

اثر دما و رطوبت نهایی شلتوک بر مدت زمان خشک شدن و خصوصیات تبدیل در خشک‌کن بسترسیال با دو منبع حرارتی

رقیه پورباقر، محمدهاشم رحمتی، محمدرضا علیزاده*، عباس رضایی اصل و ابراهیم اسماعیل‌زاده**

* نگارنده مسئول: موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران. تلفن: ۰۵۲۰۳۳۶۹۰۰۱۳، پیام‌نگار: alizadeh_mohammadreza@yahoo.com

** به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ دانشیار موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران؛ و استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱/۲۲

چکیده

تعیین روش مناسب خشک کردن شلتوک یکی از عوامل موثر بر کاهش ضایعات تبدیل است. در این تحقیق، اثر دمای هوا در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس (معادل شدت تابش‌های ۰/۳۱، ۰/۴۲ و ۰/۵۳ وات بر سانتی‌متر مکعب) و رطوبت نهایی شلتوک در سه سطح ۸ تا ۹، ۱۰ تا ۱۰ و ۱۱ درصد (بر مبنای خشک) بر مدت زمان خشک کردن و خصوصیات تبدیل رقم دمسیب در خشک‌کن بسترسیال با دو منبع حرارتی (تابش مادون قرمز و جریان هوای گرم) بررسی شد. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که اثر دما و روش خشک کردن روی مقدار شکستگی و ترک خوردگی دانه و مدت زمان خشک شدن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. با افزایش دمای هوای خشک‌کن از ۴۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، ترک خوردگی (از ۵ به ۱۴ درصد) و شکستگی شلتوک (از ۲۶ به ۳۹ درصد) افزایش و مدت زمان خشک شدن از ۹۶۴ دقیقه به ۲۴۲ دقیقه کاهش می‌یابد. در هر سطح از دما و رطوبت مورد آزمایش، درصد ترک خوردگی و شکستگی دانه‌ها در خشک‌کن بسترسیال مادون قرمز کمتر است تا در خشک‌کن هوای گرم. میزان ترک خوردگی و شکستگی شلتوک در رطوبت ۸ تا ۹ درصد و دمای ۴۰ درجه سلسیوس در خشک‌کن مادون قرمز کمترین مقدار (به ترتیب ۵/۶۷ و ۲۶/۹ درصد) و در رطوبت ۸ تا ۹ درصد و دمای ۶۰ درجه سلسیوس در خشک‌کن جریان هوای گرم بیشترین مقدار (به ترتیب ۱۴ و ۳۹/۵ درصد) است.

واژه‌های کلیدی

تابش مادون قرمز، خشک‌کن بسترسیال، خصوصیات تبدیل، رطوبت شلتوک

مقدمه

درصد افزایش یابد تا نیاز آینده مصرف کنندگان را تأمین کند (Mohadesi et al., 2013). تولید برنج در ایران با متوسط میزان رشد ۱/۶ درصد از ۱۲۹۴ هزار تن در سال ۱۳۸۰ به ۱۵۳۴ هزار تن در سال ۱۳۹۱ افزایش یافته است. که حدود ۰/۲۱ درصد از تولید جهانی این محصول است (FAO, 2012).

برنج یکی از گیاهان مهم تیره غلات و غذای اصلی مردم در کشورهای آسیایی است که بخش زیادی از انرژی غذایی آنها تأمین می‌کند. با توجه به رشد زیاد جمعیت در آسیا که حدود ۹۰ درصد برنج دنیا در آن تولید و مصرف می‌شود، تولید سالیانه برنج باید حدود ۱/۷

خشک کردن کاهش می‌یابد (Dosite *et al.*, 1989; Hashimoto *et al.*, 1991; Afzal & Abe, 1997). اما، قرارگیری طولانی مدت مواد بیولوژیک در معرض تابش مادون قرمز موجب ترک خوردگی آنها می‌شود (Jones, 1992).

همچنین گزارش شده است که تابش مادون قرمز خواص فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و کاربردی دانه‌های جو را تغییر می‌دهد (Fasina *et al.*, 1996).

نتایج تحقیقات افضل و همکاران نیز نشان می‌دهد که روش تابش مادون قرمز، در مقایسه با هوای گرم، موجب افزایش سرعت خشک شدن بذر جو می‌شود و کیفیت دانه‌های خشک شده در این روش با افزایش شدت تابش، کاهش پیدا می‌کند. پارامترهای کیفی مورد ارزیابی در این آزمایش درصد جوانه‌زنی و جرم مخصوص توده دانه‌ها بوده است (Afzal *et al.*, 1999).

گروهی از محققان خشک کردن شلتوک با دو روش جریان هوای گرم و مادون قرمز را بررسی کرده‌اند. تغییرات مقدار رطوبت و دمای شلتوک طی فرآیند خشک کردن، هم به صورت تئوری با استفاده از معادلات ریاضی انتقال حرارت و جرم و هم به صورت تجربی نیز بررسی و نشان داده شده است نتایج معادلات با داده‌های تجربی مطابقت دارد. مدل‌ها نشان دادند که تابش مادون قرمز، نسبت به جریان هوای گرم، تأثیر بیشتری بر کاهش رطوبت شلتوک دارد و با افزایش شدت تابش مادون قرمز دمای داخلی دانه برنج افزایش می‌یابد (Meeso *et al.*, 2007).

زارع و همکاران (Zare *et al.*, 2012) خشک کردن شلتوک با رطوبت اولیه ۲۵ درصد بر پایه خشک را با خشک‌کن جریان هوای گرم-تابش مادون قرمز بررسی کردند. پارامترهای متغیر در تحقیق آنها دما در سه سطح (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس)، شدت تابش در چهار سطح (۰، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ وات بر سانتی‌متر مربع) و

با توجه به افزایش جمعیت و محدودیت‌های افزایش سطح زیر کشت برنج، مهم‌ترین هدف در صنعت فرآوری این گیاه استراتژیک، تولید محصول با بالاترین کیفیت است. برای دستیابی به این هدف، لازم است شلتوک بلافاصله پس از برداشت خشک شود تا از بروز فساد بیولوژیک و ضایعات میکروبی در آن جلوگیری شود (Nasrnia *et al.*, 2012).

