

مدلسازی سینتیک خشک کردن لایه نازک برنج نیم جوش در خشک کن ترکیبی هوای داغ -

مادون قرمز

ابراهیم تقی نژاد^{۱*}، محمد هادی خوش تقاضا^۲ و علی متولی^۳

۱- استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان

۲- دانشیار، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

* ایمیل نویسنده مسئول: e.taghinezhad@uma.ac.ir

چکیده

خشک کردن به عنوان یک روش مناسب فراوری جهت افزایش ماندگاری محصولات مختلف کشاورزی به کار برده می شود. در این پژوهش مدل سازی سینتیک خشک شدن برنج نیم جوش در یک خشک کن ترکیبی هوای داغ - مادون قرمز بررسی شد. تأثیر دمای هوای داغ در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و توان لامپ پرتودهی در دو سطح ۰/۳۲ و ۰/۴۹ w/cm² طی خشک شدن برنج نیم جوش در طرح کاملاً تصادفی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد تأثیر دمای هوای داغ و توان لامپ پرتودهی بر فرایند خشک شدن برنج نیم جوش معنی دار (p<0.01) بوده است. افزایش دمای خشک کن از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، باعث کاهش زمان خشک کردن به میزان ۱۴/۸۱٪ در سطح توان ۰/۳۲ w/m² شده است. همچنین با افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۰/۳۲ به ۰/۴۹ w/cm²، زمان خشک شدن شلتوک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مقدار ۲۱/۷٪ کاهش یافت. مدل لگاریتمی در مدل سازی فرایند خشک کردن برنج نیم جوش با R²>0.99 و RMSE<0.004، کمترین خطا را در مقایسه با سایر مدل ها داشت.

واژه‌های کلیدی: برنج، سینتیک خشک کردن، مدلسازی، نیم جوش کردن



مقدمه

تیمار گرمایی^۱ بر روی شلتوک، قبل از فرآیند تبدیل^۲ را نیم جوش کردن شلتوک گویند که یک فرآیند هیدروگرمایی است و شامل سه مرحله غوطه‌وری^۳، بخاردهی^۴ و خشک کردن می‌باشد. استفاده از روش نیم‌جوش کردن، به‌عنوان یک روش مفید، کاربردی و مطمئن برای حل مشکل شکستگی برنج است که تأثیر بسزایی در خودکفایی آن دارد (Taghinezhad *et al.*, 2015). خشک کردن از مهمترین بخش فرآیند نیم جوش کردن است. زیرا طی غوطه‌وری، محتوای رطوبت برنج به حدود ۳۵٪(w.b.) افزایش می‌یابد (Islam *et al.*, 2004). روش خشک کردن تأثیر زیادی در میزان شکستگی برنج نیم‌جوش دارد. چندین روش برای خشک کردن برنج نیم‌جوش از قبیل خشک‌کن خورشیدی، هوای داغ، خلائی، بخار داغ و بستریسیال به کار رفته است (Swasdisevi *et al.*, 2010).

