l, g, c and a are coefficients of models.

در جدول ۲ به نمایش درآمده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، اثرات اصلی فاکتورهای توان لامپ و فشار خلاء در سطح احتمال ۰.۵٪ معنی‌دار بود و درحالی که اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود.

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر توان لامپ فروسرخ و فشار آون خلاء بر خشک شدن گوجه‌فرنگی آنالیز و

Table 2 Results of analysis of variance of the effects of lamp power and pressure on tomato drying time.

Source	Degrees of freedom	Sum of squares	p
Power	2	11200.0	0.000
Pressure	2	8533.3	0.000
Power× Pressure	4	1066.7	0.090
Error	9	850.0	
Total	17	21650.0	

داخل نمونه‌ها، نرخ خشک شدن نمونه‌ها بیشتر شده است. نتایج مشابهی برای خشک شدن برش‌های پیاز [۲۲] و تفاله سیب [۲۳] گزارش شده است.

کاهش فشار سیستم از ۲۶ به ۶ کیلوپاسکال به دلیل کاهش دمای تبخیر آب [۵]، باعث کاهش زمان خشک‌کردن از ۱۸۰ دقیقه به ۱۰۰ دقیقه شد (توان ۳۰۰ وات). بیش‌ترین زمان خشک شدن مربوط به توان پرتودهی ۳۰۰ وات و فشار سیستم ۲۶ کیلوپاسکال بود (۱۸۰ دقیقه). کمترین زمان خشک شدن نیز مربوط به توان پرتودهی ۴۰۰ وات و فشار سیستم ۶ کیلوپاسکال بود که مدت‌زمان ثبت شده برای این تیمار ۶۰ دقیقه به دست آمد.

همار و همکاران (۲۰۰۴) از یک خشک‌کن ترکیبی فروسرخ - هوای داغ در سه حالت ترکیبی، فروسرخ به‌تنهایی و هوای داغ به‌تنهایی برای خشک‌کردن سیب‌زمینی و هویج استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از کاهش زمان خشک شدن و کاهش

اثر توان لامپ پرتودهی و فشار خلاء بر تغییرات رطوبت در واحد زمان در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش توان لامپ فروسرخ، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت گوجه‌فرنگی افزایش یافت (شکل ۲). افزایش توان لامپ باعث افزایش دمای خشک‌کن و در نتیجه افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول می‌شود. این مسئله منجر به گرم شدن سریع‌تر محصول و تبخیر سریع‌تر آب از آن می‌شود و در نتیجه زمان خشک شدن کاهش می‌یابد [۲۰، ۲۱]. با افزایش توان لامپ فروسرخ از ۳۰۰ به ۴۰۰ وات، زمان خشک شدن گوجه‌فرنگی ۴۲/۸۶ درصد کاهش یافت. با گذشت زمان خشک شدن و به تبع آن کاهش رطوبت نمونه‌ها، نرخ خشک‌شدن کاهش یافت. با افزایش توان پرتودهی، دمای سطح نمونه‌ها افزایش یافته و در نتیجه، فشار بخار در داخل نمونه‌ها افزایش یافت. در نتیجه، با افزایش اختلاف فشار بین سطح و

تیمارهای تحقیق، در جدول ۳ گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ فروسرخ و کاهش فشار ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافته است ($p < 0.05$). با افزایش توان لامپ از ۳۰۰ به ۴۰۰ وات، مشاهده گردید که میانگین ضریب انتشار رطوبت از $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $10^{-9} \times 9/03$ به $10^{-10} \times 17/50$ افزایش یافت ($p < 0.05$). نتایج مشابهی برای خشک‌کردن برش‌های انبه $1/60 \times 10^{-9}$ تا $9/20 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه [۲۵] و برش‌های پیاز $1/32$ تا $1/09 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه [۲۶] گزارش شده است.

