



بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن شلتوک برنج به روش سطح پاسخ

عمر قرناسی غراوی^۱، حسینعلی شمس‌آبادی^{۲*}، امیرحسین افکاری سیاح^۳، عزت‌الله عسکری اصلی^۳، منصور راسخ^۳

^۱ کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۳ دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۲۷

چکیده

سابقه و هدف: برنج یکی از محبوب‌ترین غلات در جهان و از نظر اقتصادی نیز به عنوان یکی از غلات مهم به شمار می‌آید. از جمله مشکلات عمده در خشک کردن شلتوک برنج، عدم یکنواختی پخش حرارت و رطوبت در فرآیند خشک شدن این محصول است. این مشکل باعث ایجاد تنش‌های حرارتی و رطوبتی در شلتوک می‌شود و در نتیجه باعث ایجاد افت در فرآیندهای بعدی خواهد شد. هدف از این پژوهش، دستیابی به بهینه‌عملکرد تبدیل شلتوک به برنج سفید سالم در کمترین مدت زمان خشک کردن است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش برای کاهش افت و افزایش سرعت خشک شدن از یک دستگاه خشک‌کن دوار آزمایشگاهی ابداعی جدید بهره‌گیری شد. روش سطح پاسخ (طرح مرکب مرکزی) برای مدل‌سازی و بدست آوردن شرایط بهینه فرآیند خشک کردن شلتوک برنج استفاده شد. متغیرهای مستقل برای این فرآیند شامل دما (۴۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد)، سرعت چرخش استوانه دوار (۲ تا ۱۰ دور بر دقیقه) و میزان پرودن مخزن استوانه‌ای خشک‌کن دوار (۲۵ تا ۶۶ درصد) بود. ویژگی‌های کیفی همچون میزان شکستگی دانه‌ها (درصد)، مقدار ترک خوردگی دانه‌ها (درصد) و مدت زمان خشک شدن نمونه‌ها به عنوان پاسخ برای توسعه یک مدل پیشگویی و بهینه‌یابی فرآیند خشک کردن مورد استفاده قرار گرفتند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد اثر متغیرهای مذکور دما، سرعت چرخش و میزان پر بودن بر زمان خشک کردن، میزان شکستگی دانه‌ها (درصد) و مقدار ترک خوردگی دانه‌ها معنی‌دار ($P < 0/01$) است و دما بیشترین تأثیر را بر میزان این پارامترها داشت. نتایج فرآیند بهینه‌سازی با حداقل افت (درصد شکستگی و ترک خوردگی) و مدت زمان خشک شدن در دمای هوای ورودی ۵۶/۵۳ درجه سانتی‌گراد، سرعت چرخش استوانه ۱۰ دور بر دقیقه و میزان پر بودن استوانه ۵۴/۲۰ درصد به دست آمد.

نتیجه‌گیری: شرایط خشک کردن نقش مهمی در بروز خصوصیات کیفی و افت نهایی شلتوک برنج دارد. نتایج حاصل از تحقیق بیانگر کارایی مفید متدولوژی سطح پاسخ در بهینه‌یابی فرآیند خشک کردن با خشک‌کن دوار ناپیوسته آزمایشگاهی بود و تغییرات در پارامترهای کیفی به طور مطلوب توسط مدل درجه دوم کامل توصیف شد. همچنین براساس نتایج بدست آمده دما بیشترین تأثیر را نسبت به دیگر پارامترهای مستقل بر میزان افت شلتوک برنج داشت.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، شلتوک برنج، خشک‌کردن، میزان افت، روش سطح پاسخ.

* مسئول مکاتبه: shamsabadi95@yahoo.com

مقدمه

برنج یکی از قدیمی‌ترین و پرمصرف‌ترین غلات جهان به شمار می‌آید و بعد از گندم، غذای اصلی کشور ما را تشکیل می‌دهد. تولید برنج ایران در سال ۲۰۱۶، حدود ۲/۸ میلیون تن با متوسط تولید ۴/۳۱ تن در هکتار بوده است و مقدار متوسط مصرف برنج هر ایرانی ۳۱ کیلوگرم در سال می‌باشد (۲). به منظور حفظ کیفیت و افزایش عمر انبارداری برنج، باید رطوبت شلتوک برنج بعد از عملیات برداشت به حدود ۱۳ درصد (بر پایه وزن مرطوب) برسد و برای انجام عملیات تبدیل (بسته به نوع رقم شلتوک)، رطوبت باید بین ۱۰ تا ۱۳ درصد (بر پایه تر) باشد (۱). برای دستیابی به این اهداف، نیاز به خشک‌کردن شلتوک برنج بعد از عملیات برداشت می‌باشد. هدف از فرآیند خشک کردن شلتوک، دستیابی به بیشینه عملکرد تبدیل شلتوک به برنج سفید سالم با بیشترین ظرفیت خشک کردن و کمترین میزان افت محصول است. از جمله مشکلات خشک کردن شلتوک در شالی‌کوبی‌ها، عدم یکنواختی خشک شدن شلتوک برنج است که باعث ایجاد تنش‌های حرارتی و رطوبتی در لایه‌ای از شلتوک می‌شود و در نتیجه باعث شکستگی و ترک خوردگی برنج در طول فرآیند پوست‌کنی و سفیدکنی خواهد شد، از طرفی شکستگی و ترک خوردن دانه‌های برنج یکی از مهم‌ترین علل کاهش کیفیت برنج و افزایش افت تولید می‌باشد، بنابراین سیستم‌های سنتی و قدیمی خشک کردن شلتوک افت زیادی را به علت خشک شدن غیر یکنواخت در فرآیند تولید برنج ایجاد می‌کنند.

عملیات نادرست و غیر اصولی خشک کردن از مهم‌ترین دلایل ایجاد ترک و شکستگی در دانه‌های برنج می‌باشد (۱۶ و ۲۰). بنابراین مرحله خشک‌کردن در چرخه تولید برنج به عنوان یک مرحله بحرانی

به‌شمار می‌رود (۸). خشک شدن بیش از حد و یا عدم خشک نمودن مناسب شلتوک در طی فرآیند از جمله مهم‌ترین مشکلاتی است که همراه با تولید برنج مطرح است، از طرفی استفاده از ترکیب‌های دما-سرعت نامناسب منجر به کاهش کیفیت فرآورده، کاهش زمان ماندگاری و از دست دادن کیفیت برنج خواهد شد. در چنین مواقعی تعیین شرایط بهینه فرآیند که در آن برنج با بهترین خواص کیفی به دست می‌آید، حائز اهمیت خواهد بود. در این میان، روش سطح پاسخ^۱ بیشترین کاربرد را دارد (۱۳).

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که به منظور توسعه و بهینه کردن فرآیندهایی مختلف به کار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد و هدف، توصیف رابطه‌ی بین پاسخ و متغیرهای مستقل توسط مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی این پاسخ می‌باشد (۶). مزیت اصلی این روش کاهش تعداد آزمایشات لازم جهت ارزیابی پارامترهای متعدد و برهم‌کنش بین آن‌ها است و در صورتی که پاسخ تحت تأثیر تعدادی از فاکتورها قرار گیرد، استفاده از این روش مناسب و ضروری است (۲۲).

بررسی فرآیند خشک کردن شلتوک برنج توسط محققانی همچون خوش تقاضا و همکاران (۲۰۰۲)، حق‌خواه و مقصودلو (۲۰۰۱) و پراساد و همکاران (۱۹۹۴) انجام گرفته است. این محققان با بررسی اثر زمان و دما بر خصوصیات کیفی برنج نقاط مناسب برای تولید برنج سفید با بهترین کیفیت را مشخص کردند و عنوان کردند که به کارگیری دما، سرعت و ارتفاع نامناسب در خشک‌کن‌ها می‌تواند منجر به کاهش کیفیت برنج تولیدی گردد (۱۱، ۱۴ و ۱۸).

