

Modeling and Optimization of Rough Rice Drying under Hot Air-infrared Radiation in a Laboratory Scale Vibratory Bed Dryer

MOJTABA NOSRATI¹, DARIUSH ZARE^{2*}, SEYED MEHDI NASSIRI³, ABDOL ABBAS JAFARI⁴,
MOHAMMAD EGHTEHAD⁵

1. PhD Student, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz, Iran

2. Associate Professor, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

3. Associate Professor, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

4. Associate Professor, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

5. Professor, Mechanical Engineering Department, College of Mechanic, Shiraz University, Shiraz, Iran

(Received: Oct. 24, 2017- Revised: Jan. 10, 2018- Accepted: Jan. 20, 2018)

ABSTRACT

A practical model including a parameter as a function of drying condition were introduced to predict the effect of far-infrared radiation (FIR) in a combined rough rice drying process. Tests were conducted in three replication for four levels of FIR (0, 0.1, 0.2 and 0.3 Wcm⁻²) and three levels of inlet air temperature (30, 40 and 50°C). The results obtained from the simulation of the proposed model demonstrated that the models were capable satisfactorily express the characteristics of drying rough rice in combined dryer. Also due to the effects of combination of hot air and FIR drying technique on drying rates, cracking enhancement ratio (CER), required breaking energy for grain, specific energy consumption (SEC) and optimal method was presented. Combination of hot air at temperature of 40 °C and FIR at intensity of 1000 W.m⁻² is the best way to have lowest SEC and highest grain quality point of view.

Keywords: Rough Rice, Far-infrared Radiation, Single Parameter Thin Layer Model, Combined Drying

* Corresponding Author's Email: dzare@shirazu.ac.ir

مدلسازی و بهینه سازی خشک کردن شلتوک در یک خشک کن آزمایشگاهی هوای گرم-مادون قرمز بستر ارتعاشی

مجتبی نصرتی^۱، داریوش زارع^{۲*}، سید مهدی نصیری^۳، عبدالعباس جعفری^۴، محمد اقتصاد^۵

۱. دانشجوی دکتری مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳. دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۴. دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۵. استاد گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۸/۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰)

چکیده

در این پژوهش یک مدل کاربردی با یک متغیر متاثر از شرایط خشک شدن به منظور پیش بینی اثر تابش مادون قرمز در روش ترکیبی خشک کردن شلتوک ارائه گردید. آزمایش ها در سه سطح تابش مادون قرمز (صفر، ۱۰۰۰ و Wm^{-2} ۲۰۰۰) و سه سطح دمای هوای ورودی (۳۰، ۴۰ و $50^{\circ}C$) انجام پذیرفت. نتایج به دست آمده از شبیه سازی مدل ارائه شده نشان داد مدل قادر است خصوصیت های خشک شدن شلتوک را در خشک کن ترکیبی به خوبی بیان کند. همچنین با توجه به بررسی اثر روش ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز بر روی نرخ خشک شدن، نسبت افزایش ترک خوردگی، انرژی مورد نیاز برای شکستن دانه شلتوک و مصرف انرژی ویژه، یک روش بهینه ارائه گردید. بهترین روش برای کاهش مصرف انرژی و افزایش کیفیت دانه، روش ترکیبی هوای گرم در دمای $40^{\circ}C$ و شدت تابش مادون قرمز در $1000 Wm^{-2}$ است.

واژه های کلیدی: شلتوک، مادون قرمز، مدل تک متغیره لایه نازک، خشک کردن ترکیبی

مقدمه

شلتوک به عنوان یکی از محصولات غذایی اصلی در ایران، بیش از ۶۰۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی را به خود اختصاص داده است (FAO, 2017). شلتوک معمولاً در رطوبت بین ۲۴-۱۸ درصد (بر مبنای وزن تر) در ایران برداشت شده و با هدف جلوگیری از کاهش کیفیت آن و قابلیت نگهداری طولانی مدت، رطوبت محصول در محدوده ۱۴-۱۲ درصد (بر مبنای وزن تر) کاهش می‌یابد. کاهش رطوبت شلتوک طی فرآیند خشک کردن یکی از عامل‌های تاثیرگذار بر کیفیت این محصول به شمار می‌آید. خشک کردن با استفاده از هوای گرم یکی از روش‌های رایج در ایران محسوب می‌شود در حالی که این روش به دلیل استفاده از دمای پایین، یک روش کند و زمان‌بر است. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های جدید مانند تابش مادون قرمز توانسته است نرخ خشک کردن، کیفیت محصول و میزان مصرف انرژی را بهبود بخشد (Khir et al., 2007; Prakash & Pan, 2009; Zare et al., 2014). این در حالی است که اطلاعات کمی در خصوص یک مدل شبیه‌ساز فرآیند خشک کردن در حالت ترکیبی با تابش مادون قرمز به منظور طراحی و بهینه‌سازی خشک‌کن شلتوک، موجود می‌باشد.

امواج مغناطیسی ساطع شده از منبع مادون قرمز قادر است به صورت مستقیم در محصول نفوذ کند. انرژی جذب شده در محصول باعث افزایش برخورد مولکول‌ها شده به طوری که باعث تولید گرما در محصول می‌شود (Meeso et al., 2007). این ویژگی باعث شده است تا روش استفاده از امواج مادون قرمز برای محصولات حساسی مانند شلتوک توصیه شود (El-Amin, 2011). روش استفاده از امواج مادون قرمز به دو روش ترکیبی^۱ و سری^۲ ارائه گردیده است (Meeso et al., 2008). در روش ترکیبی، استفاده از هوای گرم و امواج مادون قرمز در تمام مراحل خشک کردن محصول همپوشانی دارند. گزارش‌ها نشان می‌دهند روش ترکیبی در سرعت هوای ملایم در حدود 1 ms^{-1} ۰/۱۵ قادر است ضمن افزایش کیفیت محصول، میزان مصرف انرژی و مدت زمان خشک شدن را بهبود بخشد. همچنین روش استفاده از امواج مادون قرمز به صورت ترکیبی امکان بهینه‌سازی مراحل خشک کردن محصول با استفاده از سامانه‌های کنترلی را فراهم نموده است (Zare et al., 2014; Barzegar et al., 2015).

معادلات لایه نازک به منظور درک بهتر پدیده انتقال گرما و انتقال جرم با هدف طراحی و بهبود تجهیزات خشک کردن محصولات کشاورزی ارائه گردیده است (Chen & Jayas, 1998). به منظور توصیف فرآیند خشک کردن دانه با استفاده از هوای گرم مدل تئوری با بی‌نهایت جمله منتشر شد (Luikov, 1988; Haghghi & Segerlind, 1966). از آنجا که مدل تئوری یک مدل پیچیده و دارای بی‌نهایت جمله بود، مدل‌های نیمه-تجربی ساده‌تر، بر گرفته شده از قانون دوم فیک و فرم ساده شده قانون نیوتن مورد بررسی قرار گرفت. گزارش‌های منتشر شده نشان می‌دهد مدل نیمه-تجربی استخراج شده از قانون دوم فیک نیز به دلیل استفاده از جمله اول معادله فیک، دقت لازم را ندارد (Brooker et al., 1992); از این رو معادلات نیمه-تجربی شبیه به جمله اول معادله تئوری و قانون ساده شده نیوتن توسعه و بهبود یافت (Lewis, 1921; Page, 1949; Verma et al., 1985). در سال‌های گذشته تحقیقات بسیاری با هدف توصیف فرآیند خشک کردن با استفاده از بهبود مدل‌های نیمه-تجربی در خشک‌کن‌های مجهز به روش تابش مادون قرمز ارائه گردیده است. افزایش تعداد جملات و متغیرهای متاثر از شرایط خشک کردن از نکات قابل ذکر برای مدل‌های ارائه شده می‌باشند (Abe & Afzal, 1997; Khir et al., 2007; Meeso et al., 2007; Eshtiagh & Zare, 2015). این در حالی است که اطلاعات محدودی در خصوص ارتباط بین متغیرها و جملات این چنین مدل‌هایی که متاثر از شرایط خشک کردن است، در منابع در دسترس است. اهمیت ارائه یک مدل جدید تک متغیره با دقت مناسب در این است که در سامانه کنترل فرایند خشک کردن می‌تواند بعنوان یک مدل پیش‌بینی‌کننده تغییرات رطوبت محصول در واحد کنترل به کار برده شود. هر چه این مدل ساده‌تر باشد زمان پاسخ‌گویی کمتر و کارکرد آن در سامانه کنترل‌کننده مطلوب‌تر است. از این رو یکی از اهداف این تحقیق ارائه یک مدل ساده با یک متغیر متاثر از شرایط خشک کردن دانه شلتوک با بررسی ارتباط بین ضریب‌ها و جملات موجود در مدل‌های نیمه-تجربی منتشر شده، بود. همچنین در این تحقیق نرخ خشک شدن، مصرف انرژی ویژه، نسبت افزایش ترک دانه^۳ در روش ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز برای دانه شلتوک بررسی شد و شرایط بهینه برای خشک کردن شلتوک با توجه به عملکرد خشک‌کن آزمایشگاهی ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز بستر ارتعاشی ارائه گردید.