خشک کردن به وسیله اشعه مادون قرمز به ویژه به شکل لایه نازک روش مناسبی است. در این نوع خشک کن، اشعه مادون قرمز با سرعت بالاتری جذب پوسته محصول شده و سبب ایجاد حرارت می‌شود که نسبت به خشک کن های همرفتی، که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود، راندمان بالاتری داشته و کیفیت محصولات خشک شده با این روش در مقایسه با روش هوای گرم بهتر می‌باشد (Ratti and Mujumdar, 1995). در این روش حرارت در محصول بدون ایجاد تغییرات نامطلوب ایجاد می‌شود. در نتیجه کیفیت محصول نهایی بالاتر و هزینه های فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد (Jun *et al.*, 2011). طی تحقیقی Das و همکاران (۲۰۰۴)، کیفیت برنج نیم‌جوش که به روش مادون قرمز خشک شده بود را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که افزایش شدت تابش موجب افزایش در انتقال رطوبت و کاهش راندمان محصول سالم می‌شود. همچنین عمق بستر و شدت تابش بر رنگ (شاخص زردی) برنج آسیاب شده در سطح ۱٪ به‌طور معنی‌داری تأثیرگذار بود (Das *et al.*, 2004). Bualuang و همکاران (۲۰۱۱)، با بررسی خشک‌کن مادون قرمز و هوای داغ، بر نرخ خشک شدن و کیفیت دو رقم برنج نیم‌جوش (Suphanburi و Leb Nok Pattani) نتیجه گرفته‌اند که با افزایش دمای خشک‌کن از ۶۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس راندمان برنج سالم افزایش یافت. همچنین خشک‌کن مادون قرمز دارای مصرف انرژی کمتر و زمان کمتر خشک شدن در مقایسه با خشک‌کن هوای داغ دارد (Bualuang *et al.*, 2011). در تحقیقی دیگر، Bualuang و همکاران (۲۰۱۳)، تأثیر سه نوع خشک‌کن مادون قرمز، هوای داغ و خشک‌کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز را بر راندمان برنج سالم (رقم Leb Nok Pattani از تایلند) مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها بیان کرده‌اند که برنج نیم‌جوش تحت خشک‌کن ترکیبی هوای داغ-مادون

¹ : Hydrothermal

²: Milling

³: Soaking

⁴: Steaming

قرمز، بالاترین راندمان برنج سالم را دارد (Bualuang *et al.*, 2013). بنابراین در این تحقیق تاثیر خشک کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز بر خواص خشک کردن برنج ایرانی (رقم فجر) مورد بررسی قرار گرفت. طی تحقیقی Swadisevi و همکاران (۲۰۱۰)، تأثیر زمان پیش بخاردهی و دمای خشک کردن را بر کیفیت تولید برنج نیم-جوش با استفاده از روش بستر سیال هوای داغ مورد بررسی قراردادند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان بخاردهی، درجه ژلاتینه شدن و راندمان برنج سالم افزایش یافت در صورتی که لکه‌های سفید روی برنج کاهش یافت. همچنین سفتی برنج نیم‌جوش بیشتر از برنج غیر نیم‌جوش بود و سفتی برنج با افزایش دمای خشک کن افزایش یافت. آن‌ها بهترین شرایط تولید برنج نیم‌جوش را غوطه‌وری در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۵ ساعت سپس پیش بخار در دمای ۱۰۲ درجه سلسیوس به مدت ۷۰ ثانیه و خشک کردن در خشک کن بسترسیال با دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ دقیقه و استراحت به مدت ۳۰ دقیقه را پیشنهاد داده‌اند (Swadisevi *et al.*, 2010).

نتایج مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک شلتوک رقم فجر نشان داد که مدل تقریب انتشار در این خشک کردن، نسبت به سایر مدل‌ها، از دقت بالاتری برخوردار است ولی به دلیل دقت قابل قبول و سادگی معادله پیچ، این مدل برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن شلتوک توصیه شده است (Omid *et al.*, 2010). تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی سینتیک انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در طی خشک کردن برنج نیم‌جوش (رقم فجر) در خشک کن ترکیبی هوای داغ - مادون قرمز صورت نگرفته است. لذا، هدف این تحقیق بررسی اثر دمای خشک کن و توان لامپ پرتودهی مادون قرمز بر خشک کردن برنج نیم‌جوش و مدل سازی سینتیک انتقال جرم آن می باشد.

مواد و روش‌ها

به منظور اجرای تحقیق، شلتوک رقم فجر از مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات برنج کشور در آمل تهیه گردید. لطیفی و نصیری (۱۳۹۱)، 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 رقم‌های شیرودی و فجر داشته است. رقم فجر با وزن هزار دانه ۲۳/۲ گرم دارای عملکرد ۶ تا ۶/۵ تن در هکتار می‌باشد، البته در بعضی از مزارع تا ۸ تن در هکتار نیز برداشت شده است (Anonymous, 2013). میانگین طول، ضخامت و عرض دانه این رقم به ترتیب برابر با ۱۰/۹۸، ۲/۲۴ و ۱/۹۲ میلی‌متر گزارش شده است (امید و همکاران، ۱۳۸۹).