بر اساس گزارش سازمان خوار و بار جهانی دو تا هفت درصد افت کیفی برنج در بخش خشک کردن،

آزمون‌ها از رقم هاشمی انتخاب و به میزان مورد نیاز از یک مزرعه شلتوک خریداری شد.

دستگاه‌ها و تجهیزات

دستگاه خشک‌کن ناپیوسته دوار آزمایشگاهی:

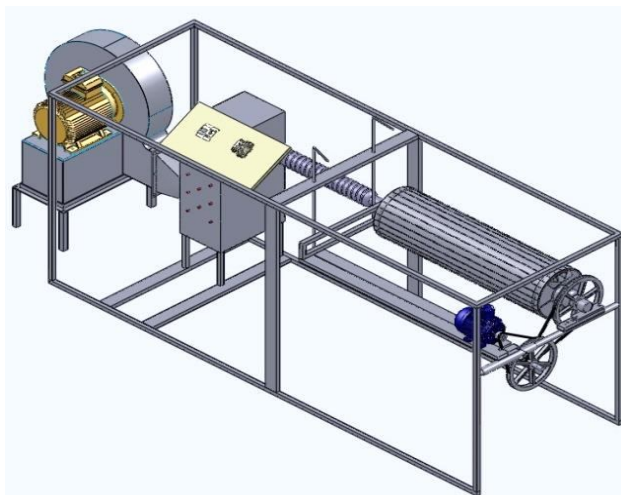
دستگاه خشک‌کن مورد استفاده (شکل ۱) برای انجام آزمایشات، ابداعی بود و توسط امیری (۲۰۱۴) ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این خشک‌کن محصول (به تعداد تیمارهای موجود در این پژوهش) در داخل مخزن استوانه‌ای مشبک که روی لوله مرکزی مشبک سوار شده است و با یک موتور الکتریکی گردش می‌کند، قرار داده شد. هوای دمیده شده توسط فن پس از برخورد به المنت‌های گرم شده درون محفظه گرم‌خانه، به درون استوانه هدایت می‌شود؛ سپس هوای گرم از سوراخ‌های لوله مرکزی وارد محفظه استوانه شده و پس از برخورد با سطح دانه‌ها، رطوبت دانه‌ها را کاهش می‌دهد (۳).

پوست‌کنی و سفیدکنی به وجود می‌آید که این میزان در کشور ما به دلیل عدم خشک کردن مناسب شلتوک گاهی به دو تا سه برابر می‌رسد (۱۴).

خشک‌کردن شلتوک برنج و بررسی خصوصیات کیفی آن توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به بررسی انجام شده تاکنون هیچ تحقیقی در خصوص بهینه‌سازی خشک کردن شلتوک برنج (رقم هاشمی) با استفاده از خشک‌کن دوار ناپیوسته جریان متقاطع منتشر نشده است. بنابراین هدف از این مطالعه در مرحله اول استفاده از روش سطح پاسخ برای بهبود و به کارگیری استفاده از مدل‌های پیشگویی برای توصیف خصوصیات کیفی شلتوک برنج طی خشک شدن با خشک‌کن دوار ناپیوسته و سپس تعیین شرایط بهینه فرآیند تولید شلتوک برنج بود.

مواد و روش‌ها

مواد: نمونه شلتوک برنج مورد استفاده برای انجام



شکل ۱: شماتیک خشک‌کن استوانه‌ای دوار ناپیوسته آزمایشگاهی (۳)

Figure 1. The schematic of laboratory batch rotary dryer

آون آزمایشگاهی با دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد بمدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا وزن آن ثابت گردد (۱۱).

روش‌ها
اندازه‌گیری رطوبت اولیه شلتوک برنج: برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه شلتوک سه نمونه ۵۰ گرمی از آن به صورت تصادفی از کل نمونه برداشت و درون

جدول (۱) انجام گردید. سپس شلتوک خشک شده در پلاستیک‌های پلی اتیلنی با ضخامت ۲ میلی متری بسته بندی شد و تا زمان انجام آزمایشات در شرایط معمولی (دمای اتاق) نگهداری شدند.

خشک کردن نمونه‌ها: به منظور ایجاد شرایط ثابت در اتاقک خشک کن مورد نظر، دستگاه به مدت ۱۵ دقیقه قبل از شروع فرآیند روشن گردید. خشک کردن دانه‌های شلتوک برنج با سامانه خشک کن مطابق با

جدول ۱: متغیرهای مستقل فرایند و سطوح آنها

Table 1. Independent process variables and their levels

سطوح کدبندی شده متغیرهای فرایند Coded levels of variables of process					نماد Symbols	منابع تغییرات (واحد) Source of variance
- α	-1	0	+1	+ α		
33.68	40	60	80	86.32	A	دما Temperature (°C)
0.74	2	6	10	11.26	B	سرعت چرخش استوانه Rotating cylinder speed (rpm)
18.52	25	45.50	66	72.48	C	میزان پر بودن مخزن cylinder Fullness (%)

$\alpha = 1.31607$

$\alpha = ۱,۳۱۶۰۷$

با دستگاه پوست گیر غلطک لاستیکی آزمایشگاهی (مدل TZ.۴/۵ ساخت کشور چین) پوست گیری شد و ۲۰ گرم از برنج قهوه‌ای بدست آمده را درون سپراتور آزمایشگاهی ریخته و با تنظیم روی درجه ۲، به مدت دو دقیقه الک شد. سپس با اندازه گیری وزن برنج قهوه‌ای سالم، میزان دانه‌های شکسته در مرحله پوست گیری برای هر ۲۰ آزمایش در ۵ تکرار برای هر کدام اندازه گیری شد. در ادامه، نمونه ۲۰ گرمی از دانه‌های برنج قهوه‌ای سالم را آماده و در پنج تکرار برای عملیات سفیدکنی با دستگاه سفیدکن آزمایشگاهی (مدل TZ ۳۰ ساخت کشور چین) که روی ۱/۵ دقیقه تنظیم شده، ریخته و سفید گردید. سپس برای اندازه گیری میزان افت مرحله سفیدکنی، برنج سفید بدست آمده را توسط سپراتور آزمایشگاهی الک کرده و دانه‌های سالم از دانه‌های شکسته را جدا کرده و وزن هر کدام اندازه گیری شد.

بررسی خصوصیات کیفی شلتوک خشک شده
اندازه گیری درصد افت (درصد شکستگی دانه‌های شلتوک برنج): دانه‌های سالم از دانه‌های شکسته با استفاده از دستگاه سپراتور آزمایشگاهی (مدل ۱۳۰ RSI ساخت کشور چین) جدا شدند. برای این منظور هر یک از نمونه‌های ۲۰ گرمی برنج قهوه‌ای و سفید شده را درون استوانه دستگاه ریخته و با تنظیم آن بمدت دو دقیقه دانه‌های شکسته که اندازه آنها از سه چهارم طول دانه سالم کمتر است، از دانه‌های سالم جدا شده و به عنوان افت تعیین شدند. با وزن کردن مقدار برنج سالم و شکسته، درصد افت پوست گیری و سفیدکنی محاسبه می شود (۱۷). نمونه‌های درون کیسه پلاستیکی پس از مرحله خشک کردن، برای پوست کنی و سفیدکنی توسط دستگاه‌های آزمایشگاهی به آزمایشگاه منتقل شد. برای پوست گیری مقداری از هر نمونه شلتوک خشک شده

این دو (معادله ۳) محاسبه شد.

$$\text{معادله (۱)} \quad 100 \times \frac{\text{میانگین وزن برنج قهوه ای} - 20}{20} = \text{درصد افت پوست کنی}$$

$$\text{معادله (۲)} \quad 100 \times \frac{\text{میانگین برنج سفید سالم} - 20}{20} = \text{درصد افت سفید کنی}$$

$$\text{معادله (۳)} \quad \text{درصد افت سفید کنی} + \text{درصد افت پوست گیری} = \text{درصد افت کل نمونه}$$

میزان افت (درصد)، مدت زمان خشک شدن (دقیقه) و میزان ترک خوردگی دانه شلتوک خشک شده (درصد) مشخص شد. طرح اولیه با ۲۰ آزمایش شامل ۶ نقطه مرکزی به دست آمد.