1. Combined
2. Series

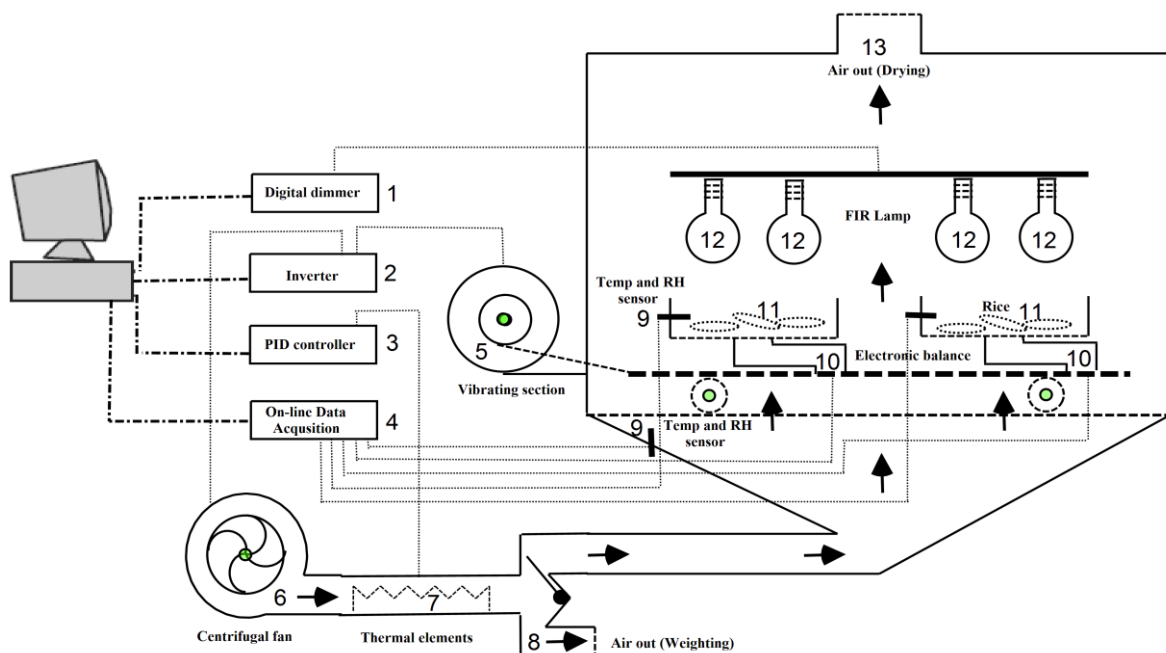
3. Cracked Enhancement Ratio (CER)

مواد و روش ها

تجهیزات آزمایشگاهی

یک خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز بستر ارتعاشی به منظور انجام آزمایش در شرایط مختلف بر روی نمونه های شلتوک، در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. طرحواره این خشک کن در شکل ۱ نشان داده شده است. هوای ورودی این خشک کن توسط یک فن گریز از مرکز با قابلیت تنظیم سرعت با استفاده از یک اینورتور (N50-007SF, Korea)، تامین گردید. بر اساس گزارش های ارائه شده سرعت هوای ورودی 0.15 m.s^{-1} با استفاده از یک سرعت سنج باد با حسگر گرمایی با دقت $\pm 0.03 \text{ m.s}^{-1}$ تنظیم شد (Jelve, 2014). بخش گرمایشی خشک کن از دو گرم کن با توان اسمی ۱kW و سه گرم کن ۰/۵ kW تشکیل شد که توان آنها با استفاده از یک کنترلر PID به منظور تنظیم دمای هوای ورودی در سطوح مختلف، کنترل شد. دما و رطوبت نسبی هوای ورودی با استفاده از حسگر DHT22 با دامنه عملکرد صفر تا ۱۰۰ درصد برای رطوبت نسبی و ۰-۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس برای دما اندازه گیری گردید. حسگرها با استفاده از دستگاه Testo 625 کالیبره شدند. طراحی خشک کن به گونه ای بود که لامپ های مادون قرمز در بالای بستر خشک کن قرار گیرند. به منظور تأمین شدت تابش یکنواخت بر روی دانه های شلتوک، در بالای هر سید سه لامپ مادون قرمز با توان ۲۷۵ W نصب شد. فاصله

لامپ ها تا سطح دانه های شلتوک در طول انجام آزمایش در حدود ۲۰ cm تنظیم شد. با توجه به توان لامپ های مادون قرمز امکان ایجاد شدت تابش 2000 W.m^{-2} به کمک یک تابش سنج سیلیکونی (Casella 187010b-02, UK) در این فاصله تعیین گردید. برای تأمین شدت تابش در سطوح مختلف، توان لامپ ها با استفاده از یک دایمر دیجیتال کنترل شد به طوری که تابش سنج سیلیکونی شدت تابش را اندازه گیری می نمود. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است به منظور تأمین حرکت ارتعاشی خشک کن، بستر دانه ها بر روی چهار بلبرینگ قرار گرفت و یک موتور الکتریکی حرکت رفت و برگشتی بستر را توسط یک مکانیزم خارج از مرکز با دامنه ۵mm تأمین نمود. فرکانس ارتعاشی دانه با استفاده از یک اینورتور که سرعت موتور الکتریکی را کنترل می کند، بر روی ۱۰ Hz تنظیم گردید (Zare et al., 2014; Jelve, 2014). سید دانه های شلتوک با ابعاد $30 \times 30 \times 6 \text{ cm}$ توسط یک لودسل با ظرفیت ۳ kg (Celltec, PA2, Rated Output:1.853mVV-1, Safe) (Overload: 150 %SF) بر روی بستر دانه ثابت نگه داشته شد به طوری که در طول آزمایش وزن دانه در فاصله زمانی معین قابل اندازه گیری باشد. به منظور جلوگیری از اثر ارتعاش و جریان هوا به هنگام وزن کردن دانه ها، حرکت ارتعاشی متوقف و جریان ورودی هوا توسط دریچه ای به بیرون از خشک کن هدایت گردید.