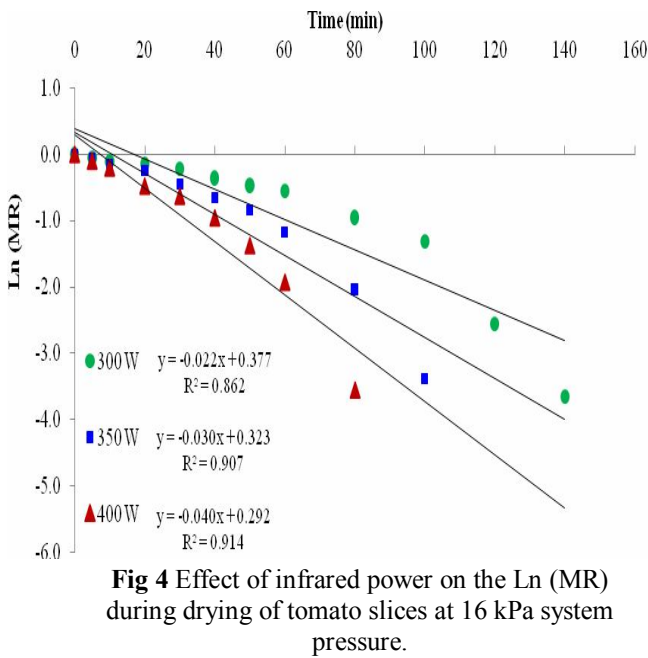


Fig 4 Effect of infrared power on the Ln (MR) during drying of tomato slices at 16 kPa system pressure.

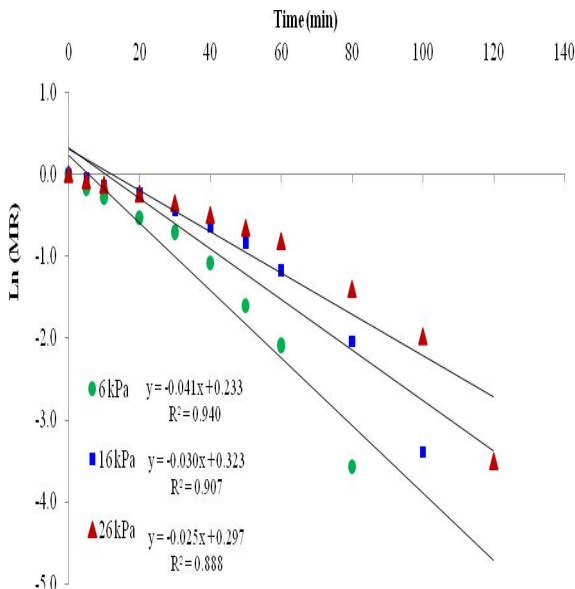


Fig 5 Effect of system pressure on the Ln (MR) during drying of tomato slices at 350 W power.

انرژی مصرفی در خشک‌کن ترکیبی نسبت به فروسرخ و هوای داغ بود [۲۴].

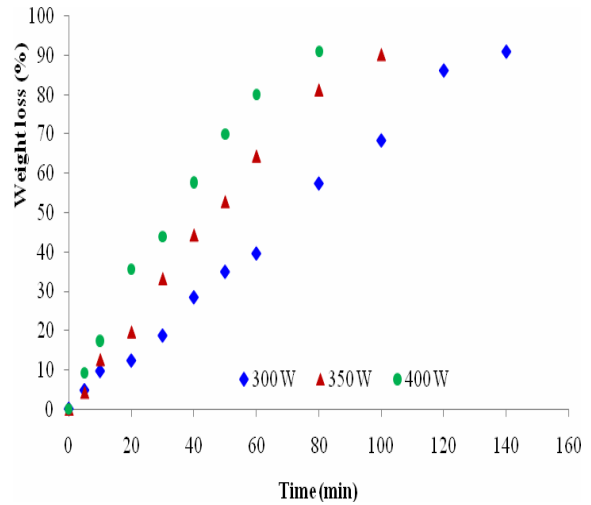


Fig 2 Variations of moisture content with drying time of tomato slices at different infrared powers (16 kPa)