چهار مدل مختلف خطی، خطی-مربعی، خطی-برهم کنش و درجه دوم کامل بر نتایج به دست آمده، اعمال شد و مدل‌های مختلف بر اساس ضریب تبیین، ضریب تبیین اصلاح شده، ضریب تبیین پیش‌بینی شونده مقایسه شدند و مدلی که دارای بیشترین مقادیر این سه فاکتور باشد دارای قدرت پیش‌بینی بالاتر و دقت بیشتری خواهد بود (۵). پس از برآزش داده‌ها با مدل‌های مختلف به کمک جدول تجزیه واریانس، معنی‌دار بودن عبارات مختلف، در سطح ۹۵ درصد، بررسی گردید و برای ارزیابی کفایت مدل از آزمون عدم برآزش^۳ استفاده شد. مرحله نهایی کار بهینه‌سازی شرایط آزمایش بود و که به وسیله مقدار مطلوبیت که بین ۰ تا ۱ بود، اعتبار شرایط بهینه مورد سنجش قرار گرفت.

نتایج و بحث

اثر شرایط آزمایش بر روی متغیرهای وابسته: نتایج داده‌های تجربی پارامترهای پاسخ در خشک‌کن دوار ناپیوسته آزمایشگاهی در جدول ۲ آورده شده است. اثر شرایط آزمون‌ها بر روی متغیرهای وابسته (پاسخ‌ها)

درصد افت مراحل پوست‌گیری و سفیدکنی از معادله ۱ و ۲ محاسبه شد و درصد افت کل از مجموع

اندازه‌گیری درصد ترک خوردگی اولیه و نهایی: برای اندازه‌گیری درصد ترک اولیه دانه برنج، تعدادی از دانه‌های شلتوک (قبل از خشک کردن) با دست پوست کنده و از آن‌ها تعداد ۵۰ عدد دانه برنج قهوه‌ای کامل انتخاب و روی دستگاه ترک بین (دستگاه پردازش تصویر مدل ۱۰۰۳ IPLS ساخت ایران) قرار داده شد. تعداد دانه‌های دارای ترک تعیین و با استفاده از روش تناسب درصد ترک اولیه مشخص شد (مینایی و همکاران، ۱۳۸۴). این عمل برای دیگر نمونه‌های خشک شده نیز تکرار شد تا بتوان تأثیر متغیرهای آزمون بر ترک خوردگی دانه‌ها بررسی گردد. در نهایت درصد ترک نمونه‌های خشک شده با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد.

$$\text{معادله (۴)} \quad \text{درصد ترک اولیه} - \text{درصد ترک ناشی از خشک کردن} = \text{درصد ترک نهایی}$$

طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

طرح اولیه و تعداد آزمایش‌ها با تعریف متغیرهای مستقل دما، سرعت دورانی استوانه خشک‌کن و میزان پر بودن استوانه خشک‌کن طبق جدول ۱ مشخص شد. تیمارها به روش کاملاً تصادفی در قالب طرح مرکب مرکزی^۱ با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم افزار دیزاین اکسپرت^۲، (نسخه ۷) و با تعریف پاسخ‌های

3. Lack of fit

1. Central composite design
2. Design expert

معنی دار بودن آزمون عدم برازش برای یک مدل بیانگر این است که نقاط به خوبی اطراف مدل قرار نگرفته و در نتیجه نمی توان از مدل برای پیش گویی مقادیر متغیرهای تابع استفاده نمود. نتایج نشان داد که عدم برازش برای صفات درصد شکستگی و زمان خشک شدن اندازه گیری شده معنی دار نمی باشد. بنابراین؛ بالا بودن ضریب تبیین و معنی دار نبودن آزمون عدم برازش صحت مدل را برای برازش اطلاعات تأیید می کند.

به کمک ضرایب رگرسیون محاسبه شد. هرچه مقدار ضریب تبیین به یک نزدیک تر شود، قدرت مدل برازش یافته در توصیف تغییرات پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل بیشتر می باشد. چنین عنوان می شود که برای یک مدل با برازش خوب، مقدار ضریب تبیین بایستی حداقل ۰/۸ باشد (۲۴). پس از مقایسه ضریب تبیین مدل های مختلف که در جدول ۳ مشخص شده، مدل درجه دوم کامل برای هر سه پاسخ مناسب در نظر گرفته شد. از طرف دیگر

جدول ۲: داده های تجربی پارامترهای پاسخ در شلتوک برنج خشک شده با استفاده از خشک کن دوار ناپیوسته آزمایشگاهی

Table 2. Experimental data for response parameters of paddy rice dried using laboratory batch rotary dryer

پاسخ Response		سطوح متغیرهای مستقل Independent variables levels				تیماز Run
درصد ترک خوردگی Percentage of crack (%)	زمان خشک شدن Drying time (min)	درصد شکستگی دانه ها Percentage of breakage (%)	پر بودن مخزن استوانه ای Cylinder fullness (%)	سرعت چرخش استوانه Cylinder rotation speed (rpm)	دمای هوای ورودی Inlet Temp. (°C)	
16.0	58	35.69	45.50	6.00	60.00	1
16.0	63	36.54	45.50	6.00	60.00	2
16.5	61	34.92	45.50	6.00	60.00	3
21.0	160	28.51	45.50	6.00	33.68	4
17.0	53	39.58	18.52	6.00	60.00	5
17.0	62	29.00	45.50	0.74	60.00	6
16.5	38	32.45	25.00	10.00	80.00	7
28.0	67	43.10	72.48	6.00	60.00	8
35.5	40	50.94	66.00	2.00	80.00	9
13.0	56	23.52	45.50	11.26	60.00	10
17.0	60	30.57	45.50	6.00	60.00	11
26.5	40	37.96	66.00	10.00	80.00	12
14.5	132	27.39	25.00	2.00	40.00	13
29.5	127	29.37	66.00	10.00	40.00	14
15.5	60	36.79	45.50	6.00	60.00	15
16.5	59	34.45	45.50	6.00	60.00	16
30.5	35	44.23	45.50	6.00	86.32	17
18.0	116	30.96	25.00	10.00	40.00	18
21.0	135	28.42	66.00	2.00	40.00	19
32.0	38	42.30	25.00	2.00	80.00	20

جدول ۳: مقایسه ضریب تبیین (R^2)، ضریب تبیین تصحیح شده و پیش‌بینی شده در تیمارهای برای خشک کردن شلتوک برنج با خشک‌کن دوار ناپوسته آزمایشگاهی

Table 3. Comparison between R^2 , adjusted and predicted R^2 for different treatments of Paddy rice drying using laboratory batch rotary dryer

پاسخ‌ها (Responses)			مدل (Model)
درصد ترک خوردگی Percentage of crack	درصد شکستگی دانه‌ها Percentage of breakage	زمان خشک شدن دانه‌ها Drying time(min)	
75.03	56.64	58.42	ضریب تبیین
73.28	58.15	56.57	ضریب تبیین تصحیح شده (Adjusted) خطی (Linear)
69.66	60.36	51.54	ضریب تبیین پیش‌بینی شده (Predicted)
89.05	85.84	89.70	ضریب تبیین
87.05	82.56	88.15	ضریب تبیین تصحیح شده (Adjusted) خطی-مربعی (Linear-) (Quadratic)
81.65	82.13	85.15	ضریب تبیین پیش‌بینی شده (Predicted)
72.92	65.63	64.03	ضریب تبیین
71.20	65.53	56.97	ضریب تبیین تصحیح شده (Adjusted) خطی-برهم‌کنش (Linear-) (Interaction)
68.99	63.52	54.16	ضریب تبیین پیش‌بینی شده (Predicted)
89.94	96.98	94.31	ضریب تبیین
86.63	95.54	92.61	ضریب تبیین تصحیح شده (Adjusted) درجه دوم کامل (Full Quadratic)
79.89	88.86	88.68	ضریب تبیین پیش‌بینی شده (Predicted)