شکل ۱. طرحواره خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز بستر ارتعاشی: ۱-دایمر دیجیتالی ۲-اینورتور ۳-کنترلر PID ۴-ثبت کننده داده برخط ۵-واحد ارتعاش ۶-دمنده ۷-گرم کن ۸-خروجی هوا (در زمان وزن کردن محصول) ۹-حسگر دما و رطوبت نسبی ۱۰-لودسل ۱۱-شلتوک ۱۲-لامپ مادون قرمز ۱۳-خروجی هوا (در زمان خشک کردن محصول)

روش آزمون

شلتوک تازه رقم محلی چمپای کامفیروزی (*Oryza Sativa cv. Champa*) از مزرعه ای در منطقه کامفیروز نزدیک شیراز خریداری شد. قبل از انجام آزمایش نمونه های شلتوک در اندازه های 300 ± 30 g بسته بندی و به منظور تعادل رطوبت نسبی در یخچال در دمای $5-4^{\circ}\text{C}$ نگهداری شدند. رطوبت اولیه دانه های شلتوک با روش استاندارد خشک کردن در آون در دمای 103°C به مدت ۷۲ ساعت در محدوده $1 \pm 22\%$ (رطوبت بر پایه تر) به دست آمد (AACC, 1995). برای تمام آزمایش های انجام شده رطوبت تا مقدار تعیین شده $1 \pm 14\%$ (رطوبت بر پایه تر) کاهش داده شد. با بررسی ۱۰۰۰ دانه شلتوک میانگین طول، قطر کوچک (d_s) و قطر بزرگ (d_l) دانه به ترتیب برابر با $5/89$ ، $2/19$ و $1/68$ mm توسط میکرومتر اندازه گرفته شد. آزمون خشک کردن شلتوک در خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز در سه سطح دما (۳۰، ۴۰ و 50°C) و سه سطح شدت تابش مادون قرمز (صفر، ۱۰۰۰ و 2000 Wm^{-2}) در سه تکرار انجام پذیرفت. قبل از انجام هر آزمایش نمونه ها از یخچال خارج و به مدت ۴ ساعت اجازه داده شد تا دمای آنها با دمای محیط به تعادل برسد. در تمام آزمایش ها سعی شد ضخامت دانه های درون سبد از مقدار ۳ mm تجاوز نکنند. برای تعیین تغییرات رطوبت نسبی، وزن دانه ها در فاصله های زمانی ۵ دقیقه به طور مرتب در طول آزمایش توسط لودسل های قرار داده شده در زیر هر سبد اندازه گیری و داده های آزمایش به سامانه جمع آوری و ثبت انتقال داده شد. درصد افزایش ترک خوردگی با اندازه گیری میانگین تعداد دانه های ترک خورده قبل و بعد از انجام هر آزمایش با استفاده از دستگاه ترک بین مشخص شد. دستگاه ترک بین یک جعبه مکعبی شکل با ابعاد $20 \times 30 \times 50$ شامل یک لامپ فلوروسنت کوچک است که در زیر یک صفحه مشبک قرار می گیرد. دانه های برنج بصورت مورب روی آن قرار گرفته و دانه ها از لحاظ وجود ترک با استفاده از ذره بین بررسی شدند. همچنین میزان انرژی لازم برای شکست دانه های سالم پس از خشک شدن با استفاده از آزمون خمش سه محوره توسط دستگاه جامع آزمون کشش-فشار (STM-20, SANTAM, Iran) انجام پذیرفت. برای انجام این آزمون از یک پایه که فاصله دو فک آن متناسب با رقم کامفیروزی برابر با $2/3$ mm بود، استفاده شد. پوسته های شلتوک بصورت دستی جدا و بارگذاری بر روی دانه برنج قهوه ای توسط فک تیغه ای اعمال گردید. با توجه به اطلاعات به دست آمده از آزمون و رابطه های ۱ و ۲، نمودار تنش-کرنش

رسم شد. مساحت زیر نمودار تنش-کرنش (چقرمگی^۱) مقدار انرژی لازم برای شکست دانه در واحد حجم را نشان می دهد. سرعت حرکت دستگاه بر اساس گزارش ها، به مقدار 1 mm.min^{-1} تنظیم گردید (Siebenmorgen & Qin, 2005).

$$\sigma = \frac{8FL}{\pi d_s^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\varepsilon = \frac{6vd_s}{L} \quad (\text{رابطه ۲})$$

مدل لایه نازک

برای تعیین نسبت رطوبت (MR) در هر آزمون از رابطه ۳ استفاده شد.

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_i - M_e} \quad (\text{رابطه ۳})$$

مقدار رطوبت دانه در هر زمان $M(t)$ و مقدار رطوبت اولیه M_i برای هر آزمون در هر آزمایش با استفاده از روش وزن کردن تعیین گردید. مقدار رطوبت تعادلی نیز در شرایطی که دانه تحت تأثیر تابش مادون قرمز است، برابر صفر قرار داده شد، چراکه در بازه زمانی طولانی سطح دانه شلتوک در اثر تابش مادون قرمز، برشته می شود (El-Amin, 2011). اما برای مقدار رطوبت تعادلی شلتوک تحت تأثیر هوای گرم از معادله چانگ (رابطه ۴) استفاده شد (Brooker et al., 1992).

(رابطه ۴)

$$M_e = 0.29394 - 0.046015 \ln[-(T + 35.703) \ln(RH)]$$

برای بیان نسبت رطوبت (MR) به عنوان تابعی از مدت زمان خشک شدن، مدل های تئوری و نیمه-تجربی ارائه گردیده است. بعضی از این مدل ها که در تحقیقات گذشته به کار برده شده در جدول ۱ نشان داده شده است. واحد ثابت (k) در تمام مدل ها h^{-1} و یا s^{-1} می باشد (Brooker et al., 1992).

به منظور تعیین توانایی مدل های ارائه شده در جدول ۱ برای پیش بینی فرآیند خشک کردن در روش ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز دقت مدل ها برای تمام تیمار ها با استفاده از شاخص هایی چون R^2 ، χ^2 ، RMSE و MBE بررسی شد. ضرایب مدل هایی که دارای دقت بالایی بودند از مقایسه بین داده های آزمایشگاهی و داده های به دست آمده از مدل ها برای تمام تیمار ها با استفاده از نرم افزار SPSS 20 استخراج شد. در ادامه رابطه بین جملات و ثابت های استخراج شده به منظور ارائه یک مدل با یک متغیر متاثر از شرایط خشک شدن بررسی شد.

SPSS 20 از مقایسه بین داده های آزمایشگاهی و داده های پیش بینی شده توسط مدل ها محاسبه گردید.

سپس ضریب مدل های تک متغیره به عنوان تابعی از شرایط خشک شدن با استفاده از آنالیز غیر خطی رگرسیون در نرم افزار

جدول ۱. مدل های ریاضی به کار برده شده برای پیش بینی نمودار خشک شدن دانه شلتوک

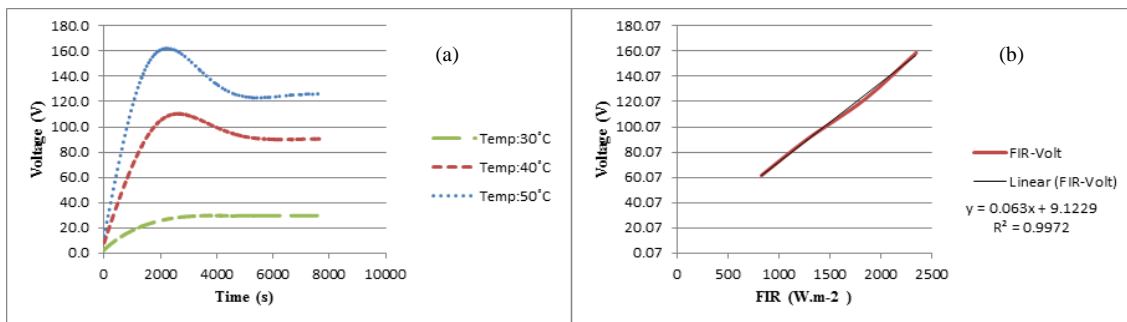
شماره	نام مدل	معادله مدل	منبع
۱	اولین جمله از معادله انتشار در مختصات کروی	$MR = \frac{6}{\pi^2} e^{-kt}$	(Brooker <i>et al.</i> , 1992)
۲	اولین جمله از معادله انتشار در مختصات استوانه ای	$MR = \frac{4}{(2.4)^2} e^{-kt}$	(Brooker <i>et al.</i> , 1992)
۳	Lewis	$MR = e^{-kt}$	(Lewis, 1921)
۴	Page	$MR = e^{-kt^n}$	(Page, 1949)
۵	Henderson	$MR = ae^{-kt}$	(Henderson, 1961)
۶	Logarithmic	$MR = ae^{-kt} + c$	(Chandra & Singh, 1995)
۷	Two term	$MR = ae^{-k_1t} + be^{-k_2t}$	(Henderson, 1974)
۸	Verma	$MR = ae^{-k_1t} + (1-a)e^{-k_2t}$	(Verma <i>et al.</i> , 1985)

مصرف انرژی ویژه^۱

که در هر آزمایش مقدار آنها متفاوت است. شکل ۲ (a) رابطه بین میزان ولتاژ مصرفی تنظیم شده توسط کنترلر PID در گرم کن ها را در سطوح مختلف دما نشان می دهد. همچنین شکل ۲ (b) نیز میزان ولتاژ مصرفی لامپ های مادون قرمز تنظیم شده توسط دایمر دیجیتالی در سطوح مختلف شدت تابش را نمایش می دهد.