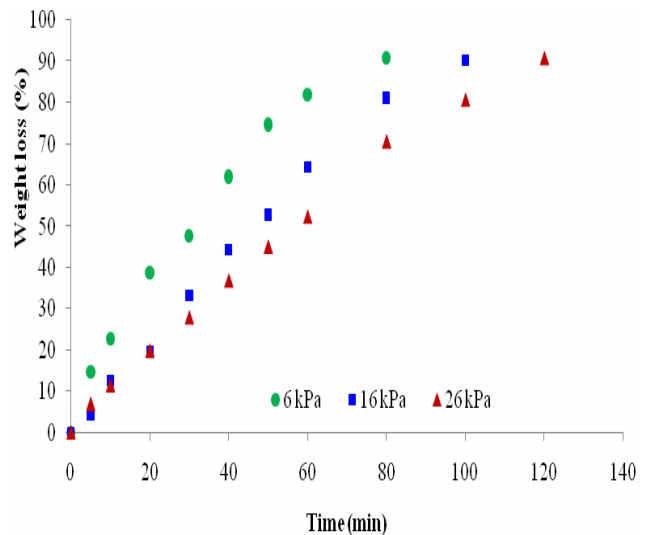


Fig 3 Variations of moisture content with drying time of tomato slices at different system pressures (350 W)

بررسی سینتیک انتقال جرم و ضرایب انتشار رطوبت می‌تواند یک ابزار سودمند برای کنترل شرایط فرآیند خشک‌کردن و افزایش کیفیت محصول باشد. شکل ۴ روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت (LnMR) نسبت به زمان در توان‌های متفاوت و در فشار ۱۶ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت نسبت به زمان برای فشارهای مختلف و لامپ فروسرخ ۳۵۰ وات را نشان می‌دهد. شیب این خطوط جهت محاسبه ضریب انتشار مؤثر استفاده گردید. مقادیر مختلف میزان ضریب انتشار مؤثر برای

Table 3 Values of effective moisture diffusivity of tomato slices obtained from drying experiments.

Power (W)	Pressure (kPa)	Effective diffusivity (m ² /s)	R ²
300	6	1.29×10 ⁻⁰⁹ c	0.932
	16	9.17×10 ⁻¹⁰ de	0.928
	23	5.00×10 ⁻¹⁰ e	0.935
350	6	1.71×10 ⁻⁰⁹ b	0.970
	16	1.25×10 ⁻⁰⁹ c	0.952
	23	1.04×10 ⁻⁰⁹ d	0.942
400	6	2.38×10 ⁻⁰⁹ a	0.968
	16	1.67×10 ⁻⁰⁹ b	0.956
	23	1.21×10 ⁻⁰⁹ c	0.946

دویماز (۲۰۰۹) طی مطالعه‌ای، فرآیند خشک‌کردن کیوی را بررسی نمود. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲/۴ متربرثانیه و رطوبت نسبی ۱۰ تا ۲۵٪ انجام شد. در این تحقیق مدل تجربی هنرسون و پاییس اصلاح شده و مدل ورما و همکاران نتایج بهتری نشان دادند [۲۷]. طغرل (۲۰۰۶) خشک شدن هویج را با فرسوخ در محدوده ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس بررسی کرد و مدل تجربی میدیلی را جهت توصیف رفتار خشک‌کردن پیشنهاد داد [۲۸].

مدل‌های مورد استفاده جهت برازش داده‌های فرآیند خشک شدن گوجه‌فرنگی در جدول ۱ گزارش شده است. مطابق نتایج به دست آمده، مدل درجه دوم نسبت به سایر مدل‌ها با بیشترین مقدار ضریب تعیین (R²) و کم‌ترین خطای استاندارد (SE)، نتایج نزدیک‌تری به داده‌های آزمایش را داشت. با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل درجه دوم، نتایج این مدل در جدول ۴ گزارش شده است. در این جدول ضریب تعیین، خطای استاندارد و ضرایب این مدل ارائه شده است. لذا استفاده از این مدل تجربی برای بررسی فرآیند خشک‌کردن برش‌های گوجه‌فرنگی با استفاده از سامانه ترکیبی فرسوخ-خلاء توصیه می‌شود.