نشان داده شده است که در سطح احتمال $P < 0.0001$ معنی‌دار است. با توجه به نتیجه تجزیه واریانس اثر خطی متغیر مستقل دما در سطح احتمال $P < 0.0001$ معنی‌دار بود و متغیر سرعت چرخش استوانه خشک‌کن و میزان درصد پر بودن مخزن در سطح احتمال $P < 0.05$ معنی‌دار است، که به معنای رابطه خطی متغیرهای یادشده با زمان خشک شدن است. اثرات متقابل تمامی فاکتورهای مستقل در سطح احتمال $P < 0.05$ معنی‌دار نمی‌باشد، که نشان‌دهنده

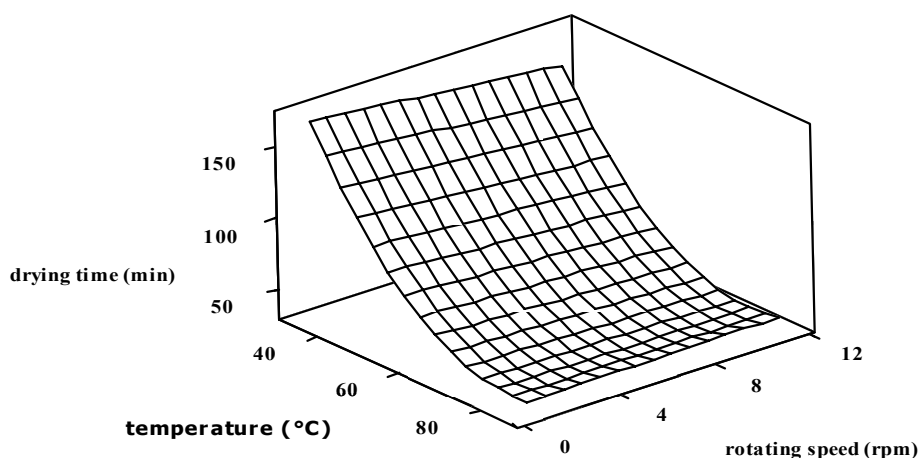
اثر شرایط آزمایش بر زمان خشک شدن شلتوک دانه برنج: جدول تجزیه واریانس برای ارزیابی معنی‌داری مدل استفاده شد (جدول ۴). برای هر یک از عبارت‌های مدل یک مقدار P مشخص شده که هر چقدر میزان P کمتر باشد عبارت مورد نظر تاثیر بیشتری در میزان پاسخ و در واقع میزان معنی‌داری بیشتری خواهد داشت (۱۹). نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای مدل به‌دست آمده از مدت زمان خشک شدن شلتوک با متغیرهای مورد بررسی در جدول ۴

هوای ورودی به استوانه خشک‌کن، مدت زمان خشک شدن شلتوک به بالاترین مقدار خود رسید که دلیل آن بهم خوردگی کم و پایین بودن دمای هوای ورودی بود. و در نتیجه، کاهش سرعت خشک شدن شلتوک می‌باشد. به علاوه در کمترین دمای هوای ورودی، با افزایش سرعت چرخش استوانه مدت زمان خشک شدن شلتوک به میزان کمی کاهش یافت.

افزایش هوای ورودی به خشک‌کن باعث انتقال جرم و گرمای بالاتری شده و موجب افت سریع‌تر رطوبت می‌گردد و در نتیجه زمان خشک شدن شلتوک برنج کاهش می‌یابد. به‌طورکلی افزایش دما از یک طرف باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول شده و از طرف دیگر باعث گرم شدن سریعتر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود و در نهایت باعث کاهش زمان خشک شدن می‌گردد که با نتایج دوپماز (۲۰۰۷) در مورد خشک‌کردن گوجه فرنگی هم‌خوانی دارد (۹). نتایج مشابهی برای مواد غذایی و محصولات کشاورزی دیگر گزارش شده است که استفاده از درجه حرارت‌های بالاتر منجر به افزایش قابل توجهی در شدت خشک‌شدن و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن می‌شود (۴، ۹، ۱۰ و ۲۱).

عدم وجود رابطه خطی توأم بین فاکتورهای مورد بررسی بر زمان خشک‌شدن می‌باشد. توان دوم سرعت چرخش استوانه و پر بودن مخزن در سطح احتمال $P \leq 0.05$ معنی‌دار نیست ولی اثر درجه دوم دما در سطح احتمال $P < 0.0001$ معنی‌دار است. در نهایت با توجه به این که ضریب تبیین مدل برابر با ۰/۹۲۶۱ و آزمون عدم برازش مدل در سطح احتمال $P < 0.05$ معنی‌دار نمی‌باشد، مدل پیش‌بینی شده کفایت و صحت آزمایش‌ها را تأیید می‌کند.

شکل ۲، بیانگر تأثیر متغیرهای مستقل بر مدت زمان خشک‌شدن نمونه‌ها به صورت شمای سه بعدی سطح پاسخ می‌باشد. شکل ۲ نشان دهنده اثر دما و سرعت چرخش استوانه (در شرایطی که میزان پر بودن مخزن در نقطه مرکزی ثابت نگه‌داشته شده است) بر مدت زمان خشک شدن دانه شلتوک برنج است. با افزایش دما در هر نقطه از سرعت چرخش استوانه، مدت زمان خشک شدن کاهش می‌یابد و این شیب کاهشی در سرعت‌های بالا، کمتر است. این امر می‌تواند ناشی از بهم خوردگی زیاد محصول در دوران مخزن خشک‌کن باشد که افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت زمان خشک شدن در پی داشته است. در سرعت‌های پایین چرخش استوانه با کاهش دمای



شکل ۲: اثر متقابل دما و سرعت چرخش استوانه بر مدت زمان خشک شدن نمونه‌های شلتوک برنج
Figure 2. The interaction effect of temperature and rotating speed on drying time of paddy rice

جدول ۴: نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) و برازش مدل بر پاسخ در فرآیند خشک کردن شلتوک برنج در خشک کن دوار ناپوسته آزمایشگاهی.

Table 4. ANOVA analysis and model fitting for response parameters of Paddy rice drying by laboratory batch rotary dryer

P values			درجه آزادی	منابع تغییرات
درصد ترک خوردگی percentage of crack	درصد شکستگی percentage of breakage	زمان خشک شدن Drying time	Degrees of freedom	Source
<0.0001	<0.0001	<0.0001	9	مدل Model
<0.0001	<0.0001	<0.0001	1	(A)
<0.0001	<0.0001	0.0075	1	(B)
<0.0001	<0.0001	0.0034	1	(C)
<0.0001	<0.0001	0.0632	1	A×B
0.0061	<0.0001	0.2388	1	A×C
<0.0001	0.0261	0.3398	1	B×C
<0.0001	0.0279	<0.0001	1	A ²
0.0007	<0.0001	0.9350	1	B ²
<0.0001	<0.0001	0.4567	1	C ²
-	-	-	10	باقیمانده residual
0.6640	0.7727	0.0657	5	عدم برازش Lack of fit
-	-	-	5	خطای خالص Pure error
-	-	-	19	خطای کل Total error

A: دما، B: سرعت چرخش استوانه، C: پر بودن استوانه

A; Tem, B; rotating speed, C: cylinder fullness

اهمیت بالایی در کیفیت محصول نهایی است و باید شرایط فرآیند طوری انتخاب گردد که محصول نهایی کمترین میزان دانه‌های شکسته شده را دارا باشد. جدول (۴) نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای مدل بدست آمده از درصد شکستگی (ضایعات) برنج خشک شده با متغیرهای مورد بررسی را نشان می‌دهد که در سطح $P < 0.0001$ معنی‌دار است. با توجه به نتیجه تجزیه واریانس اثرات خطی متغیرهای مستقل در سطح $P < 0.0001$ معنی‌دار بود، حاکی از آن است که تأثیر سه متغیر یاد شده بر درصد شکستگی بسیار معنی‌دار بوده و رابطه خطی هم وجود داشت.