مقدار انرژی مورد نیاز برای تبخیر یک کیلوگرم آب از محصول در فرآیند خشک کردن را مصرف انرژی ویژه تعریف می کنند (Barzegar *et al.*, 2015). دو منبع اصلی مصرف انرژی در خشک کن ارائه شده گرم کن ها و لامپ های مادون قرمز است

1. Specific Energy Consumption (SEC)



شکل ۲. (a) ولتاژ مصرفی در گرم کن ها در طول آزمایش در سطوح مختلف دما و (b) ولتاژ مصرفی لامپ های مادون قرمز در سطوح مختلف شدت تابش

بنابراین مقدار P_{conv} برابر $3/5$ کیلو وات در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۲ (b)، مقدار توان مصرف شده برای تابش مادون قرمز در شدت تابش های مختلف (I) از رابطه ۶ استفاده شد.

$$P_{fir} = \frac{0.063 \times I + 9.12}{220} \times P_{ifir} \quad (\text{رابطه ۶})$$

برای تابش امواج مادون قرمز از ۹ لامپ با توان ۲۷۵ وات استفاده گردید به طوری که مقدار P_{ifir} برابر ۲۴۷۵ وات در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه تمام توان مصرف شده توسط لامپ

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۲ (a)، مقدار ولتاژ مصرفی (V_{conv}) برای ایجاد دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰°C به ترتیب برابر با ۲۹، ۹۲ و ۱۲۴ ولت می باشد. مقدار توان مصرف شده برای گرمایش هوای ورودی با توجه به ولتاژ مصرف شده برابر است با:

$$P_{conv} = \frac{V_{conv}}{220} \times P_{i_{conv}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

بخش گرمایشی خشک کن از دو گرم کن با توان اسمی ۱kW و سه گرم کن با توان اسمی ۰/۵ kW تشکیل شده است

$$MBE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \right] \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

نتایج و بحث

منحنی های خشک شدن شلتوک

نمودارهای خشک شدن شلتوک رقم چمپای کامفیروزی تحت شرایط مختلف دما و شدت تابش مادون قرمز در شکل ۳ نشان داده شده است. این نمودارها چگونگی تأثیر دما و شدت تابش مادون قرمز را بر نسبت رطوبت (MR) نشان می‌دهند. همچنین شرایط مختلف خشک شدن به همراه مدت زمان آن در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است نرخ خشک شدن، که بوسیله شیب منحنی تعیین می‌شود، با افزایش دما و شدت تابش مادون قرمز افزایش یافت. اثر دما و شدت تابش مادون قرمز بر نرخ خشک شدن کاملاً مشهود و در تحقیقات مختلف گزارش داده شده است (Meeso, et al., 2008; Prakash & Pan, 2009; Zare, et al., 2014; Eshtiagh & Zare, 2015). امواج مادون قرمز به دلیل نفوذ مستقیم انرژی در سطح دانه و جذب آن به صورت گرما باعث کاهش مدت زمان خشک شدن و افزایش نرخ خشک شدن می‌شود. همچنین افزایش دمای هوای ورودی نیز بدلیل افزایش دمای دانه باعث کاهش مدت زمان خشک شدن شد، اگرچه در شدت تابش 2000 Wm^{-2} اختلاف معنی داری بین سطوح مختلف دما مشاهده نگردید. دلیل این رویداد را می‌توان افزایش دمای سطح دانه در شدت تابش‌های بالا بیان نمود. نتایج مشابهی در خصوص اثر متقابل دما و شدت تابش مادون قرمز گزارش شده است به طوری که با افزایش شدت تابش مادون قرمز اثر تغییرات دما کاهش می‌یابد (Zare, et al., 2014).

های مادون قرمز و گرم کن‌ها بر روی بستر دانه اثر می‌گذارند، مقدار کل توان مصرف شده برابر است با:

$$P_{total} = P_{conv} + P_{fir} \quad (\text{رابطه ۷})$$

با محاسبه مدت زمان هر آزمون و مقدار رطوبت تبخیر شده، مقدار مصرف انرژی ویژه از رابطه ۸ محاسبه گردید.

$$SEC = \frac{P_{total} \times \Delta t}{m_w} \quad (\text{رابطه ۸})$$

تحلیل های آماری

برای تحلیل داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده، از آزمایش‌های فاکتوریل، با طرح پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی بهره‌گرفته شد. فاکتورهای اصلی این آزمایش شامل سه سطح شدت تابش مادون قرمز و سه سطح دمای هوای ورودی است و برای هر سطح آزمایش سه تکرار انجام شد. برای تعیین اختلاف معنی داری بین میانگین نتایج به دست آمده نیز از آزمون توکی استفاده گردید.

همچنین با بهره‌گیری از آنالیز غیر خطی رگرسیون در نرم‌افزار SPSS 20، ضرایب معادلات ارائه شده تعیین شد. میزان همگرایی داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده نیز با شاخص‌هایی مانند R^2 ، χ^2 ، میانگین خطای سوگیری^۱ و جذر میانگین مربع‌های خطا^۲ (رابطه‌های ۹ تا ۱۱) بررسی گردید.

$$\chi^2 = \left[\frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \right] \quad (\text{رابطه ۹})$$

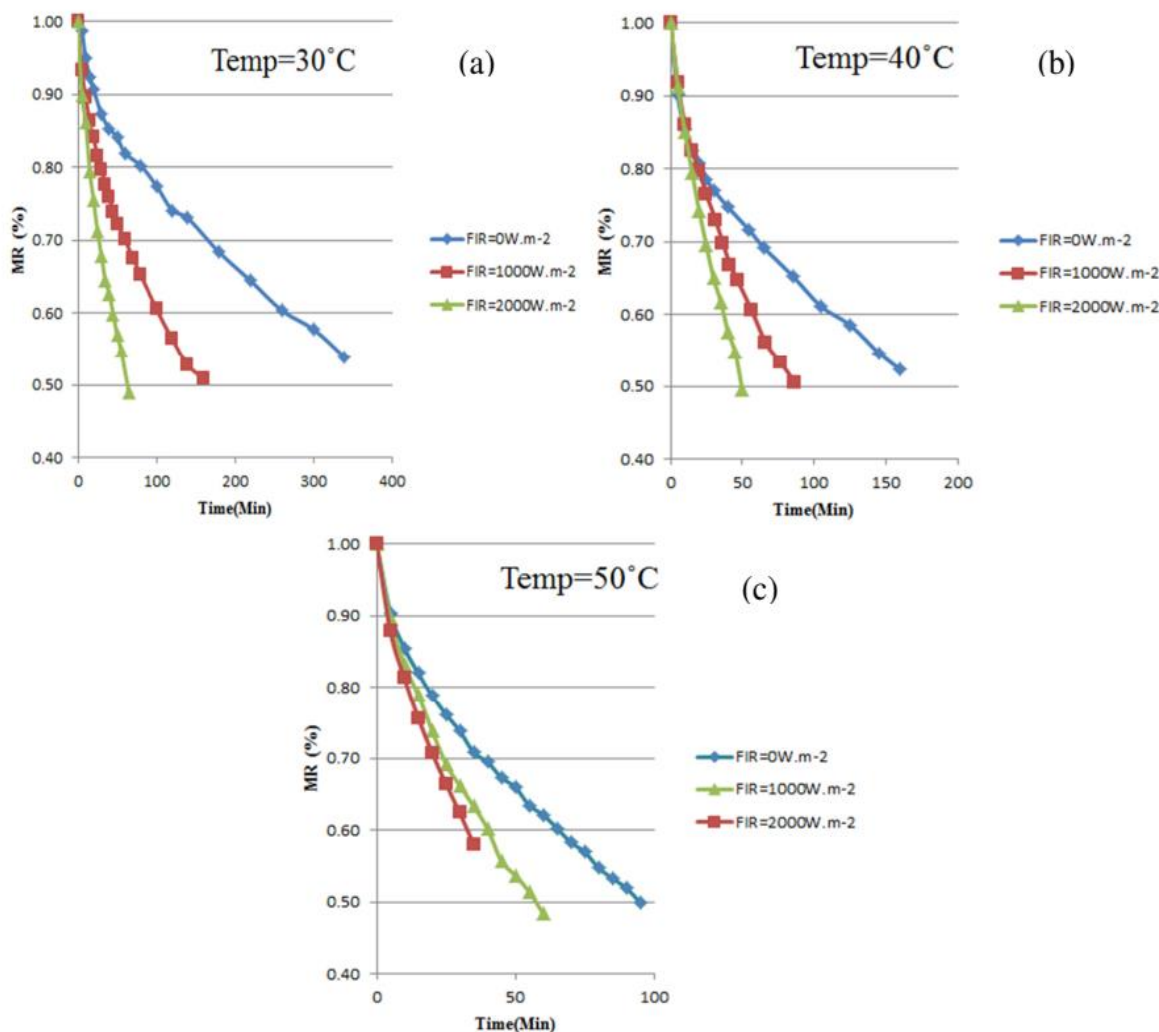
$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