قبل از شروع خشک کردن، فرآیند غوطه وری و بخاردهی بر شلتوک صورت گرفت. برای غوطه وری شلتوک از سامانه ساخته شده توسط تقی نژاد و همکاران (۲۰۱۵) استفاده گردید (Taghinezhad *et al.*, 2015). آن‌ها با بررسی دماهای مختلف غوطه وری بر خواص کیفی برنج نیم‌جوش رقم فجر، دمای غوطه وری، ۶۵ درجه سلسیوس و زمان بخاردهی ۴ دقیقه را پیشنهاد داده‌اند.



بنابراین در این تحقیق، دمای غوطه وری ۶۵ درجه سلسیوس و زمان بخاردهی ۴ دقیقه برای نیم جوش کردن انتخاب شد. جهت تکمیل فرآیند نیم جوش کردن، ۲ ساعت بعد از غوطه وری (Soponronnarit *et al.*, 2006)، مرحله بخاردهی (در فشار اتمسفر و دمای ۹۶ درجه سلسیوس) و سپس مرحله ی خشک کردن اجرا شد. برای تعیین میزان رطوبت شلتوک، نمونه‌های ۱۰ گرمی به مدت ۲۴ ساعت در اجاق آزمایشگاهی دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس قرار داده شد و میزان رطوبت نمونه‌های شلتوک از رابطه‌ی (۱) بدست آمد (AACC., 1976). میانگین رطوبت اولیه شلتوک ۱۱٪ (w.b.%) بود.

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

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.

خشک کردن

بعد از بخاردهی، نمونه های شلتوک درون کیسه زیپ دار به مدت ۳ ساعت قرار گرفته تا گرادایان رطوبتی درون محصول از بین برود. سپس به برای خشک کردن نمونه ها از خشک کن ترکیبی هوای داغ - مادون قرمز استفاده شد. جهت بررسی سینتیک خشک شدن، ترازوی دیجیتال (AND GF-600 ساخت کشور ژاپن با دقت ۰/۰۰۱ g) با قابلیت اتصال به کامپیوتر در قسمت پایینی خشک کن قرار گرفته و هر یک دقیقه تغییرات وزن را ثبت می کرد. آزمایش ها در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، دو سطح توان مادون قرمز ۰/۳۲ و ۰/۴۹ w/cm² با سرعت هوای ورودی ۱ m/s انجام شد. در طول انجام آزمایش ها دمای محیط بین ۲۰ تا ۲۶ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوا بین ۲۲ تا ۲۷ درصد بود.

مدلسازی ریاضی منحنی های خشک شدن

برای مدلسازی خشک شدن لایه نازک شلتوک نیم جوش، از معادله ی نسبت رطوبت نمونه ها، طی خشک شدن مطابق رابطه (۲) استفاده شد.

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

که در آن MR رطوبت نسبی (بی بعد)، M_t میزان رطوبت در هر لحظه بر پایه خشک (d.b.)، M_e رطوبت تعادلی نمونه ها (d.b.)، M_0 رطوبت اولیه نمونه ها (d.b.) است.



مدلهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) آمده است. نسبت رطوبت های بدست آمده طی آزمایش های مختلف به کمک نرم افزار *MATLAB 2007* با مدل های مذکور برازش داده شد و برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) استفاده شد. بهترین برازشی که می تواند خصوصیات خشک شدن دانه های انار را توصیف کند مدلی است که دارای بیشترین ضریب همبستگی (R^2)، کمترین مربع کای (χ^2) و کمترین ریشه متوسط مربع خطای داده ها ($RMSE$) باشد.