مدل نهایی (رابطه ۵) به‌دست آمده برای مدت زمان خشک شدن براساس داده‌های کد شده و معنی‌دار بودن آن براساس جدول ۳ عبارت است از:

$$Y = 59.77 - 45.23A - 2.78B + 3.18C + 22.22A^2 + 3AB \quad (5)$$

قدر مطلق مقدار ضریب متغیرها بیانگر میزان تأثیر متغیر بر پاسخ می‌باشد. با توجه به ضرایب می‌توان نتیجه گرفت که دما، بیشترین تأثیر را در میزان تغییرات زمان خشک شدن داشته است.

اثر شرایط آزمایش بر میزان افت (درصد شکستگی دانه‌های شلتوک برنج): میزان دانه‌های شکسته دارای

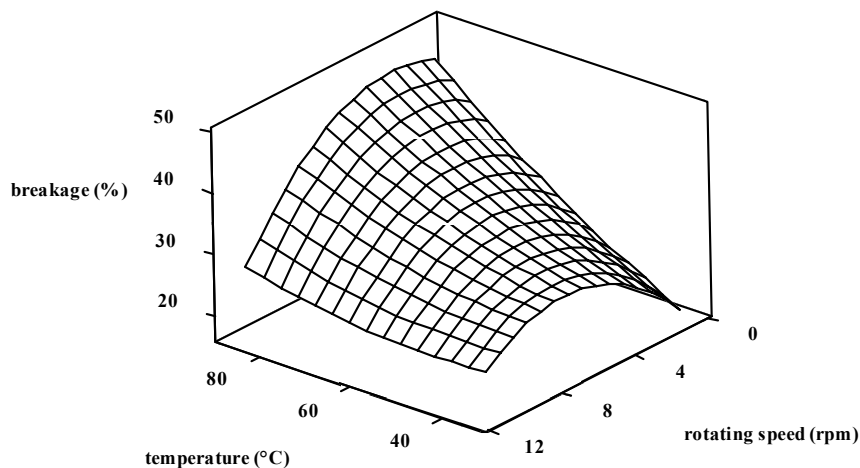
ثابت پر بودن مخزن در نقطه مرکزی (۴۵/۵ درصد) را نشان می‌دهد. با افزایش دما در هر نقطه از سرعت چرخش استوانه، درصد شکستگی هم افزایش یافت، به طوری که این شیب افزایشی در سرعت‌های زیاد کمتر بود. این نتیجه می‌تواند ناشی از بهم خوردگی زیاد محصول در دوران مخزن خشک‌کن باشد. نتیجه دیگر بهم خوردگی زیاد محصول در مخزن در حال دوران خشک‌کن؛ افزایش سرعت خشک شدن و کاهش درصد افت است.

افزایش سرعت چرخش استوانه در هر نقطه از دما، رفتارهای متفاوتی در رابطه با میزان شکستگی نشان داد به طوری که بالاترین میزان شکستگی در سرعت چرخش استوانه ۶ rpm بالاترین میزان شکستگی دیده شد و در سرعت‌های بالاتر و پایین‌تر میزان شکستگی کاهش یافت. این رفتار نشان‌دهنده اثر درجه دوم سرعت چرخش استوانه بر مدل رگرسیونی درجه دوم می‌باشد.

همچنین اثرات متقابل فاکتورهای مستقل دمای هوای ورودی با پر بودن استوانه مخزن و سرعت چرخش استوانه در سطح احتمال $P \leq 0.0001$ معنی‌دار بود.

اثر متقابل متغیرهای سرعت چرخش و میزان پر بودن استوانه بر میزان ضایعات برنج سفید شده در سطح احتمال $P < 0.05$ معنی‌دار بود که نشان‌دهنده وجود رابطه خطی توأم بین فاکتورهای مورد بررسی بر میزان ضایعات برنج سفید شده می‌باشد. با توجه به این که مدل پیشنهادی نرم‌افزار و مدل استفاده شده از درجه دوم می‌باشد، توان دوم سرعت چرخش استوانه و پر بودن مخزن در سطح احتمال $P \leq 0.0001$ و همچنین اثر درجه دوم دما در سطح $P < 0.05$ معنی‌دار است. در نهایت با توجه به این که ضریب تبیین مدل برابر با ۰/۹۹۲۹ و آزمون عدم برازش مدل در سطح $P < 0.05$ معنی‌دار نبود؛ مدل پیش‌بینی شده کفایت و صحت آزمایش‌ها را تأیید نمود.

شکل ۳ اثر متقابل دما و سرعت چرخش استوانه بر میزان شکستگی دانه‌های شلتوک برنج در مقادیر



شکل ۳: اثر متقابل دما و سرعت چرخش استوانه بر درصد شکستگی شلتوک برنج (افت)

Figure 3. The interaction effect of temperature and rotating speed on percentage of breakage of paddy rice (Loss)

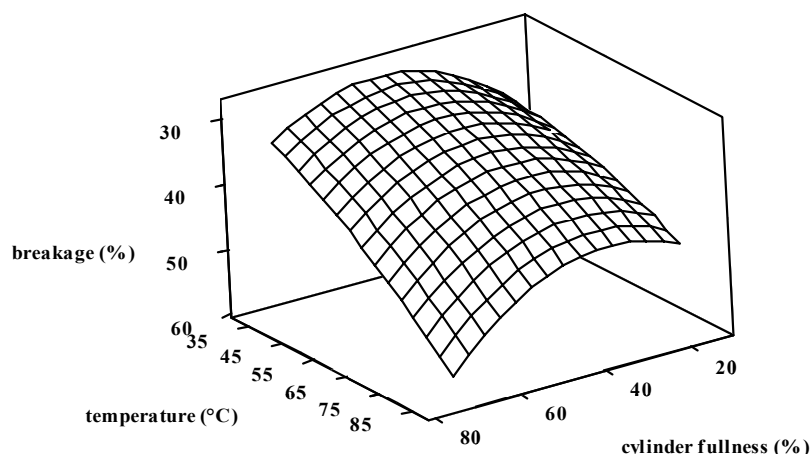
بهم خوردگی زیاد محصول باشد. حاصل این کار، سریع‌تر خشک شدن شلتوک و کم شدن زمان ماندگاری محصول در دمای بالاست. در نتیجه؛

با توجه به شکل ۳ در دمای‌های بالا، با افزایش سرعت چرخش استوانه خشک‌کن، میزان درصد شکستگی برنج کاهش یافت که به نظر می‌رسد به دلیل

که بیانگر رابطه خطی بین متغیر مستقل درصد میزان پر بودن و درصد شکستگی (افت) شلتوک برنج می‌باشد. همچنین درجه دوم پر بودن استوانه بر درصد شکستگی نیز در سطح احتمال $P < 0/0001$ معنی‌دار بود. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، به منحنی شکل انحنایی داده است. علاوه بر این با توجه به ضریب، میزان پر بودن مخزن استوانه کمترین اثر خطی را نسبت به فاکتورهای دما و سرعت چرخش استوانه نشان می‌دهد. گفتنی است که اثر متقابل فاکتورهای دما و پر بودن مخزن استوانه در سطح احتمال $P < 0/0001$ و همچنین فاکتورهای سرعت چرخش استوانه و پر بودن مخزن در سطح $P < 0/05$ بر مدل پیشنهادی درصد شکستگی معنی‌دار بود.