1. Mean Bias Error (MBE)
2. Root Mean Square Error (RMSE)

جدول ۲. مدت زمان خشک شدن و مصرف انرژی ویژه در شرایط مختلف

شماره	شرایط خشک شدن		مدت زمان خشک شدن (دقیقه)	رطوبت تعادلی (% بر پایه تر)	مصرف انرژی ویژه (kJ.kg ⁻¹)
	دما (°C)	شدت تابش مادون قرمز (W.m ²)			
۱	۳۰	۰	۳۶ ^a	۷/۴	۱۸۷/۷ ^b
۲	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۶۰ ^b	۰	۷۲/۴ ^a
۳	۲۰۰	۲۰۰۰	۶۵ ^d	۰	۳۱/۹ ^b
۴	۴۰	۰	۱۶۰ ^c	۴/۸	۲۳۶/۵ ^c
۵	۱۰۰	۱۰۰۰	۸۶ ^e	۰	۱۰۸/۸ ^c
۶	۲۰۰	۲۰۰۰	۵۰ ^g	۰	۶۵/۵ ^d
۷	۵۰	۰	۹۵ ^f	۴/۷	۱۷۵/۳ ^f
۸	۱۰۰	۱۰۰۰	۵۵ ^h	۰	۸۶/۶ ^d
۹	۲۰۰	۲۰۰۰	۴۵ ^h	۰	۷۳/۴ ^d

نکته: حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی داری بین میانگین در سطح ۰/۰۱ است.



شکل ۳. منحنی های خشک شدن شلتوک تحت شرایط مختلف دما و شدت تابش مادون قرمز

(Eshtiagh & Zare, 2015; Younis, *et al.*, 2017).

در ادامه با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی ضرایب معادلات Page و Verma برای هر آزمایش استخراج گردید. برای تبدیل مدل های Page و Verma به مدل هایی با تنها یک متغیر، روند تغییرات ضرایب به دست آمده برای هر مدل تحت شرایط مختلف آزمایشگاهی بررسی شد.

مدل Page

مقدار ضریب n مربوط به مدل Page برای تمام آزمایش ها تحت شرایط مختلف بین مقدار $0.92-0.56$ با مقدار میانگین 0.691 متغیر بود. از آنجا که این تغییرات بسیار کوچک می باشند، یک مقدار ثابت برای n تحت شرایط مختلف در نظر گرفته شد. بنابراین مدل تک متغیره Page برابر است با

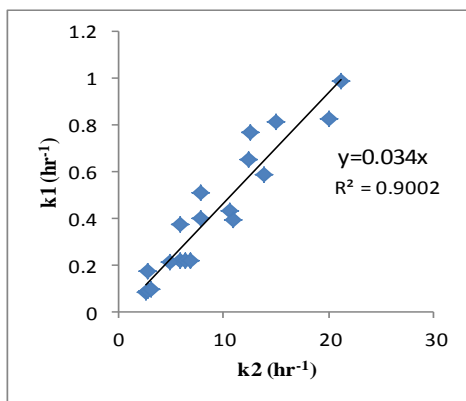
$$MR = e^{(-kt^{0.691})} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

مدل لایه نازک شلتوک

نتایج به دست آمده از مقایسه مدل های ارائه شده برای دو تیمار صورت نمونه در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج مشابهی برای تمامی تیمار ها نیز به دست آمد. با توجه به مقدارهای R^2 ، χ^2 ، RMSE و MBE به دست آمده برای هر آزمایش می توان گفت مدل های Page و Verma (جدول ۱) مدل های لایه نازکی هستند که قادرند فرآیند خشک شدن شلتوک تحت تأثیر شرایط ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز را به خوبی و با دقت مناسب پیش بینی کنند. اگر چه مدل Two terms نیز دارای دقت مناسب است اما به دلیل تعداد جملات و ضرایب زیاد، روند مشخصی را برای شرایط مختلف ارائه نمی دهد. در تحقیقات مشابه نیز دقت بالایی برای مدل های Page و Verma در خشک کن های ترکیبی گزارش شده است (Abe & Afzal, 1997;)

جدول ۳. نتایج آماری به دست آمده از مقایسه مدل‌ها و داده‌های آزمایشگاهی

T=40°C; FIR=1000W.m ⁻²				T=30°C; FIR=0W.m ⁻²				معادله مدل	شماره مدل
MBE	RMSE	χ ²	R ²	MBE	RMSE	χ ²	R ²		
۰/۱۰۴۳	۰/۱۸۲۵	۰/۰۳۵۸	-	۰/۱۵۶۷	۰/۲۲۴۹	۰/۰۵۳۵	-	$MR = \frac{6}{\pi^2} e^{-kt}$	۱
۰/۰۷۳۶	۰/۱۳۴۸	۰/۰۱۹۶	۸۷/۱	۰/۱۱۲۸	۰/۱۶۷۵	۰/۰۲۹۷	۶۸/۵	$MR = \frac{4}{(2.4)^2} e^{-kt}$	۲
-۰/۰۱۲۱	۰/۰۳۱۳	۰/۰۰۱۱	۹۵/۲	۰/۰۲۱۱	۰/۰۴۲۶	۰/۰۰۱۹	۹۰/۴	$MR = e^{-kt}$	۳
۷/۹*۱۰ ^{-۱۸}	۰/۰۰۵۳	۳/۳*۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹	۰/۰۰۰۶	۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۰۱	۹۹/۵	$MR = e^{-kt^n}$	۴
.	۰/۰۱۸۹	۰/۰۰۰۴	۹۸/۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۲۵۳	۰/۰۰۰۷	۹۶/۵	$MR = ae^{-kt}$	۵
۷/۹*۱۰ ^{-۱۸}	۰/۰۱۰۷	۰/۰۰۰۱	۹۹/۵	۰/۰۰۱۱	۰/۰۱۸۰	۰/۰۰۰۴	۹۸/۴	$MR = ae^{-kt} + c$	۶
.	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۰۱	۹۹/۸	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۰۱	۹۹/۸	$MR = ae^{-k_1t} + be^{-k_2t}$	۷
۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۶۰	۴/۵*۱۰ ^{-۵}	۹۹/۸	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۰۰۱	۹۹-۷	$MR = ae^{-k_1t} + (1-a)e^{-k_2t}$	۸



شکل ۴. رابطه بین دو ضریب k_1 و k_2 مربوط به مدل Verma

رابطه بین متغیر K و شرایط مختلف خشک شدن دانه شلتوک از آنجا که روند تغییرات k نسبت به شرایط مختلف خشک شدن شامل سطوح مختلف دما و شدت تابش مادون قرمز برای هر دو مدل تک متغیره، بسیار به یکدیگر شبیه می‌باشند، در ادامه تنها چگونگی تغییرات ضریب مدل Page بیان می‌شود. زمانی که مقدار شدت تابش مادون قرمز مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود، تغییرات متغیر k تنها متأثر از تغییرات دما بوده و همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است این رابطه را می‌توان با استفاده از یک معادله درجه دو، معادله از نوع Arrhenius و یا یک معادله نمایی بیان نمود. همچنین با ثابت نگه داشتن دما، رابطه بین تغییرات k و سطوح مختلف شدت تابش را نیز می‌توان با استفاده از یک معادله درجه دو و یا یک معادله نمایی نشان داد.

