

## بررسی میزان ترک شلتوک خشک‌شده توسط خشک‌کن دوار خورشیدی

مأده لیلایی<sup>۱</sup>، اکبر عرب‌حسینی<sup>۲\*</sup>، محمدحسین کیانمهر<sup>۳</sup> و هیمن امیری<sup>۴</sup>

### چکیده

فرآیند خشک‌کردن از جمله مراحل مهم و تأثیرگذار در فرآوری پس از برداشت شلتوک است که در کیفیت تبدیل آن به برنج سفید و درصد ترک ایجاد شده در دانه مؤثر است. به منظور کاهش مصرف انرژی در فرآیند خشک‌کردن شلتوک و همچنین از بین بردن اثرات سوء خشک‌کن‌های بستر ثابت موجود در کارخانه‌های شالیکوبی، یک دستگاه خشک‌کن دوار خورشیدی طراحی و ساخته شد. مخزن اصلی و دوار دستگاه از یک صفحه مشبک ساخته شده و توسط یک استوانه ثابت از جنس ورق گالوانیزه پوشیده شده است. صفحه مشبک موجب توزیع و عبور یکسان هوا از جهات مختلف و کاهش یکنواخت رطوبت شلتوک می‌شود. برای تأمین حرکت دورانی مخزن اصلی دستگاه از یک الکتروموتور ۰/۷۵ اسب بخار استفاده شده است. در این پژوهش اثر خشک‌کن دوار خورشیدی در کاهش رطوبت و میزان ترک ایجاد شده در شلتوک رقم هاشمی و همچنین تأثیر سرعت هوا بر کاهش رطوبت آن بررسی شد. شلتوک‌ها در بازه‌ی دمایی ۴۳ تا ۴۶ درجه سلسیوس با خشک‌کن دوار، خشک شدند. واکنش توسعه ترک در محصول با رطوبت‌های اولیه ۱۱، ۱۴ و ۱۶ درصد بر پایه‌ی تر بررسی شد. برای کمی‌کردن ترک تنش‌ی ایجاد شده در دانه‌های شلتوک از شاخص ترک تنش‌ی (SCI) استفاده شد. نتایج به دست آمده از شاخص تعداد ترک در دانه‌های برنج نشان می‌دهد که دستگاه خشک‌کن دوار خورشیدی دارای عملکرد قابل‌قبولی است و جمع‌کننده خورشیدی قادر به تأمین شرایط دمایی مد نظر برای خشک‌کردن شلتوک برنج (۴۳ تا ۴۶ درجه سلسیوس) است. بررسی‌های انجام گرفته در ارتباط با مقدار شاخص ترک تنش‌ی شلتوک‌ها و مقایسه آن با شاخص ترک تنش‌ی شلتوک‌های خشک‌شده با خشک‌کن بستر ثابت نشان می‌دهد که خشک‌کردن شلتوک به روش دوار باعث کاهش چشمگیری در ترک ایجاد شده در برنج قهوه‌ای می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** برنج، ترک تنش‌ی، خشک‌کن دوار خورشیدی، شلتوک.

ارجاع: لیلایی م. عرب‌حسینی ا. کیانمهر م. ح. و امیری ه. ۱۴۰۰. بررسی میزان ترک شلتوک خشک‌شده توسط خشک‌کن دوار خورشیدی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۱۸: ۳۷-۴۵.

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه فنی کشاورزی، دانشکده پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۲- دانشیار گروه فنی کشاورزی، دانشکده پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۳- استاد گروه فنی کشاورزی، دانشکده پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۴- فارغ‌التحصیل دکتری، گروه فنی کشاورزی، دانشکده پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

\* نویسنده مسئول: [ahosseini@ut.ac.ir](mailto:ahosseini@ut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۲

## مقدمه

برنج یکی از مهم‌ترین مواد غذایی در جهان است که بخش زیادی از کالری موردنیاز مصرف‌کنندگان را تأمین می‌کند و میلیون‌ها نفر از آن به عنوان غذای اصلی استفاده می‌کنند (Luh, 1991). این محصول به همراه گندم و ذرت جزو سه غله اساسی در زنجیره غذایی به حساب می‌آید. همزمان با افزایش جمعیت و با توجه به میزان اهمیت این محصول در ایران و سایر کشورها، کاهش ضایعات آن در هنگام فرآوری بسیار مهم است. از آنجایی که ارتباط ناگسستگی بین افزایش جمعیت و تأمین غذا وجود دارد، کاهش تلفات محصولات کشاورزی در مراحل مختلف تولید اهمیت بالایی دارد (Vijayavenkataraman *et al.*, 2012). رطوبت این محصول در هنگام برداشت بر پایه‌ی تر حدود ۲۵ درصد یا حتی بیشتر است. این میزان رطوبت سبب خسارت به محصول در هنگام انبارداری می‌شود به همین علت ابتدا باید رطوبت شلتوک را تا حدود ۱۴ درصد (رطوبت مناسب برای انبارداری و فرآیندهای بعد از برداشت) کاهش داد (Askari Asli Ardeh, & Ghebleh, 2016).