طی سالیان متمادی، خشک‌کن‌های سیلویی تنها خشک‌کن در صنعت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما در چند سال اخیر نوع جدیدی از خشک‌کن به نام خشک‌کن بسترسیال برای انواع محصولات کشاورزی وارد صنعت شده است. در خشک‌کن‌های بسترسیال دانه، دانه‌ها نقش ذرات جامد و هوای داغ نقش سیال را بازی می‌کند. هوای داغ از پایین صفحه مشبک خشک‌کن به شدت به درون محفظه وارد می‌شود، بر نیروی وارد بر وزن دانه‌ها غلبه می‌کند و دانه‌ها را به غلایان درمی‌آورد (Sohrabi, 1998). یکی از مزایای عمده خشک‌کن بسترسیال، یکنواختی در انتقال جرم و حرارت بین دو فاز جامد و گاز است. با توجه به این خصوصیت، به دور از هر گونه اثر نامطلوب در فرآیند خشک کردن، دمایی به مراتب بالاتر را می‌توان به کار برد. همچنین برای محصولات حساس به حرارت می‌توان با افزایش سرعت جریان هوا و کاهش دما، آنها را خشک کرد (Kunii & Levenspiel, 1991).

به‌کارگیری خشک‌کن ترکیبی بسترسیال-مادون قرمز روشی است برای به دست آوردن مواد غذایی مانند غلات، حبوبات، سبزی‌ها و سایر میوه‌ها با کیفیت بالا که علاوه بر ویژگی‌های خشک‌کن بسترسیال ویژگی‌هایی مانند کاهش زمان فرآیند خشک کردن، کیفیت بالای محصول خشک شده و دمای یکنواخت محصول را داراست (Mohajeran *et al.*, 2006).

مطالعات در مورد خشک کردن مواد به روش تابش مادون قرمز نشان می‌دهد که با افزایش شدت تابش، زمان

بستر سیال برای خشک کردن نمونه‌های ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ گرمی شلتوک با دو منبع حرارتی هوای گرم و مادون قرمز به کار گرفته شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه شامل یک دمنده گریز از مرکز نوع جریان شعاعی با موتوری به قدرت ۳ اسب بخار است. محفظه سیال‌سازی خشک‌کن استوانه‌ای است به قطر ۲۰ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از جنس پلکسی گلاس شفاف است که به منظور تسهیل در سیال‌سازی دانه‌ها و ایجاد سیال‌سازی یکنواخت یک مخزن کمکی از جنس استیل به قطر سه برابر قطر محفظه پلکسی گلاس در بالای آن نصب شده است. برای اندازه‌گیری دمای محفظه خشک‌کن، سنسورهای دقیق دما (ELREHA ساخت کشور آلمان مدل GMBH) با دقت ± 1 درجه سلسیوس در قسمت ورودی، وسط و انتهای محفظه نصب شد که با هرگونه تغییر ناگهانی، شرایط را تنظیم و تعدیل می‌کند. به منظور گرم کردن هوای خشک‌کن در روش متداول جریان هوای گرم از یک گرم‌کن با توان ۱۶۵۰ وات استفاده شد. در روش تابش مادون قرمز از لامپ‌های مادون قرمز با شدت تابش ۰/۰۳۱، ۰/۰۴۲ و ۰/۰۵۳ وات بر سانتی‌متر مکعب برای تأمین دمای هوای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس استفاده شد. برای اندازه‌گیری رطوبت هوا در سیکل بسته از سنسور اندازه‌گیر رطوبت (SAMWON ساخت کشور کره مدل SU-503B) با دقت ± 1 درصد بهره گرفته شد به طوری که پس از تنظیم دستگاه روی دما و رطوبت مشخص، هوای محیط که با فن کشیده می‌شود از داخل سیستم رطوبت‌گیر و رطوبت دهنده عبور می‌کند و رطوبت آن به رطوبت مشخص شده تغییر می‌یابد سپس هوا به کمک چند المنت گرم می‌شود و به دمای مورد نظر جهت خشک کردن نمونه‌ها می‌رسد.

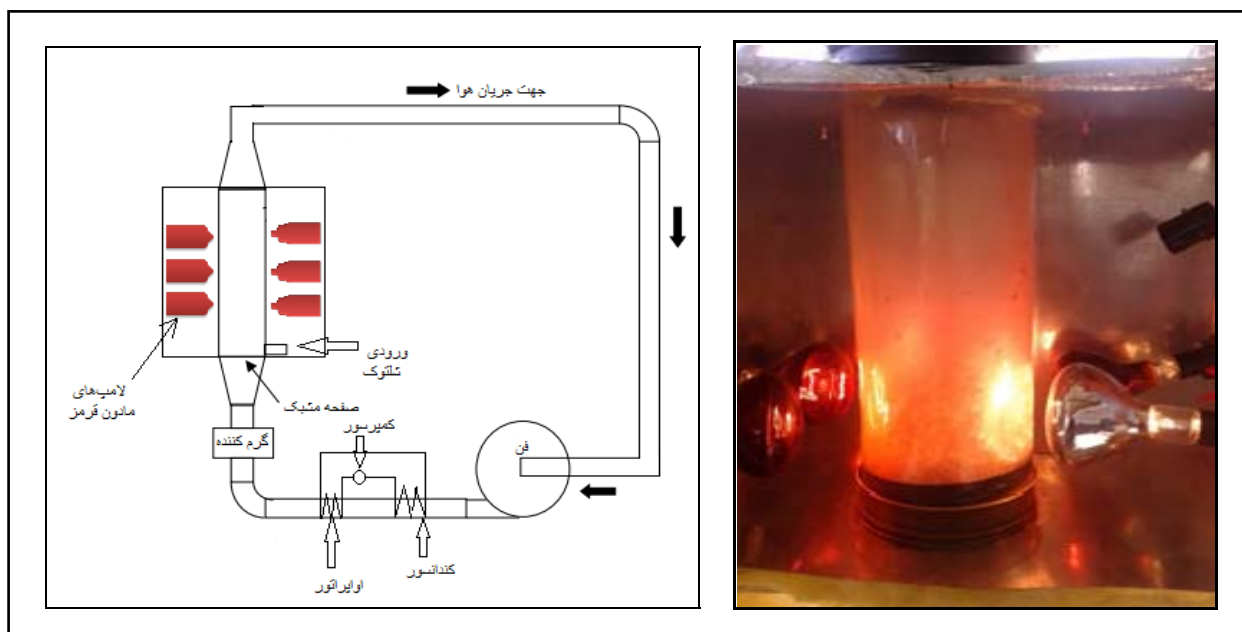
سرعت هوا در سه سطح (۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ متر بر ثانیه) بود؛ این محققان مقاومت خمشی برنج قهوه‌ای، میزان ترک‌خوردگی دانه‌ها و زمان خشک کردن را بررسی کردند و نشان دادند که افزایش دمای هوای ورودی خشک‌کن و نیز افزایش شدت تابش مادون قرمز باعث کاهش مدت زمان خشک کردن می‌شود. بالاترین مقاومت خمشی و کمترین درصد ترک‌خوردگی زمانی بود که شلتوک با روش ترکیبی هوای گرم و تابش مادون قرمز خشک شد (Zare et al., 2012). افزایش توان اعمال شده مادون قرمز، سبب افزایش سریع دما در سطح ماده و به دنبال آن افزایش فشار بخار درون ماده و در نتیجه شدت بالای خشک شدن می‌شود (Datta & Ni, 2002).

