



## خشک کردن جریان معکوس شلتوک بخاردهی شده و اثر آن بر کیفیت برنج و انرژی مصرفی

فرزانه حسن نیا<sup>۱</sup>، کبری تجددی طلب<sup>۲\*</sup>، سید احمد شهیدی<sup>۳</sup>، آزاده قربانی حسن سرایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد آیت ا... آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.

۲- استادیار مهندسی صنایع غذایی، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران.

۳- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد آیت ا... آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

خشک شدن غیر یکنواخت و کاهش برنج سالم تولیدی به دلیل عدم جابجایی شلتوک در خشک کن های بستر ثابت متداول یکی از مشکلات اساسی در کارخانه های برنج کوبی است. به منظور بررسی و ارائه روش خشک کردن مناسب با رویکرد ایجاد یکنواختی در عملیات خشک کردن، کاهش ضایعات، صرفه جویی مصرفی در خشک کن های بستر ثابت متداول از آزمایش دو فاکتوره در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. فاکتورها شامل رطوبت اولیه شلتوک در دو سطح (۱۶ و ۱۸ درصد) و روش خشک کردن در ۴ سطح (جریان هوای یک طرفه، جریان هوای معکوس به مدت ۱ ساعت، ۲ ساعت و ۳ ساعت، سپس برگشت هوا و ادامه عملیات خشک کردن همانند جریان یک طرفه) بودند. دما و سرعت جریان هوای خشک کن برای کلیه تیمارها یکسان در نظر گرفته شد. در هر دو تیمار رطوبتی، خشک کردن به روش جریان معکوس به مدت سه ساعت، بیشترین مقدار برنج سالم (۷۵/۷-۷۵/۸۶ درصد) و کمترین مقدار انرژی مصرفی (۴۹-۴۱ مگاژول بر کیلوگرم آب) را به خود اختصاص دهد. بیشترین انرژی مصرفی با مقادیر ۷۹ و ۶۷ مگاژول بر کیلوگرم آب به ترتیب متعلق به تیمار جریان هوای یک طرفه شلتوک با رطوبت اولیه بالا و پائین (به ترتیب) بود. در روش خشک کردن جریان یک طرفه، شلتوک های خشک شده در لایه ۱۰ سانتی متری از کف خشک کن، کمترین مقدار برنج سالم (۶۳/۶۵ درصد) را داشتند. در هر دو تیمار رطوبتی، نتایج مخلوط لایه ها نشان داد خشک کردن جریان معکوس یک ساعته با مقادیر ۶۸/۶۸-۶۸/۲۸ درصد دارای کمترین مقدار برنج سالم بودند. هم چنین روش خشک کردن اثر قابل ملاحظه ای ( $P > 0.05$ ) بر کیفیت پخت نداشت.

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹

کلمات کلیدی:

خشک کردن،

جریان معکوس،

بخاردهی،

برنج سالم،

انرژی.

DOI: 10.22034/FSCT.19.133.225

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.133.19.4

\* مسئول مکاتبات:

dr2eng@yahoo.com

## ۱- مقدمه

آنجایی که در این خشک‌کن‌ها امکان حرکت شلتوک در خشک‌کن بسیار کم است لذا تغییر مسیر جریان هوا، راه‌کار کاربردی است که می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نتایج تحقیقات ایبراهیم و همکاران (۲۰۱۳) و تجددی طلب (۲۰۱۲) نشان داد تغییر جهت جریان هوادر خشک‌کن‌های بستر ثابت صندوقی اثر معنی‌داری بر کاهش مصرف انرژی، افزایش ظرفیت خشک‌کردن و برنج سالم تولیدی دارد. تجددی طلب (۲۰۱۲) اظهار نمود به دلیل کاهش قابل‌ملاحظه برنج سالم تولیدی، افزایش ارتفاع بستر خشک‌کن صندوقی به بیش از ۵۰ سانتی‌متر قابل توصیه نمی‌باشد.

ارتقای کیفیت بر اساس ترجیحات مصرف‌کننده در کنار توجه به کاهش ضایعات، مقوله‌ای است که همواره مورد توجه صنعت برنج می‌باشد. برنج جزو غلاتی است که پس از عملیات برداشت، طی دوره انبارمانی دچار تغییراتی می‌شود که به آن رسیدگی<sup>۲</sup> گفته می‌شود [۱۹]. این تغییرات، اغلب برای مصرف‌کنندگان برنج [۲۰] از جمله مصرف‌کنندگان ایرانی مطلوب است. رسیدگی تسریع یافته<sup>۳</sup> فرآیندی است که در مدت زمان کوتاه در برنج تازه، کیفیتی مطلوب و مشابه با برنج کهنه ایجاد می‌کند [۲۱]. بخاردهی یکی از روش‌های رسیدگی تسریع یافته و روش کوتاه شده‌ی فرآیند نیم‌جوش کردن<sup>۴</sup> است که در آن مرحله خیساندن حذف می‌شود [۲۲]. نتایج پژوهش‌هایی که در آنها از تیمار بخاردهی قبل از عملیات خشک‌کردن استفاده شده است، بیانگر اثر مثبت عملیات بخاردهی بر کیفیت برنج، به‌ویژه برنج سالم و ویژگی‌های پخت آن می‌باشد [۱۹، ۲۱-۲۴]. چون طی فرآیند بخاردهی، رطوبت شلتوک افزایش می‌یابد لذا برای جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌ها (قارچ‌ها، مخمرها و باکتری‌ها) و تغییر رنگ برنج، ضروری است نسبت به خشک‌کردن این نوع شلتوک در کوتاه‌ترین زمان ممکن اقدام شود. ترویج روش بخاردهی به‌ویژه در سطح کوچک (کشاورزان)، مستلزم معرفی خشک‌کن مناسب و ارزان‌قیمت است. اگرچه عدم حرکت شلتوک در بستر خشک‌کن‌های صندوقی متداول‌عامل اصلی خشک‌شدن غیر یکنواخت محسوب