یکی از مراحل قابل توجه در تبدیل شلتوک به برنج سفید، فرآیند خشک‌کردن است که بر مقدار کمیت و همچنین کیفیت برنج تولیدی کارخانه‌ها تأثیر چشمگیری دارد. تنش‌های واردشده به دانه‌ی برنج در این مرحله و ترک‌های ایجادشده، از نظر میزان خرده برنج تأثیر زیادی در کیفیت برنج سفید حاصل دارد (Minaei *et al.*, 2005). طبق تحقیقات انجام‌شده، وجود خرده برنج قیمت محصول نهایی را به مقدار یک دهم در مقایسه با قیمت برنج مرغوب کاهش می‌دهد (Courtois *et al.*, 2001). همچنین عدم خشک‌کردن به موقع شلتوک باعث بروز فساد میکروبی، خسارت‌های ناشی از تجزیه ترکیبات شیمیایی دانه و جوانه‌زنی دانه پس از ۴۸ ساعت خواهد شد (Beeny & Basil, 1970, Javare & Reddy, 1987, Juliano, 1985). از اینرو فرآیند خشک‌کردن از نگرانی‌های اساسی اکثر کشورهای تولیدکننده برنج است. دو عامل مهم در ایجاد ضایعات برنج نوع دستگاه استفاده شده و رقم برنج هستند (Anonymous, 2015). از نظر تجاری، بازده برنج سالم به عنوان معیار تعیین‌کننده در میزان کیفیت برنج تعریف می‌شود (Webb, 1991). تنش‌های واردشده به توده محصول در حین خشک‌شدن، موجب ترک در دانه

شده و کیفیت محصول نهایی را کاهش می‌دهد. همچنین دمای هوای داغ برای خشک‌کردن و روش خشک‌کردن از جمله موارد قابل‌توجه طی این فرآیند هستند. تحقیقات انجام‌شده بر روی عوامل مؤثر فیزیکی در ترک‌خوردگی شلتوک در خشک‌کن با جریان معکوس نشان می‌دهد که افزایش دما از ۳۵ درجه سلسیوس به ۶۵ درجه سلسیوس، میزان ترک‌خوردگی را ۴۵ درصد افزایش می‌دهد (Kianmehr, 2001).

خشک‌کردن محصولات کشاورزی در محیط‌های باز و مقابل نور خورشید از قدیمی‌ترین روش‌ها برای کاهش رطوبت و نگهداری محصولات است. به علت پایین‌بودن سرعت خشک‌شدن در این روش، تلفات مربوط به آن نیز بیشتر است. مشکلات استفاده مستقیم از انرژی خورشید در خشک‌کردن محصولات کشاورزی سبب شده است تا انواع مختلفی از خشک‌کن‌های صنعتی مورد استفاده قرارگیرند. این خشک‌کن‌ها در کنار مزایای زیادی که دارند، دارای معایبی نظیر مصرف زیاد انرژی و عدم کنترل کافی در کاهش تلفات محصول نهایی هستند (Vijayavenkataraman *et al.*, 2012). امروزه رایج‌ترین نوع خشک‌کن‌هایی که در کشورهای آسیایی از جمله ایران استفاده می‌شوند خشک‌کن‌های بستر ثابت هستند. این خشک‌کن‌ها از یک مخزن ثابت تشکیل شده‌اند که در قسمت پایین آن یک صفحه مشبک قرار دارد و هوای گرم تأمین‌شده توسط مشعل از قسمت زیر صفحه مشبک به توده شلتوک اعمال می‌شود و پس از عبور از لایه‌های شلتوک رطوبت محصول را به خود می‌گیرد و از توده خارج می‌شود. مشعل تأمین‌کننده‌ی هوای گرم می‌تواند با نفت یا گازوئیل کار کند. استفاده از این نوع خشک‌کن زمان و انرژی زیادی را هدر می‌دهد. ماندن بیش از حد محصول در این خشک‌کن‌ها و بکاربردن دماهای نامتعارف باعث تغییر رنگ، بوی نامطبوع و بروز ترک‌های موئین در لایه‌های زیرین شلتوک در خشک‌کن می‌شود (Gazor *et al.*, 2013). دومین نوع خشک‌کن‌های مورد استفاده برای خشک‌کردن شلتوک‌ها در استان‌های شمالی ایران، خشک‌کن‌های ایستاده هستند که حدود ۱۰ درصد از خشک‌کن‌های مورد استفاده در این استان‌ها را تشکیل می‌دهد. عمدتاً این نوع خشک‌کن‌ها وارداتی بوده و ساخت کشورهای تایوان و چین هستند. به دلیل عدم آشنایی کافی با مسائل فنی این نوع خشک‌کن‌ها، از آنها در صنعت

و یا خیلی خشک باشد چراکه نمی‌تواند در برابر فشار مقاومت کند و دچار ترک می‌شود (Azizi & Shafi, 1966). طبق تحقیقات انجام‌شده، دما و زمان خشک‌کردن بیشترین تأثیر را بر روی ترک‌خوردگی محصول دارند (Mendoza & Rigor Jr, 1983).

