

## بررسی پارامترهای خشک کردن شلتوک نیم جوش و تأثیر خشک کن ترکیبی هوا گرم - فروسرخ بر راندمان برنج سالم (مطالعه موردی: رقم فجر)

ابراهیم تقی نژاد<sup>۱\*</sup>، محمد هادی خوش تقاضا<sup>۲</sup> و علی متولی<sup>۳</sup>

۱- استادیار دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، رشته مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی

۲- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم

۳- استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۲۱ / تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۲۴)

### چکیده

خشک کردن به‌عنوان یک روش مناسب فراوری جهت افزایش ماندگاری محصولات مختلف کشاورزی به‌کاربرده می‌شود. در این پژوهش به بررسی سینتیک خشک کردن برنج نیم‌جوش در یک خشک‌کن ترکیبی هوای گرم - فروسرخ پرداخته شد. تأثیر دمای هوای گرم در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C، شدت تابش فروسرخ در دو سطح ۰/۳۲ و ۰/۴۹ w/cm<sup>2</sup> و سرعت جریان هوا ۱ m/s طی خشک کردن برنج نیم‌جوش بر راندمان برنج سالم در قالب طرح کاملاً تصادفی ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که دمای هوا گرم و شدت تابش فروسرخ بر زمان خشک کردن برنج نیم‌جوش داری تأثیر معنی‌داری (P<0.01) می‌باشد. با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰°C، مقدار کاهش زمان خشک کردن برای شدت‌های تابش ۰/۳۲ و ۰/۴۹ w/cm<sup>2</sup> به ترتیب ۱۳/۸۲٪، ۱۶/۷۱٪ به دست آمد. همچنین با افزایش شدت تابش فروسرخ از ۰/۳۲ به ۰/۴۹ w/cm<sup>2</sup>، زمان خشک کردن شلتوک در دمای ۶۰، ۵۰، ۴۰°C به ترتیب به مقادیر ۲۱/۷٪، ۲۱/۶٪ و ۱۶/۴٪ کاهش یافت. همچنین مدل لگاریتمی، بهترین برازش را برای مدل‌سازی فرایند خشک کردن نشان داد. زیرا این مدل به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر R<sup>2</sup> (۰/۹۹) و RMSE (۰/۰۰۳) داشته است. راندمان برنج سالم از مقدار ۰/۵۰/۱۰٪ (برنج غیر نیم‌جوش) به مقدار ۰/۶۵/۹۲٪ (برنج نیم‌جوش) به‌طور معنی‌داری (P<0.05) افزایش یافت. در دمای خشک کردن ۵۰°C و سطح تابش ۰/۴۹ w/cm<sup>2</sup> بالاترین راندمان برنج سالم به دست آمد.

کلید واژگان: راندمان برنج سالم، سینتیک خشک کردن، شلتوک نیم‌جوش، مدل‌سازی

\*مسئول مکاتبات: e.taghinezhad@uma.ac.ir

## ۱- مقدمه

تیمار گرمایی، قبل از فرآیند تبدیل<sup>۱</sup> شلتوک را نیم جوش کردن گویند که یک فرآیند هیدروگرمایی<sup>۲</sup> است و شامل سه مرحله غوطه‌وری<sup>۳</sup>، بخاردهی<sup>۴</sup> و خشک کردن است. استفاده از روش نیم جوش کردن، به‌عنوان یک روش مفید، کاربردی و مطمئن برای حل مشکل شکستگی برنج است که تأثیر بسزایی در خودکفایی این محصول استراتژیک دارد [۱]. خشک کردن از مهم ترین بخش فرآیند نیم جوش کردن برنج است. روش مناسب خشک کردن می‌تواند تأثیر بسزایی بر میزان شکستگی برنج نیم جوش داشته باشد. چندین روش خشک کردن برای برنج نیم جوش از قبیل خشک کن خورشیدی، خشک کن هوای گرم، خشک کن خلائی، خشک کن بخار گرم و خشک کن بسترسیال به کاررفته است [۲]. در کنار روش‌های اشاره شده، استفاده از شدت تابش فروسرخ می‌تواند روش مناسبی برای خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی به صورت لایه نازک باشد. در این روش تابش فروسرخ در محصول تبدیل به حرارت شده و با بالا بردن درجه حرارت محصول، بدون ایجاد تغییرات نامطلوب سبب خارج شدن رطوبت از محصول می‌گردد. به دنبال این فرآیند کیفیت محصول نهایی مناسب‌تر و هزینه‌های فرآیند خشک کردن کاهش می‌یابد [۳]. اشعه فروسرخ با سرعت بالاتری جذب پوسته محصول شده و سبب ایجاد حرارت می‌گردد. خشک کن فروسرخ نسبت به خشک کن‌های همرفتی، راندمان بالاتری داشته و کیفیت محصولات خشک شده با این روش در مقایسه با روش هوای گرم بهتر می‌باشد [۴]. بنابراین استفاده از شدت تابش فروسرخ در خشک کردن شلتوک نیم جوش، ممکن است روش مناسبی برای خشک کردن این محصول باشد.

نتایج مدل سازی سینتیک خشک کردن لایه نازک شلتوک (غیر نیم جوش) رقم فجر نشان داد که مدل تقریب انتشار در این نوع خشک کن، نسبت به سایر مدل‌ها، از دقت بالاتری برخوردار است ولی به دلیل دقت قابل قبول و سادگی معادله پیچ، این مدل برای مدل سازی سینتیک خشک کردن شلتوک توصیه شده است [۵]. طی تحقیقی Das و همکاران (۲۰۰۴)، کیفیت برنج نیم جوش را توسط خشک کن فروسرخ مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که افزایش شدت تابش موجب افزایش انتقال رطوبت و کاهش راندمان محصول سالم می‌شود. همچنین عمق بستر و