شلتوک تازه برداشت‌شده از مزرعه برای ذخیره‌سازی و عملیات تبدیل باید به موقع خشک شود [۱]. تأخیر در عملیات خشک‌کردن و ناکارآمدی آن می‌تواند موجب کاهش کیفیت دانه و افزایش ضایعات شود [۲]. برنج یک ماده بیولوژیک حساس به حرارت است و برخی از خواص کیفی آن همانند مقدار برنج سالم و رنگ برنج سفید تولیدی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر شرایط خشک‌کردن قرار می‌گیرد [۳-۴]. خشک‌کردن برنج عملیات واحدی است که انرژی زیادی مصرف می‌کند [۵-۶]. مصرف انرژی بالا در فرآیند خشک‌کردن شلتوک، یکی از مشکلات اساسی کشورهای تولیدکننده برنج محسوب می‌شود [۷]. هزینه انرژی در فرآیند خشک‌کردن تقریباً دو سوم کل هزینه فرآیندهای پس از برداشت شلتوک را شامل می‌شود [۸]. از این‌رو هرگونه تغییر در روش خشک‌کردن که باعث کاهش هزینه‌ها شود، مورد توجه صنایع تبدیلی است [۹]. به‌طور کلی کارخانه‌های برنج‌کوبی در مناطق برنج‌خیز کشور به‌ویژه استان‌های گیلان و مازندران برای خشک‌کردن شلتوک از خشک‌کن‌های صندوقی بستر ثابت استفاده می‌نمایند. ضعف اصلی این خشک‌کن‌ها، عدم یکنواختی عملیات خشک‌کردن است [۱۰-۱۲]. ثابت ماندن دانه‌ها در بستر خشک‌کن باعث می‌شود شلتوک‌های موجود در بخش‌های تحتانی در تماس بیش‌تر با هوای ورودی قرار گرفته و نسبت به شلتوک‌های مستقر در لایه‌های بالایی، زودتر با شرایط هوای اطراف خود به تعادل رسیده و خشک می‌شوند. از آنجایی که برنج دانه‌ای هیگروسکوپیک است و به‌راحتی تحت تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرد [۱۴-۱۳] می‌توان انتظار داشت دانه‌ها با رطوبت کمتر، از دانه‌ها با رطوبت بیشتر و همین‌طور محیط اطراف خود، رطوبت جذب کرده و ترک در دانه ایجاد شود [۱۵]. تشکیل ترک به علت جذب رطوبت و ایجاد تنش رطوبتی در دانه پس از عملیات خشک‌کردن و متعاقب آن شکسته شدن طی عملیات تبدیل، دلیل اصلی کاهش راندمان برنج سالم در صنایع تبدیلی است [۱۶]. برای غلبه بر تفاوت رطوبت و دمایی ایجاد شده در این نوع از خشک‌کن‌های بستر ثابت صندوقی، دو راه وجود دارد که می‌توان به حرکت شلتوک در داخل خشک‌کن و یا تغییر جریان هوا اشاره نمود. از

2. Aging  
3. Accelerated Aging  
4. Parboiling

بخاردهی شدند. دستگاه استوانه‌ای شکل و شامل دو بخش بالایی و پائینی است. آب به کمکیک المنت برقی در بخش پائینی دستگاه، به جوش می‌آید و بخارهای حاصل تحت فشار اتمسفر با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از کف توری و لوله‌های حفره‌دار تعبیه‌شده در بخش فوقانی دستگاه به شلتوک انتقال داده می‌شود. نمونه‌های بخاردهی شده پس از گذراندن دوره استراحت به مدت ۱۸ ساعت، خشک شدند.

## ۲-۱-۲- خشک کردن

برای انجام عملیات خشک کردن از خشک‌کن غیر مدام افقی متداول، جریان هوای یک‌طرفه مرسوم (از پائین به بالا) در صنعت برنج‌کوبی و جریان هوای معکوس استفاده شد. در این روش ابتدا جریان هوا از بالا به پائین برقرار شد و در سه زمان متفاوت ۱، ۲ و ۳ ساعت پس از عملیات خشک کردن جهت جریان هوا تغییر داده شد و از پائین به بالا ادامه یافت؛ بنابراین از چهار تیمار برای خشک کردن استفاده شد. دمای خشک کردن و عمق بستر برای کلیه تیمارها ثابت و به ترتیب ۴۵ درجه سانتی‌گراد و ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. رطوبت نهایی  $9\pm 0.5$  (w.b) بود. برای عملیات خشک کردن از یک خشک‌کن که در مقیاس آزمایشگاهی با دو ورودی هوا، از پائین و بالا طراحی و ساخته شد، استفاده شد.

طی فرایند خشک کردن، نمونه برداری در فاصله‌های زمانی نیم‌ساعته از لایه‌های مختلف بالایی، میانی و پائینی در عمق‌های ۳۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متر از کف خشک‌کن (به ترتیب) از طریق دریچه‌هایی که در همین فاصله‌ها روی دیواره خشک‌کن تعبیه شده بود انجام گرفت. فرایند خشک شدن تا رسیدن به رطوبت موردنظر در هر روش خشک کردن ادامه یافت. معیار پایان فرایند، کنترل مقدار رطوبت شلتوک در لایه بالایی بود. در پایان فرایند خشک کردن، نمونه‌ها از بخش‌های بالایی، میانی و پائینی خشک‌کن جمع‌آوری شد. بعلاوه یک نمونه نیز از ترکیب لایه‌های مختلف خشک‌کن تهیه شد. شرایط هوای محیط (دمای حباب خشک و رطوبت نسبی) با استفاده از یک دیتالاگر ثبت شد. دمای حباب تر و خشک و دمای هوای گرم ورودی به خشک‌کنا استفاده از یک هیگروترموتر ثبت شد. دما در بخش‌های مختلف خشک‌کن توسط دیتالاگر (Pico technology, model TC-08, UK) ثبت شد.

می‌شود اما با اصلاح آنها از طریق به کارگیری روش‌های کاربردی از جمله تغییر جریان هوا می‌توان انتظار داشت علاوه بر کاهش ضایعات، بتوان در مصرف انرژی نیز صرفه‌جویی نمود. اگرچه نتایج تحقیقات بیانگر اثرات مثبت روش تغییر جریان هوا بر ارتقای کیفی محصول نهایی و عملکرد خشک کردن است اما عامل مهمی همانند تغییر زود هنگام جریان هوا می‌تواند مشکل جذب رطوبت و ترک خوردن شلتوک با رطوبت پایین‌تر در لایه‌های مقابل و متعاقب آن افزایش ضایعات به صورت برنج شکسته پس از عملیات تبدیل را به همراه داشته باشد. هدف اصلی این پژوهش بررسی امکان به کارگیری روش جریان هوای معکوس برای خشک کردن شلتوک بخاردهی شده و اثر آن بر خواص کیفی برنج، انرژی مصرفی و عملکرد خشک‌کن صندوقی بستر ثابت و ارائه روش خشک کردن مناسب می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- روش آزمایش

#### ۲-۱-۱- بخاردهی

در این پژوهش با توجه به نتایج مطلوب تحقیقات انجام شده قبلی، از تیمار بخاردهی شلتوک رقم هاشمی به مدت ۵ دقیقه پیش از عملیات خشک کردن استفاده شد [۲۱، ۲۵]. در این مطالعه از شلتوک بادو سطح رطوبت اولیه  $1\pm 18/5$  و  $5\pm 16$  بر مبنای وزن تر استفاده شد. شالی مرطوب تازه برداشت شده، قبل از عملیات خرم‌نکوبی، ابتدا در مزرعه خشک شدند. شلتوک‌های حاصل از خرم‌نکوبی دارای رطوبت تقریبی ۱۶ درصد (براساس وزن تر) بودند. قبل از عملیات بخاردهی، به منظور رساندن رطوبت شلتوک‌ها به ۱۸ درصد، نیاز به افزودن آب به آنها بود که با استفاده از فرمول زیر، مقدار آب مورد نیاز محاسبه شد: [۲۶]:

$$\text{Volume of water (liters)/grain (ton)} = \frac{M_1 - M_2}{100 - M_2}$$

$M_1$  و  $M_2$  به ترتیب مقدار رطوبت دانه (%) بعد و قبل از مرطوب کردن می‌باشند.