شکل ظاهری برنج سفید و درصد دانه‌های شکسته در آن از پارامترهای کیفی مهم است که در بحث بازاریابی نیز مؤثر است. راندمان دستگاه، سرعت خشک‌کردن و مقدار انرژی مصرفی از جمله عوامل مؤثر در انتخاب روش خشک‌کردن و مقرون به صرفه بودن آن هستند. لذا با توجه به مشکلات موجود در خشک‌کن‌های مرسوم در ایران در این تحقیق یک دستگاه خشک‌کن دوار خورشیدی طراحی و ساخته شد. به منظور ارزیابی دستگاه، اثر دما بر میزان ترک‌خوردگی و همچنین اثر سرعت هوا بر کاهش رطوبت شلتوک برنج رقم طارم هاشمی بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

### تهیه و آماده‌سازی ماده آزمایشی

برای انجام آزمایش‌ها، شلتوک رقم هاشمی همزمان با فصل برداشت از یک کارخانه‌ی برنج سفیدکنی در شهرستان آمل تهیه و در شرایط متعارف آزمایشگاهی در دمای ۲۳ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۰ درصد نگهداری شده است. آزمایش‌ها در شهرستان پاکدشت، در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی استان تهران (عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۱ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی) و در طول فصل تابستان انجام شده است.

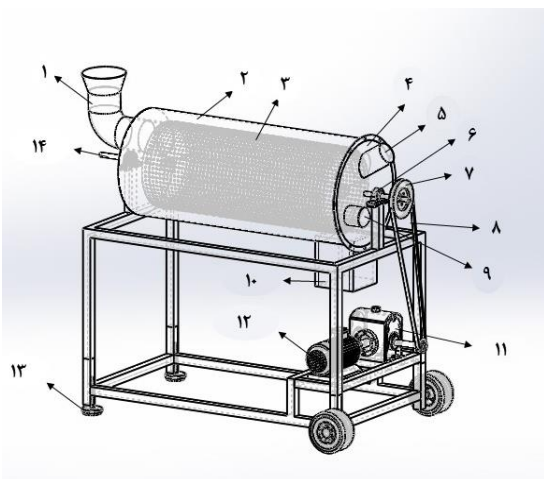
### دستگاه خشک‌کن دوار خورشیدی

برای انجام آزمایش‌ها در این تحقیق، ابتدا یک دستگاه خشک‌کن دوار خورشیدی شلتوک طراحی و ساخته شد. دستگاه خشک‌کن مورد استفاده در این تحقیق که در شکل ۱ نشان داده شده است شامل دو بخش اساسی مخزن مشبک دوار و محفظه خشک‌کن است که هر دو به شکل استوانه بوده و مخزن درون محفظه قرار دارد. مخزن مشبک دوار قسمت اصلی دستگاه بوده که بصورت یک استوانه مشبک با دو انتهای باز است. این استوانه مشبک دارای طول ۱۰۰ و قطر ۴۰ سانتی‌متر است و در هنگام

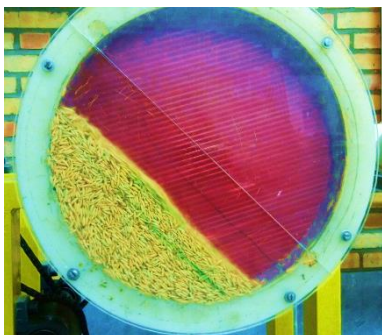
خشک‌کردن برنج استقبال کمی شده است. در این نوع خشک‌کن‌ها به دلیل نصب وسایل اندازه‌گیری دما و کنترل میزان ورود و خروج شلتوک در دستگاه، مصرف انرژی و زمان خشک‌شدن به طور قابل‌توجهی پایین است. در بررسی میدانی انجام‌شده بر روی خشک‌کن‌های ایستاده و خوابیده در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، ملاحظه شد که خشک‌کردن شلتوک با خشک‌کن‌های ایستاده با ظرفیت ۳ تا ۴ تن، حدود ۲۰ ساعت طول می‌کشد و با توجه به کاربرد تجهیزات کنترل دما، مصرف انرژی در خشک‌کن ایستاده ۴۳ درصد کمتر از خشک‌کن‌های خوابیده است علاوه بر این در خشک‌کن‌های ایستاده، یکنواختی بیشتری در خشک شدن دانه‌ها وجود دارد (Gazor *et al.*, 2013). در بیشتر سیستم‌های خشک‌کن، انرژی موردنیاز برای حذف رطوبت اضافی مواد غذایی به طور عمده از انرژی حرارتی حاصل از سوختن سوخت‌های فسیلی تأمین می‌گردد. بنابراین با توجه به رطوبت اولیه زیاد شلتوک برنج، خشک‌کردن آن به انرژی زیادی نیاز دارد (Billiris *et al.*, 2011). یکی از عوامل محدودکننده در طراحی خشک‌کن‌ها، لزوم مصرف پایین انرژی است. سوخت‌های فسیلی رو به پایان و تقاضا برای انرژی رو به افزایش است از این رو منابع انرژی نقش مهمی در آینده جهان دارند. از طرفی مصرف سوخت‌های فسیلی باعث پدید آمدن گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌گی هوا و بهم خوردن اکوسیستم موجود می‌شود. این امر باعث شده است که توجه بشر به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در دسترس و بدون آثار آلاینده‌گی جلب شود (Ummel & Wheeler, 2008). استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی در مناطق تولید محصولات کشاورزی، باعث صرفه‌جویی در بخش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های تولید و تبدیل بهینه و با کیفیت محصولات می‌شود (Soheili *et al.*, 2006).