جدول ۱ مدل های مورد استفاده برای پیش بینی فرآیند خشک شدن

نام مدل	معادله مدل
مدل نیوتن (Liu et al., 1997)	$MR = \exp(-kt)$
مدل پیچ (Singh et al., 1999)	$MR = \exp(-kt^n)$
مدل اصلاح شده پیچ (White et al., 1981)	$MR = \exp(-(kt)^n)$
مدل وانگ و سینگ (Wang and Singh, 1978)	$MR = 1 + a.t + bt^2$
مدل هندرسون و پاپیس (Chhninman, 1984)	$MR = a.\exp(-kt)$
مدل لگاریتمی (Yagcioglu et al., 1991)	$MR = a.\exp(-kt) + c$
مدل تقریبی انتشار (Kassem, 1998)	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$
مدل اصلاح شده پیچ ۲ (Diamante and Munro, 1991)	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$
مدل میدیلی (Midilli et al., 2002)	$MR = a.\exp(-kt^n) + b.t$

طی تحقیقی که توسط Ondier و همکاران (۲۰۱۱) بر روی محتوای رطوبت تعادلی برنج نیم جوش انجام شد، آن ها معادله Chung-Pfost مطابق رابطه (۳)، را برای محاسبه محتوای رطوبت تعادلی برنج نیم جوش پیشنهاد کرده بودند (Ondier et al., 2011).

$$MC_{d.b.} = \frac{-1}{C} \ln \left[\frac{-(T+B) \ln RH}{A} \right] \quad (3)$$

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 $۰/۲۳۰۳$.

1. Correlation coefficient
2. Chi-square
3. Root mean square error



همچنین پارامتر $MC_{d.b}$ ، محتوای رطوبت تعادلی بر پایه ی خشک، T ، دمای محیط بر حسب درجه سلسیوس و RH ، رطوبت نسبی محیط بر حسب اعشار است. معادلات مربوط به محاسبه ضرایب خطا در روابط ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - Z} \quad (6)$$

N ، Z ، $MR_{pre,i}$ و $MR_{exp,i}$ به ترتیب تعداد مشاهدات، تعداد ثابت های خشک کن، نسبت رطوبت پیشگویی شده μ و نسبت رطوبت تجربی μ می باشد.