تاکنون بیشتر تحقیقات در زمینه خشک کردن شلتوک در خشک‌کن‌های بستر سیال یا در خشک‌کن‌های مادون قرمز بستر ثابت با سیکل باز بوده است و در باره روش مقایسه‌ای خشک کردن شلتوک در خشک‌کن بستر سیال و مادون قرمز بستر سیال با سیکل بسته کمتر تحقیق شده است. بنابراین، بررسی مقایسه‌ای خشک کردن شلتوک با دو روش خشک کردن تابش مادون قرمز و روش متداول جریان هوای گرم در سیکل بسته از نظر میزان ترک‌خوردگی، زمان خشک شدن و میزان ضایعات محصول برنج ضروری به نظر می‌رسد. این تحقیق با هدف بررسی اثر دمای هوای ورودی، رطوبت نهایی شلتوک بر مدت زمان خشک شدن، درصد ترک‌خوردگی دانه، شکستگی برنج و راندمان تبدیل در خشک‌کن بستر سیال با دو منبع حرارتی مادون قرمز و هوای گرم برای شلتوک رقم دم‌سیاه (رقم غالب در استان گلستان) اجرا شد.

مواد و روش‌ها

خشک‌کن آزمایشگاهی

در این تحقیق، یک نمونه خشک‌کن آزمایشگاهی



شکل ۱- دستگاه خشک‌کن بستر سیال

روش آزمایش

نمونه‌های شلتوک تا سطوح رطوبتی ۸ تا ۹، ۹ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۱۱ درصد بر پایه خشک در سه سطح دمای هوای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس (و سرعت جریان هوای ۴/۵ متر بر ثانیه) با سه تکرار خشک شدند.

به منظور مطالعه پارامترهای تبدیل نمونه‌های شلتوک خشک شده، سه نمونه ۱۵۰ گرمی از شلتوک‌های خشک شده به طور تصادفی انتخاب شد. از پوست‌کن آزمایشگاهی برنج (SATAKE مدل THU ساخت کشور ژاپن) برای پوست‌کنی نمونه‌های شلتوک استفاده شد. خروجی پوست‌کن که برنج قهوه‌ای است برای سبوس‌برداری به محفظه ماشین سفیدکن ریخته شد. سفیدکن اصطلاحی برنج (McGill Miller ساخت کشور آمریکا) برای فرآیند سفیدکنی به کار گرفته شد. برای جدا کردن دانه‌های سالم از دانه‌های شکسته، از یک الک دوار (SATAKE مدل TRG 058 ساخت کشور ژاپن) استفاده شد. بعد از عملیات تبدیل، وزن برنج قهوه‌ای، برنج سفید سالم و برنج سفید شکسته به دست آمد و شاخص‌های درصد ترک‌خوردگی، درصد شکستگی، درجه سفیدشدگی

رقم شلتوک مورد استفاده طارم دم‌سیاه (رقم دانه بلند با کیفیت مطلوب) بود که از یکی از مزارع شالیزاری گرگان تهیه و در هنگام حمل و نقل در محفظه‌ای پلاستیکی دو لایه قرار داده شد تا از وارد آمدن آسیب‌های مکانیکی، تنش‌های رطوبتی و عوامل منفی مؤثر در اخذ نتیجه از آزمایش‌ها جلوگیری شود. رطوبت اولیه دانه‌ها با استفاده از استاندارد انجمن مهندسان کشاورزی آمریکا (ASAE, 2000) تعیین شد. بدین منظور نمونه‌های ۱۰ گرمی به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند و مقدار رطوبت ۱۵ درصد بر مبنای خشک به دست آمد. جهت دستیابی به حالت پایدار در سیستم و قبل از ریختن نمونه‌ها، خشک‌کن به مدت ۲ ساعت به کار انداخته شد. در هر مرحله، ۲۰۰ گرم شلتوک به درون محفظه خشک‌کن ریخته شد. طی عملیات خشک کردن، نمونه‌ها با استفاده از یک ترازوی دیجیتال (Satorius ساخت کشور آلمان) با دقت ± 0.1 درصد در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای وزن شدند.

و راندمان تبدیل محاسبه شدند. در شکل ۲ تصویر الک دوار، سفیدکن و پوست کن نشان داده شده است.



شکل ۲- الف. الک دوار، ب. سفیدکن، ج. پوست کن

ترک عرضی کامل) شمارش شد. پس از هر مرحله از آزمایش خشک کردن، بار دیگر دانه‌های ترک دار شمارش شد و میزان ترک خوردگی قبل از عملیات خشک کردن از آن کسر گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها بر پایه آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و تجزیه واریانس سه طرفه با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (9.1, 2004) انجام گرفت و در صورت معنی‌داری آنالیز واریانس تیمارها ($P < 0.05$) اثر متقابل آنها در سطح احتمال ۰/۰۵ با آزمون LSD بررسی و نمودارها با نرم‌افزار Microsoft office Excel 2010 رسم شد.

$$(1) \quad 100 \times \frac{\text{مجموع وزن برنج سالم و خرده برنج}}{\text{وزن اولیه شلتوک}} = \text{راندمان تبدیل}$$

$$(2) \quad \text{درجه سفیدی} = \frac{\text{جرم سبوس برداشته شده از برنج قهوه‌ای}}{\text{جرم برنج قهوه‌ای}}$$

$$(1) \quad \text{درصد شکستگی} = \frac{\text{وزن برنج سفید شکسته}}{\text{مجموع وزن برنج سالم و شکسته}} \times 100$$