Table 4 Curve-fitting coefficients of the Quadratic model.

Power (W)	Pressure (kPa)	a	b	c	R ²	SE
300	6	0.981	-0.013	3.663×10 ⁻⁵	0.999	0.013
	16	1.001	-0.008	2.939×10 ⁻⁶	0.997	0.027
	26	0.997	-0.006	2.934×10 ⁻⁶	0.996	0.028
350	6	0.968	-0.020	1.074×10 ⁻⁴	0.997	0.026
	16	1.012	-0.013	3.611×10 ⁻⁵	0.998	0.021
	26	0.993	-0.011	2.133×10 ⁻⁵	0.999	0.012
400	6	0.935	-0.025	1.799×10 ⁻⁴	0.992	0.049
	16	0.997	-0.019	8.762×10 ⁻⁵	0.998	0.018
	26	1.012	-0.013	4.352×10 ⁻⁵	0.998	0.021

مختلفی استفاده گردید که در نهایت مدل درجه دوم به دلیل بالا بودن شاخص ضریب تعیین و پایین بودن خطای استاندارد، به عنوان بهترین مدل تجربی انتخاب گردید.

۵- منابع

[1] Akbari, A., SHahedi, M., Hmadami, N., Dokhani, S., Sadeghi, M. 2009. Study of water loss kinetics and quality characteristics of the tomato slices during drying by three methods: solar drying, open-sun drying and hot air drying, Journal of Water and Soil Science. 13, 445-459.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سینتیک خشک‌کردن برش‌های گوجه‌فرنگی در یک خشک‌کن ترکیبی فرسوخ-خلاء در محدوده توان ۳۰۰ تا ۴۰۰ وات و فشار ۶ تا ۲۶ کیلوپاسکال مورد مطالعه قرار گرفت. افزایش توان لامپ و کاهش فشار آون موجب افزایش سرعت و کاهش مدت‌زمان خشک شدن گردید. ضریب انتشار مؤثر رطوبت برای گوجه‌فرنگی در محدوده $5/0 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $2/38 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به دست آمد که با افزایش توان لامپ فرسوخ و کاهش فشار افزایش یافت. برای برازش داده‌های سینتیک خشک شدن گوجه‌فرنگی، از مدل‌های