شدت تابش بر رنگ (شاخص زردی) برنج آسیاب شده به‌طور معنی داری ( $P < 0.01$ ) تأثیرگذار است [۶]. بررسی خشک کن فروسرخ و هوای گرم، بر نرخ خشک کردن و کیفیت دو رقم برنج نیم جوش (Leb Nok Pattani و Suphanburi) نشان داد که با افزایش دمای خشک کن از ۶۰ تا ۱۰۰ °C راندمان برنج سالم افزایش یافت. همچنین خشک کن فروسرخ، مصرف انرژی پایین تر و زمان کمتر خشک کردن در مقایسه با خشک کن هوای گرم دارد [۷]. در تحقیقی دیگر، Bualuang و همکاران (۲۰۱۳)، تأثیر سه نوع خشک کن فروسرخ، هوای گرم و خشک کن ترکیبی هوای گرم- فروسرخ را بر راندمان برنج سالم (رقم Leb Nok Pattani از تایلند) مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها بیان کرده‌اند که برنج نیم جوش تحت خشک کن ترکیبی هوای گرم - فروسرخ، دارای بالاترین راندمان برنج سالم می‌باشد [۸]. خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی از جمله، شلتوک (غیر نیم جوش) [۹]، قارچ دکمه‌ای [۱۰]، برش‌های بادمجان [۱۱]، توت [۱۲]، سیب زمینی [۱۳]، تفاله‌ی انگور [۱۴] و کدو حلوایی [۱۵] در یک خشک کن ترکیبی هوای گرم - فروسرخ تاکنون توسط محققین مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهشی دیگر، خشک کن بسترسیال در مقایسه با خشک کن هوای گرم برای خشک کردن برنج نیم جوش بررسی شد [۱۶]. طی این تحقیق، راندمان برنج سالم و کیفیت برنج نیم جوش (رنگ برنج) در استفاده از خشک کن بسترسیال، به ترتیب در سطح بالاتر و پایین تری بود. در تحقیقی Cheevitsopon و Noomhorm (۲۰۱۱)، تأثیر نیم جوش کردن شلتوک و خشک کن بسترسیال، بر خواص فیزیکی و شیمیایی آن مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که میزان رطوبت، زردی، بیشینه چسبندگی و سختی برنج نیم جوش افزایش یافته است اما ترک درونی دانه، زمان پخت، جذب آب و کل تلفات جامد در مقایسه با برنج غیر نیم جوش کاهش یافت. وقتی دما و زمان خشک کردن زیاد می‌شود تغییرات مشابهی در خواص فیزیکی و شیمیایی برنج نیم جوش و غیر نیم جوش مشاهده شد [۱۷].

بررسی منابع مختلف نشان داد که تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی سینتیک انتقال رطوبت، ضریب نفوذ مؤثر، انرژی فعال سازی و راندمان برنج سالم طی خشک کردن برنج نیم جوش (رقم فجر) با استفاده از خشک کن ترکیبی هوای گرم - فروسرخ انجام نشده است. لذا، هدف این پژوهش بررسی اثر دمای خشک کن و شدت تابش اشعه فروسرخ بر خشک کردن برنج نیم جوش ایرانی (رقم فجر)، مدل سازی سینتیک انتقال جرم آن به همراه ارزیابی راندمان برنج سالم می‌باشد.

1. Milling
2. Hydrothermal
3. Soaking
4. Steaming

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- تهیه نمونه و فرآیند نیم‌جوش کردن برنج

در این پژوهش ۵۰ کیلوگرم شلتوک رقم فجر از مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات برنج کشور در آمل تهیه گردید. محققان با بررسی خواص کیفی سه رقم شلتوک طارم محلی، شیرودی و فجر، تحت تیمارهای مختلف نیم‌جوش کردن، نتیجه گرفته‌اند که تیمارهای نیم‌جوش کردن تأثیر معنی‌داری در کاهش شکستگی رقم فجر داشته است [۱۸]. بنابراین رقم فجر برای اجرای تحقیق انتخاب شد. میانگین طول، ضخامت و عرض دانه این رقم به ترتیب برابر با ۱۰/۹۸، ۲/۲۴ و ۱/۹۲ میلی‌متر گزارش شده است [۵].

قبل از شروع خشک‌کردن، فرآیند غوطه‌وری و بخاردهی شلتوک، اجرا گردید. برای غوطه‌وری شلتوک از سامانه ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد [۱]. بررسی پژوهش‌ها نشان داد که دمای غوطه‌وری، ۶۵°C و زمان بخاردهی ۴ دقیقه بهترین تیمار برای اعمال فرآیند نیم‌جوش کردن شلتوک رقم فجر می‌باشد [۱]. بنابراین در پژوهش حاضر، دمای غوطه‌وری ۶۵°C و زمان بخاردهی ۴ دقیقه برای نیم‌جوش کردن انتخاب شد. جهت تکمیل فرآیند نیم‌جوش کردن، ۲ ساعت بعد از غوطه‌وری [۱۹] و مرحله بخاردهی (در فشار اتمسفر و دمای ۹۶°C) اجرا شد. برای تعیین میزان رطوبت شلتوک، نمونه‌های ۱۰ گرمی به مدت ۲۴ ساعت در اجاق آزمایشگاهی دمای ۱۳۰°C قرار داده شد و میزان رطوبت نمونه‌های شلتوک از رابطه‌ی (۱) معادل ۱۱٪ (w.b.%) به دست آمد.

$$M.C. = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، M.C.: درصد رطوبت نمونه‌ها بر پایه‌ی تر (w.b.%)،  $m_1$ : جرم اولیه‌ی نمونه (kg) و  $m_2$ : جرم نهایی نمونه (kg) است.

بعد از اعمال فرآیند بخاردهی، نمونه‌های شلتوک به واحد خشک کن منتقل گردید. طرح‌واره خشک‌کن ترکیبی هوای گرم - فروسرخ مورد استفاده در این پژوهش در (شکل ۱) آورده شده است. اجزا تشکیل‌دهنده این خشک‌کن عبارت‌اند از: کنترل سرعت هوا، دمنده و الکتروموتور، گرم‌کننده هوا، کانال انتقال دهنده هوای گرم، محفظه خشک‌کن، لامپ‌های فروسرخ، کلید قطع و وصل لامپ و کنترل دمای هوای ورودی.

به‌منظور بررسی سینتیک خشک کردن، ترازوی دیجیتال (AND GF-600 ساخت کشور ژاپن با دقت ۰/۰۰۱ g) با قابلیت اتصال به کامپیوتر در قسمت پایینی خشک‌کن قرار گرفته و هر دو دقیقه تغییرات وزن ثبت می‌گردید. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C، دو سطح توان فروسرخ ۰/۳۲ و ۰/۴۹ w/cm<sup>2</sup> با سرعت هوای ورودی ۱ m/s انجام شد. در طول انجام آزمایش‌ها دمای محیط ۳ ± ۲۳°C و رطوبت نسبی هوا ۳ ± ۲۴٪ بود.

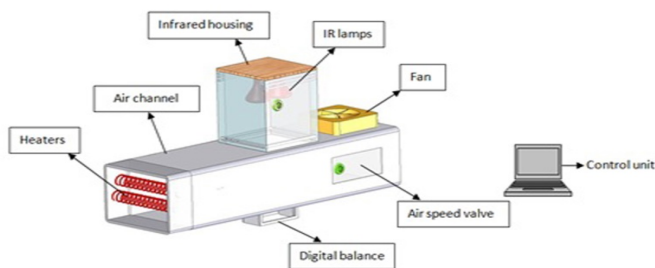


Fig 1 Combined Infrared-Hot Air Dryer

## ۲-۲- مدل‌سازی ریاضی منحنی‌های خشک کردن

برای مدل‌سازی خشک کردن لایه نازک، از معادله‌ی نسبت رطوبت نمونه‌ها، طی خشک کردن مطابق رابطه (۲) استفاده شد.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

که در آن MR رطوبت نسبی (بی‌بعد)،  $M_t$  میزان رطوبت در هر لحظه بر پایه خشک (d.b.)،  $M_e$  رطوبت تعادلی نمونه‌ها (d.b.)،  $M_0$  رطوبت اولیه نمونه‌ها (d.b.) است.

مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) نشان داده شده است. نسبت رطوبت‌های به‌دست‌آمده طی آزمایش‌های مختلف به کمک نرم‌افزار MATLAB 2013 با مدل‌های مذکور برازش داده شد و برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین  $(R^2)$ ، مربع کای  $(2\chi)$  و ریشه میانگین مربعات خطا  $(RMSE)^2$  مطابق روابط ۳، ۴ و ۵ استفاده گردید. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک کردن شلتوک را توصیف کند مدلی است که دارای بیشترین ضریب همبستگی  $(R^2)$ ، کمترین مربع کای  $(2\chi)$  و کمترین ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) باشد [۲۰].

1. Correlation coefficient  
2. Root mean square error

**Table 1.** Mathematical models for prediction of drying process

Refreccess	Equation	Model
[21]	MR=exp (-kt)	Newton
[22]	MR=a.exp (-kt)+c	Logarithmic
[23]	MR = 1 +a.t+bt <sup>2</sup>	Wang and Singh
[24]	MR=a.exp (-kt)	Henderson and Pabis
[25]	MR = exp( c(t/L <sup>2</sup> )n)	Modified Page –II
[26]	MR = a.exp( kt <sup>n</sup> )+b.t	Midilli
[27]	MR = a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-n.t)	Verma
[28]	MR = a.exp(-k* t)+b.exp(-n. t)	Two term
[29]	MR = a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-k.a.t)	Two terms exponential

(۷)، می‌توان از قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار و انتقال رطوبت طی مرحله نزولی فرآیند خشک کردن استفاده کرد.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (۷)$$

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و X شاخص فضایی می‌باشد. مطالعه انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم طی دوره سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد [۳۱]. برای به کار بردن قانون فیک فرض می‌گردد که فرآورده غذایی تک بعدی است، رطوبت اولیه یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت عمده در برابر انتقال رطوبت است. حل معادله فیک برای یک تیغه به صورت رابطه (۸) می‌باشد [۳۲].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}) \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، r قطر معادل برنج (بر حسب متر)، n تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک کردن (s) و D<sub>eff</sub> ضریب نفوذ مؤثر (m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>) می‌باشند. ضریب نفوذ مؤثر از طریق محاسبه شیب رابطه (۹) به دست می‌آید [۳۲].

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}) \quad (۹)$$

ضریب نفوذ به‌طور معمول با رسم داده‌های تجربی خشک کردن برحسب LnMR نسبت به زمان تعیین می‌گردد. با رسم نمودار LnMR در واحد زمان، شیب خط به‌دست‌آمده را در رابطه (۱۰) قرار داده تا ضریب نفوذ مؤثر به دست آید. k<sub>1</sub> شیب خط می‌باشد.

$$k_1 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r_o^2} \quad (۱۰)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{exp,i})^2} \quad (۳)$$

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۴)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N-z} \quad (۵)$$

Z, N, MR<sub>pre,i</sub> و MR<sub>exp,i</sub> به ترتیب تعداد مشاهدات، تعداد ثابت‌های خشک‌کن، نسبت رطوبت پیشگویی شده آام و نسبت رطوبت تجربی آام می‌باشد.

طی تحقیقی، Ondier و همکاران (۲۰۱۱) برای ارزیابی محتوای رطوبت تعادلی برنج نیم‌جوش انجام شد، آن‌ها معادله Chung - Pfof مطابق رابطه (۶)، را برای محاسبه محتوای

$$MC_{d,b} = \frac{-1}{C} \ln \left[ \frac{-(T+B) \ln RH}{A} \right] \quad (۶)$$

رطوبت تعادلی برنج نیم‌جوش پیشنهاد داده‌اند [۳۰]. که در آن A, B و C ضرایب ثابت هستند که برای برنج نیم جوش به ترتیب عبارت است از: ۴۰۶/۹۰۲، ۲۳/۶۱۷۲ و ۰/۲۳۰۳. همچنین پارامتر MC<sub>d,b</sub>: محتوای رطوبت تعادلی بر پایه‌ی خشک، T: دمای محیط بر حسب درجه سلسیوس و RH: رطوبت نسبی محیط بر حسب اعشار است.

## ۲-۳- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

پدیده‌های انتقال رطوبت اغلب پیچیده بوده و به‌طور معمول برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه‌بندی می‌شود. مطابق رابطه

## ۲-۴- انرژی فعال سازی

با استفاده از معادله آرنیوس رابطه بین دما و ضریب نفوذ مؤثر در معادله زیر نشان داده شده است که می توان انرژی فعال سازی را به دست آورد [۱۲].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g \cdot T_{abs}}\right) \quad (11)$$

که،  $E_a$  انرژی فعال سازی (kJ/mol) و  $R_g$  ثابت جهانی گازها که برابر با (۸/۳۱۴۳ kJ/mol)  $T_{abs}$  دمای هوای درون محفظه خشک کن (K) و  $D_0$  عرض از مبدأ که مقدار آن ثابت می باشد. دمای مورد استفاده در معادله فوق، دمای محصور محیط خشک کن است بنابراین می بایست فرض هم دما بودن در پخش مؤثر و انرژی فعال سازی مدنظر قرار گیرد. معادله بالا می تواند با لگاریتم گیری از طرفین رابطه به صورت خطی درآید.

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R_g} \cdot \frac{1}{T_{abs}} \quad (12)$$

۲-۵- راندمان برنج سالم نیم جوش<sup>۱</sup>

دانه های سالم به دانه هایی بیش از ۰/۷۵ طول برنج کامل اطلاق می گردد. بعد از سفید کردن شلتوک، تمام دانه های شکسته از دانه های سالم توسط جداکننده ی گریز از مرکز (FQS-13X20, Sensewealth, China)، جدا شدند. راندمان برنج سالم از تقسیم دانه های سفید شده سالم به کل شلتوک برحسب درصد به دست آمد [۳۳].