به منظور اندازه‌گیری درصد ترک خوردگی دانه‌ها، یک دستگاه ترک سنج (Mahsa ساخت ایران) به کار گرفته شد. این دستگاه شامل یک لامپ فلوروسنت است که زیر صفحه‌ای مشبک نصب می‌شود. برای محاسبه درصد ترک خوردگی قبل از شروع عملیات خشک کردن ابتدا به طور تصادفی سه نمونه ۵۰ تایی از برنج مورد نظر انتخاب و پوست خارجی آنها به دقت جدا شد. با قراردادن دانه‌های بدون پوست برنج قهوه‌ای روی شیارهای دستگاه ترک‌بین، دانه‌های ترک‌دار (دانه‌های با

نتایج و بحث

جدول ۱ تجزیه واریانس اثر دمای هوا، نوع خشک‌کن و رطوبت نهایی شلتوک را بر خصوصیات تبدیل برنج رقم طارم نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج نشان می‌دهد که اثر رطوبت نهایی شلتوک بر پارامترهای درصد ترک خوردگی، درصد شکستگی، راندمان تبدیل و درجه سفیدشدگی معنی‌دار نیست. اثر دمای هوا روی درصد ترک خوردگی و درصد شکستگی در سطح احتمال یک

درصد معنی‌دار است. همچنین اثر نوع دستگاه خشک‌کن روی درصد ترک‌خوردگی، درصد شکستگی و راندمان تبدیل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. اثر متقابل رطوبت و دما روی درصد ترک‌خوردگی و درصد شکستگی در سطح یک درصد معنی‌دار است. اثر متقابل رطوبت در نوع خشک‌کن و اثر متقابل دما در نوع خشک‌کن روی هیچ یک از پارامترها معنی‌دار نیست. اثر دمای هوا، رطوبت نهایی شلتوک و نوع خشک‌کن و همچنین اثر متقابل آنها بر مدت زمان خشک شدن نمونه‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است.

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر دما، نوع خشک‌کن و رطوبت نهایی شلتوک بر خصوصیات تبدیل برنج

میانگین مربعات						
منابع تغییرات	درجه آزادی	درصد ترک‌خوردگی	درصد شکستگی	راندمان تبدیل	درجه سفیدشدگی	زمان (دقیقه)
مقدار رطوبت	۲	۲/۷۴ ^{ns}	۲۷/۵۹۳ ^{ns}	۰/۹۱۸ ^{ns}	۱/۷۴۰ ^{ns}	۳۹۹۲۶۶/۳ ^{**}
دمای هوا	۲	۵۸/۹۶۲ ^{**}	۱۹۲/۶۱۱ ^{**}	۰/۰۵۰ ^{ns}	۱/۷۳۱ ^{ns}	۱۵۹۰۶۵۹/۷ ^{**}
نوع دستگاه خشک‌کن	۱	۱۱۲/۶۶۶ ^{**}	۱۶۳/۸۳۸ ^{**}	۳/۷۰ ^{ns}	۶/۷۴۸ ^{ns}	۱۹۲۶۶۶۶/۶ ^{**}
مقدار رطوبت × دمای هوا	۴	۳۰/۴۰۷ ^{**}	۶۳/۳۲۰ ^{**}	۰/۱۲۹ ^{ns}	۰/۷ ^{ns}	۴۱۷۰۰/۷ ^{**}
مقدار رطوبت × نوع خشک‌کن	۲	۸/۲۲۲ ^{ns}	۱۳/۶۹۵ ^{ns}	۰/۶۸۸ ^{ns}	۱/۱۴۹ ^{ns}	۷۹۵۰۴/۲ ^{**}
دمای هوا × نوع خشک‌کن	۲	۱۰/۶۶۶ ^{ns}	۳۹/۴۰۴ ^{ns}	۰/۴۷۹ ^{ns}	۵/۲۰۹ ^{ns}	۵۵۸۰۶۸/۱ ^{**}
دمای هوا × مقدار رطوبت × نوع خشک‌کن	۴	۲۲/۵۵۵ ^{**}	۳۳/۹۱۱ ^{ns}	۰/۵۷۰ ^{ns}	۱/۲۰۹ ^{ns}	۱۹۲۲۸۲/۶ ^{**}
خطای آزمایش	۳۴	۴/۵۴۴	۱۲/۹۸۴	۰/۳۱۷	۱/۹۰۳	۱۷۰۴/۳
ضریب تغییرات	-	۲۳/۸۸	۱۱/۴۲۰	۴/۲۶	۲/۸۸	۱۰/۶

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns: عدم اختلاف معنی‌دار

می‌یابد. در رطوبت ۸ تا ۹ درصد، بیشترین و کمترین درصد ترک‌خوردگی به ترتیب در دمای ۶۰ و ۴۰ درجه سلسیوس به دست آمده است. در رطوبت ۹ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۱۱ درصد، درصد ترک‌خوردگی در هر سه سطح دما اختلاف معنی‌داری نداشته است. بنابراین، بیشترین درصد ترک‌خوردگی (۱۴/۰۰ درصد) مربوط به رطوبت ۸ تا ۹ درصد و دمای ۶۰ درجه سلسیوس (معادل شدت تابش ۰/۰۵۳ وات بر سانتی‌متر مکعب) است و کمترین درصد ترک‌خوردگی (۵/۶۷ درصد) در دمای ۴۰ درجه سلسیوس

مقایسه میانگین اثر متقابل رطوبت نهایی شلتوک و دمای هوا بر درصد ترک‌خوردگی دانه در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در دمای ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس، بین هر سه رطوبت از نظر درصد ترک‌خوردگی اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. در دمای ۶۰ درجه سلسیوس درصد ترک‌خوردگی در رطوبت ۹ تا ۱۰ درصد اختلاف معنی‌داری با دو سطح رطوبتی دیگر دارد و با افزایش رطوبت از ۸ تا ۹ درصد به ۱۰ تا ۱۱ درصد، میزان ترک‌خوردگی به طور معنی‌داری کاهش