نمونه‌ها بدون عملیات خیساندن، به مدت  $1\pm 5$  دقیقه با استفاده از دستگاه پاربول (نیم‌جوش) آزمایشگاهی به ظرفیت ۷ کیلوگرم

## ۲-۳- اندازه‌گیری ظرفیت خشک کردن

به منظور اندازه‌گیری ظرفیت خشک کردن از معادله زیر استفاده شد [۲۷]:

$$\text{ظرفیت خشک کردن (ton/m}^2\text{)} = \frac{\text{وزن شلتوک مرطوب}}{\text{کل زمان خشک کردن (h)}}$$

## ۲-۴- اندازه‌گیری نرخ خشک کردن

برای اندازه‌گیری نرخ خشک کردن از معادله زیر استفاده شد [۲۸]:

$$\text{نرخ خشک کردن } (\%h^{-1}) = \frac{\text{IMC-FMC}}{t} \quad (9)$$

IMC مقدار رطوبت اولیه (%w.b)، FMC مقدار رطوبت نهایی (%w.b)،  $t$  کل زمان خشک کردن.

## ۲-۵- راندمان برنج سالم

۱۵۰ گرم شلتوک خشک شده با استفاده از دستگاه پوست کن غلتک لاستیکی آزمایشگاهی ساتاکه جدا شد. جهت سفید کردن از سفیدکن آزمایشگاهی از نوع اصطکاکی، مک گیل شماره ۲ استفاده شد. سپس برنج‌های سفید سالم با الک دوار آزمایشگاهی ایندنت ساخت شرکت ساتاکه ژاپن از برنج‌های شکسته جدا شدند. برنج سالم، برنجی است که طول آن حداقل سه چهارم طول دانه برنج سفید کامل باشد [۲۹]. درصد برنج سالم با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه شد.

$$\text{HRY (\%)} = \frac{\text{HR (gr)}}{\text{WR (gr)}} \times 100 \quad (10)$$

HR: وزن برنج سالم و WR: وزن برنج سفید.

## ۲-۶- ویژگی‌های پخت

بررسی ویژگی‌های پخت مطابق روش سینگ و همکارانش (۲۰۰۵) انجام شد.

**حداقل زمان پخت:** ۲ گرم نمونه برنج سالم که از قبل به مدت نیم ساعت خیس خورده بود در یک لوله آزمایش ریخته شد، سپس ۲۰ میلی لیتر آب مقطر افزوده شد و در یک حمام آب گرم قرار داده شد. پس از گذشت چند دقیقه به تناوب دانه‌های برنج خارج و بین دو صفحه شیشه‌ای فشرده شد، این کار تا زمانی که هیچ نقطه سفیدی مشاهده نشود ادامه یافت.

**درصد مواد جامد از دست رفته:** آب برنج پخته به ارلن خشک که از قبل وزن شده بود منتقل و سپس در آون با دمای ۱۰۵ درجه

اندازه‌گیری رطوبت شلتوک، با دستگاه رطوبت‌سنج دیجیتال GMK303 G-Won ساخت کشور کره انجام شد.

## ۲-۲- ارزیابی مصرف انرژی

انرژی مصرفی شامل دوبخش انرژی گرمایی جهت گرم کردن هوا و انرژی الکتریکی برای به حرکت درآوردن فن دمنده می‌باشد. برای محاسبه مصرف انرژی خشک کردن شلتوک از معادله‌های زیر استفاده شد [۲]. کارایی دستگاه تولید نیرو برای تبدیل انرژی حرارتی به الکتریکی ۳۸٫۵٪ در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین فاکتور تبدیل ۲٫۶ = ۱۰۰/۳۸ است که در معادله برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی اولیه استفاده می‌شود.

$$E_{\text{elec}} = 2.6P \times t \quad (2)$$

$$E_{\text{heat}} = m_a c_a (T_{\text{mix}} - T_i) \quad (3)$$

$$m_a = Q \times \rho_a \times t \quad (4)$$

$$Q = A \times V \quad (5)$$

کل رطوبت تبخیر شده از شلتوک در هر بیج با استفاده از معادلات موازنه جرم محاسبه شد [۲]. عملکرد خشک کن و مصرف کل انرژی در نهایت از طریق مجموع انرژی الکتریکی و حرارتی برحسب مگاژول بر کیلوگرم آب (MJ/kg) تبخیر شده محاسبه شد.

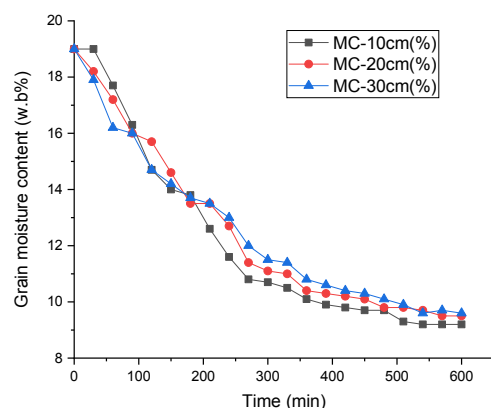
$$F = P + W \quad (6)$$

$$F X_f = P X_p \quad (7)$$

در معادلات بالا،  $Q$  دبی هوای ورودی به محفظه خشک کن ( $m^3 s^{-1}$ )،  $A$  ناحیه مقطع جریان ورودی ( $m^2$ )،  $V$  سرعت متوسط هوای خشک کردن در بخش ورودی ( $ms^{-1}$ )،  $E_{\text{elec}}$  انرژی الکتریکی مصرفی توسط فن دمنده خشک کن ( $KJ$ )،  $E_{\text{heat}}$  انرژی گرمایی مصرفی برای گرم کردن هوای خشک کن ( $KJ$ )،  $P$  توان موتور فن دمنده ( $kw$ )،  $t$  کل زمان خشک شدن ( $h$ )،  $m_a$  جرم هوای خشک کردن ( $kg$ )،  $\rho_a$  چگالی هوا ( $kgm^{-3}$ )،  $C_a$  گرمای ویژه هوای خشک کردن ( $kJkg^{-1}C^{-1}$ )،  $T_i$  دمای هوای محیط ( $^{\circ}C$ )،  $T_{\text{mix}}$  دمای هوای خشک کردن ( $^{\circ}C$ )،  $F$  وزن شلتوک با رطوبت اولیه ( $kg$ )،  $P$  وزن شلتوک خشک شده با رطوبت نهایی ( $kg$ )،  $w$  مقدار رطوبت حذف شده ( $kg$ )،  $X_p$ ،  $X_f$  به ترتیب جز جامد شلتوک اولیه و شلتوک خشک شده.

در حالت اشباع قرار دارد سرعت تبخیر و حذف رطوبت بالا منجر به افت دما و کاهش روند خروج رطوبت از شلتوک می‌شود [۳۳،۳۴]. اثر خنک‌کنندگی با دمای هوای خشک‌کن، مقدار رطوبت دانه و سرعت جریان هوا ارتباط دارد [۱۸].