تنش‌های حرارتی کاهش یافته و شکستگی‌های کمتری در دانه شلتوک ایجاد خواهد شد، که معادل کاهش میزان افت است. در دماهای پایین تا نقطه مرکزی درصد ضایعات افزایش و با کمتر شدن سرعت چرخش، افت هم کمتر می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش دما در سرعت‌های کمتر بیشترین افت اتفاق می‌افتد که می‌توان گفت بدلیل حذف شدن ضرباتی است که توسط بدنه به شلتوک وارد می‌شود. به عبارت دیگر؛ در دمای پایین تأثیر سرعت چرخش استوانه بر درصد افت بیشتر از دما می‌باشد.

با توجه به تجزیه واریانس (ANOVA) در جدول (۴)، اثر میزان پر بودن استوانه بر میزان درصد شکستگی در سطح احتمال $P < 0/0001$ معنی‌دار شد



شکل ۴: اثر متقابل دما و پر بودن استوانه خشک‌کن بر درصد شکستگی شلتوک برنج

Figure 4. The interaction effect of temperature and cylinder fullness on percentage of breakage of paddy rice

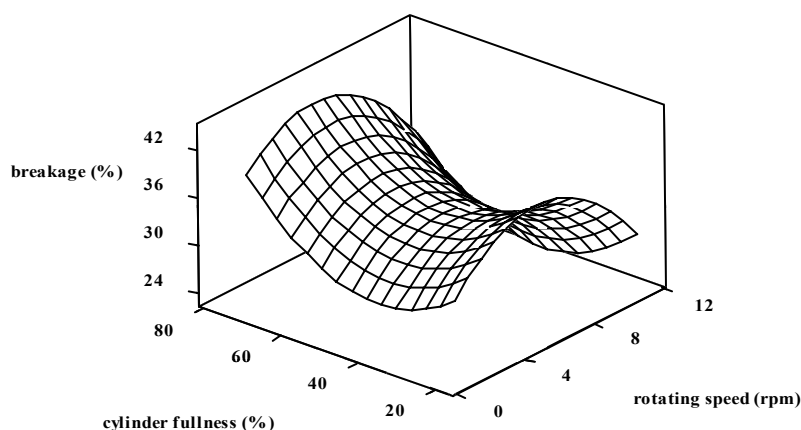
که باعث ایجاد تنش‌های حرارتی درون دانه شده و حجم زیاد محصول درون استوانه که شرایط بهم‌خوردگی یکنواخت را ندارند و به‌صورت یکدست (یکنواخت) خشک نشده‌اند، دانست. همچنین در پر بودن بیشینه مخزن با افزایش دما درصد شکستگی افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در مقادیر کمتر درصد

شکل (۴) اثر متقابل دما و پر بودن استوانه خشک‌کن را در حالتی که سرعت چرخش استوانه در سطح کدبندی صفر (۶ دور بر دقیقه) است نشان می‌دهد. شکل گویای آن است که درصد شکستگی در بیشترین مقدار پر بودن استوانه و بیشترین دما، بیشترین مقدار را داراست، که می‌توان آن را به دلیل دمای بالا

مرکزی (۶۰ درجه سانتی‌گراد) است نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۵، میزان افت در سرعت چرخش کم و میزان پر بودن مخزن زیاد نسبت به میزان افت در سرعت‌های چرخش بیشتر و میزان پر بودن مخزن کم، بیشتر است.

پر بودن استوانه کمتر است که می‌توان آن را بدلیل بهم خوردگی مناسب و یکنواخت خشک شدن محصول دانست.

شکل (۵) اثر متقابل درصد پر بودن استوانه و سرعت چرخش استوانه را در حالتی که دما در نقطه



شکل ۵: اثر متقابل پر بودن استوانه و سرعت چرخش استوانه بر درصد شکستگی شلتوک برنج
Figure 5. The interaction effect of cylinder fullness and rotating speed on percentage of breakage of paddy rice

احتمال $P < 0.0001$ معنی‌دار بود. همچنین آزمون عدم برازش معنی‌دار نبود. یعنی می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی درصد ترک استفاده کرد و مدل ارائه شده کفایت و صحت لازم را دارا می‌باشد. اثرات خطی هرکدام از پارامترها و نیز اثرات درجه دوم و اثرات متقابل آن‌ها، همگی با سطح بالای معنی‌داری در سطح احتمال $P < 0.0001$ اثرات بسیار معنی‌داری بر درصد ترک خوردگی در مرحله خشک‌کردن داشتند. شکل (۶)، نشان‌دهنده اثر دما و سرعت چرخش استوانه بر درصد ترک حاکی از آن است که بیشترین درصد ترک در بیشینه دما و سرعت چرخش کم استوانه می‌باشد. دلیل این اتفاق می‌تواند ناشی از تنش‌های حرارتی که بر دانه اعمال شده و بهم خوردگی کم به علت سرعت پایین چرخش استوانه- که شرایط برای تنش حرارتی را مساعدتر کرده، دانست. با افزایش دمای فرایند، رطوبت سطحی

مدل نهایی (رابطه ۲) به‌دست آمده برای میزان درصد شکستگی (افت) شلتوک براساس داده‌های کد شده و معنی‌دار بودن آن براساس جدول (۴) عبارت است از:

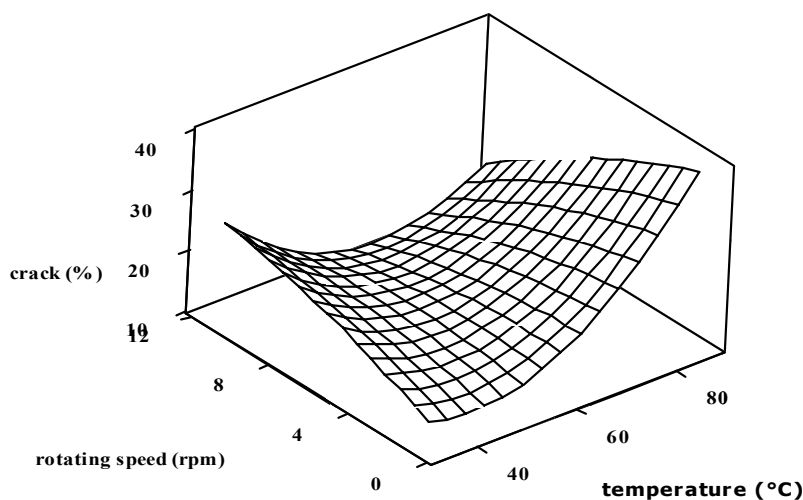
$$Y = 35.48 + 5.95A - 2.23B + 1.59C + 0.76A^2 - 5.08B^2 + 3.63C^2 - 3.42AB + 1.84AC - 0.72BC \quad \text{رابطه (۲)}$$

با توجه به ضرایب می‌توان نتیجه گرفت که دما، بیشترین تأثیر را در میزان تغییرات درصد شکستگی دارد. این نتیجه مطابق با نتایج بونازی و همکاران (۱۹۷۷) بود (۷). آنها نیز تأثیر دمای ورودی بر شاخص برنج سفید سالم را که از پارامترهای دیگر بیشتر بود، گزارش کردند.

درصد ترک خوردگی دانه شلتوک برنج: با توجه به نتایج تجزیه واریانس در جدول (۴) مدل سطح پاسخ درجه دو برای درصد ترک خوردگی در سطح

نشده؛ در نتیجه درصد ترک با شیب کمتری تغییر کرده است. در سرعت‌های زیاد چرخش استوانه و دمای کم هوای ورودی، درصد ترک افزایش یافته است. این موضوع نیز می‌تواند ناشی از ضربات مکانیکی حاصل از چرخش استوانه بر دانه شلتوک باشد.