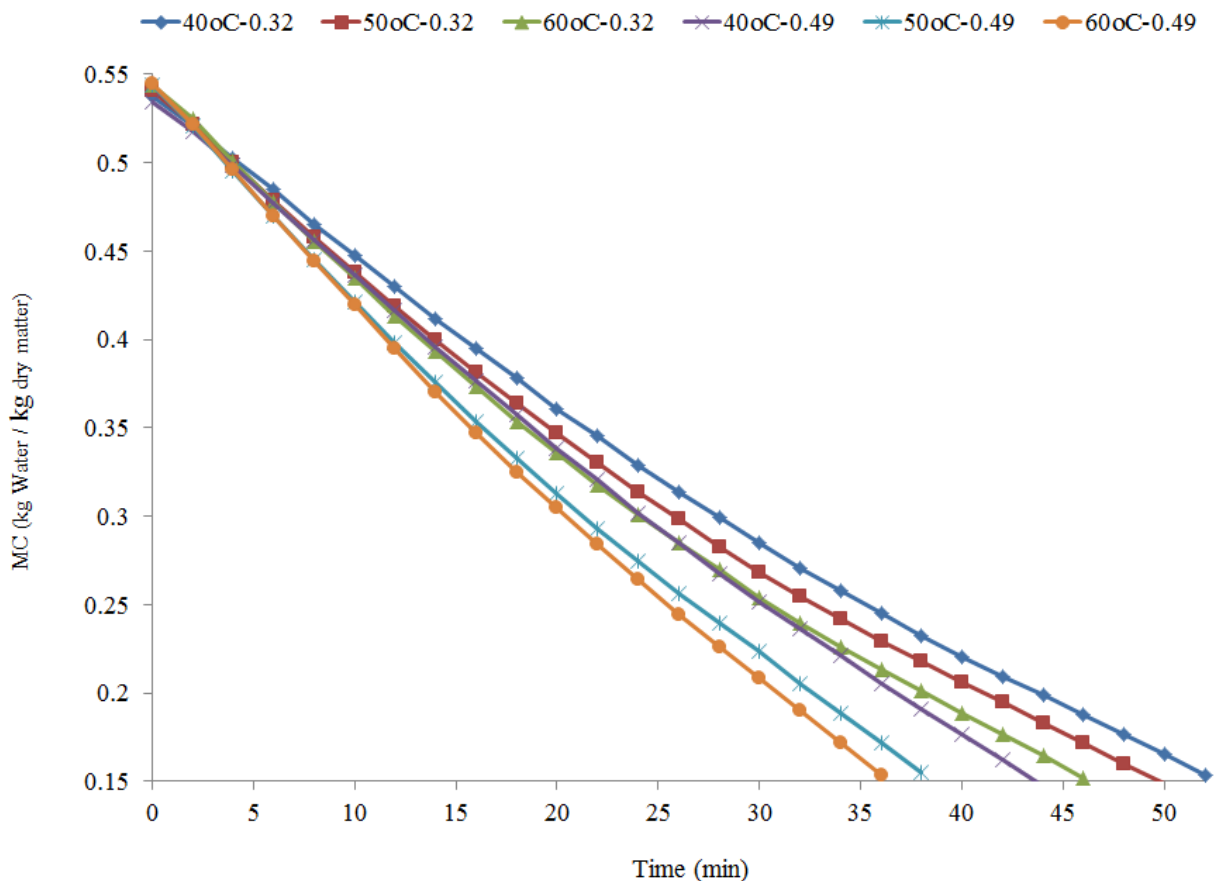
آنالیز آماری

کلیه آزمایش ها، در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل (دو فاکتوره 2×3) با ۳ تکرار انجام گرفت. رسم نمودارها با نرم افزار (2010) Excel، تجزیه واریانس یا تحلیل آماری با نرم افزار SPSS Statistics 17.0 و مقایسه میانگینها با آزمون دانکن صورت گرفت.

نتایج و بحث

خشک کردن یکی از مهم ترین بخش فرآیند نیم جوش کردن است که با خشک کردن شلتوک، فرآیند نیم جوش کردن تکمیل می گردد. شکل (۱) تاثیر دمای هوای ورودی (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) و توان تابش مادون قرمز (۰/۳۲ و ۰/۴۹ w/cm^2) را بر زمان خشک شدن شلتوک نیم جوش نشان می دهد. با افزایش دما و توان، زمان لازم برای خشک کردن شلتوک نیم جوش کاهش می یابد. بیش ترین زمان خشک شدن مربوط به دمای ۴۰ درجه سلسیوس و توان ۰/۳۲ w/cm^2 (۵۴ min) و کم ترین زمان خشک شدن نیز مربوط به دمای ۶۰ درجه سلسیوس و توان ۰/۴۹ w/cm^2 (۳۶ min) است. افزایش دمای خشک کن از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، زمان خشک کردن را ۱۴/۸۱٪ کاهش داد (توان ۰/۳۲ w/cm^2). همچنین با افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۰/۳۲ به ۰/۴۹ w/cm^2 ، زمان خشک شدن شلتوک ۲۱/۷٪ کاهش یافت (دمای ۶۰ درجه سلسیوس). افزایش توان لامپ باعث افزایش دمای خشک کن و از طرف دیگر باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا، به دلیل اختلاف دما بین هوا و محصول می شود در نتیجه محصول سریع تر داغ شده و موجب تبخیر بهتر آب از آن می گردد. بنابراین زمان خشک شدن