شلتوک برنج به گرادبان رطوبت و انتقال جرم حساس است و در فرآیند خشک‌شدن واکنش نشان داده و در صورت عدم انتخاب روش و شرایط مطلوب، دچار تغییرات کیفی همچون ترک‌خوردگی، تغییر رنگ، عطر و طعم می‌شود (Lan & Zheng, 2007). ترک خوردن دانه برنج هنگامی رخ می‌دهد که تنش حاصل از تغییرات رطوبت، از مقاومت کششی دانه بیشتر شود (Kunze & Choudhury, 1972) دانه برنج در طول خشک‌شدن نباید خیلی مرطوب

انتخاب پولی‌ها به نحوی انجام شده است که کاهش دور به میزان ۳ به ۱ اتفاق بیفتد. دور خروجی مورد نظر با استفاده از یک اینورتر (LS ساخت کره جنوبی) تأمین شده است. برای تعیین قطر مخزن خشک کن از دستگاه استوانه‌ای دوار استفاده شد (شکل ۲). قطر مناسب با توجه به مقدار توده تغذیه شده به دستگاه و مدل حرکتی توده در داخل مخزن تعیین می‌شود نتایج این آزمایش نشان داد که مدل حرکتی توده شلتوک به صورت Slumping (ریزشی) که زیرمجموعه مدل حرکتی Cascading است، معمولاً در سرعت‌های پایین اتفاق می‌افتد (Mellmann, 2001). این مدل حرکتی باعث اختلاط کامل محصول و جلوگیری از ایجاد ضربه به دانه‌های شلتوک برنج می‌شود.



شکل ۱- شماتیک دستگاه خشک کن دوار و اجزای آن. ۱ دهانه ورودی محصول، ۲ محفظه خشک کن، ۳ مخزن مشبک دوار، ۴ درپوش، ۵ ورودی هوا، ۶ یا تاقان، ۷ پولی، ۸ تسمه، ۹ دریچه کنترل، ۱۰ خروجی محصول، ۱۱ جعبه دنده، ۱۲ الکتروموتور، ۱۳ پایه رزوه دار، ۱۴ محور اصلی دستگاه



شکل ۲- تصویر نوع حرکت Slumping (ریزشی) توده شلتوک در دستگاه استوانه‌ای دوار

کارکرد دستگاه با سرعت‌های دورانی مشخصی دوران می‌کند که این مکانیزم حرکتی باعث تغییر مداوم عمق بستر شلتوک در استوانه می‌شود به طوری که از عدم یکنواختی در خشک شدن محصول جلوگیری می‌کند. همچنین استوانه در راستای طولی خود دارای یک شیب قابل تنظیم است که عامل اصلی حرکت شلتوک‌ها و عدم سکون محصول در یک محل مشخص است. ترکیب حرکت دورانی و شیب استوانه باعث حرکت محصول در داخل مخزن می‌شود. با توجه به اینکه در استوانه‌های صیقلی با سرعت دوران پایین سرخوردگی (slipping) مواد دانه‌ای اتفاق می‌افتد و مانع مخلوط شدن مواد می‌شود (Mellmann, 2001) مخزن اصلی خشک کن، مشبک در نظر گرفته شده تا علاوه بر توزیع همزمان هوای گرم بر روی تمام سطوح شلتوک، با ایجاد اصطکاک بین مخزن و توده محصول، مانع سرخوردن توده در طول استوانه شود و محصول حین طی کردن طول مخزن به طور کامل مخلوط شود. استوانه مخزن از یک صفحه مشبک با روزنه‌هایی به قطر ۱ میلی‌متر، متناسب با ابعاد دانه شلتوک، ساخته شده است. برای هدایت هوای گرم ورودی به داخل مخزن مشبک و هوا بندگی و جلوگیری از هدررفت هوای داغ، محفظه خشک کن توسط ورق گالوانیزه به شکل استوانه ساخته شده است که مخزن استوانه‌ای مشبک را می‌پوشاند. دریچه‌های ورودی و خروجی هوای داغ، ورودی محصول و یک دریچه کنترل بر روی دو سطح قاعده استوانه مجفله در نظر گرفته شده است. همچنین دریچه خروجی محصول خشک شده در زیر محفظه گالوانیزه تعبیه شده است. شاسی دستگاه طوری ساخته شده است که بتواند شیب لازم خشک کن را فراهم کند به همین جهت برای سهولت در جابه‌جایی دو عدد چرخ زیر دو پایه شاسی به کار رفته و برای تنظیم شیب دستگاه از دو عدد پایه پیچی قابل تنظیم در زیر دو پایه دیگر استفاده شده است.

برای تأمین حرکت دورانی بخش متحرک دستگاه (مخزن مشبک) از یک الکتروموتور ۰/۷۵ اسب بخار با ۱۴۰۰ دور در دقیقه استفاده شده است. برای کاهش سرعت دورانی الکتروموتور از یک جعبه دنده‌ی حلزونی با نسبت ۱ به ۱۰۰ که جهت حرکت ۹۰ درجه تغییر می‌کند، استفاده شد. همچنین حرکت محور خروجی جعبه دنده توسط تسمه و پولی به محور اصلی دستگاه منتقل شده است،

### شیب دستگاه

در شیب‌های طولی مختلف مخزن استوانه‌ای، سرعت خطی حرکت مواد داخل مخزن متفاوت است. هر چه مقدار شیب بیشتر باشد پیشروی مواد در راستای طول استوانه سریع‌تر اتفاق می‌افتد و ماندگاری محصول در داخل مخزن کمتر خواهد شد. از این‌رو مدت زمان ماندگاری توده محصول به ازای هر متر طول، در شیب‌های مختلف بررسی شد. زمان ماندگاری محصول در مخزن و میزان دمای خشک‌کن بر میزان کاهش رطوبت تأثیر چشمگیری دارند. در آزمایش‌های انجام‌شده شیب خشک‌کن در سه سطح ۱، ۱/۵ و ۲ درجه تعیین شده است.