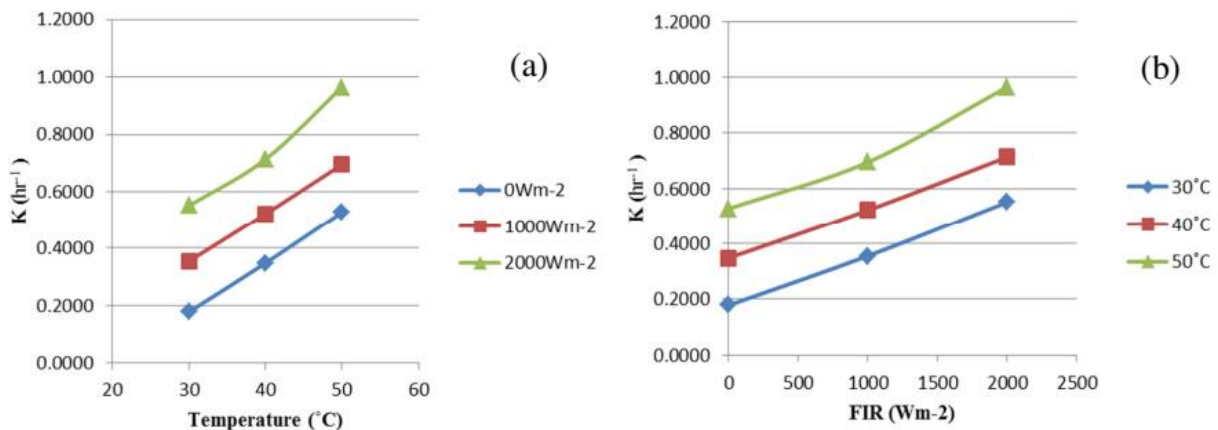
بررسی‌های انجام شده نشان داد مدل Page زمانی که ضریب k تابعی از شرایط مختلف خشک کردن نباشد، دارای دقت بیشتری نسبت به مدل تک متغیره آن دارد اما این در حالی است که روند تغییرات (k) در مدل تک متغیره Page برای سطوح مختلف دما و شدت تابش با دقت بیشتری قابل پیش بینی می‌باشد که در کل دقت داده‌های پیش بینی شده را برای تمامی شرایط خشک کردن افزایش می‌دهد.

مدل Verma

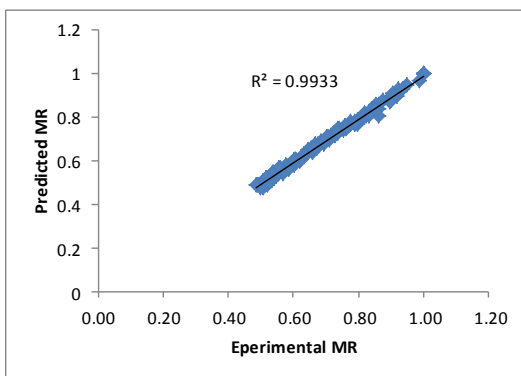
شکل ۴ رابطه خطی بین k_1 و k_2 مربوط به مدل Verma که از مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش بینی شده توسط مدل به دست آمده است را نشان می‌دهد. آزمون همبستگی در سطح احتمال 0.01 نیز نشان می‌دهد رابطه ای خطی بین دو ضریب k_1 و k_2 وجود دارد بنابراین برای مدل تک متغیره Verma می‌توان نوشت

$$MR = 0.111e^{-kt} + (1 - 0.111)e^{-(0.034)kt} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

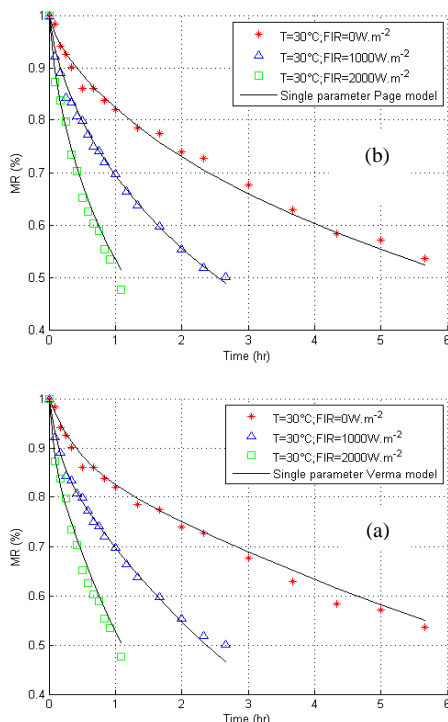
همان طور که قبلاً نیز برای مدل Page بیان شد، مدل Verma نیز زمانی که ضریب k تابعی از شرایط مختلف خشک کردن نباشد، دارای دقت بیشتری نسبت به مدل تک متغیره آن دارد اما این در حالی است که روند تغییرات k در مدل تک متغیره Verma برای سطوح مختلف دما و شدت تابش با دقت بیشتری قابل پیش بینی می‌باشد که در کل دقت داده‌های پیش بینی شده را برای تمامی شرایط خشک کردن افزایش می‌دهد.



شکل ۵. رابطه بین ضریب k مربوط به مدل تک متغیره Page، (a) سطوح مختلف دما در مقدار ثابت تابش مادون قرمز و (b) سطوح مختلف شدت تابش مادون قرمز در مقدار ثابت دما



شکل ۶. نمودار داده های آزمایشگاهی نسبت به داده های پیش بینی شده توسط مدل های تک متغیره Page و Verma



شکل ۷. مقایسه بین نمودار نسبت رطوبتی (MR) به دست آمده از آزمایش در دمای ۳۰°C برای سطوح مختلف تابش و مدل تک متغیره (a) Verma و (b) Page

با آنالیز غیر خطی رگرسیون بر روی داده های به دست آمده از ۲۷ آزمون، مقدار متغیر k بر اساس تابعی از دما و شدت تابش مادون قرمز با R^2 برابر با ۰/۹۹۱ برای مدل تک ثابت Page به دست آمد.

(رابطه ۱۴)

$$k_{Page} = 2554.961e^{\frac{-2600.43}{(T+273)}} + 0.302e^{\frac{0.135(I)}{(T+273)}} - 0.586$$

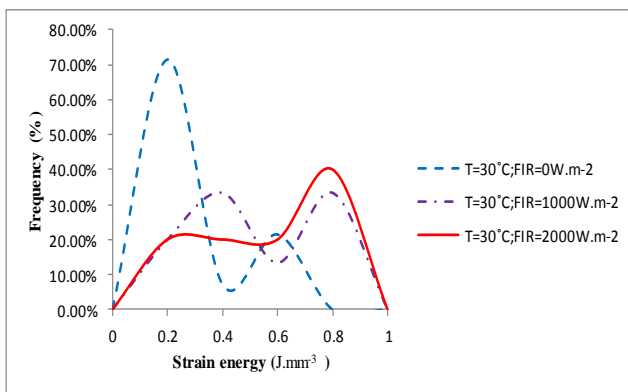
همچنین مقدار متغیر k بر اساس تابعی از دما و شدت تابش مادون قرمز با R^2 برابر با ۰/۹۸۸ برای مدل تک متغیره Verma برابر است با

(رابطه ۱۵)

$$k_{Verma} = 590901.509e^{\frac{-3339.09}{(T+273)}} + 5.981e^{\frac{0.174(I)}{(T+273)}} - 13.155$$

رسم داده های پیش بینی شده از مدل های تک متغیره Page و Verma نسبت به داده های آزمایشگاهی در شکل ۶ نشان می دهد که داده ها در یک دامنه بسیار کوچک نسبت به یک خط با زاویه ۴۵ درجه قرار گرفته اند که این نشان از دقت داده های پیش بینی شده می باشد. همچنین شکل ۷ مقایسه نمودار نسبت رطوبتی (MR) به دست آمده از آزمایش در دمای ۳۰ درجه سلسیوس در سطوح مختلف شدت تابش و داده های پیش بینی شده توسط دو مدل تک متغیره Page و Verma را نشان می دهد. در شرایط دیگر خشک شدن شلتوک نیز همین همبستگی به دست آمد. میانگین شاخص های آماری χ^2 ، RMSE و MBE برای مدل تک متغیره Verma به ترتیب برابر است با ۰/۰۰۰۴، ۰/۰۱۸۴ و ۰/۰۰۰۳ و برای مدل Page به ترتیب برابر است با ۰/۰۰۰۳، ۰/۰۱۶۸ و ۰/۰۰۰۳ که نشان از دقت بیشتر مدل Page می باشد.