دانه‌های شلتوک به سرعت خشک شده و فشار بخار شدید داخلی ایجاد شده باعث ایجاد تنش بزرگ در داخل دانه‌های شلتوک می‌گردد که موجب افزایش ترک خوردگی می‌شود (۲۱). در سرعت‌های بالای چرخش استوانه به سبب بهم خوردگی مناسب و زودتر خشک شدن محصول تنش زیادی به دانه اعمال

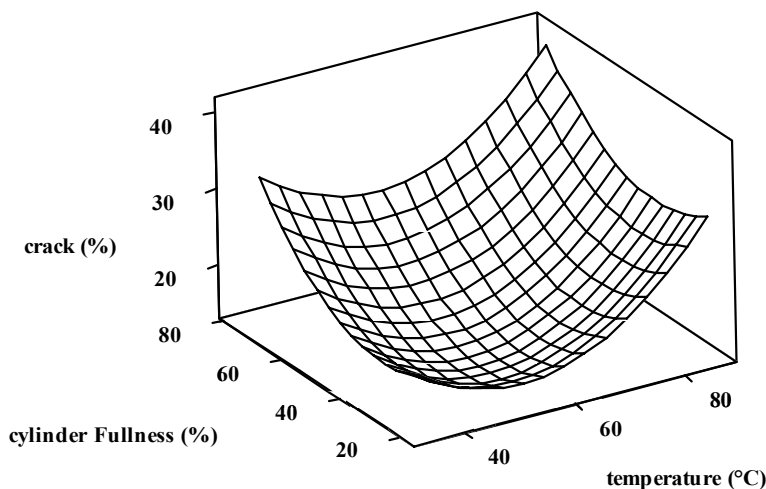


شکل ۶: اثر متقابل دما و سرعت چرخش بر میزان ترک خوردگی شلتوک برنج

Figure 6. The interaction effect of temperature and rotating speed on percentage of crack of paddy rice

ترک در دانه را ایجاد کرده است. این نتیجه می‌تواند ناشی از تنش‌های حرارتی بالا، به سبب بالا بودن دما، بهم خوردگی کم محصول و دیرتر خشک شدن شلتوک برنج دانست.

در شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش دمای هوای ورودی و درصد پر بودن مخزن؛ درصد ترک در دانه‌های خشک شده افزایش یافته به گونه‌ای که در بیشترین دما و درصد پر بودن مخزن، بیشترین درصد

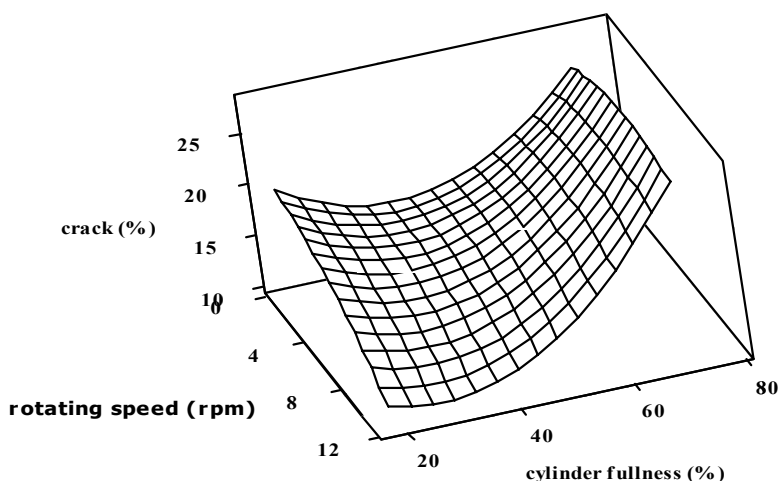


شکل ۷- اثر متقابل دما و میزان پر بودن بر میزان ترک خوردگی شلتوک برنج

Figure 7. The interaction effect of temperature and cylinder fullness on percentage of crack of paddy rice

طرفی با افزایش سرعت چرخش استوانه در هر میزان متفاوت پر بودن واکنش‌های متفاوتی نشان داده شده به طوری که در در بخشی میزان ترک خوردگی کاهش یافته و در بخشی افزایش یافته و در بخشی دیگری ثابت است.

شکل ۸ نیز نشان می‌دهد که در سرعت‌های مختلف چرخش استوانه با افزایش درصد پر بودن مخزن درصد ترک افزایش داشته که می‌توان آن را بدلیل بهم خوردگی کم محصول و یکنواخت خشک نشدن آن دانست. در نتیجه؛ دانه‌های تحت تنش حرارتی میانگین درصد ترک را افزایش داده‌اند. از



شکل ۸: اثر متقابل پر بودن مخزن و سرعت چرخش بر میزان ترک خوردگی شلتوک برنج

Figure 8. /The interaction effect of rotating speed and cylinder fullness on percentage of crack of paddy rice

شکستگی و ترک خوردگی دانه‌های شلتوک) می‌باشد. برای شلتوک برنج خشک شده، مدت زمان خشک شدن و درصد افت (درصد شکستگی و میزان ترک خوردگی شلتوک برنج) به‌عنوان پاسخ‌های اصلی برای تعیین میزان مطلوبیت خشک شدن در نظر گرفته می‌شود. در فرآیند بهینه‌یابی، اهمیت پاسخ‌ها با یکدیگر برابر در نظر گرفته شد و بهینه‌سازی با تکنیک بهینه‌یابی عددی انجام شد (۱۵). با توجه به شرایط موجود، دمای هوای ورودی ۵۶/۵۳ درجه سانتی‌گراد، سرعت چرخش استوانه ۱۰ دور بر دقیقه و میزان پر بودن استوانه ۵۴/۲۰ درصد به عنوان شرایط بهینه خشک کردن یافت شد.

هاشمی سلیمانی (۱۳۷۶) و تتر (۱۹۹۴)، در پژوهشی که اهمیت دمای ورودی بر شاخص برنج سفید را نشان می‌داد، بیان کردند که دمای مناسب

مدل نهایی (رابطه ۳) به‌دست آمده برای میزان درصد شکستگی (افت) شلتوک براساس داده‌های کد شده و معنی‌دار بودن آن براساس جدول ۳ عبارت است از.

$$Y=16.33+3.47A-1.53B+3.99C+5.33A^2-0.87B^2+3.46C^2-4.54AB-0.59AC+1.46BC \quad \text{رابطه (۳)}$$

با توجه به ضرایب می‌توان نتیجه گرفت که به‌دلیل ضریب بالایی که اثر درجه اول و درجه دوم دما و اثر متقابل دما و سرعت چرخش استوانه دارد؛ دما بیشترین تأثیر را بر میزان درصد ترک ایجاد شده در دانه شلتوک خشک شده داشت.