### خشک‌کردن شلتوک

شلتوک برنج در برابر آسیب‌های ضربه و تنش‌های فیزیکی بسیار حساس است. به همین منظور برای جلوگیری از آسیب‌های مربوط به ضربه، سرعت دورانی استوانه مشبک سه مقدار ۰/۲۱، ۰/۴۲ و ۰/۸۴ دور در دقیقه انتخاب شده است. برای ایجاد شرایط یکسان با تحقیقات کرمانی و همکاران (۲۰۰۷) به منظور مقایسه نتایج، دمای هوای داغ تأمین‌شده از صفحه جاذب خورشیدی برای خشک‌کردن توده محصول در بازه ۴۳ تا ۴۶ درجه سلسیوس تنظیم شده است. این کار با استفاده از تنظیم صفحه جاذب در زاویه‌ی مناسب نسبت به جهت تابش خورشید و تغییر زاویه آن انجام شده است. دوران مخزن و حرکت مواد در طول استوانه و برخورد هوای داغ به تمام سطوح شلتوک باعث خروج یکنواخت رطوبت از محصول شده که مانع ایجاد ترک‌های تنشی در محصول می‌شود.

### سرعت هوای خشک‌کردن

برای تأمین حجم مناسب هوا، دمنده استفاده‌شده در خشک‌کن دارای یک دریچه تنظیم‌کننده حجم و سرعت هوا است. با تنظیم موقعیت دریچه‌ی ورودی هوا در سه وضعیت باز، نیمه باز و بسته سرعت و حجم هوا در سه سطح مختلف حاصل می‌شود (جدول ۱). سپس نمونه‌ها با هر سه سطح سرعت هوا خشک شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته‌است. همچنین برای اندازه‌گیری سرعت هوا از یک دستگاه سرعت‌سنج باد Lutron مدل AM-4206 استفاده شده است. محل قرارگیری دستگاه در قسمت دهانه ورودی و خروجی هوا است.

همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود برای تأمین گرمای موردنیاز خشک‌کن از یک جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت که طول و عرض صفحه جمع‌کننده آن به ترتیب ۲۰۰ و ۹۵ سانتی‌متر و شیب آن از سطح افق ۲۸ درجه بود، استفاده شده است. برای عایق‌بندی، اطراف صفحه جمع‌کننده با تخته چوب صنوبر و پشم شیشه پوشانده شده و برای افزایش جذب نور تابیده شده از طرف خورشید، سطح صفحه جاذب با شیشه‌ی معمولی به ضخامت چهار میلی‌متر پوشانده شده است (Samimi et al., 2019). پوشش شیشه‌ای صفحه، دارای خواص نوری از جمله ضریب عبور ۰/۸۵، ضریب جذب ۰/۰۵ و ضریب بازتاب ۰/۱ است (Motahayer Razdari, 2016). برای رسیدن به بیشینه مقدار ضریب جذب انرژی خورشید، سطح صفحه جاذب با رنگ سیاه پوشیده‌شد و با مشبک‌کردن این صفحه جاذب از باقی‌ماندن انرژی در انتهای صفحه و هدررفت انرژی جلوگیری شده است (Motahayer Razdari, 2016). برای انتقال هوای گرم از محفظه جمع‌کننده به محفظه خشک‌کن از دمنده‌ی سانتریفیوژ با دبی ۵۰۵ مترمکعب بر ساعت و توان ۲۵۰ وات استفاده شده است. همچنین با توجه به کارکرد مداوم دستگاه خشک‌کن و مکش هوای داغ در مدت کار توسط فن، برای جلوگیری از صدمه دیدن دمنده و سوختن سیم‌پیچی آن، از یک دمنده که پره‌های آن از موتور جدا است، استفاده شده است.



شکل ۳- جمع‌کننده صفحه تخت خورشیدی (Arabhosseini et al., 2019)

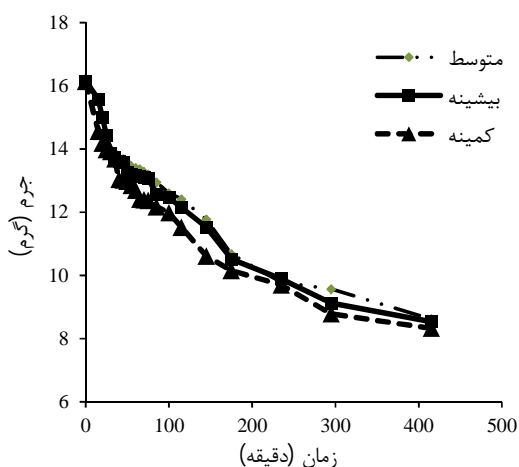
$$SCI=5m+3d+s \quad (1)$$

که در این معادله  $SCI$  (Stress-cracking index) شاخص ترک‌خوردگی تنشی،  $s$  تعداد دانه‌های دارای یک ترک،  $d$  تعداد دانه‌های دارای دو ترک و  $m$  تعداد دانه‌ها با بیش از دو ترک هستند.