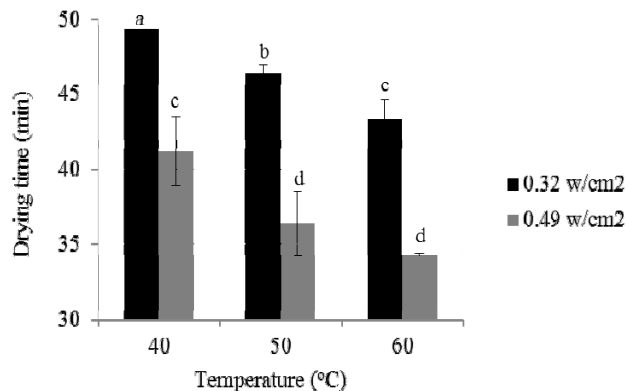
## ۲-۶- آنالیز آماری

کلیه آزمایش ها، در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل (دو فاکتوره ۳×۲) با ۳ تکرار انجام گرفت. رسم نمودارها با نرم افزار Excel (2010) و TableCurve 3D (Version4, 2007)، تجزیه واریانس یا تحلیل آماری با نرم افزار SPSS Statistics 17.0 و مقایسه میانگین ها با آزمون دانکن صورت گرفت.

## ۳- نتایج و بحث

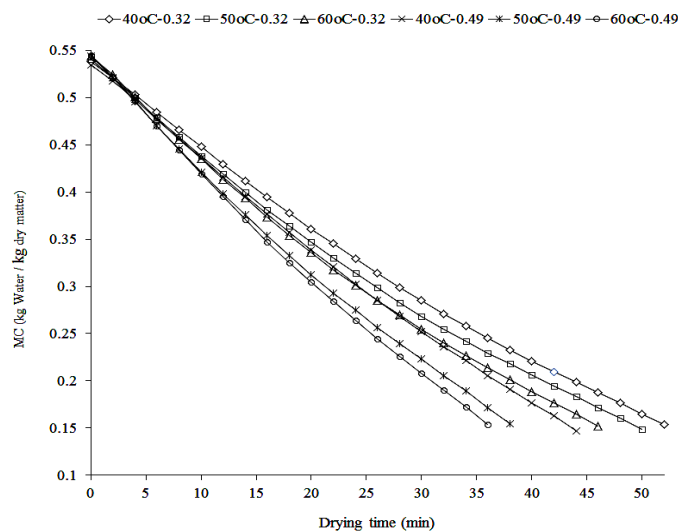
## ۳-۱- زمان خشک کردن

شکل (۲) تأثیر دمای هوای ورودی و شدت تابش اشعه فرسرخ را بر زمان خشک کردن شلتوک نیم جوش نشان می دهد. با افزایش دما و شدت تابش، زمان لازم برای خشک کردن شلتوک نیم جوش کاهش می یابد. بیشترین زمان خشک کردن مربوط به دمای ۴۰°C و شدت تابش ۰/۳۲w/cm<sup>2</sup> (۵۴ min) و کمترین زمان خشک کردن نیز مربوط به دمای ۶۰°C و ۰/۴۹w/cm<sup>2</sup> (۳۶ min) است. با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰°C، زمان خشک کردن برای شدت های تابش ۰/۳۲ و ۰/۴۹ w/cm<sup>2</sup> به ترتیب ۱۳/۸۲٪ و ۱۶/۷۱٪ کاهش می یابد. همچنین با افزایش شدت تابش فرسرخ از ۰/۳۲ به ۰/۴۹ w/cm<sup>2</sup>، زمان خشک کردن شلتوک در دمای ۶۰°C به مقدار ۲۱/۷٪، در دمای ۵۰°C به میزان ۲۱/۶٪ و در دمای ۴۰°C به میزان ۱۶/۴٪ کاهش یافت. افزایش شدت تابش اشعه فرسرخ سبب افزایش دمای خشک کردن شده و از طرف دیگر سبب افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا، به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول می شود و در نتیجه محصول سریع تر گرم شده و موجب تبخیر بهتر آب از آن می گردد. بنابراین زمان خشک کردن کاهش می یابد [۳۴]. این نتایج با گزارش های سایر محققان سازگار است [۸، ۱۱]. Bualuang و همکاران (۲۰۱۳)، یک خشک کن ترکیبی فرسرخ- هوای گرم را در مقایسه با خشک کن فرسرخ به تنهایی و هوای گرم به تنهایی برای خشک کردن برنج مورد بررسی قرار داده اند. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش زمان خشک کردن و کاهش انرژی مصرفی در خشک کن ترکیبی نسبت به سامانه های انفرادی فرسرخ و هوای گرم بود. صالحی و همکاران (۲۰۱۶)، رفتار خشک کردن برش های بادمجان را در خشک کن ترکیبی هوای گرم - فرسرخ مورد بررسی قرار داده اند و گزارش داده اند که با افزایش توان لامپ فرسرخ و دمای هوای گرم، مقدار کاهش رطوبت برش های بادمجان و زمان خشک کردن به ترتیب افزایش و کاهش می یابد.



**Fig 3** Drying time versus hot air temperature for parboiled paddy at air velocity of 1m/s and various conditions of drying

مطابق شکل (۳)، با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ °C و افزایش توان لامپ از ۰/۳۲ به ۰/۴۹ w/cm<sup>2</sup>، زمان خشک کردن به طور معنی داری (P<0.05) کاهش یافته است. افزایش دما موجب شیب بیشتر منحنی‌های به دست آمده شده و بیانگر سرعت بالای فرآیند می‌باشد [Hebber, ۲۰۰۴, ۳۵, ۳۶]. همکاران (۲۰۰۴)، از خشک کن ترکیبی فروسرخ با هوای گرم، در سه حالت ترکیبی، فروسرخ به تنهایی و هوای گرم به تنهایی برای خشک کردن سبب زمینی و هویج استفاده کردند. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش زمان خشک کردن در خشک کن ترکیبی نسبت به دو نوع دیگر بوده است [۳۷].



**Fig 2** Moisture content versus drying time for parboiled paddy under various conditions of drying

جدول (۲)، نتایج حاصل از تجزیه واریانس، تأثیر شدت تابش فروسرخ و دمای هوای گرم را بر زمان خشک کردن شلتوک نیم جوش نشان می‌دهد که اثر فاکتورهای شدت تابش و دما بر مدت زمان خشک کردن معنی دار (P<0.01) شده است. مقایسه میانگین زمان خشک کردن نمونه‌ها بر اساس دمای هوای خشک کن به وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

**Table 2** Variance analysis (ANOVA) table for independent variables

P value	Square mean	Square sum	Free degree	Treatment
0.000**	367.065	367.06	1	Radiation intensity (RI)
0.000**	62.807	125.613	2	Temperature (T)
0.581 <sup>n.s</sup>	1.434	2.869	2	RI × T
	2.528	30.333	12	Error
		525.879	17	Total

\*\* : Significant (p<0.01),

<sup>n.s</sup>: Not significant.