با تداوم عملیات خشک‌کردن، بسته به دور یا نزدیک بودن لایه‌ها به هوای ورودی، با کاهش رطوبت و افزایش دما در لایه‌ها، سرعت خروج رطوبت افزایش یافت و با گذشت زمان روند کاهش رطوبت کند شد (اشکال ۱ تا ۴). سایر محققین نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند [۲،۵،۳۵،۳۶]. به‌طور کلی در ساعات ابتدایی عملیات خشک‌کردن، رطوبت سطح دانه می‌تواند به‌راحتی به وسیله هوای گرم خارج شود [۳۷ و ۳۶]. پس از آن رطوبت موجود در بخش‌های مرکزی دانه به آرامی به سطح دانه انتشار می‌یابد و این انتشار رطوبت، سرعت خشک شدن دانه را محدود نموده [۳۶] و موجب کند شدن حذف رطوبت می‌شود. در مراحل پایانی، بسته به روش خشک‌کردن، شرایط رطوبتی و دمایی داخل خشک‌کن، رطوبت لایه‌های مختلف در مدت زمان‌های متفاوت به یکدیگر نزدیک شدند (اشکال ۱ تا ۴). در لایه‌های ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری مربوط به تیمار جریان هوای دوطرفه (یک ساعت از بالا به سمت پائین)، پس از تغییر جهت جریان هوا (دمیده شدن هوا از پائین به سمت بالا) در فاصله ۱۸۰ تا ۲۱۰ دقیقه، بدلیل جذب رطوبت، تغییر قابل ملاحظه‌ای در رطوبت شلتوک‌های مستقر در لایه‌های فوق مشاهده نشد.



**Fig 1** Paddy drying curve at different layers for reverse air flow drying of one hour from top

سلسیوس تا خشک شدن کامل قرار داده شد. تفاوت وزن ارلن قبل و بعد از خشک شدن میزان مواد جامد از دست‌رفته می‌باشد که به‌صورت درصد گزارش شد.

نسبت طولیل شدن: نسبت طول ۱۰ دانه پخته به طول ۱۰ دانه خام.

نسبت جذب آب: نسبت وزن ۱۰ دانه پخته به وزن ۱۰ دانه خام.

## ۲-۷- تعیین رنگ

اندازه‌گیری رنگ با استفاده از هانترلب (color flex, model 45/0, USA) انجام شد. بعد از کالیبره شدن با استفاده از کاشی سیاه و سفید مقادیر رنگ با استفاده از پارامترهای  $L^*$  (روشنایی)،  $a^*$  (قرمز-سبز) و  $b^*$  (زرد-آبی) بیان شد [۳۱].

## ۲-۸- آنالیز آماری

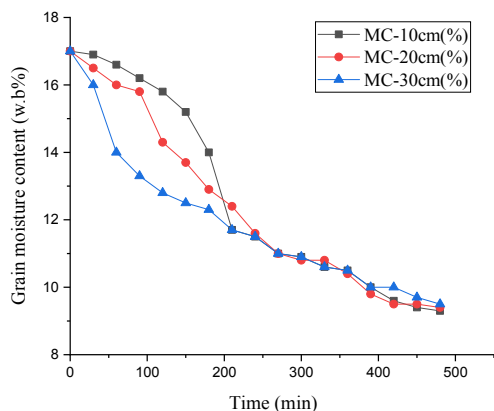
آزمایش دو فاکتوره در قالب طرح کاملاً تصادفی به کمک نرم‌افزار Minitab (ver16) برای انجام آزمون‌های آماری استفاده شد. فاکتورها شامل رطوبت اولیه در دو سطح (۱۶ و ۱۸ درصد) و جهت جریان هوا در ۴ سطح (جریان هوای یک‌طرفه، جریان هوای معکوس به مدت ۱ ساعت، ۲ ساعت و ۳ ساعت از بالا) در نظر گرفته شد. مقایسه میانگین‌ها به روش توکی در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. آزمون‌ها در سه تکرار اجرا و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Origin (2019b) استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

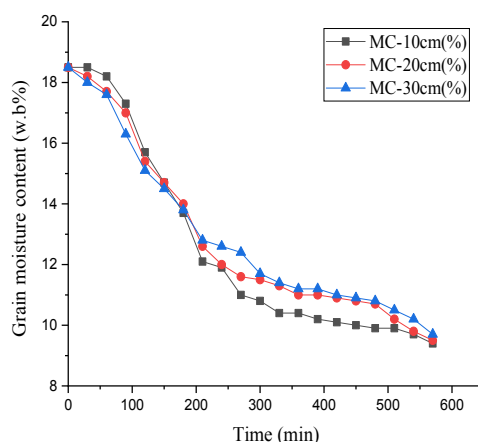
### ۳-۱- نمودار خشک‌کردن شلتوک در لایه‌های

#### مختلف خشک‌کن

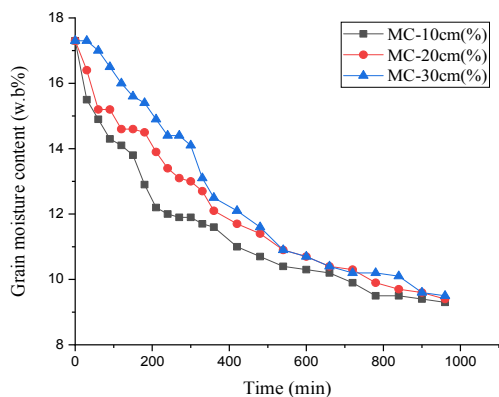
همان‌گونه که در اشکال ۱ تا ۴ مشاهده می‌شود در بازه زمانی کوتاه، سرعت خروج رطوبت از دانه بسیار کند اتفاق می‌افتد که این امر به اثر خنک‌کنندگی تبخیری در شروع عملیات خشک‌کردن ارتباط دارد. به نقل از کومار و همکاران (۲۰۱۵) در ابتدای عملیات خشک‌کردن چون سطح دانه از نظر رطوبت تقریباً



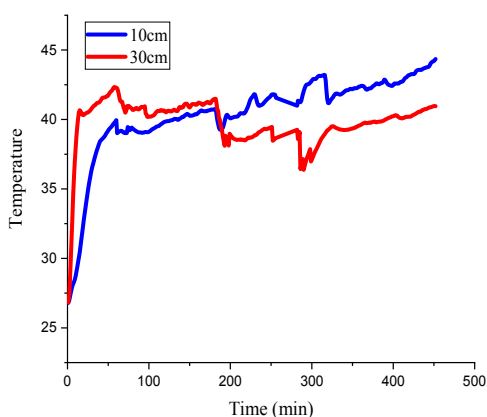
**Fig 3** Paddy drying curve at different layers for reverse air flow drying of three hours from top



**Fig 2** Paddy drying curve at different layers for reverse air flow drying of two hours from top



**Fig 4** Paddy drying curve at different layers for single direction air flow drying



**Fig 5** Temperature profile inside dryer for reverse air flow drying three hours from top

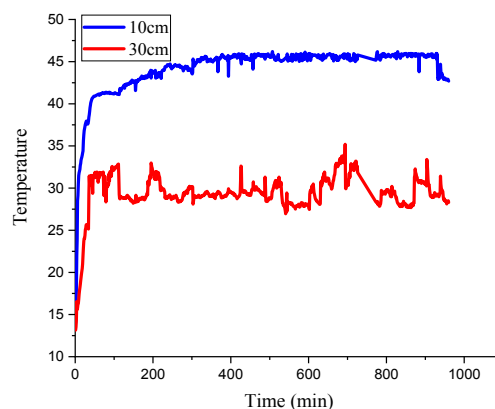
همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می شود از نظر روند کاهش رطوبت در مراحل پایانی، روش خشک کردن با جریان هوای معکوس به مدت ۳ ساعت، بیشترین یکنواختی را داشت به طوری که پس از سپری شدن حدود ۴ ساعت از شروع عملیات خشک کردن، مقدار رطوبت لایه های مختلف بسیار به هم نزدیک شدند. این امر نشانه نزدیک تر شدن دما در لایه های مختلف شلتوک در این روش خشک کردن نسبت به روش جریان یک طرفه است که در اشکال ۵ و ۶ به خوبی مشاهده می شود. همان گونه که در اشکال ۳ و ۴ دیده می شود قبل از سپری شدن مدت زمان ۳ ساعت، روند تغییر رطوبت در لایه ها تقریباً مشابه با روش خشک کردن جریان یک طرفه است. خروج کافی رطوبت از شلتوک های مستقر در لایه های فوقانی به دلیل تغییر جریان هوا پس از گذشت مدت زمان طولانی تر، منجر می شود تا رطوبت نسبی هوای اطراف دانه هادر زمان برگشت هوا به شرایطی برسد که عملیات خشک شدن بتواند با یکنواختی بیشتر پیش رفته و در مدت زمان کمترین نسبت به روش جریان یک طرفه خاتمه یابد (اشکال ۳ و ۴).