در شرایط متداول بستر ثابت، دمای حدود ۴۰ درجه سلسیوس برای خشک کردن شلتوک استفاده می‌شود و با توجه به اینکه یکی از مزایای خشک‌کن‌های بستر سیال استفاده از دمای بالاست (Khoshtaqa et al., 2007)، بنابراین استفاده از دمای بالا تا محدوده‌ای معین در خشک‌کن بسترسیال تأثیر معنی‌داری بر درصد ترک‌خوردگی ندارد، اما با بالا بردن بیش از حد دما درصد ترک‌خوردگی افزایش می‌یابد. بنابراین، به منظور صرفه جویی در زمان خشک شدن، می‌توان به جای افزایش دما از سرعت بیشتر جریان هوا استفاده کرد تا تأثیر نامطلوب کمتری بر کیفیت تبدیل محصول داشته باشد (Chen et al., 1997). در دیگر خشک‌کن‌های برنج (غیر از بسترسیال جریان هوای گرم) کاهش رطوبت باعث افزایش درصد ترک‌خوردگی می‌شود (Minaei et al., 2005).

(معادل شدت تابش ۰/۰۳۱ وات بر سانتی‌متر مکعب) و رطوبت ۸ تا ۹ درصد به دست آمده است. نتایج به دست آمده را می‌توان این‌طور توضیح داد که افزایش دما باعث ایجاد تنش‌های حرارتی در داخل دانه می‌شود و زمینه ایجاد ترک و شکستگی را در فرایند تبدیل ایجاد می‌کند. درصد ترک‌خوردگی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس با افزایش رطوبت افزایش یافته در حالی که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس با افزایش رطوبت کاهش یافته است. خدادادی در تحقیقاتش به نتایج مشابهی رسید. نتایج تحقیقات خدادادی نشان می‌دهد که درصد ترک‌خوردگی در دمای ۴۵ درجه سلسیوس با افزایش رطوبت افزایش می‌یابد در حالی که در دماهای ۵۰ و ۵۵ درجه سلسیوس با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد (Khodadadi, 2012). از عوامل مؤثر بر خرد شدن برنج تنش‌هایی است که در نتیجه دفع رطوبت در آن ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل رطوبت نهایی شلتوک و دمای هوا بر درصد ترک‌خوردگی دانه

دما (درجه سلسیوس)			رطوبت
۶۰	۵۰	۴۰	(بر پایه وزن خشک)
۱۴/۰۰ ^{Aa}	۸/۳۳ ^{Ab}	۵/۶۷ ^{Ab}	۹ تا ۸
۱۰/۰۰ ^{ABa}	۷/۶۷ ^{Aa}	۸/۰۰ ^{Aa}	۱۰ تا ۹
۹/۰۰ ^{Ba}	۸/۳۳ ^{Aa}	۹/۳۳ ^{Aa}	۱۱ تا ۱۰

حروف کوچک مشترک در هر سطر و حروف بزرگ مشترک در هر ستون مربوط به مقایسه میانگین تغییرات به ترتیب دمای هوا و رطوبت هستند.

افزایش یافته است. در رطوبت ۹ تا ۱۰ درصد، درصد شکستگی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس با دو دمای دیگر اختلاف معنی‌داری ندارد اما درصد شکستگی در دو دمای ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌داری نشان می‌دهد یعنی با افزایش دما میزان شکستگی از ۲۸/۶۹ به ۳۵/۵۲ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین، بیشترین درصد شکستگی برنج سفید در رطوبت ۸ تا ۹ درصد و دمای ۶۰ درجه سلسیوس (معادل شدت تابش ۰/۰۵۳ وات بر

مقایسه میانگین اثر متقابل رطوبت نهایی شلتوک و دمای هوا بر درصد شکستگی برنج سفید (جدول ۳) نشان می‌دهد که در رطوبت ۸ تا ۹ درصد بین دمای ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس و در رطوبت ۱۰ تا ۱۱ درصد بین دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس از نظر درصد شکستگی برنج اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارد، در حالی که با افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس در رطوبت ۸ تا ۹ درصد، میزان شکستگی از ۳۲/۰۹ به ۳۹/۵۴ درصد

سانتی‌متر مکعب) و کمترین درصد شکستگی برنج سفید در رطوبت ۸ تا ۹ درصد و دمای ۴۰ درجه سلسیوس (معادل شدت تابش ۰/۳۱ وات بر سانتی‌متر مکعب) به دست آمده است. همان‌طور که در جدول مشخص شده است، درصد شکستگی برنج سفید در دمای ۴۰ درجه

سلسیوس با افزایش رطوبت افزایش یافته در حالی که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس با افزایش رطوبت کاهش یافته است که البته این کاهش درصد شکستگی برنج در رطوبت‌های مختلف در دمای ۵۰ درجه سلسیوس معنی‌دار نیست.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل رطوبت نهایی شلتوک و دمای هوا بر درصد شکستگی برنج سفید

رطوبت (بر پایه وزن خشک)	دما (درجه سلسیوس)		
	۶۰	۵۰	۴۰
۹ تا ۸	۳۹/۵۴ ^{Aa}	۳۲/۰۹ ^{Ab}	۲۶/۹۹ ^{Ab}
۱۰ تا ۹	۳۵/۵۲ ^{Aa}	۲۹/۸۸ ^{Aab}	۲۸/۶۹ ^{Ab}
۱۱ تا ۱۰	۳۰/۲۶ ^{Ba}	۳۰/۶۹ ^{Aa}	۳۰/۳۲ ^{Aa}

حروف کوچک مشترک در هر سطر و حروف بزرگ مشترک در هر ستون مربوط به مقایسه میانگین تغییرات به ترتیب دمای هوا و رطوبت هستند.

بالاتر است (۳۳/۲۹ در برابر ۲۹/۸۱ درصد). استفاده از روش تابش مادون قرمز، در مقایسه با هوای گرم علاوه بر سرعت بخشیدن به عملیات خشک کردن، تلفات ناشی از روش‌های نامناسب خشک کردن دانه برنج را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد (Mohammad Alami & Maqsoudlo, 2011).