محاسبه نمود. با کاربرد چنین معادلاتی، لزوم انجام آزمایش‌ها در سطوح مختلف دما و شدت تابش کم می‌شود.

$$\text{Drying time} = 334.57 - 15.75 \times T + 0.3065 \times T^2 - 0.0020 \times T^3 - 53.12 \times \text{RI} \quad R^2 = 0.9942 \quad (12)$$

$D_{\text{eff}}$ : ضریب نفوذ مؤثر (m<sup>2</sup>/s), T: دمای هوای گرم (°C), RI: شدت تابش لامپ فروسرخ (w/cm<sup>2</sup>)

مطابق شکل (۴)، با استفاده از آنالیز رگرسیون چند متغیره، رابطه‌ی بین زمان خشک کردن، دمای هوا گرم و شدت تابش لامپ فروسرخ، برای برنج نیم جوش برقرار شده است. معادلات و ضریب همبستگی R<sup>2</sup> در رابطه‌ی (۱۲) آمده است. با استفاده از رابطه‌ی تدوین شده، زمان خشک کردن (min) را می‌توان بر حسب دو متغیر مستقل دما (°C) و شدت تابش (w/cm<sup>2</sup>)

میدیلی، مدل پیچ، مدل ورما و مدل تقریب پخش، با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها، فرآیند خشک کردن شلوک نیم جوش را پیش‌بینی کردند. در این میان مدل لگاریتمی بهترین برازش را داشت و از این رو، نتایج مربوط به آن با جزئیات ارائه شد. ضرایب و شاخص‌های آماری مربوط به مدل لگاریتمی در سطوح مختلف دما و شدت تابش در جدول ۳ نشان داده شده است. تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم‌افزار Matlab انجام گردید. نتایج برازش مدل‌ها نشان داد که مدل لگاریتمی بهترین مدل برای توصیف خشک کردن می‌باشد. مقادیر ضریب همبستگی  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE ریشه میانگین مربع خطا، برای مدل ارائه شده به ترتیب بین ۰/۹۹۹۸-۰/۹۹۹۹، ۰/۰۰۰۱۲۶۵ تا ۰/۰۰۰۲۹۷۰ تا ۰/۰۰۰۳۴۴۰ قرار داشت. رفتار خشک کردن لایه نازک شلتوک غیر نیم‌جوش در یک خشک‌کن آزمایشگاهی هوای گرم توسط محققین بررسی شده و مدل پیچ به‌عنوان بهترین مدل برای توصیف سینتیک خشک‌کردن شلتوک معرفی گردید [۵]. صالحی و همکاران (۲۰۱۷)، سه مدل پیچ، نیوتن و لگاریتمی برای مدل‌سازی سینتیک خشک کردن لایه نازک قارچ خوراکی توسط خشک‌کن هوای گرم - فرورسرخ پیشنهاد دادند [۱۰].

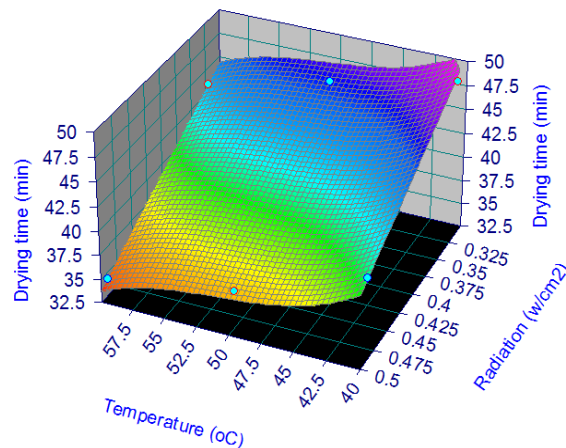


Fig 4 Drying time of parboiled paddy under various conditions of drying

### ۲-۳- مدل‌سازی خشک کردن و نتایج حاصل از

#### برازش مدل‌ها

پس از به دست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در دما و شدت تابش مختلف، مدل‌های معرفی شده در جدول (۱) بر منحنی‌های خشک‌کردن حاصل از داده‌های آزمایشی برازش داده شد. سپس مدل‌های مختلف خشک کردن لایه نازک با توجه به مقادیر  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE ارزیابی گردید و بهترین مدل بر اساس بیشترین مقادیر  $R^2$  و کمترین مقادیر  $\chi^2$  و RMSE انتخاب شد. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ارائه‌شده نشان داد که تقریباً همه مدل‌ها مناسب‌اند، اما مدل لگاریتمی،

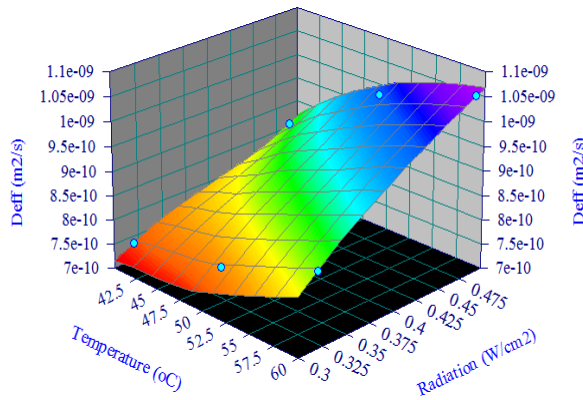
Table 3 Statistical results obtained for logarithmic models at different temperatures and radiation intensities

$k$	$b$	$a$	RMSE	$R^2$	$\chi^2$	Radiation ( $w/cm^2$ )	Temperature ( $^{\circ}C$ )
0.01315	-0.6992	1.709	0.0035	0.9998	0.0003	0.32	40
0.0102	-1.374	2.385	0.003798	0.9998	0.0002885	0.49	40
0.01666	-0.4998	1.507	0.00249	0.9999	0.0001364	0.32	50
-0.9084	1.914	0.002728	0.9999	0.00013	0.01514	0.49	50
-0.5158	1.525	0.003045	0.9999	0.0001947	0.01773	0.32	60
-1.139	2.147	0.003148	0.9999	0.00019	0.0139	0.49	60

به  $60^{\circ}C$  مشاهده شد که ضریب نفوذ رطوبت محصول از  $10^{-10}$   $m^2/s$  به  $7/37 \times 10^{-10} m^2/s$  افزایش یافت. در اثر افزایش دما و شدت تابش، آنتالپی میزان انتقال جرم و حرارت بیشتر شده و در نتیجه ضریب نفوذ افزایش می‌یابد [۳۸]. نتایج این تحقیق با گزارش‌های دیگر محققان سازگار است. مقادیر ضریب نفوذ مؤثر برای مواد غذایی در محدوده  $10^{-11}$  تا  $10^{-9} m^2/s$  توسط

### ۳-۳- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

جدول (۴)، مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک کردن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود با افزایش شدت تابش لامپ و دمای هوای گرم، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یک روند افزایشی دارد. با افزایش شدت تابش لامپ از  $0/32$  به  $0/49 w/cm^2$  و افزایش دمای هوای گرم از  $40$