بدون تنش رطوبتی و حرارتی بتواند از دانه خارج شود.

### ۳-۳- ارزیابی زمان خشک شدن، مصرف انرژی،

#### نرخ و ظرفیت خشک شدن

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود در هر دو سطح رطوبتی، با به کارگیری روش تغییر جهت جریان هوا پس از گذشت مدت زمان سه ساعت، کوتاه‌تر شدن مدت زمان خشک کردن، کاهش انرژی مصرفی و افزایش ظرفیت خشک کردن را دربر داشته‌است. بیشترین مدت زمان خشک کردن مربوط به تیمار جریان یک‌طرفه می‌باشد که نتیجه آن حداکثر شدن مصرف انرژی و حداقل شدن ظرفیت خشک کردن در این تیمار است. بالاترین متوسط نرخ خشک شدن در تیمار جریان هوای دوطرفه ۳ ساعت از بالا و کمترین نرخ خشک شدن در تیمار جریان یک‌طرفه هوا مشاهده شد. از بین دو روش دیگر جریان هوای معکوس (۱ ساعته و ۲ ساعته)، تیمار ۲ ساعته به لحاظ مصرف انرژی، زمان خشک شدن، ظرفیت و نرخ خشک شدن شرایط بهتری داشت. نتایج تحقیقات ایبراهیم و همکارانش (۲۰۱۳) و تجدیدی‌طلب (۲۰۱۲) نیز اثر مثبت جریان هوای معکوس بر افزایش ظرفیت خشک کردن، کاهش مدت زمان خشک کردن و انرژی مصرفی در رقم را نشان داد.



**Fig 6** Temperature profile inside dryer for single direction air flow drying

همان‌گونه در شکل ۶ مشاهده می‌شود از آنجایی که در روش خشک کردن جریان یک‌طرفه، فاصله دمایی بین لایه‌ها تقریباً از ابتدا تا انتهای عملیات خشک کردن نسبتاً زیاد بود لذا شلتوک‌های مستقر در لایه‌های بالایی برای رسیدن به رطوبت نهایی  $9 \pm 0.5$  درصد نیاز به گذشت زمان بیشتری داشتند تا شرایط هوای اطراف آنها به‌ویژه از نظر رطوبت نسبی به مرحله مناسب از نظر رطوبت تعادلی برسد. هم‌چنین با تغییر جریان هوا پس از سه ساعت و کاهش حدود ۵ درجه‌ای دمای هوا در لایه ۳۰ سانتی‌متری باعث شد فرصتی ایجاد شود تا رطوبت موجود در بخش‌های مرکزی دانه به آرامی به سمت لایه‌های خارجی هدایت شده و به راحتی

**Table 1** Drying Time, Total Energy, Drying capacity, and Average Drying rate for different drying methods

Average Drying rate ( $\%h^{-1}$ )	Drying Capacity ( $Ton/m^2h$ )	Total Energy (MJ/kg water)	Drying Time (h)	Drying method
0.49	0.012	79	16	hS
0.95	0.018	62	10	hR-1h
0.94	0.019	60	9.5	hR-2h
0.95	0.023	49	8	hR-3h
0.63	0.016	67	11	lS
0.75	0.020	48	8.3	lR-1h
0.76	0.022	46	8	lR-2h
0.98	0.023	41	7.5	lR-3h

h=high moisture, l=low moisture, S=single direction air flow drying, R-1h=reverse air flow drying-1 hour from top, R-2h=reverse air flow drying-2 hour from top, R-3h=reverse air flow drying-3 hour from top

باتیمارهای جریان هوای معکوس یک و دو ساعته و جریان هوای یک‌طرفه، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد داشت. تیمار جریان هوای معکوس یک‌ساعته، کمترین مقدار برنج سالم در لایه‌ها و نمونه ترکیبی حاصل از سه لایه رابه خود اختصاص داد.

### ۳-۴- راندمان برنج سالم

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در هر دو تیمار رطوبتی (بالا و پائین)، در هر سه لایه، بیشترین راندمان برنج سالم مربوط به تیمار جریان هوای معکوس ۳ ساعته بود و نتایج این تیمار

متعاقب آن کاهش مقدار برنج سالم کم است. علاوه بر آن تغییر جریان هوا پس از گذشت مدت زمان ۳ ساعت از عملیات خشک کردن و کاهش یافتن دما در لایه‌های بالایی، فرصتی ایجاد نمود تا بدون بوجود آمدن تنش رطوبتی و حرارتی، رطوبت از بخش‌های داخلی به آرامی به سمت بخش‌های خارجی دانه هدایت شوند. به این ترتیب راندمان برنج سالم در لایه‌سنتی متری بیشتر از سایر تیمارها شد. گفتنی است لایه ۱۰ سانتی متری در تیمار جریان معکوس ۳ ساعته و لایه ۳۰ سانتی متری جریان یک‌طرفه از ابتدا تا انتهای عملیات خشک کردن دارای نرخ خشک کردن کمتر از حد بحرانی بودند. عامل دیگری که می‌توانست در کاهش درصد برنج سالم تولیدی تأثیرگذار باشد جذب رطوبت پس از برگشت جریان هوا در یک و دو ساعته است. در تیمار جریان یک‌طرفه، کمترین مقدار برنج سالم مشاهده شده در لایه ۱۰ سانتی متری می‌تواند به خشک شدن بدون وقفه این لایه تا رسیدن رطوبت شلتوک در لایه‌های بالایی به حد مناسب ارتباط داشته باشد. در تیمار جریان معکوس ۳ ساعته، کاهش رطوبت در لایه‌های پایینی در زمان تغییر جریان هوا عامل مؤثری در کاهش امکان جذب رطوبت و متعاقب آن ترک خوردن و کاهش برنج سالم در لایه‌های بالایی بوده و از نظر برنج سالم تولیدی در هر دو رطوبت اولیه، بیشترین مقدار را داشته است (جدول ۲). در واقع پس از برگشت جریان هوا و مواجه شدن شلتوک‌های مستقر در لایه‌های پایینی با هوای گرم‌تر، محتوای رطوبت آنها به اندازه‌ای بود که نتواند به شلتوک‌های رطوبت پائین مستقر در لایه‌های بالایی آسیب برساند.