با توجه به شکل ۳، بین درصد شکستگی برنج سفید خشک شده در خشک‌کن بستر سیال جریان هوای گرم و مادون قرمز اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در خشک‌کن بستر سیال با منبع حرارتی جریان هوای گرم، در مقایسه با خشک‌کن بسترسیال با منبع حرارتی مادون قرمز، درصد شکستگی برنج خشک شده



شکل ۳- نمودار متوسط درصد شکستگی در روش‌های مختلف خشک کردن

بین دمای ۵۰ درجه سلسیوس و دو دمای دیگر اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و در گروه یکسانی قرار داده شده- اند؛ ولی در این سطح رطوبتی، مدت زمان خشک شدن شلتوک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به‌طور معنی‌داری کمتر است تا در دو دمای دیگر. طولانی‌ترین مدت زمان خشک شدن شلتوک در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و رطوبت ۸ تا ۹ درصد (با میانگین ۹۶۴/۲ دقیقه) و کوتاه-ترین مدت زمان خشک شدن شلتوک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و رطوبت نهایی ۱۰ تا ۱۱ درصد (با میانگین ۷۰ دقیقه) دیده می‌شود. با افزایش دما، مدت زمان خشک شدن، به علت افزایش گرادیان حرارتی در داخل جسم و در نتیجه افزایش سرعت تبخیر رطوبت محصول، کاهش می‌یابد (Khodadadi et al., 2012).

مقایسه میانگین اثر متقابل رطوبت در دما بر مدت زمان خشک شدن در جدول ۴ آمده است. داده‌ها نشان می‌دهد که در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس (معادل شدت تابش های ۰/۰۳۱ و ۰/۰۴۲ وات بر سانتی متر مکعب) در سطوح رطوبتی مورد آزمایش، تفاوت معنی‌داری در مدت زمان خشک شدن وجود ندارد و این دو در یک گروه قرار داده می‌شوند. در دمای ۶۰ درجه سلسیوس (معادل شدت تابش ۰/۰۵۳ وات بر سانتی متر مکعب)، بین سطح رطوبتی ۸ تا ۹ درصد و دو سطح رطوبتی دیگر تفاوت معنی‌داری وجود دارد. در رطوبت نهایی ۸ تا ۹ و ۱۰ تا ۱۱ درصد، بین دمای ۴۰ درجه سلسیوس و دو دمای دیگر تفاوت معنی‌داری وجود دارد و در گروه یکسانی قرار داده نشده‌اند. در حالی که در سطح رطوبتی ۹ تا ۱۰ درصد،

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل رطوبت نهایی شلتوک و دمای هوا مربوط به مدت زمان خشک شدن

رطوبت		دما (درجه سلسیوس)	
(بر پایه وزن خشک)		۶۰	۵۰
۸ تا ۹	۹۶۴/۲ ^{Aa}	۴۰۲/۵۰ ^{Ab}	۲۴۲/۵۰ ^{Ab}
۹ تا ۱۰	۷۱۱/۷۰ ^{Aa}	۳۳۷/۵۰ ^{Aab}	۱۳۰/۸۳ ^{Bb}
۱۰ تا ۱۱	۴۸۸/۳۰ ^{Aa}	۱۵۷/۵۰ ^{Ab}	۷۰/۰۰ ^{Bb}

حروف کوچک مشترک در هر سطر و حروف بزرگ مشترک در هر ستون مربوط به مقایسه میانگین تغییرات به ترتیب دمای هوا و رطوبت هستند.

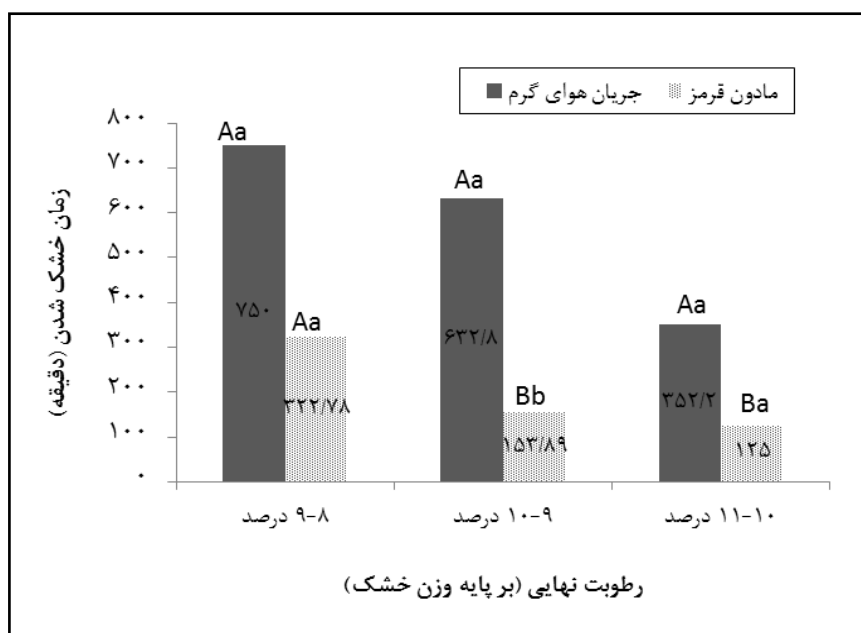
تفاوت معنی‌داری دارند و این دو روش در گروه متفاوتی قرار می‌گیرند. طولانی‌ترین زمان خشک شدن (۷۵۰ دقیقه) مربوط به رطوبت ۸ تا ۹ درصد و خشک‌کن بستر سیال جریان هوای گرم و کوتاه‌ترین زمان خشک شدن (۱۲۵ دقیقه) مربوط به رطوبت ۱۰ تا ۱۱ درصد و خشک‌کن مادون قرمز است.

در روش جریان هوای گرم، ابتدا لایه خارجی دانه خشک می‌شود و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد. این لایه سخت شده مانعی در برابر انتشار رطوبت در سطح دانه ایجاد و خروج رطوبت را از دانه به درازا می‌کشاند. اما در

با توجه به شکل ۴، در خشک‌کن بستر سیال با جریان هوای گرم بین سه سطح رطوبت نهایی شلتوک تفاوت معنی‌داری دیده نمی‌شود و همه آنها در گروه یکسان قرار دارند. در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز، بین سطح رطوبتی ۸ تا ۹ درصد و دو سطح دیگر تفاوت معنی‌دار وجود دارد و در گروه متفاوتی قرار گرفته‌اند. در سطوح رطوبت نهایی ۸ تا ۹ و ۱۰ تا ۱۱ درصد بین دو روش خشک کردن تفاوت معنی‌داری وجود ندارد و هر دو در گروه یکسان قرار دارند. در سطح رطوبت ۹ تا ۱۰ درصد، مدت زمان خشک شدن بین دو روش خشک کردن

شدن لایه سطحی تا حدود زیادی کاهش می‌یابد و در نتیجه مدت زمان خشک شدن هم کوتاه‌تر می‌شود (Pahlevanzadeh, 1998). گروهی دیگر از محققان (Laohavanich and Wongpichet, 2008) نیز با تحقیق روی برنج به نتیجه مشابه دست یافته‌اند.