کاهش می یابد (Doymaz and M., 2003). Bualuang و همکاران (۲۰۱۳)، از یک خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ را در مقایسه با خشک کن مادون قرمز به تنهایی و هوای داغ به تنهایی برای خشک کردن برنج مورد بررسی قرار داده اند. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش زمان خشک شدن و کاهش انرژی مصرفی در خشک کن ترکیبی نسبت به سامانه های انفرادی مادون قرمز و هوای داغ بود. مهاجران و همکاران (۱۳۸۵)، زمان خشک شدن شلتوک (غیر نیم جوش) در روش تابش مادون قرمز و روش جریان هوای داغ را اندازه گیری کرده اند. نتایج نشان داد که زمان خشک کردن به روش تابش مادون قرمز به طور معنی داری کمتر از روش جریان هوای داغ است. صالحی و همکاران (۱۳۹۴)، رفتار خشک شدن برش های بادمجان را در خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ مورد بررسی قرار داده اند و گزارش کرده اند که با افزایش توان لامپ مادون قرمز و دمای هوای داغ، مقدار کاهش رطوبت برش های بادمجان و زمان خشک کردن به ترتیب افزایش و کاهش می یابد.



شکل ۱ تاثیر دمای هوای ورودی و توان تابش مادون قرمز بر زمان خشک شدن شلتوک نیم جوش

جدول (۲)، نتایج حاصل از تجزیه واریانس، تاثیر توان لامپ مادون قرمز و دمای هوای داغ بر زمان خشک شدن شلتوک نیم جوش نشان می دهد که اثر فاکتورهای توان و دما بر مدت زمان خشک شدن معنی دار ($p < 0.01$) شده است.

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرهای دمای هوای داغ و توان لامپ بر زمان خشک شدن برنج نیم جوش

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	P
توان	۱	۳۶۷/۰۶۵	۳۶۷/۰۶۵	۰/۰۰۰
دما	۲	۱۲۵/۶۱۳	۶۲/۸۰۷	۰/۰۰۰
توان × دما	۲	۲/۸۶۹	۱/۴۳۴	۰/۵۸۱
خطا	۱۲	۳۰/۳۳۳	۲/۵۲۸	
کل	۱۷	۵۲۵/۸۷۹		

مدل سازی ریاضی

تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار *MATLAB* انجام گردید. جدول (۳) نتایج بهترین برازش حاصل از استفاده مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق بر داده‌های آزمایشگاهی برای خشک شدن برنج نیم جوش را نشان می‌دهد (ضریب همبستگی R^2 ، χ^2 و $RMSE$ و ضرایب ثابت). نتایج برازش مدل‌ها نشان داد که مدل لگاریتمی بهترین مدل برای توصیف خشک شدن می‌باشد. مقادیر ضریب همبستگی R^2 ، χ^2 و $RMSE$ ریشه میانگین مربع خطا، برای مدل ارائه شده به ترتیب بین ۰/۹۹۹۸ - ۰/۹۹۹۹، ۰/۰۰۰۱۲۶۵ تا ۰/۰۰۰۲۹۷۰ و ۰/۰۰۲۵۱۹ تا ۰/۰۰۳۴۴۰ قرار داشت.

جدول ۳ شاخص‌های آماری و مقادیر ثابت مدل لگاریتمی برای خشک کردن برنج نیم جوش در توان و دماهای مختلف

تیمار	R^2	χ^2	RMSE	a	c	K
۴۰ - ۰/۳۲	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۲۹۷	۰/۰۰۳۴۴	۱/۷۱۵	-۰/۷۰۵۲	۰/۰۱۳۰۹
۵۰ - ۰/۳۲	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۱۴۵۹	۰/۰۰۲۵۱۹	۱/۵۱۶	-۰/۵۱۰۱	۰/۰۱۶۵۱
۶۰ - ۰/۳۲	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۱۹۴۷	۰/۰۰۳۰۴۵	۱/۵۲۵	-۰/۵۱۵۸	۰/۰۱۷۷۳
۴۰ - ۰/۴۹	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۲۸۸۵	۰/۰۰۳۷۹۸	۲/۳۸۵	-۱/۳۷۴	۰/۰۱۰۲
۵۰ - ۰/۴۹	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۱۲۶۵	۰/۰۰۲۷۲۸	۱/۹۱۴	-۰/۹۰۸۴	۰/۰۱۵۱۴
۶۰ - ۰/۴۹	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۱۵۸۶	۰/۰۰۳۱۴۸	۲/۱۴۷	-۱/۱۳۹	۰/۰۱۳۹