بر طبق نتایج مخلوط لایه‌ها، در هر دو تیمار رطوبتی، تیمار جریان معکوس دوساعته پس از تیمار جریان هوای معکوس یک‌ساعته، کمترین مقدار را داشت (جدول ۲). کاهش مشاهده شده برنج سالم در لایه‌ها و نمونه‌های ترکیبی در دو تیمار جریان هوای معکوس یک و دوساعته در بسیاری از موارد حتی نسبت به جریان یک‌طرفه، می‌تواند به دو عامل مهم شامل بالا بودن نرخ خشک کردن شلتوک در لایه‌ها و ترک خوردن شلتوک در لایه‌های بالایی به دلیل جذب رطوبت، بلافاصله پس از تغییر جهت جریان هوا ارتباط داشته باشد. اگرچه نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد متوسط نرخ خشک کردن خارج از مقدار بحرانی  $1.05h^{-1}$  اعلام شده توسط بان (۱۹۷۱) به نقل از چامپاگنی (۲۰۰۴) نمی‌باشد، اما بررسی داده‌های ثبت شده در ساعات مختلف مبین بالا بودن نرخ خشک کردن نسبت به حد بحرانی به‌ویژه در برخی از لایه‌هاست. در تیمار جریان معکوس دو و یک‌ساعته، در لایه ۳۰ سانتی متری و ۱۰ سانتی متری برای مدت زمان طولانی ۵ تا ۵/۳۰ ساعت، نرخ خشک کردن بالاتر از ۱/۵ را تجربه کردند. این در حالی است که در روش خشک کردن جریان معکوس سه‌ساعته، لایه ۳۰ سانتی متری که تا سه ساعت اول دارای نرخ خشک کردن بالاتر از ۱/۵ بود با برگشت جریان هوا، مقدار آن کمتر از حد بحرانی شد. افزایش نرخ خشک کردن در لایه ۳۰ سانتی متری باعث کاهش برنج سالم نشد (جدول ۲). در ساعات ابتدایی عملیات خشک کردن که شلتوک دارای رطوبت بیشتری است چون خروج رطوبت در نواحی سطحی آن رخ می‌دهد لذا در اینحالت امکان ایجاد ترک در اثر تنش حرارتی و رطوبتی و

Table 2 HRY for different drying methods

HRY (mixed grains of dryer layer) (%)	HRY (bottom layer) (%)	HRY (middle layer) (%)	HRY (top layer) (%)	Drying method
72.34±0.68 <sup>abc</sup>	63.65±1.93 <sup>c</sup>	71.75±0.96 <sup>c</sup>	72.61±0.52 <sup>ab</sup>	<b>hS</b>
65.88±2.21 <sup>c</sup>	65.47±2.89 <sup>bc</sup>	68.47±1.47 <sup>c</sup>	67.26±0.41 <sup>c</sup>	<b>hR-1h</b>
68.28±1.68 <sup>de</sup>	69.84±1.71 <sup>abc</sup>	69.68±0.76 <sup>c</sup>	69.76±1.19 <sup>bc</sup>	<b>hR-2h</b>
75.86±0.61 <sup>a</sup>	74.98±0.83 <sup>a</sup>	76.07±1.44 <sup>a</sup>	76.28±0.36 <sup>a</sup>	<b>hR-3h</b>
72.16±1.83 <sup>bc</sup>	67.66±5.17 <sup>bc</sup>	72.03±2.05 <sup>bc</sup>	68.54±3.04 <sup>c</sup>	<b>IS</b>
68.86±0.08 <sup>cde</sup>	69.27±0.23 <sup>abc</sup>	68.91±0.82 <sup>c</sup>	68.18±0.16 <sup>c</sup>	<b>IR-1h</b>
71.21±0.37 <sup>cd</sup>	71.19±1.12 <sup>ab</sup>	71.92±1.15 <sup>c</sup>	70.28±0.54 <sup>bc</sup>	<b>IR-2h</b>
75.7±0.64 <sup>ab</sup>	75.11±0.75 <sup>a</sup>	75.73±0.46 <sup>ab</sup>	74.76±1.58 <sup>a</sup>	<b>IR-3h</b>

h=high moisture, l=low moisture, S=single direction air flow drying, R-1h=reverse air flow drying-1 hour from top, R-2h=reverse air flow drying-2 hour from top, R-3h=reverse air flow drying-3 hour from top

Mean values ± standard error mean (SEM), the same lower case letters are not significantly different (P > 0.05)



### ۳-۵- ویژگی‌های پخت و رنگ

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد روش‌های مختلف خشک‌کردن در سطح ۵ درصد تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های پخت شامل حداقل مدت‌زمان پخت، مواد جامد ازدست‌رفته، نسبت افزایش طول و نسبت جذب آب نداشت. به دلیل معنی‌دار نبودن کلیه نتایج، تنها اطلاعات مربوط به نمونه‌های مخلوط لایه‌های مختلف‌آورده شده است. هم‌چنین روش‌های مختلف خشک‌کردن تأثیر معنی‌داری بر پارامترهای رنگ همچون  $L^*$ ،  $a^*$ ،  $b^*$  نداشت (جدول ۳). از آنجایی‌که در این تحقیق عوامل مهم خشک‌کردن شامل ارتفاع بستر، رطوبت نهایی شلتوک و درجه حرارت خشک‌کن در کلیه تیمارها یکسان بوده است لذا عدم تفاوت مشاهده شده در نتایج ویژگی‌های پخت و رنگ محصول نهایی دور از انتظار نمی‌باشد.

در این روش مقدار رطوبت در لایه‌های ۳۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متری به ترتیب ۱۲/۳، ۱۲/۹ و ۱۴ درصد و برای جریان معکوس دوساعته به ترتیب ۱۵/۱، ۱۵/۴ و ۱۵/۷ و روش جریان معکوس یک‌ساعته به ترتیب ۱۶/۲، ۱۷/۲ و ۱۷/۷ بود. با توجه به نتایج این تحقیق، ۱۵ تا ۱۶ درصد می‌تواند دامنه رطوبتی بحرانی برای شلتوک رقم هاشمی در نظر گرفته شود. جولیانو و پرز (۱۹۹۳) رطوبت بحرانی برای رقم حساس IR42 را ۱۶ درصد و برای رقم IR60 در فصول زراعی خشک و تر به ترتیب، ۱۴ و ۱۲ درصد اعلام کردند. آنچه در روش برگشت جریان هوا بسیار حائز اهمیت است جلوگیری و کاهش قابل‌ملاحظه بازجذب رطوبت توسط لایه‌های بالایی پس از تغییر جریان هواست لذا ضروری است تغییر جریان هوا زمانی اتفاق بیافتد که لایه‌های پائینی دارای رطوبت کمتری باشند.