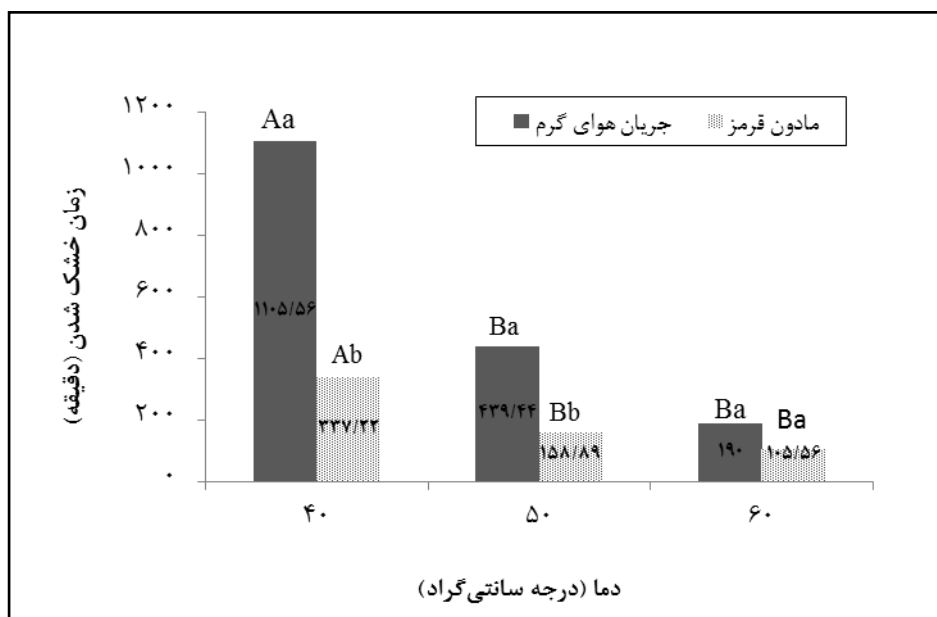
روش تابش مادون قرمز به دلیل اینکه امواج مادون قرمز در محدوده طول موج‌های قابل جذب به وسیله آب هستند، با جذب این امواج به وسیله رطوبت موجود در شلتوک‌ها و ارتعاش مولکول‌های آب، گرما در درون دانه شلتوک تولید می‌شود و مشکل هدایت گرمایی و خشک



شکل ۴- اثر رطوبت نهایی شلتوک بر مدت زمان خشک شدن در دو خشک‌کن بسترسیال جریان هوای گرم و مادون قرمز (حروف کوچک مشترک و حروف مشترک بزرگ مقایسه میانگین تغییرات به ترتیب نوع خشک‌کن و رطوبت هستند).

در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس در خشک‌کن بستر سیال جریان هوای گرم به ترتیب (۱۱۰۵/۵۶، ۴۳۹/۴۴ و ۱۹۰ دقیقه)، در مقایسه با مدت زمان خشک شدن در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس معادل با شدت تابش‌های (۰/۰۳۱، ۰/۰۴۲ و ۰/۰۵۳ وات بر سانتی‌متر مکعب) به ترتیب (۳۳۷/۲۲، ۱۵۸/۸۹ و ۱۰۵/۵۶ دقیقه)، طولانی‌تر است. محققان دیگر (Mohajeran et al., 2006) نیز در تحقیقات خود به نتایج مشابه دست یافته‌اند.

با توجه به شکل ۵، در خشک‌کن جریان هوای گرم و مادون قرمز بین دمای ۴۰ درجه سلسیوس و دو دمای دیگر اختلاف معنی‌داری وجود دارد و بین دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس در هر دو روش خشک کردن اختلاف معنی‌دار دیده نمی‌شود. مدت زمان خشک شدن در دو دمای ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس در دو روش جریان هوای گرم و مادون قرمز اختلاف معنی‌دار وجود دارد؛ در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، بین دو روش خشک کردن هیچ اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. مدت زمان خشک شدن



شکل ۵- اثر دمای هوا بر مدت زمان خشک شدن در دو خشک‌کن بستر سیال جریان هوای گرم و مادون قرمز (حروف کوچک مشترک و حروف بزرگ مشترک مقایسه میانگین تغییرات به ترتیب نوع خشک‌کن و دما هستند)

خشک‌کن بسترسیال جریان هوای گرم دیده می‌شود و کمترین درصد ترک‌خوردگی دانه (۵/۶۷درصد) در دمای ۴۰ درجه سلسیوس (معادل شدت تابش ۰/۰۳۱ وات بر سانتی‌متر مکعب) و رطوبت ۸ تا ۹ درصد در خشک‌کن بسترسیال مادون قرمز دیده شده است. هیچ یک از فاکتورها اثر معنی‌داری روی راندمان تبدیل و درجه سفیدشدگی ندارد.

در مورد رقم دم‌سیاه پیشنهاد می‌شود که به منظور کاهش خردشدگی برنج و صرفه جویی در زمان، از دمای ۴۰ درجه سلسیوس، معادل شدت تابش ۰/۰۳۱ وات بر سانتی‌متر مکعب، و رطوبت ۸ تا ۹ درصد و نیز از روش بسترسیال با تابش مادون قرمز استفاده شود.

نتیجه‌گیری

با افزایش دمای هوا درصد ترک‌خوردگی و شکستگی دانه شلتوک افزایش و مدت زمان خشک کردن کاهش می‌یابد.

خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز، نسبت به خشک‌کن بستر سیال جریان هوای گرم، مدت زمان خشک شدن کوتاه‌تری دارد.

در هر دو روش خشک کردن، فاکتور دمای هوا نسبت به فاکتور رطوبت نهایی شلتوک، تأثیر بیشتری بر درصد ترک‌خوردگی و شکستگی دانه شلتوک دارد.