### نتایج و بحث

#### تأثیر سرعت هوا بر کاهش رطوبت محصول

شکل ۵ تأثیر میزان سرعت هوا بر روند کاهش رطوبت شلتوک با رطوبت اولیه ۱۶ درصد با شیب طولی استوانه به میزان ۲ درجه و سرعت دورانی ۰/۲۱ دور در دقیقه را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشخص است کاهش رطوبت شلتوک در رطوبت‌های بالاتر سریعتر اتفاق می‌افتد. سرعت هوای متوسط و پایین تأثیر یکسانی بر کاهش رطوبت دارد. اما در رطوبت کمتر از ۱۳ درصد، هرچه سرعت هوا کمتر باشد به دلیل ماندگاری بیشتر هوا در طول مسیر صفحه جاذب و جذب حرارت بیشتر، رطوبت بیشتری از محصول جذب شده و فرصت برای انتقال جرم بیشتر، افزایش می‌یابد بنابراین شدت کاهش رطوبت بیشتر می‌شود.



شکل ۵- نمودار کاهش رطوبت نسبت به زمان در سرعت‌های مختلف هوا

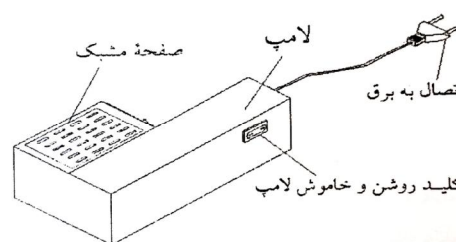
با توجه به تحقیق انجام‌شده توسط کرمانی و همکاران (۲۰۰۷) در ارتباط با بررسی قابلیت ترک‌خوردگی تنشی رقم برنج هاشمی، برای خشک‌کردن دانه‌های شلتوک تا رطوبت ۱۵ درصد دمای ۵۵ درجه سلسیوس اثر چندانی بر ایجاد ترک در دانه ندارد اما از این مرحله به بعد میزان

### جدول ۱- مقادیر سرعت هوای ورودی و خروجی

شرایط دمپر	سرعت هوای ورودی ( $m/s$ )	سرعت هوای خروجی ( $m/s$ )
باز	۱/۷۶	۰/۴
نیمه باز	۱/۹۰	۰/۵۷
بسته	۱/۸۴	۰/۴۵

### آزمون ترک تنشی شلتوک

طبق تحقیقات انجام‌شده ترک‌خوردگی در محصولات در طول فرآیند خشک‌کردن و یا بلافاصله بعد از آن اتفاق نمی‌افتد. به همین دلیل شلتوک‌ها پس از خشک‌شدن داخل کیسه‌های پلاستیکی زیپ‌دار درون یخچال با دمای ۴ درجه سلسیوس و به مدت ۴۸ ساعت نگهداری شده‌اند تا فرصت کافی برای ایجاد ترک وجود داشته باشد (Chen *et al.*, 1997, Sarker *et al.*, 1996). پس از این زمان، دانه‌های شلتوک به دقت با دست پوست‌گیری شده و با دستگاه ترک‌بین که در شکل ۴ نشان داده شده است مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ترک‌های ایجاد شده در سطح شلتوک باعث شکستن یا منعکس شدن شعاع‌های نوری عبوری از درون دانه و تیره‌تر شدن نیمه‌ی دیگر دانه می‌شود. در این آزمایش دانه‌ها در دو امتداد طولی و عرضی در برابر طیف نوری عبوری از شیشه قرار گرفته و ترک‌های آنها بررسی و ثبت شده است. تعداد ترک‌ها در هر تیمار مورد ارزیابی قرار گرفته و با نتایج (Kermani *et al.*, 2007) بر روی خشک‌کن بستر ثابت مقایسه شده است.

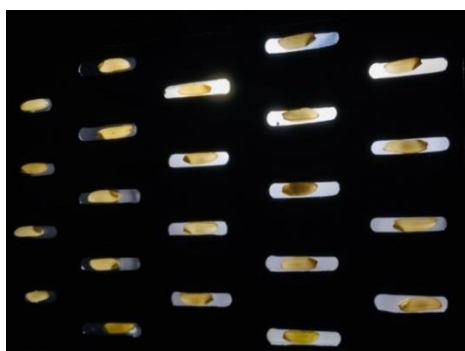


شکل ۴- طرحواره دستگاه ترک‌بین (Kermani *et al.*, 2007)

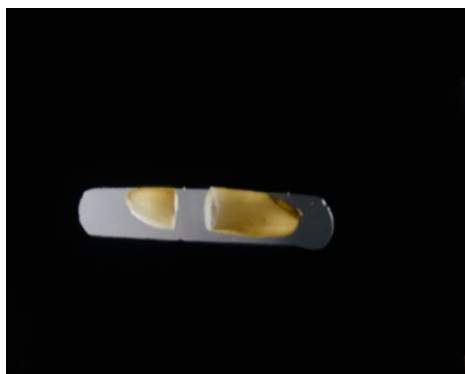
### شاخص ترک تنشی

شاخص ترک تنشی یک معیار کمی است که شدت ترک ایجاد شده در دانه را بیان می‌کند. برای تعیین این شاخص، با توجه به تعداد ترک‌های موجود بر روی دانه، نمونه‌ها در گروه‌های بدون ترک، یک ترک، دو ترک و چند ترک تقسیم‌بندی می‌شوند. رابطه (۱) شاخص ترک را نشان می‌دهد (Kermani *et al.*, 2007).