**Table 3** Cooking properties and color of rice for different drying methods

b*	a*	L*	Elongation ratio	Water uptake ratio	Solid loss (%)	Cooking Time (min)	Drying method
19.19±0.35 <sup>a</sup>	1.37±0.02 <sup>a</sup>	67.36±0.93 <sup>a</sup>	1.64±0.02 <sup>a</sup>	2.74±0.21 <sup>a</sup>	23.43±2.2 <sup>a</sup>	13.33±0.57 <sup>a</sup>	hS
18.93±0.44 <sup>a</sup>	1.38±0.18 <sup>a</sup>	69.08±0.66 <sup>a</sup>	1.65±0.08 <sup>a</sup>	2.47±0.14 <sup>a</sup>	23.7±1.05 <sup>a</sup>	13±0 <sup>a</sup>	hR-1h
18.3±0.18 <sup>a</sup>	1.52±0.24 <sup>a</sup>	68.64±0.71 <sup>a</sup>	1.65±0.08 <sup>a</sup>	2.58±0.33 <sup>a</sup>	22.8±0.2 <sup>a</sup>	13±0 <sup>a</sup>	hR-2h
19.16±0.44 <sup>a</sup>	1.51±0.12 <sup>a</sup>	68.41±1.06 <sup>a</sup>	1.66±0.05 <sup>a</sup>	2.81±0.34 <sup>a</sup>	22.06±3.18 <sup>a</sup>	13±0 <sup>a</sup>	hR-3h
18.97±0.11 <sup>a</sup>	1.34±0.11 <sup>a</sup>	67.48±0.46 <sup>a</sup>	1.64±0.03 <sup>a</sup>	3±0.12 <sup>a</sup>	22.83±4.21 <sup>a</sup>	12.66±0.57 <sup>a</sup>	IS
19.17±0.54 <sup>a</sup>	1.37±0.18 <sup>a</sup>	68.49±0.51 <sup>a</sup>	1.66±0.9 <sup>a</sup>	2.8±0.08 <sup>a</sup>	23.83±4.4 <sup>a</sup>	13±1 <sup>a</sup>	IR-1h
19.24±0.11 <sup>a</sup>	1.61±0.25 <sup>a</sup>	68.18±0.55 <sup>a</sup>	1.63±0.03 <sup>a</sup>	2.74±0.09 <sup>a</sup>	23.26±1.29 <sup>a</sup>	13.33±0.57 <sup>a</sup>	IR-2h
18.95±0.48 <sup>a</sup>	1.42±0.37 <sup>a</sup>	68.41±0.7 <sup>a</sup>	1.67±0.02 <sup>a</sup>	2.66±0.14 <sup>a</sup>	22.33±3.13 <sup>a</sup>	13±0 <sup>a</sup>	IR-3h

h=high moisture, l=low moisture, S=single direction air flow drying, R-1h=reverse air flow drying-1 hour from top, R-2h=reverse air flow drying-2 hour from top, R-3h=reverse air flow drying-3 hour from top  
Mean values ± standard error mean (SEM), the same lower case letters are not significantly different (P > 0.05)

سه لایه نسبت به روش خشک‌کردن جریان یک‌طرفه شد. اگرچه به‌کارگیری خشک‌کن صندوقی مجهز به جریان هوای برگشتی نسبت به جریان یک‌طرفه می‌تواند در جلوگیری از خشک شدن بیش از اندازه شلتوک‌های تحتانی نقش مؤثری داشته باشد اما انتخاب نادرست پارامترهای خشک‌کردن در این نوع از خشک‌کن‌ها می‌تواند باعث جذب رطوبت توسط شلتوک‌های خشک‌شده در لایه‌های متقابل و درنهایت منجر به افزایش ضایعات به‌صورت برنج شکسته شود؛ بنابراین ضروری است تغییر جریان هوا به نحوی مدیریت شود که جذب رطوبت در لایه‌های متقابل به حداقل ممکن برسد.

### ۴- نتیجه‌گیری

بر طبق نتایج این تحقیق، بیشترین مدت‌زمان خشک‌کردن مربوط به تیمار جریان یک‌طرفه بود که نتیجه آن حداکثر شدن مصرف انرژی و حداقل شدن ظرفیت خشک‌کردن نسبت به سایر نمونه‌ها در هر تیمار رطوبتی بوده است. تیمار خشک‌کردن جریان معکوس سه‌ساعته از این نظر حداقل مقدار را داشت. در هر دو تیمار رطوبتی (بالا و پائین)، در هر سه لایه، بیشترین راندمان برنج سالم مربوط به تیمار جریان هوای معکوس سه‌ساعته بود. تغییر زود هنگام جریان هوا در عملیات خشک‌کردن شلتوک به روش جریان معکوس به‌ویژه در شلتوک با رطوبت اولیه بالا منجر به کاهش برنج سالم تولیدی در لایه‌ها و نمونه ترکیبی حاصل از

## ۶- منابع

- [10] Souza, G. F. M. V., Miranda, R. F., Lobato, F. S., and Barrozo, M. A. S. (2015). Simultaneous heat and mass transfer in a fixed bed dryer. *Applied Thermal Engineering*. 90: 38-44.
- [11] Bennamoun, L., and Belhamri, A. (2008). Mathematical description of heat and mass transfer during deep bed drying: Effect of product shrinkage on bed porosity. *Applied Thermal Engineering*. 28(17-18), 2236-2244.
- [12] Ling, G., and Jianping, W. (2001). Study on the moisture uniformity of paddy drying technology by employing air direction reversals. *J. Zhejiang Univ*. 27 (5): 587-590.
- [13] Champagne, E. T. (2004). Rice: Chemistry and Technology. 3rd ed. St. Paul, Minn.: American Association of Cereal Chemists.
- [14] Chakraverty, A., and P. Singh. (2001). Postharvest Technology: Cereals, Pulses, Fruits, and Vegetables. Enfield, N.H.: Science Publishers.
- [15] Kunze, O. R., and Prasad, S. (1978). Grain fissuring potentials in harvesting and drying of rice. *Trans. ASAE*. 21(2): 361-366.
- [16] Lan, Y., and O. R. Kunze. (1996). Fissure resistance characteristics related to moisture adsorption stresses in rice. *Trans. ASAE*. 39(6): 2169-2174.
- [17] Ibrahim, M. N., Talab, K. T., Spotar, S., Muhammad, K., and Talib, R. A. (2013). Effects of airflow reversal in fixed-bed drying of rough rice on head rice yield and drying performance. *Transactions of the ASABE*. 56(4): 1485-1493.
- [18] Tajaddodi, K. (2012). Fixed-bed drying of rice with airflow reversal for product quality and drying performance. Serdang, Malaysia: Universiti Putra Malaysia, PhD thesis.
- [19] Latifi, A., and Esmaili, M. (2019). Effect of Steam Curing of Shiroudi Paddy on Quality, Texture and Thermal Properties of Rice. *Food Engineering Research*. 67: 61-72
- [20] Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., Blanchard, C. (2002). Ageing of stored rice: Changes in chemical and physical attributes. *Cereal Science*. 35(1): 65-78.
- [21] Tajaddodi Talab, K. Effect of commercial Guilan and Mazandaran rice varieties steaming on milling quality, physicochemical characteristics and nutritional value of rice and pests during storage. (2020). Final report of
- [1] Gazor, H. R., and Alizadeh, M. R. (2020). Comparison of rotary dryer with conventional fixed bed dryer for paddy drying, milling quality and energy consumption. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 22(2), 264-271.
- [2] Sarker, M. S. H., Ibrahim, M. N., Aziz, N. A., and Salleh, P. M. (2014). Energy and rice quality aspects during drying of freshly harvested paddy with industrial inclined bed dryer. *Energy conversion and management*. 77, 389-395.
- [3] Prachayawarakon, S., Sawanduianpen, S., Saynampheung, S., Poolp-atarachewin, T., Soponronnarit, S., and Nathakarakule, A. (2004). Kinetics of colour change during storage of dried garlic slices as affected by relative humidity and temperature. *Journal of Food Engineering*. 62: 1-7.
- [4] Jittanit, W., Saeteaw, N. and Charoenchaisri, A. (2010). Industrial paddy drying & energy saving options. *Journal of Stored Products Research*. 46(4): 209-213.
- [5] Sarker, M. S. H., Ibrahim, M. N., Aziz, N. A., and Punan, M. S. (2015). Overall energy requisite and quality feature of industrial paddy drying. *Drying Technology*. 33(11), 1360-1368.
- [6] Ogura, H., Hamaguchi, N., Kage, H., and Mujumdar, A. S. (2004). Energy and Cost Estimation for Application of Chemical Heat Pump Dryer to Industrial Ceramics Drying. *Dry Technol*. 22: 307-323.
- [7] Mondal, M. H. T., Shiplu, K. S. P., Sen, K. P., Roy, J., and Sarker, M. S. H. (2019). Performance evaluation of small scale energy efficient mixed flow dryer for drying of high moisture paddy. *Drying Technology*. 37(12): 1541-1550.
- [8] Goyal, S. K., Jogdand, S. V., Agrawal, A. K. (2014). Energy Use Pattern in Rice Milling Industries-a Critical Appraisal. *J. Food Sci. Technol*. 51: 2907-2916.
- [9] Ghiasi, M., Ibrahim, M. N., Kadir Basha, R., and Abdul Talib, R. (2016). Energy usage and drying capacity of flat-bed and inclined-bed dryers for rough rice drying. *International Food Research Journal*, 23:S23-S29.