**Fig 5** Effective diffusion coefficient of parboiled paddy under various conditions of drying

$$D_{eff} = 3.39 \times 10^{-9} + 1.32 \times 10^{-11} \times T - 5.30 \times 10^{-14} \times T^2 + 1.82 \times 10^{-8} \times RI - 2.11 \times 10^{-8} \times RI^2$$

$$R^2 = 0.96 \quad (13)$$

$D_{eff}$ : ضریب نفوذ مؤثر ( $m^2/s$ ),  $T$ : دمای هوای گرم ( $^{\circ}C$ ),  $RI$ : شدت تابش لامپ ( $w/cm^2$ )

تغییرات میزان ضریب نفوذ رطوبت نیز می‌تواند بر میزان انرژی فعال‌سازی اثر مستقیم داشته باشد (شکل ۶) و با افزایش این پارامتر مقدار انرژی فعال‌سازی نیز افزایش یابد. محاسبات انرژی فعال‌سازی برای خشک‌کردن برنج نیم‌جوش نشان داد که با افزایش شدت تابش از  $0.32$  به  $0.49 w/cm^2$ ، مقدار انرژی فعال‌سازی از  $6.21$  به  $9.18 kJ/mol$  افزایش یافت. محققان گزارش داده‌اند که میزان انرژی فعال‌سازی برای خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای در خشک‌کن ترکیبی جریان هوای گرم-فروسرخ با افزایش توان از  $150$  تا  $375$  وات (در سرعت هوای  $1 m/s$ )، به ترتیب از  $28.53$  تا  $30.06 kJ/mol$  افزایش می‌یابد [۱۰]. همچنین در مطالعاتی دیگر، میزان انرژی فعال‌سازی برای خشک‌کردن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در سه دبی  $1$ ،  $1/4$  و  $1/8 kg/min$  به ترتیب برابر  $14.29$ ،  $16.19$  و  $13.76 kJ/mol$  گزارش شده است [۳۸].

محققان گزارش شد [۳۲]. محققان، میزان ضریب نفوذ مؤثر برای خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای در یک خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-فروسرخ در محدوده‌ی دمایی  $50^{\circ}C$  تا  $70^{\circ}C$  از  $9.2 \times 10^{-9}$  تا  $1.05 \times 10^{-9} m^2/s$  گزارش داده‌اند [۱۰]. همچنین در مطالعه دیگری، ضریب نفوذ مؤثر برای برش‌های بادمجان در محدوده دمایی  $60^{\circ}C$  تا  $80^{\circ}C$ ، بین  $2.42 \times 10^{-9}$  الی  $8.13 \times 10^{-9} m^2/s$  گزارش شده است [۱۱]. برای خشک‌کردن شلغم توسط خشک‌کن جریان هوای گرم در محدوده دمایی  $45^{\circ}C$  تا  $75^{\circ}C$ ، مقدار ضریب نفوذ مؤثر از  $8.37 \times 10^{-10}$  تا  $4.48 \times 10^{-9} m^2/s$  اعلام شد [۳۹]. در پژوهشی دیگر، ضریب نفوذ مؤثر لایه نازک شلتوک غیرنیم‌جوش در خشک‌کن هوای گرم در محدوده دمایی  $50^{\circ}C$  تا  $150^{\circ}C$  مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاکی از آن است که ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دما افزایش یافت [۵]. Rizvi (۱۹۸۶) بیان کرد که ضریب نفوذ مؤثر به شرایط خشک‌کردن، وارسته و ترکیبات محصول بستگی دارد [۴۰]. تأثیر دمای هوای خشک‌کردن و سطح تابش بر مقدار ضریب نفوذ مؤثر در رابطه (۱۳) توسط معادله آرنیوس<sup>۱</sup> نشان داده شده است. این نتایج با گزارش سایر محققان مطابقت دارد [۳۹]. آن‌ها تأثیر دمای هوا، سرعت هوا و سرعت تسمه نقاله بر ضریب نفوذ مؤثر شلغم را توسط معادله چندجمله‌ای آرنیوس گزارش داده‌اند.

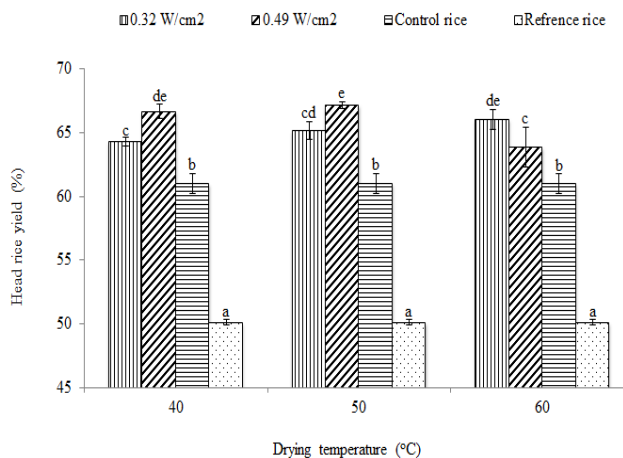
**Table 4** Moisture diffusion coefficient at dryer different temperatures and radiation intensities

$D_{eff} \times 10^{-10}$ ( $m^2/s$ )	Temperature ( $^{\circ}C$ )	Radiation intensity ( $w/cm^2$ )
7.367	40	0.32
7.712	50	0.32
8.507	60	0.32
8.573	40	0.49
9.912	50	0.49
10.587	60	0.49

1. Arrhenius equation



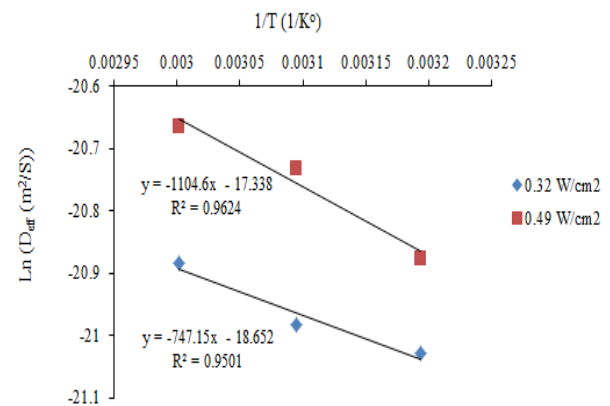
فضاهای خالی بین ذرات نشاسته نفوذ می‌کند. در نتیجه موجب کاهش ترک در دانه برنج می‌گردد [۸]. کاهش راندمان در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  با افزایش سطح تابش می‌تواند به علت نرخ بالای خشک کردن باشد زیرا نرخ بالای خشک‌کردن، موجب تنش بالای حرارتی در دانه و افزایش ترک در آن می‌شود. در نتیجه، استفاده از خشک‌کن ترکیبی در شرایط مناسب دما و تابش می‌تواند راندمان برنج سالم را افزایش دهد.