ترک شلتوک رقم هاشمی خشک‌شده با خشک‌کن بستر ثابت توسط کرمانی و همکاران، نشان می‌دهد که شلتوک‌های خشک‌شده در دمای ۴۵ درجه سلسیوس با رطوبت اولیه ۱۲ درصد دارای شاخص ترک برابر ۹۵، با رطوبت اولیه ۱۵ درصد دارای شاخص ترک ۵۷ و با رطوبت اولیه ۱۸ درصد دارای شاخص ترک ۱۰ بوده‌اند (Billiris et al., 2011; Kermani et al., 2007). به علاوه شلتوک‌های خشک‌شده با رقم یکسان و دمای تقریباً مشابه در خشک‌کن دوار نسبت به خشک‌کن بستر ثابت دارای تعداد ترک‌های کمتری است. شکل ۶ تصویر بازبینی ترک برنج قهوه‌ای را نمایش می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۶- تصویر بازبینی ترک برنج قهوه‌ای بر روی دستگاه ترک‌بین (الف) برنج قهوه‌ای بدون ترک (ب) برنج قهوه‌ای شکسته‌شده در اثر ترک

### نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از شاخص تعداد ترک در دانه‌های برنج نشان می‌دهد که دستگاه خشک‌کن خورشیدی دوار دارای عملکرد قابل‌قبولی است. همچنین این شاخص نشان می‌دهد که واحد جمع‌کننده خورشیدی به درستی توانایی ایجاد شرایط دمایی مناسب برای خشک‌کردن شلتوک برنج (۴۳ تا ۴۶ درجه سلسیوس) را دارد. از نتایج

دما در ایجاد ترک تأثیرگذار است لذا باید از دماهای پایین‌تر استفاده شود (Kermani et al., 2007). براساس آزمایش‌های انجام‌شده با دستگاه خشک‌کن دوار بازه‌ی دمایی ۴۳ تا ۴۶ درجه سلسیوس، دمایی مناسب برای کاهش رطوبت برنج رقم هاشمی است که جز ارقام دانه بلند به حساب می‌آید. مطالعات نشان می‌دهد ارقام دانه بلند کمتر از ارقام دانه متوسط دچار ترک‌خوردگی می‌شوند (Kunze, 1979).

### شاخص ترک‌خوردگی

نتایج حاصل از مقدار ترک‌های دیده‌شده در تیمارهای مختلف (در بازه دمایی ۴۳ تا ۴۶ درجه سلسیوس و پس از رسیدن به رطوبت نهایی ۷ درصد) در جدول ۲ دیده می‌شود. با توجه به اطلاعات جدول می‌توان دریافت که افزایش رطوبت اولیه از ۱۱ به ۱۴ درصد تفاوت مشخصی بین درصد بدون ترک در نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند ولی با افزایش رطوبت اولیه به ۱۶ درصد میزان دانه‌های ترک‌خورده بیشتر می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد تغییر شیب مخزن تأثیر معنی‌داری بر روی میزان ترک نمونه‌ها ندارد و فقط در رطوبت ۱۶ درصد با کاهش شیب میزان ترک‌خوردگی نمونه‌ها بیشتر می‌شود.

جدول ۲- تعداد ترک در ۱۰۰ عدد دانه شلتوک رقم طارم هاشمی خشک‌شده توسط خشک‌کن دوار در سرعت دورانی ۰/۲۱ دور در دقیقه

شاخص SCI	چند ترک	تعداد ترک	ترک ترک	بدون ترک	شیب (درجه)	رطوبت اولیه بر مبنای (درصد)
۶	۰	۲	۰	۹۸	۱	
۴	۰	۰	۴	۹۶	۱/۵	۱۱
۱	۰	۰	۱	۹۹	۲	
۱	۰	۰	۱	۹۹	۱	
۱	۰	۰	۱	۹۹	۱/۵	۱۴
۱۰	۲	۰	۰	۹۸	۲	
۱۱	۰	۱	۸	۹۱	۱	
۱۱	۰	۲	۵	۹۳	۱/۵	۱۶
۲	۰	۰	۲	۹۸	۲	

نتایج نشان می‌دهد در دمای خشک‌کردن یکسان تعداد ترک‌ها در مقایسه با نتایج کرمانی و همکاران (۲۰۰۷) که از خشک‌کن بستر ثابت برای خشک‌کردن شلتوک برنج طارم هاشمی استفاده کرده‌اند بسیار کمتر است. بررسی