- [31] Good, H. (2002). Measurement of color in cereal products. *Cereal Foods World*. 4: 5–6.
- [32] Kumar, C., Millar, G.J., and Karim, M. A. (2015). Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material. *Drying Technology*. 33: 227–237.
- [33] Zhang, W., Mujumdar, A.S. (1992). Deformation and stress analysis of porous capillary bodies during intermittent volumetric thermal drying. *Drying Technology*. 10(2): 421–443.
- [34] Turner, I.W., Jolly, P.C. (1991). Combined microwave and convective drying of a porous material. *Drying Technology*. 9 (5), 1209–1269.
- [35] Kumoro, A. C., Lukiwati, D. R., Praseptiangga, D., Djaeni, M., Ratnawati, R., Hidayat, J. P., and Utari, F. D. (2019, November). Effect of Bed Thickness on the Drying Rate of Paddy Rice in an Up-flow Fixed Bed Dryer. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1376, No. 1, p. 012045). IOP Publishing
- [36] Rao P.S., Bal S., and Goswami T.K. (2007). Modelling and Optimization of Drying Variables in Thin Layer Drying Of Parboiled Paddy. *J. Food Eng.* 78: 480–487.
- [37] Gunathilake, D. M. C. C., Senanayaka, D.P., Adiletta, G. and Senadeera, W. (2018). Drying of agricultural crops. In book: *Advances in Agricultural Machinery and Technologies* 1<sup>th</sup> Edi. Taylor and Francis Group. CRC Press. Pp: 331-365.
- [38] Champagne, E. T. (2004). *Rice: Chemistry and Technology*. 3rd ed. St. Paul, Minn.: American Association of Cereal Chemists.
- [39] Juliano, B., Perez, C. M. (1993). Critical moisture content for fissures in rough rice. *Cereal Chem.* 70: 613-615.
- project. *Rice Research Institute of Iran*. Page 87
- [22] Tajaddodi- Talab, K., Alipanah, F., Shahidi, A. (2020). Effect of steaming on bending strength and milling quality of high yield rice variety. *Food Engineering Research*. 69: 43-56
- [23] Latifi, A., and Esmaili, M. (2017). Effect of accelerated aging on physicochemical properties of rice cultivar Tarom. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 13(5), 798-807
- [24] Gujral, H.S., and Kumar, R. (2003). Effect of accelerated aging on the physicochemical and textural properties of brown and milled rice. *Journal of Food Engineering*. 59(2-3), 117-121
- [25] Hasannia, F., Tajaddodi Talab, K., Shahidi, S. A., and Ghorbani-Hasansaraei, A. (2022). Effect of steam curing on pasting and textural properties, starch structure and the quality of a local aromatic rice variety. *Journal of food processing and preservation*. 46(10), e16857.
- [26] Mclean. K. A. (1989). *Drying and storing combinable crops*. 2nd Edition. Farming Press. United Kingdom. 256p.
- [27] Islam, M. T., B. P. Marks, and F. W. Bakker-Arkema. (2004). Optimization of commercial ear-corn dryers. *Agric. Eng. Intl.: CIGR Ejournal* 6: Manuscript FP04007.
- [28] Ban, T. (1971). Rice cracking in high-rate drying. *Japanese Agric. Res. Qrtly*. 6: 113-116.
- [29] Thakur, A. K. and Gupta, A. K. (2006). Two stage drying of high moisture paddy with intervening rest period. *Energy Conversion and Management*. 47(18-19): 3069-3083.
- [30] Singh, N., Kaur, L., Sohdi, N.S., and Sekhon, K.S. (2005). Physicochemical, cooking and textural properties of milled rice from different Indian rice cultivar. *J. Food Chem.* 89: 253-259.



## Reverse airflow drying of steamed paddy and its effect on the rice quality and energy consumption

Hasannia, F. <sup>1</sup>, Tajaddodi Talab, K. <sup>2\*</sup>, Shahidi, S. A. <sup>3</sup>, Ghorbani-Hasansaraei, A. <sup>4</sup>

1. Ph.D student of Department of Food Science and Technology, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.
2. Assistant professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran.
3. Associated professor, Department of Food Science and Technology, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.
4. Associated professor, Department of Food Science and Technology, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

### ABSTRACT

Non-uniform drying and head rice reduction due to non-movement of paddy in common fixed bed dryers is one of the basic problems in rice milling factories. In order to investigate and provide a suitable drying method with the approach of creating uniformity in drying process, reducing losses, and saving energy consumption, a two factorial experiment in completely randomized design (CRD) was used. The factors were the initial moisture content (IMF) of paddy at two levels (16 and 18%) and drying method at 4 levels (one-way air flow, reverse air flow in 1 hour, 2 hours and 3 hours and then continuation of drying process the same as one-way airflow). The same drying air temperature and air velocity was considered for all treatments. In both moisture treatments, three hours reverse air flow drying has the highest head rice (75.7-75.86%) and the lowest energy consumption (41-49 MJ/kg water). The highest energy consumption with the amount of 79 and 67 MJ/kg water was belonging to the one-way air flow treatment of paddy with high and low IMC (respectively). In one way airflow, dried paddy in 10 cm from the bottom layers of dryer has the lowest amount of head rice (63.65%). In both moisture treatments, the results of mixed layers showed that one hour reverse air flow drying with values of 68.28-68.68% had the lowest head rice. Also, drying method had no significant effect ( $P > 0.05$ ) on the cooking quality.

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 2022/ 07/ 07  
Accepted 2022/ 08/ 10

#### Keywords:

Drying,  
Reverse airflow,  
Steaming,  
Head rice,  
Energy.

DOI: 10.22034/FSCT.19.133.225

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.133.19.4

\*Corresponding Author E-Mail:  
dr2eng@yahoo.com