**Fig 7** The HRY of parboiled paddy under different conditions of drying as compared to unparboiled paddy (The mean values having the same letter do not have significant difference at the 5% probability level)

#### ۴- نتیجه گیری

مدل‌سازی سینتیک فرآیند خشک‌کردن محصولات غذایی و بررسی پارامترهای خشک کردن می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مهم برای کنترل بهینه شرایط فرآیند باشد. در این پژوهش، استفاده از روش خشک‌کردن ترکیبی هوای گرم - فروسرخ برای خشک کردن لایه نازک شلتوک نیم‌جوش رقم فجر، مورد بررسی قرار گرفت. افزایش دمای هوای گرم (از  $40^{\circ}\text{C}$  به  $60^{\circ}\text{C}$ ) و توان لامپ (از  $0.32$  به  $0.49 \text{ W/cm}^2$ ) موجب کاهش زمان خشک کردن (از  $49/3$  به  $34/3 \text{ min}$ )، افزایش ضریب نفوذ مؤثر (از  $7/37 \times 10^{-10}$  به  $10/59 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) و انرژی فعال‌سازی (از  $6/21$  به  $9/18 \text{ kJ/mol}$ ) گردید. همچنین نتایج برازش مدل‌های ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل لگاریمتی به دلیل بالا بودن ضریب تبیین و پایین بودن خطای رگرسیون در خشک کردن لایه نازک شلتوک نیم‌جوش بهترین برازش را دارا می‌باشد.



**Fig 6** Determination of activation energy ( $E_a$ ) based on the changes of  $\text{Ln}(D_{eff})$  versus inverse temperature for drying of parboiled paddy

#### ۳-۴- راندمان برنج سالم

راندمان برنج سالم نیم‌جوش و غیر نیم‌جوش تحت شرایط مختلف خشک‌کردن در شکل (۷)، نشان داده شده است. راندمان برنج سالم در نمونه غیر نیم‌جوش<sup>۱</sup> از مقدار  $50/10\%$  به مقدار  $61/03\%$  و  $65/92\%$  به ترتیب برای نمونه شاهد<sup>۲</sup> و نمونه نیم‌جوش<sup>۳</sup>، به‌طور معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) افزایش یافت. بیشترین راندمان برنج سالم مربوط به دمای خشک‌کردن  $50^{\circ}\text{C}$  و سطح تابش  $0.49 \text{ W/cm}^2$  است. همچنین مقادیر میانگین راندمان برنج سالم در دماهای  $40^{\circ}\text{C}$  و  $50^{\circ}\text{C}$  با افزایش سطح تابش به‌طور معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) افزایش یافته اما مقدار آن، در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  با افزایش سطح تابش، کاهش معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) داشته است. فرآیند نیم‌جوش کردن، موجب ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج و در نتیجه بهبود کیفیت تبدیل آن می‌گردد [۴۱]. ژلاتینه‌شدن نشاسته موجب افزایش سختی دانه و مقاومت آن به شکنندگی شده و در نهایت راندمان تبدیل برنج، افزایش خواهد یافت [۴۲]. نتایج محققان نشان داد که درجه ژلاتینه‌شدن نشاسته با دمای خشک‌کن مرتبط است [۱۹، ۲]. در مجموع استفاده از خشک‌کن موجب ژلاتینه‌شدن نشاسته شده و در نتیجه موجب افزایش راندمان برنج سالم در نمونه تیمار شده نسبت به نمونه نیم‌جوش شده می‌گردد. زیرا تورم نشاسته موجب تخریب پروتئین گشته و سپس درون

1. Reference rice: Reference rice is raw rice which was not parboiled rice
2. Control rice: Control rice is parboiled rice which was dried in ambient air
3. Parboiled rice: It is parboiled rice which was dried using dryer

- [10] Salehi, F., Kashaninejad, M., Sadeghi Mahoonak, A., and Ziaiiifar, A.M. 2017. Kinetics Modeling of Thin-Layer Drying of Button Mushroom in Combined Infrared-Hot Air Dryer. *Journal of Food Science and Technology*, 13: 99-109 (in Farsi)
- [11] Salehi, F., Kashaninejad, M., and Asadi, A. 2016. Investigation of Mass Transfer Kinetics in Combined Infrared-Hot Air Dryer for Eggplant slices. *Food Innovation Technology*, 7: 53-60 (in Farsi)
- [12] Puente-Díaza, L., Ah-Hen, K., Vega-Gálvez, A., Lemus-Mondaca, R., and Scala, K.D. 2013. Combined Infrared-Convective Drying of Murta (*Ugni molinae* Turcz) Berries: Kinetic Modeling and Quality Assessment. *Drying Technology: An International Journal*, 31: 329-338.
- [13] Supmoon, N. and Noomhorm, A. 2013. Influence of Combined Hot Air Impingement and Infrared Drying on Drying Kinetics and Physical Properties of Potato Chips. *Drying Technology: An International Journal*, 31: 24-31.
- [14] Sui, Y., Yang, J., Ye, Q., Li, H., and Wang, H. 2014. Infrared, Convective, and Sequential Infrared and Convective Drying of Wine Grape Pomace. *Drying Technology: An International Journal*, 32: 686-694.
- [15] 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 (in Farsi). *Journal Of Food Technology and Nutrition*, 13: 5-16.
- [16] Taechapairoj, C., Dhuchakallaya, I., Soponronnarit, S., Wetchacama, S., and Prachayawarakorn, S. 2003. Superheated steam fluidised bed paddy drying. *Journal of Food Engineering*, 58: 67-73.
- [17] Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. 2011. Effects of parboiling and fluidized bed drying on the physicochemical properties of germinated brown rice. *International Journal of Food Science & Technology*, 46: 2498-2504.
- [18] Latifi, A. and Alizadeh, M.R. 2014. Effect of parboiling on qualities and milling of Iranian rice. *Journal of Agricultural and engineering research*, 15: 77-88 (in Farsi).
- [19] Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Jirajindalert, A., and Taechapairoj, C. 2006. Parboiling brown rice using super heated steam fluidization technique. *Journal of Food Engineering*, 75: 423-432.
- بیشترین راندمان برنج سالم (۰/۶۵/۹۲) مربوط به دمای خشک کردن ۵۰°C و سطح تابش ۰/۴۹ w/cm<sup>2</sup> به دست آمد.
- ### ۵- منابع
- [1] Taghinezhad, E., Khoshtaghaza, M.H., Minaei, S., and Latifi, A. 2015. Effect of soaking temperature and steaming time on the quality of parboiled Iranian paddy rice. *International journal of food engineering*, 11: 547-556.
- [2] Swasdisevi, T., Sriariyakula, W., Tia, W., and Soponronnarit, S. 2010. Effect of pre-steaming on production of partially-parboiled rice using hot-air fluidization technique. *Journal of Food Engineering*, 96: 455-462.
- [3] Jun, S., Krishnamurthy, K., Irudayaraj, J., and A., D. 2011. Fundamentals and Theory of Infrared Radiation. *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*. CRC press, New York.
- [4] Ratti, C. and Mujumdar, A.S., *Infrared Drying. in, Mujumdar. Handbook of industrial drying*. 1995: New York.
- [5] Omid, M., Yadollahinia, A.R., and Rafiee, S. 2010. Development of a kinetic model for thin layer drying of Paddy, Fajr variety. *Biosystem Engineering of Iran*, 41: 153-160 (in Farsi)
- [6] Das, I., Das, S.K., and Bal, S. 2004. Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. *Journal of Food Engineering*, 62: 9-14.
- [7] Bualuang, O., Tirawanichakul, S., and Tirawanichakul, Y. 2011. Study of drying kinetics and qualities of two parboiled rice: hot air and infrared radiation. *TICHe International Conference*. (ed.^eds. p.^pp. 1-6. ed., November 10 – 11, 2011 at Hatyai, Songkhla Thailand.
- [8] Bualuang, O., Tirawanichakul, Y., and Tirawanichakul, S. 2013. Comparative Study between Hot Air and Infrared Drying of Parboiled Rice: Kinetics and Qualities Aspects. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37: 1119-1132.
- [9] Zare, D., Naderi, H., and Jafari, A. 2011. Predict the moisture content, drying time, necessary force to rupture of paddy grains using neural network in combined dryer infrared - hot air. *7 th Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization*. (ed.^eds. p.^pp. ed., University Shiraz.