قرمز در مدت زمان خشک کردن بر اساس دمای انتقال شیشه ای^۴ (T_g) باعث انتقال وضعیت دانه از حالت شیشه ای به حالت لاستیکی می شود. در تحقیقی اعلام کردند زمانی که برنج در حالت لاستیکی است گرادیان رطوبت ایجاد شده درون دانه برنج در مدت زمان خشک کردن اثر معنی داری در کاهش مقاومت دانه برنج ندارد (Cnossen *et al.*, 2001). این در حالی است که در تمام سطوح دمای هوای ورودی در سطح احتمال ۰/۰۱ هیچ اختلاف معنی داری در توزیع فراوانی برای انرژی مورد نیاز برای شکست دانه های سالم وجود نداشت.



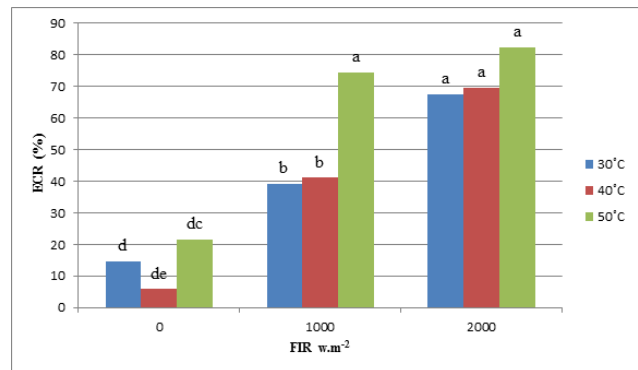
شکل ۹. نمودار توزیع فراوانی میزان انرژی مورد نیاز برای شکست دانه های سالم

مصرف انرژی ویژه (SEC)

میانگین مصرف انرژی ویژه برای تمام شرایط خشک شدن با استفاده از رابطه ۸ محاسبه و در شکل ۱۰ و همچنین در جدول ۲ نشان داده شده است. در تمام سطوح شدت تابش مادون قرمز میانگین مصرف انرژی ویژه کاهش یافت. در سطح تابش بین صفر تا 1000 Wm^{-2} بیشترین نرخ کاهش مصرف انرژی بویژه در دمای 30°C وجود داشت. گرچه در سطوح دیگر تابش نیز کاهش مصرف انرژی وجود داشت اما نرخ کاهش آن کمتر است. همچنین در تمام شرایط آزمایش به جز در سطح تابش 2000 Wm^{-2} افزایش دمای هوای ورودی نیز باعث کاهش مصرف انرژی گردید. گزارش های ارائه شده در خصوص اثر تابش مادون قرمز بر میزان مصرف انرژی نشان می دهد امواج مادون قرمز به صورت مستقیم درون دانه نفوذ کرده و تبدیل به گرما شده به طوری که انتقال رطوبت از مرکز دانه به سطح را تسریع کرده و مدت زمان خشک شدن را کاهش می دهد که این باعث کاهش مصرف انرژی برای خشک کردن محصول می شود (Afzal & Abe, 1999; Zare, *et al.*, 2014).

کیفیت شلتوک تحت شرایط مختلف آزمایش

اثر شرایط مختلف خشک کردن شلتوک شامل سطوح مختلف دمای هوای ورودی و شدت تابش مادون قرمز بر نسبت افزایش ترک خوردگی^۱ دانه در شکل ۸ به تصویر کشیده شده است. نتایج نشان داد، با افزایش شدت تابش مادون قرمز، نسبت افزایش ترک خوردگی نیز افزایش می یابد در حالی که اختلاف معنی داری در سطح ۰/۰۱ بین سطح دمای 30°C و 40°C وجود نداشت. گزارش های ارائه شده نشان می دهد افزایش دما و شدت تابش مادون قرمز باعث افزایش گرادیان رطوبت و دما در دانه شلتوک شده به طوری که این عامل باعث افزایش ترک خوردگی دانه می شود (Li, *et al.*, 1999; Chen & Wu, 2000; Meeso, *et al.*, 2008; Zare, *et al.*, 2014). تحقیقات انجام شده نشان می دهد در روش ترکیبی، مدیریت تغییرات دما و شدت تابش مادون قرمز در طول آزمایش با توجه به چگونگی حرکت رطوبت در دانه و تغییرات گرادیان رطوبت باعث افزایش کیفیت دانه شلتوک می شود (Meeso, 2008).



شکل ۸. میانگین درصد افزایش ترک خوردگی دانه شلتوک در شرایط مختلف آزمایش (آزمون توکی در سطح ۰/۰۱، حروف یکسان نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در بین تیمار ها است)

همچنین شکل ۹ نمودار عمومی توزیع فراوانی انرژی مورد نیاز برای شکست دانه های سالم^۲ در دمای 30°C و شدت تابش های مختلف را نشان می دهد. تمام نمودار های توزیع فراوانی بطور مشابه از الگوی دو حالت^۳ پیروی کردند. بر اساس الگوی دو حالت محققان دانه های برنج را به دو گروه ضعیف و قوی تقسیم بندی می کنند (Nassiri & Etesami, 2016). همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است استفاده از تابش مادون قرمز در تمام سطوح آن باعث افزایش درصد فراوانی دانه های برنج در گروه قوی شد. چرا که استفاده از تابش مادون

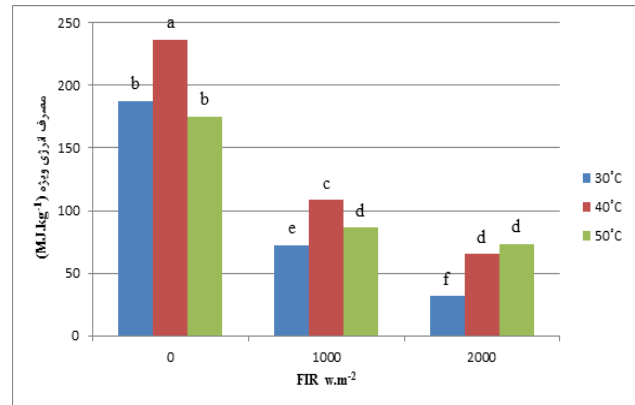
1. Cracked Enhancement Ratio (CER)
2. Head Rice Yield (HRY)
3. bi-modal

4. Glass Transition Temperature (Tg)

برای شکستن دانه سالم را نداشت. بنابراین با توجه به شاخص مصرف انرژی ویژه و کیفیت دانه توصیه می شود عمل خشک کردن دانه شلتوک در خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز در دمای ۴۰°C و شدت تابش ۱۰۰۰ Wm⁻² صورت پذیرد.