نتیجه گیری

با افزایش دمای هوا و توان لامپ مادون قرمز، زمان لازم برای خشک کردن شلتوک نیم جوش کاهش یافت. بیشترین زمان خشک شدن مربوط به دمای ۴۰ درجه سلسیوس و توان 0.32 w/cm^2 (۵۴ min) و کمترین زمان خشک شدن نیز مربوط به دمای ۶۰ درجه سلسیوس و توان 0.49 w/cm^2 (۳۶ min) است. تاثیر توان لامپ مادون قرمز و دمای هوای داغ بر زمان خشک شدن شلتوک نیم جوش معنی دار ($p < 0.01$) بوده است. نتایج مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک شلتوک نیم جوش رقم فجر نشان داد که مدل لگاریتمی در خشک کن هوای داغ - مادون قرمز، نسبت به سایر مدل‌ها، از دقت بالاتری برخوردار بوده است و بهترین مدل برای توصیف خشک شدن بوده است.

منابع

- AACC. 1976. Approved methods of analysis. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, Minnesota, USA.
- Bualuang O, Tirawanichakul Y, 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.
- Chhinnman MS. 1984. Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. Transactions of the ASAE 27: 610-615.
- Das I, Das SK, Bal S. 2004. Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. Journal of Food Engineering 62: 9-14.
- Diamante LM, Munro PA. 1991. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. Solar Energy 51: 271-276.
- Doymaz I, M .P. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. J. Food Eng. 60: 125-130.
- Islam MR, Shimizu N, Kimura T. 2004. Energy requirement in parboiling and its relationship to some important quality indicators. Journal of Food Engineering 63: 433-439.
- Jun S, Krishnamurthy K, Irudayaraj J, A. D. 2011. Fundamentals and Theory of Infrared Radiation. Infrared Heating for Food and Agricultural Processing. New York: CRC press.

- Kassem AS. 1998. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. Paper presented at In 13th international congress on agricultural engineering, 2–6 February, Morocco.
- Liu Q, Montross MD, Bakker-Arkema FW. 1997. Stochastic Modelling of Grain Drying: Part 1. Experimental Investigation. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66: 267-273.
- Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology* 20: 1503–1513.
- Omid M, Yadollahinia AR, S. R. 2010. Development of a kinetic model for thin layer drying of Paddy, Fajr variety. *Biosystem Engineering of Iran* 41: 153-160 (in Farsi)
- Ondier GO, Siebenmorgen TJ, Bautista RC, Mauromoustakos A. 2011. EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENTS OF PURELINE, HYBRID, AND PARBOILED RICE. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)* 54: 1007-1013.
- Ratti C, Mujumdar AS. 1995. Infrared Drying. in, Mujumdar. *Handbook of industrial drying*, vol. 1. New York.
- Singh S, Shivhare US, Ahmed J, Raghavan GSV. 1999. Osmotic concentration kinetics and quality of carrot preserve. *Food Research International* 32: 509-51.۴
- Soponronnarit S, Nathakaranakule A, Jirajindalert A, Taechapiroj C. 2006. Parboiling brown rice using super heated steam fluidization technique. *Journal of Food Engineering* 75: 423-432.
- Swasdisevi T, Sriariyakula W, Tia W, 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.
- Taghinezhad E, Khoshtaghaza MH, Minaei S, 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.
- Wang CY, Singh R. 1978. A single layer drying equation for rough rice. *ASAE*
- White GM, Ross IJ, Ponekert R. 1981. Fully exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE* 24: 466–468.
- Yagcioglu A, Degirmencioglu A, Cagatay F. 1991. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. Paper presented at Proceedings of the 7th



international congress on agricultural mechanization and energy, Adana, Turkey Faculty
of Agriculture, C, ukurova University.