9. Javare, G. S. & Reddy, S. R. (1987). Optimization of drying parameters in paddy seeds. *Seed Res*, 15(2): 176-182.
10. Juliano, B. O. (1985). *The rice grain and its gross composition*. Rice: chemistry and technology.
11. Kermani, A. M., Tavakkoli Hashjin, T., Khushtaqa, M. H. (2007). Stress cracking ability of two Hashemi and Caspian rice cultivars during the thin layer drying process. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 37(4): 705-697. (In Persian).
12. Kianmehr, M. H., (2001). *Investigation of Physical Factors Affecting on paddy rice cracking in Reversed Air Dryer*. PhD dissertation in Agricultural Machinery Mechanics, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modarres University. (In Persian).
13. Kunze, O. R. (1979). Fissuring of the rice grain after heated air drying. *Transactions of the ASAE*, 22(5): 1197-1201.
14. Kunze, O. R. (1972). Moisture adsorption related to the tensile strength of rice.
15. Luh, B. S. (1991). *Rice*, volume 2: Utilization, Springer Science & and Business Media.
16. Mellmann, J. (2001). The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior. *Powder technology*, 118(3): 251-270.
17. Mendoza, M. E., & Rigor Jr, A. C. (1983). *Grain quality deterioration in on-farm level of operation*. Philippine Phytopathology (Philippines).
18. Minaei, S., Rouhi, G.h. & Alizadeh, M., (2005). Investigation of Factors Influencing on Crack and crumb Rice due to Drying of Rice during Conversion Process. *Agricultural Engineering Research*, 22: 97-112. (In Persian).
19. Motahayer Razdari, M., (2016). *Optimization and evaluation of solar dryer absorber plate with recirculated air flow*. Master of Science in Biosystems Engineering. University of Tehran. (In Persian).
20. Samimi Akhijahani, H., Arabhosseini, A., Motahayer Razdari, M., & Fatehi, F. (2019). Investigation of Solar Dryer Performance Equipped with Heat Exchanger and Porous Plate System. *11th Iranian Congress of Biosystems and Mechanization Engineering*. (In Persian).
21. Sarker, N. N., Kunze, O. R., & Strouboulis, T. (1996). Transient moisture gradients in rough rice mapped with finite element model and related to fissures after heated air drying. *Transactions of the ASAE*, 39(2): 625-631.
- حاصل از خشک کردن شلتوکها در سه سطح سرعت هوا می توان دریافت که برای کاهش رطوبت از ۱۳ درصد به ۸ درصد هرچه سرعت هوا کمتر باشد (۱/۷۶ متر بر ثانیه - کمترین سرعت هوا)، زمان لازم برای کاهش رطوبت کمتر خواهد بود. همچنین از بررسی های انجام گرفته در ارتباط با شاخص ترک تنشی شلتوکها و مقایسه آن با شاخص ترک تنشی شلتوکهای خشک شده با خشک کن بستر ثابت بدست می آید که خشک کردن شلتوک به روش دوار باعث کاهش چشمگیر در ترک ایجاد شده در برنج قهوه ای می شود.

### منابع

1. Arabhosseini, A., Samimi-Akhijahani, H., & Motahayer, M. (2019). Increasing the energy and exergy efficiencies of a collector using porous and recycling system. *Renewable energy*, 132: 308-325.
2. Aziz, M. A. & Shafi, M. (1966). *Study on the effect of variety on milling*. Technical Bulletin No. 1-3. Department of Agriculture, Government of West Pakistan.
3. Beeny, J. M., & Basil, C. S. N. (1970). Multipass drying of paddy (rice) in the humid tropics. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 15(4): 364-374.
4. Billiris, M. A., Siebenmorgen, T. J., & Mauromoustakos, A. (2011). Estimating the theoretical energy required to dry rice. *Journal of food engineering*, 107(2): 253-261.
5. Chen, H., Siebenmorgen, T. J., & Marks, B. P. (1997). Relating drying rate constant to head rice yield reduction of long-grain rice. *Transactions of the ASAE*, 40(4): 1133-1139.
6. Courtois, F., Archila, M. A., Bonazzi, C., Méot, J. M., & Trystram, G. (2001). Modeling and control of a mixed-flow rice dryer with emphasis on breakage quality. *Journal of Food Engineering*, 49(4): 303-309.
7. Gazor, H. R., Alizadeh, M. R., & Younessy Alamouti, M. (2013). An analysis on the performance of dryers in rice factory in the northern provinces of Iran. *Eighth National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran*. (In Persian).
8. Ghebleh, N., & Askari Asli Ardeh, A., (2016). Investigation of Paddy Rice Solar Dryer Performance. *3rd International Conference on New Ideas in Agriculture, Environment and Tourism*. (In Persian).



22. Soheili Mehdizadeh, A., Poursani Kamal, A. & Akram, A. (2006). Design of forced-convection solar dryers for leafy vegetables and evaluation of solar collector performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 27: 147-164. (In Persian).
23. Ummel, K., & Wheeler, D. (2008). Desert power: the economics of solar thermal electricity for Europe, North Africa, and the Middle East. *Center for Global Development Working Paper*, 156.
24. VijayaVenkataRaman, S., Iniyar, S., & Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(5): 2652-2670.
25. Webb, B. D. (1991). *Rice quality and grades*. In *Rice* (pp. 508-538). Springer, Boston, MA.
26. Zheng, X., & Lan, Y. (2007). Effects of drying temperature and moisture content on rice taste quality. In *The Proceedings of the 5th Asia-Pacific Drying Conference: (In 2 Volumes)* (pp. 1112-1117).