نتیجه گیری کلی

استفاده از مدل های لایه نازک با تعداد جملات و متغیر های زیاد یک روند مشخصی را تحت شرایط مختلف آزمایش ارائه نمی کنند. در این مطالعه با بررسی مدل های ارائه شده و ارتباط بین جملات و ضرایب آنها دو مدل تک متغیره Page و Verma به منظور پیش بینی فرآیند خشک شدن شلتوک در یک خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز ارائه گردید. آزمایش ها در سه سطح دمای هوای ورودی ۳۰، ۴۰ و ۵۰°C به همراه سه سطح شدت تابش مادون قرمز صفر، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ Wm⁻² صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده نشان داد ثابت هر دو مدل یک روند قابل پیش بینی را تحت شرایط مختلف آزمایش نشان می دهد. به علاوه در این مقاله شرایط بهینه خشک کردن شلتوک در خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز نیز بررسی گردید. با توجه به شاخص مصرف انرژی ویژه و کیفیت دانه توصیه می شود عمل خشک کردن دانه شلتوک در خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز در دمای ۴۰°C و شدت تابش ۱۰۰۰ Wm⁻² صورت پذیرد.



شکل ۱۰. میانگین مصرف انرژی ویژه برای شرایط مختلف آزمایش (آزمون توکی در سطح ۰/۰۱، حروف یکسان نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در بین تیمار ها است)

تعیین شرایط بهینه خشک کردن شلتوک

بهترین شرایط خشک کردن شلتوک با بررسی نتایج ارائه شده در خصوص میزان مصرف انرژی ویژه و کیفیت نهایی محصول در خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز تعیین شد. شرایط بهینه شرایطی است که ضمن کاهش نسبت افزایش ترک خوردگی دانه های شلتوک و مصرف انرژی ویژه، انرژی مورد نیاز برای شکستن دانه سالم را نیز افزایش دهد. امواج مادون قرمز در حالی که نسبت افزایش ترک خوردگی دانه را افزایش داد اما باعث افزایش انرژی مورد نیاز برای شکستن دانه های سالم و کاهش میزان مصرف انرژی ویژه شد. در کنار آن افزایش دمای هوای ورودی در حالی که میزان مصرف انرژی ویژه و مدت زمان خشک شدن را کاهش داد اما اثری بر میزان انرژی مورد نیاز

معرفی نمادها

جدول ۴. معرفی نمادهای به کار برده شده در رابطه ها

نماد	توضیح	واحد	نماد	توضیح	واحد
d_t	قطر بزرگ دانه شلتوک	mm	N	تعداد داده های هر آزمایش	-
d_s	قطر کوچک دانه شلتوک	mm	P	تعداد ثابت های مدل	-
F	نیرو	N	P_{fir}	توان مصرفی لامپ های مادون قرمز	W
I	شدت تابش مادون قرمز	Wm ⁻²	P_{iconv}	توان اسمی گرم کن ها	W
k	ثابت مدل	h ⁻¹	P_{ifir}	توان اسمی لامپ های مادون قرمز	W
L	طول دهانه پایه مربوط به آزمون خمش	mm	P_{total}	توان کل مصرفی خشک کن	W
M	رطوبت نسبی دانه شلتوک در هر زمان	% w.b	RH	رطوبت نسبی هوا	%
M_i	رطوبت اولیه دانه شلتوک	% w.b	t	زمان	h
M_e	رطوبت تعادلی دانه شلتوک	% w.b	T	دما	°C
MR	نسبت رطوبت	% w.b	V_{conv}	ولتاژ مصرفی در گرم کن ها	V
MR_{exp}	نسبت رطوبتی به دست آمده از آزمایش	% w.b	v	جابجایی ^۱	mm
MR_{pred}	نسبت رطوبتی پیش بینی شده توسط مدل	% w.b	Δt	مدت زمان هر آزمون	s
m_w	جرم رطوبت تبخیر شده در هر آزمایش	kg			

REFERENCES

- AACC. (1995). *Approved Method of the American of Cereal Chemists* (9th ed). St. Paul, Minnesota.
- Abe, T., & Afzal, T. M. (1997). Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67, 289-297.
- Afzal, T. M., & Abe, T. (1999). Energy and Quality Aspect During Combined FIR Convection Drying of Barley. *Journal of Food Engineering*, 42, 177-182.
- Barzegar, M., Zare, D., & Stroshine, R. L. (2015). An integrated energy and quality approach to optimization of green peas drying in a hot air infrared-assisted vibratory bed dryer. *Journal of Food Engineering*, 166, 302-315.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grain and oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Chandra, P. K., & Singh, R. P. (1995). *Applied Numerical Methods for Food and Agricultural Engineers*. London: CRC Press.
- Chen, C., & Jayas, D. S. (1998). Dynamic Equilibrium Moisture Content for Grain Drying. *Journal of Canadian Agricultural Engineering*, 40, 299-303.
- Chen, C., & Wu, P. (2000). The Study of Interrupted Drying Technique for Rough Rice. *Drying Technology*, 18(10), 2381-2397.
- Cnossen, A. G., Siebenmorgen, T. J., Yang, W., & Bautistad, R. C. (2001). An Application of Glass Transition Temperature to Explain Rice Kernel Fissure Occurrence During the Drying Process. *Drying Technology*, 19(8), 1661-1682.
- El-Amin. M. (2011). *Advanced Topics in Mass Transfer: Modeling Moisture Movement in Rice*. (pp. 283-304). Croatia: Intech.
- Eshtiaq, A., & Zare, D. (2015). *Modeling of thin layer hot air-infrared drying of green peas*. Agric Eng Int: CIGR Journal, Special Issue 2015: 18th World Congress of CIGR: 246-258.
- FAO. (2017). *World Food Situation FAO Cereal Supply and Demand Brief: Food and Agriculture Organization of the United Nation*.
- Haghighi, K., & Segerlind, L. J. (1988). Modeling Simultaneous Heat and Mass Transfer in an Isotropic Sphere-A Finite Element Approach. *Transactions of the ASAE*, 32, 737-761.
- Henderson, S. M. (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169-174.
- Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin-layer drying equation. *Journal of Food Technology*, 18, 507-524.
- Jelve, B. (2014). *Design, Fabricated and Evaluation of an Infrared-assisted Vibratory Bed Grain Dryer, A Case study: Paddy Drying*. (M. S.), Shiraz University.
- Khair, R., Pan, Z., Salim, A., & Thompson, J. F. (2007). Drying characteristics and quality of rough rice under infrared radiation heating. *Paper presented at the ASABE Annual International Meeting*, Minneapolis Convention Center, Minneapolis, Minnesota.
- Lewis, W. K. (1921). The Rate of Drying of Solid Materials. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432.
- Li, Y. B., Cao, C. W., & Zhong, Q. X. (1999). Study on Rough Rice Fissuring During Intermittent Drying. *Drying Technology*, 17(9), 1779-1793.
- Luikov, A. V. (1966). *Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies*. New York: Pergamon Press.
- Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T., & Soponronnarit, S. (2007). Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process. *Journal of Food Engineering*, 78, 1248-1258.
- Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T., & Soponronnarit, S. (2008). Different Strategies of Far-Infrared Radiation Application in Paddy Drying. *International Journal of Food Engineering*, 4(3), 238-251.
- Nassiri, S. M., & Etesami, S. M. (2016). Estimation of head rice yield by measuring the bending strength of kernels after drying by different drying methods. *AgEngInt. CIGR Journal*, 18, 368-377.
- Page, C. (1949). *Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shelled Corn in Layers*. (M. S. Thesis), Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Prakash, B., & Pan, Z. (2009). Heat and Mass Transfer Modeling of Rough Rice under Convective and Infrared Drying. *Paper presented at the ASABE Annual International Meeting*, Grand Sierra Resort and Casino Reno, Nevada.
- Siebenmorgen, T. J., & Qin, G. (2005). Relating Rice Kernel Breaking Force Distributions to Milling Quality. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 223-228.
- Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., & Wratten, F. T. (1985). Effects of Drying Air Parameters on Rice Drying Models. *Transactions of the ASAE*, 28(1), 296-301.
- Younis. M., Abdelkarim. D., & El-Abdein, A. Z. (2017). Kinetics and Mathematical Modeling of Infrared Thin-layer Drying of Garlic Slices. *Saudi Journal of Biological Science*, 17, 215-223.
- Zare, D., Naderi, H., & Ranjbaran, M. (2014). Energy and Quality Attributes of Combined Hot Air-Infrared Drying of Paddy. *Drying Technology*, 33(5), 570-582.