- Transaction Journal of Engineering, Management & Applied Sciences & Technologies. 2.
- [15] Sacilik, K., Keskin, R., Elicin, A. K. 2006. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato, *Journal of Food Engineering*. 73, 231-238.
- [16] Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of Food Engineering*. 79, 243-248.
- [17] Wong, J. Y. 2001. *Theory of ground vehicles*, John Wiley & Sons,
- [18] Ozer, D. J. 1985. Correlation and the coefficient of determination, *Psychological Bulletin*. 97, 307.
- [19] Varmuza, K., Filzmoser, P. 2016. *Introduction to multivariate statistical analysis in chemometrics*, CRC press,
- [20] Gorjian, S. *Modelling of thin layer drying kinetics of barberry fruit*. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. in, Farsi, 2009.
- [21] Doymaz, I., Pala, M. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn, *Journal of Food Engineering*. 60, 125-130.
- [22] Jain, D., Pathare, P. B. 2004. Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices, *Biosystems Engineering*. 89, 289-296.
- [23] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J., Hu, X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace, *Food Research International*. 40, 39-46.
- [24] Hebbar, H. U., Vishwanathan, K., Ramesh, M. 2004. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables, *Journal of Food Engineering*. 65, 557-563.
- [25] Jaya, S., Das, H. 2003. A vacuum drying model for mango pulp, *Drying Technology*. 21, 1215-1234.
- [26] Mitra, J., Shrivastava, S., Rao, P. S. 2011. Vacuum dehydration kinetics of onion slices, *Food and Bioproducts Processing*. 89, 1-9.
- [27] Doymaz, I. 2009. Mathematical modelling of thin - layer drying of kiwifruit slices, *Journal of Food Processing and Preservation*. 33, 145-160.
- [28] Toğrul, H. 2006. Suitable drying model for infrared drying of carrot, *Journal of Food Engineering*. 77, 610-619.
- [2] Purkayastha, M. D., Nath, A., Deka, B. C., Mahanta, C. L. 2013. Thin layer drying of tomato slices, *Journal of Food Science and Technology*. 50, 642-653.
- [3] Salehi, F., Kashaninejad, M., Asadi, F., Najafi, A. 2016. Improvement of quality attributes of sponge cake using infrared dried button mushroom, *Journal of Food Science and Technology*. 53, 1418-1423.
- [4] Salehi, F., Kashaninejad, M. 2018. Mass transfer and color changes kinetics of infrared-vacuum drying of grapefruit slices, *International Journal of Fruit Science*. 1-16.
- [5] Salehi, F., Kashaninejad, M. 2018. Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying, *Information Processing in Agriculture*. 1-10.
- [6] Rastogi, N. K. 2012. Recent trends and developments in infrared heating in food processing, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 52, 737-760.
- [7] Salehi, F., Kashaninejad, M., Jafarianlari, A. 2017. Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices, *Heat and Mass Transfer*. 53, 1751-1759.
- [8] Ratti, C., Mujumdar, A. 1995. Infrared drying, *Handbook of Industrial Drying*, Ed. Mujumdar, A. S., Second edition, New York, NY, Marcel Dekker Inc. 1, 567-588.
- [9] Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T., Soponronnarit, S. 2004. Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying, *Journal of Food Engineering*. 65, 293-301.
- [10] Salehi, F., Kashaninejad, M., Akbari, E., Sobhani, S. M., Asadi, F. 2016. Potential of sponge cake making using infrared-hot air dried carrot, *Journal of Texture Studies*. 47, 34-39.
- [11] Doymaz, I. 2012. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices, *Journal of Food Science and Technology*. 49, 760-766.
- [12] Lin, Y.-P., Lee, T.-Y., Tsen, J.-H., King, V. A.-E. 2007. Dehydration of yam slices using FIR-assisted freeze drying, *Journal of Food Engineering*. 79, 1295-1301.
- [13] Doymaz, I. 2011. Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures, *Journal of Food Processing and Preservation*. 35, 280-289.
- [14] Taheri-Garavand, A., Rafiee, S., Keyhani, A. 2011. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of tomato influence of air dryer conditions, *International*

Thin layer drying of tomato slices using a combined infrared-vacuum dryer

Salehi, F. ^{1*}, Kashaninejad, M. ²

1. Assistant Professor, Department of Food Industry Machines, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Professor, Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

(Received: 2017/11/10 Accepted:2018/08/06)

In this study, drying kinetic of tomato slice in a combined infrared-vacuum dryer was investigated. The effects of infrared lamp power at three levels (300, 350 and 400 W) and pressure of vacuum oven at three levels (6, 16 and 26 kPa) on drying time and moisture diffusion coefficients during drying process of tomato were evaluated. The results showed that the effects of infrared lamp power and pressure on the drying process of tomato were significant ($p < 0.05$). With increase in infrared lamp power from 300 to 400 W, drying time of tomato 42.86 percent reduced. In addition, decreasing in vacuum oven pressure from 26 to 6 kPa reduced 40.00 percent of drying time. The effects of infrared heat power and vacuum oven pressure on effective diffusivity coefficient of tomato were investigated and the results showed that the effective diffusivity coefficient was increased with increasing heat source power and decreasing of pressure. Moisture effective diffusivity coefficient of tomato was between 5.00×10^{-10} - 2.38×10^{-9} m²/s. In fitting of tomato drying process data, the quadratic model, compared to other models, with the highest R² and the lowest error, had closer results to the experimental data. According to the results obtained in this study, the use of this dryer is recommended for the drying of tomato slice.

Keywords: Drying, Effective diffusion coefficient, Infrared, Kinetics, Tomato, Vacuum.

* Corresponding Author E-Mail Address: F.Salehi@Basu.ac.ir