- [32] Doymaz, I. 2011. Drying of eggplant slice in thin layers at different air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35: 280-289.
- [33] Bello, M., Baeza, R., and Tolaba, M.P. 2006. Quality characteristics of milled and cooked rice affected by hydrothermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 72: 124-133.
- [34] Doymaz, I. and M., P. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *J. Food Eng.*, 60: 125-130.
- [35] Aregbesola, O.A., Ogunsina, B.S., Sofolahan, A.E., and Chime, N.N. 2015. Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (*Irvingia gabonensis*) nuts and kernels. *Nigerian Food Journal*, 33: 83-89.
- [36] Muhidong, J. and Ramadhani, N.F. 2012. Single-layer drying behavior of red chili. *AGRITTECH*, 32: 378-382.
- [37] Hebbar, H.U., Vishwanathan, K.H., and Ramesh, M.N. 2004. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65: 557-563.
- [38] Abbasi, S., Minaei, S., and H., K.M. 2014. Investigation of kinetics and energy consumption thin layer drying of corn. *Journal of Agricultural Machinery*, 4: 98-107. (In Farsi).
- [39] Kaveh, M. and Amiri Chayjan., R. 2016. Modeling Thin-Layer Drying of Turnip Slice Under Semi-Industrial Continuous Band Dryer. *Journal of Food Processing and Preservation*, doi:10.1111/jfpp.12778.
- [40] Rizvi, S.S.H. 1986. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In *Engineering Properties of Foods*, (M.A. Rao, and S.S.H. Rizvi, eds) Marcel Dekker Inc., New York.
- [41] Sareepuang, K., Siriamornpun, S., Wiset, L., and Meeso, N. 2008. Effect of soaking temperature on physical, chemical and cooking properties of parboiled Fragrant rice. *World Journal of Agricultural Sciences*, 4: 409-415.
- [42] Islam, M.R., Shimizu, N., and Kimura, T. 2004. Energy requirement in parboiling and its relationship to some important quality indicators. *Journal of Food Engineering*, 63: 433-439.
- [20] Kumar pandey, S., Diwan, S., and Soni, R. 2015. Review Of Mathematical Modelling Of Thin Layer Drying Process. *International Journal Of Current ENGINEERING And Science Research (IJCESR)*, 2: 96-107.
- [21] Liu, Q., Montross, M.D., and Bakker-Arkema, F.W. 1997. Stochastic Modelling of Grain Drying: Part 1. Experimental Investigation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66: 267-273.
- [22] Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., and Cagatay, F. 1991. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. *Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy*. (ed.^eds. I.A. Bascetinceliks), p.^pp. 565-569. ed., Adana, Turkey Faculty of Agriculture, C, ukurova University.
- [23] Wang, C.Y. and Singh, R. 1978. A single layer drying equation for rough rice. *ASAE*
- [24] Chhninman, M.S. 1984. Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*, 27: 610-615.
- [25] Diamante, L.M. and Munro, P.A. 1991. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51: 271-276.
- [26] Midilli, A., Kucuk, H., and Yapar, Z. 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20: 1503-1513.
- [27] Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B., and Wratten, F.T. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28: 296-301.
- [28] 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.
- [29] Ertekin, C. and Yaldiz, O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63: 349-359.
- [30] Ondier, G.O., Siebenmorgen, T.J., Bautista, R.C., and Mauromoustakos, A. 2011. Equilibrium Moisture Contents Of Pureline, Hybrid, And Parbolled Rice. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 54: 1007-1013.
- [31] Wong, J.Y. 2001. *Theory of Ground Vehicles*, 3rd Edition. Wiley-Interscience, Richmond, Tx, U.S.A.

***Investigation of drying parameters of parboiled paddy and the effect of combined hot air - infrared drier on head rice yield  
(Case study: Fajr cultivar)***

***Taghinezhad, E.<sup>1\*</sup>, Khoshtaghaza, M. H.<sup>2</sup>, Motevali, A.<sup>3</sup>***

1. Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2. Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3. Department of Biosystem Engineering, Sari Agriculture Science and Natural Resource University

***(Received: 2016/11/18 Accepted:2016/12/14)***

Drying is used as a suitable method for increasing shelf life of agricultural different products. In this research, kinetics modeling of parboiled rice drying in a combined infrared-hot air dryer was investigated. The effect of hot air temperature at 3 levels of 40, 50 and 60°C, infrared radiation intensity at 2 levels of 0.32 and 0.49 w/cm<sup>2</sup> and air velocity 1 m/s were evaluated during drying of parboiled rice on head rice yield in a completely randomized design. The results showed that the effect of hot air temperature and infrared radiation intensity on the drying time of parboiled rice was significant (P<0.01). Increase in drying temperature from 40 to 60°C was caused a decrease in drying time of samples 13.82% and 16.71% for radiation intensities 0.32 and 0.49 w/cm<sup>2</sup>, respectively. Also, increase in the radiation intensity from 0.32 to 0.49 w/cm<sup>2</sup> reduced the drying time of the samples 21.7, 21.6 and 16.4% for temperature 60, 50 and 40°C, respectively. Also, the logarithmic model revealed the best model fit for modeling of the drying process, because this model had the highest and lowest R<sup>2</sup> (0.99) and RMSE (0.003) values, respectively. Head rice yield increased significantly (P<0.05) from 50.10% (un-parboiled rice) to 65.92% (parboiled rice). In drying temperature 50°C and radiation intensities 0.49 w/cm<sup>2</sup> found the highest values of head rice yield.

***Key words:*** Head rice yield, Drying kinetics, Parboiled paddy, Modeling

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: e.taghinezhad@uma.ac.ir