بیشترین درصد ترک‌خوردگی دانه (۱۴درصد) در رطوبت ۸ تا ۹ درصد و دمای ۶۰ درجه سلسیوس (معادل شدت تابش ۰/۰۵۳ وات بر سانتی‌متر مکعب) در

مراجع

- Afzal, T.M., Abe, T. and Hikida, Y.1999. Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *J. Food Eng.* 42, 177-182.
- Afzal, T.M. and Abe, T. 1997. Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *J. Agric. Eng. Res.* 67, 289-297.
- ASAE, 2000. ASAE Standard S352.2: moisture measurement-unground grain and seeds in ASAE Standard 2000. St. Joseph, MI.
- Chen, H., Siebenmorgen, T.J. and Marks, B.P. 1997. Relating drying rate constant to reduction of longgrain head-rice yield. *Transactions of the ASAE.* 40(4):1132-1139.
- Datta, A. K. and Ni, H. 2002. Infrared and hot air assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. *J. Food Eng.* 51, 355-364.
- Dosite, M., Seguin Maure, D., Ton-That, Q.A. and Chatingy, R., 1989. Preliminary measurements by combinations by intermittent infrared and continuous convection heating in: mujumdar, A.S., Roques, M.A. (Eds.), *Drying 89*, Hemisphere, NY.
- FAO, 2012. FAO Organization. Available on the www. FAO.org.
- Fasina, O.O., Tyler, R.T. and Pickard, M. 1996. Effect of infrared heat treatment on the chemical composition and functionality of cereal grains-comparison of hull and pearled barley. Progress Report. Department of Applied Microbiology and Food Science, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Jones, W. 1992. A place in the line for micrinizer. Special Report, micronizing Company Ltd. UK.
- Hashimoto, A., Hirota, H., Honda, T., Shimizu, S. and Watanabe, A. 1991. Factors influencing constant drying rate of wet granular bed irradiated by infrared radiation. *J.Chem. Eng (Japan)* 24(6): 748-755.
- Khodadadi, M., Rahmati, M. H., Alizadeh, M. R. and Rezaei Asl, A. 2012. Investigation on effective factors in drying time Iranian rice varieties in fluidized bed dryer. *International J. Agric. Crop Sci.* 5(24): 2934-2938. (in Persian)
- Khodadadi, M. 2012. Effects of air temperature and paddy ultimate moisture content on milling quality of different rice varieties in fluidized bed dryer. M. Sc. thesis. Department of Mechanic of Biosystem Engineering. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Gorgan. Iran. (in Persian)
- Khoshtaqaza, M.H., Sadeqi, M., AmirChayjan, R., 2007. Study of rough rice drying process in fixed and fluidized bed conditions *J. Agric. Natural Res.* 14(2): 127-136. (in Persian)
- Kunii, D. and Levenspiel, O. 1991. *Fluidization Engineering*. Butterworth- Heinemann. U.S.A.
- Laohavanich, J. and Wongpichet, S. 2008. Thin layer drying model for gas-fired infrared drying of paddy. *Songklanakarinn J. Sci. Technol.* 30(3): 343-348.
- Meeso, n., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. 2007. Modeling Of far-infrared irradiation in paddy drying process. *J. Food Eng.* 78, 1248-1258.
- Minaei, S., Roohi, Gh. R., Alizadeh, M.R. 2005. Investigation of the Effects of Drying Parameters on Rice Cracking and Breakage during Milling. *J. Agric. Eng. Res.* 6(22): 97-112. (in Persian)

- Mohadesi, M., Bakhshi Poor, S., Abbasian, A., Sattari, M. and Mohammad Salehi, M. 2013. Study on adaptability, quality and quantity characters of rice genotypes in Mazandaran. *J. plant production*. 20(2): 19-36.
- Mohammad Alami, B. and Maqsoudlo, Y. 2011. The effect of dryer type and drying temperature of paddy on the breakage of rice during the milling process. National Conference on the food industry. (in Persian)
- Mohajeran, H., Khosh taghaza, M.H., Moazami Godarzi, A. 2006. Study effect of air temperature of paddy and air stream speed on crack percent during infrared radiation drying. *J. Sci. and Food Man. of Iran*. 3(2): 57-66. (in Persian)
- Nasrnia, A., Sadeghi, M., Masoomi, A., 2012. Effect of different drying and tempering conditions on milling index during the two-stage drying. *Iranian J. Food Sci. Tech*. 8(1): 40-48.
- Pahlevanzadeh, H. 1998. Drying, desining, Tarbiat Modares University. (in Persian)
- Sohrabi, M. 1998. Food processing technology (principles and application). Tehran University Publication Center. (In Persian)

Effect of Air Temperature and Final Moisture Content of Rough Rice on Drying Time and Milling Properties in Fluidized Bed Dryer with Two Thermal Sources

R. Pourbagher, M. H. Rahmati, M. R. Alizadeh*, A. Rezaei Asl
and E. Esmail Zadeh

* Corresponding Author: Associate Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran. Email: alizadeh_mohammadreza@yahoo.com

Received: 8 September 2016, Accepted: 10 April 2016

Determination of the proper drying methods of rough rice is one of the effective factors on reducing the grain losses. In this study effect of air temperature in three levels (40, 50 and 60 °C) equivalent radiations intensity (0.031, 0.042 and 0.053 w.cm^{-3}) and paddy final moisture in three levels (8-9, 9-10 and 10-11% d.b.) on the drying time and rice milling characterization of *Domsiah* variety were examined in the fluidized bed dryer with two thermal sources; infrared radiation and warm air stream. The experiments were conducted in factorial layout based on completely randomized design with three replications. The results indicated that the effects of air temperature and drying method on the broken grains, cracked grains and drying time was significant ($P < 0.01$). With increasing the air temperature from 40 to 60 °C, the cracked percent (from 5 to 14%) and broken grains (from 26 to 39 %) increased and drying time (from 964 to 242 min) decreased. In each level of air temperature, the cracked grain and broken grain at the moisture content 8-9% and air temperature of 40 °C in the infrared dryer was minimum (5.67 and 26.9%, respectively) and it was maximum at the moisture contents of 8-9% and air temperature of 60°C (14 and 39.5%, respectively).

Key words: Fluidized bed dryer, Infrared radiation, Milling characteristic, Moisture of paddy.