بهینه‌سازی: یکی از اهداف اصلی روش سطح پاسخ، پیدا کردن شرایط بهینه برای فرآیند مورد نظر می‌باشد و هدف از بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن، کم شدن مدت زمان خشک شدن و کاهش درصد افت (درصد

- energy and the kinetic of the fluid bed drying of paddy in terms of networks using propagation, Proceedings of the Fifth National Congress agricultural engineering and mechanization, Article ID, 588. (In Persian)
- Anonymous. 2016. World Rice Statistics. Available from: <http://ricestat.irri.org:8080/wrs/> (visited on 15/2/2017).
 - Amiri, E. 2014. Optimize the drying process of corn in a non-continuous rotary drum dryer, a master's thesis, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Golestan. (In Persian)
 - Babalís, S.J., and Belessiotis, V.G. 2004. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying. Journal of Food Engineering, 65: 449-458.
 - Badwaik, L.S., Prasad, K., and Deka, S.C. 2012. Optimization of extraction conditions by response surface methodology for preparing partially defatted peanut. International Food Research Journal, 19(1): 341-346.
 - Bas, D., Boyacı, H., and Smail, H. 2007. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. Journal of Food Engineering, 78(3): 836-845.
 - Bonazzi, C. Du Peuty, M.A., and Themelin, A. 1997. Influence of drying conditions on the processing quality of rough rice. Drying Technology, 3&4 (15): 1141-1157.
 - Brooker D.B., Bakker-Arkema F.W., and Hall C.W. 1992. Drying and Storage of Grain and Oilseeds. Van Nostrand Reinhold. New York. USA.
 - Doymaz, I. 2007. Air drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering, 78, 1291-1297.
 - Doymaz, I., and Pala. M. 2003. The thin layer drying characteristics of corn. Journal of Food Engineering, 60: 125-130.
 - Haghkhah, A., and Maghsoudlou, Y. 2001. Evaluation the height of the dryer and the effect of drying temperature on fracture grain paddy rice in Shalykoby

خشک کردن شلتوک باید کمتر از ۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد (۱۲ و ۲۳). در این پژوهش دمای مناسب برای خشک کردن شلتوک برنج برخلاف مطالعات تتر (۱۹۹۴) و هاشمی سلیمانی (۱۳۷۶) بالاتر از دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد تشخیص داده شد و علت این تفاوت ممکن است مربوط به نوع خشک‌کن مورد استفاده و همچنین رقم شلتوک خشک شده باشد.

نتیجه‌گیری

خشک کردن یکی از روش‌های افزایش ماندگاری محصولات کشاورزی به شمار می‌آید و شرایط خشک کردن نقش مهمی در بروز خصوصیات کیفی و افت نهایی محصول دارد. نتایج حاصل از تحقیق بیانگر کارایی مفید روش سطح پاسخ در بهینه‌یابی فرایند خشک کردن با خشک‌کن دوار ناپیوسته آزمایشگاهی بود. براساس نتایج به دست آمده هر سه عامل دمای هوای ورودی، سرعت چرخش استوانه دوار و میزان پر بودی تاثیر قابل توجهی بر خصوصیات کیفی و درصد افت داشتند و دما بیشترین تأثیر را نسبت به دیگر پارامترهای مستقل بر میزان افت داشت. مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش، تقریباً دارای مقادیر ضریب تبیین بالایی بودند و در بیشتر مدل‌ها، آزمون عدم برازش بی‌معنی بود که نشان دهنده کارایی مدل‌های ارائه شده در این مطالعه می‌باشد. نتایج آزمون بهینه‌یابی نیز نشان داد که شرایط مطلوب برای خشک نمودن شلتوک برنج با استفاده از خشک‌کن دوار ناپیوسته آزمایشگاهی، به کارگیری دمای ۵۶/۵۳ درجه سانتی‌گراد، سرعت چرخش استوانه ۱۰ دور بر دقیقه و میزان پر بودن استوانه ۵۴/۲۰ درصد بود.

منابع

- Amiri Chaijan, R. and Khoshtaghaza, M.H. 2008. Prediction of qualitative variables,

- Tarbiat Modarres University, p. 110. (In Persian)
18. Prasad, B.V.S., Chandra. P.K., and Bal, S. 1994. Drying parboiled rough rice in stationary, semi-fluidized and fluidized conditions. Transactions of the ASAE, 37(2): 589-594.
 19. Quanhong, L., and Caili, F. 2005. Application of response surface methodology for extraction optimization of germinant pumpkin seeds protein. Food Chemistry, 92, 701-706.
 20. Rahmani, H. 2011. The effect of moisture, rotational speed and the time of loading of the rice seed failure optimization testing machine, a master's thesis, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil.
 21. Rao, P.S., Bal, S., and Goswami. T.K. 2007. Modelling and optimization of drying variables in thin layer drying of parboiled paddy. Journal of Food Engineering, 78 (2), 480-487.
 22. Salar Bashi, D., Mortazavi, S.A., Rezaei, K., Rajaei, A., and Karimkhani, M.M. 2012. Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from Yarrow (*Achillea beibrestinii*) by response surface methodology, Food Sci. Biotechnology, 21(4), 1005-1011.
 23. Teter, N. 1987. Paddy Drying Manual. Rome: Food and Nutrition Series (FAO). Italy.
 24. Zou, T.B., Jia, Q., Li, H.W., Wang, C.X. and Wu, H.F. 2013. Response surface methodology for ultrasound-assisted extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. Mar. Drugs, 11, 1644-1655.
 - Gorgan, Iran's Sixteenth National Congress of the food industry (the first regional congress), Gorgan University of Agricultural Sciences and natural resources, Gorgan. (In Persian)
 12. Hashemi Solomon, S. 1996. The necessity to develop and implement comprehensive programs in the rice processing industry, the sixth annual report of the country's rice, publication of the Statistics Department of Agriculture, 2: 135-125. (In Persian)
 13. Horuz, E., Altan, A., and Maskan, M. 2012. Spray drying and process optimization of unclarified pomegranate (*Punica granatum*) juice. Drying Technology, 30(7): 787-798.
 14. Khoshtaqaza, M., Soleimani, M., and Shahedi, M. 2002. The relationship between healthy white rice yield (HRY) with crack and bending strength of paddy rice during the drying process, The Iranian Journal of Agricultural Science, 33 (1): 121-11. (In Persian)
 15. Li, J., Zhang, L. and Liu, Y. 2013. Optimization of extraction of natural pigment from purple sweet potato by RSM and its stability. Hindawi publishing corporation, Journal of Chemistry, 12, 1-5.
 16. Malek, S., Qazvini, H.R., and Sltanabady, M. 2008. Determination the appropriate moisture content of rice. the Fifth National Congress agricultural engineering and mechanization, Code Article 190. (In Persian)
 17. Mohajeran, S.A. 2010. Construction of infrared radiation laboratory dryer for drying paddy rice. Mechanics of Agricultural Machinery MSc Thesis,

Optimization of paddy rice drying using response surface methodology

O. Gharnasi Gharavi¹, H.A. Shamsabadi^{2*}, A.H. Afkarisayyah³, A. Askari³, M. Rasekh³

¹M.Sc. student, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

²Assistant Professor, Department of Mechanics of Agricultural Machinery, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

³Associate Professor, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 2016/12/05; Accepted: 2017/04/16

Abstract

Background and objectives: Rice is a very popular cereal in world and very important from economic point of view. The problems of drying paddy rice is lack of drying uniformity in the paddy rice that creates stress temperature and moisture and thus will cause losses in the later stages. The purpose of this research was to develop a high performance system for processing the paddy to healthy white rice in the shortest drying time.

Materials and methods: In this study, to reduce losses and increase the drying rate, an innovative laboratory rotary dryer machine was used. The response surface methodology (RSM) with central composite design was used for modeling and determining the optimum processing conditions for paddy drying. Independent variables for this process were temperature (40 to 80°C), cylinder rotation speed (2 to 10 rpm) and the cylinder fullness (25 to 66%). The percentage of breakage, percentage of crack and drying time were used as response parameters to develop predictive models and optimize the drying process.

Results: The results showed that the temperature, cylinder rotation speed and cylinder fullness had significant effect ($P < 0.01$) on the percentage of breakage, percentage of crack and drying time, as temperature was the most effective parameter. According to optimization process, the minimum losses (percentage of breakage and percentage of crack) and drying time were found with the inlet air temperature 56.53 °C, cylinder rotation speed of 10 rpm and the cylinder fullness of 54.20%.

Conclusion: Conditions and parameters of drying process had important rule in the final quality properties and losses of paddy rice. Our results revealed that RSM could be used to develop adequate prediction models for describing quality changes in paddy rice during drying. The changes in the quality parameters were adequately described by quadratic model. Also, the result showed that inlet temperature was more important than cylinder rotation speed and cylinder fullness on losses of paddy rice.

Keywords: Optimization, Paddy rice, drying, Losses, Response surface methodology

* Corresponding author: shamsabadi95@yahoo.com

