

ترک خوردگی تنش شلتوک تحت تأثیر شرایط فرآیندهای خشک کردن و استراحت‌دهی

مرتضی صادقی^{۱*}، علی قاسمی^۲، سید احمد میره‌ای^۳

۱. دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۵/۱۰)

چکیده

در این تحقیق اثر فرآیندهای خشک کردن متناوب و پیوسته بر ترک خوردگی شلتوک ارقام هاشمی و کوهسار بررسی شد. ترک خوردگی دانه‌ها بر مبنای شاخص ترک تنشی ارزیابی شد. آزمایش‌ها در دماهای خشک کردن و استراحت‌دهی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ °C، زمان‌های خشک کردن ۲۰، ۴۰ و ۶۰ min و زمان استراحت‌دهی ثابت ۸۰ min انجام شد. شاخص ترک تنشی هنگام خشک کردن به روش متناوب نسبت به روش پیوسته به طور معنی‌داری در دماهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ °C به ترتیب از ۴۳/۵ به ۱۷، ۷۴/۲۵ به ۲۸/۳ و ۸۳ به ۵۸/۴ کاهش پیدا کرد. همچنین مقدار شاخص ترک تنشی بلافاصله پس از عملیات خشک کردن نسبت به مقدار آن پس از گذشت ۴۸ ساعت از زمان عملیات به صورت معنی‌داری از ۲۸/۷۸ به ۴۶/۷۳ افزایش یافت. افزایش دمای استراحت‌دهی به علت یکنواخت کردن سریع‌تر رطوبت درون دانه، سبب کاهش کل زمان فرآیند خشک شدن و شاخص ترک تنشی شد. بنابراین، با انجام عملیات استراحت‌دهی مناسب می‌توان ضمن حفظ کیفیت محصول کل زمان خشک شدن دانه را نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن متناوب، رقم، شاخص ترک تنشی، گرادیان‌های رطوبتی

مقدمه

برنج یکی از مهم‌ترین مواد غذایی بشر محسوب می‌شود، زیرا حدود یک سوم مردم جهان به عنوان غذای اصلی به آن وابسته‌اند. با توجه به لزوم خودکفایی در تولید برنج کشور، کاهش ضایعات طی فرآیند تبدیل شلتوک به برنج سفید از موارد مهم در افزایش تولید محسوب می‌شود. برنج عموماً در رطوبت بالا (۲۵٪ تا ۳۵٪ بر پایه تر) برداشت می‌شود و برای انجام فرآیند تبدیل و جلوگیری از فساد محصول در انبار، نیاز است تا محتوای رطوبتی آن به یک مقدار مشخص (۱۲٪ تا ۱۴٪ بر پایه تر) کاهش یابد (Zamani & Alizadeh, 2007).

در هر یک از مراحل تبدیل برنج مقداری ضایعات وجود دارد. برخی از این ضایعات به دلیل کاربرد نامناسب تجهیزات تبدیل است، اما دلیل عمده شکستگی دانه‌ها وجود ترک‌هایی است که طی مرحله خشک کردن و پس از آن درون دانه ایجاد می‌شوند (Dong et al., 2010). این ترک‌های داخلی مقاومت دانه به شکست را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. در یک تحقیق، آزمون خمش روی نمونه‌های برنج خشک شده در دمای ۶۰ °C انجام و مشخص شد که ضریب کشسانی ظاهری،

مقاومت خمشی و انرژی شکست در دانه‌های برنج سالم نسبت به دانه‌های ترک‌دار بیشتر بود (Zhang et al., 2005). این پدیده نشان می‌دهد که ترک‌هایی که طی فرآیند خشک کردن درون دانه ایجاد می‌شوند و یا گسترش می‌یابند، باعث ضعیف شدن دانه نسبت به شکست می‌شوند.

اختلاف دمای سطح و مرکز دانه طی فرآیند خشک کردن باعث ایجاد تنش حرارتی در دانه می‌شود. گرادیان‌های دمایی معمولاً پس از گذشت زمان اندکی از شروع عملیات خشک کردن از بین می‌روند. در نتیجه، این گرادیان‌ها می‌توانند نادیده گرفته شوند (Yang et al., 2000). از سوی دیگر، طی فرآیند خشک کردن به دلیل اینکه رطوبت سطح دانه نسبت به مرکز آن با نرخ بیشتری کاهش می‌یابد، قسمت‌های داخلی و مرکزی نسبت به قسمت‌های سطحی محتوای رطوبتی بالاتری پیدا می‌کنند (گرادیان‌های رطوبتی) (Nasrnia et al., 2012). این گرادیان‌های رطوبتی باعث ایجاد تنش‌های کششی در سطح و تنش‌های فشاری در داخل دانه می‌شوند که چنانچه مقدار آن‌ها از مقاومت دانه به ترک تجاوز کند، سبب ایجاد ترک در دانه برنج می‌شوند (Jia et al., 2000).

به منظور کاهش ترک خوردگی، روش خشک کردن متناوب به طور گسترده‌ای در صنعت خشک کردن مواد دانه‌ای،

* نویسنده مسئول: sadeghimor@cc.iut.ac.ir

صرفه‌جویی انرژی در کارخانه‌های برنج‌کوبی اهمیت دارد (Tajaddodi Talab, 2005).

تحقیقات بسیاری در زمینه مطالعه عوامل موثر بر ایجاد ترک در دانه شلتوک طی فرآیندهای خشک کردن و استراحت‌دهی صورت گرفته است (Steffe & Singh, 1980; Cnossen *et al.*, 2000; Dong *et al.*, 2010). به هر جهت، در این زمینه تحقیقات اندکی در کشور صورت گرفته است (Tajddodi Talab, 2005; Nasmnia *et al.*, 2012). تحقیقات انجام شده به بررسی عوامل موثر بر کیفیت شلتوک خشک شده به روش پیوسته پرداخته‌اند (Minaei *et al.*, 2005; Hedayatipour & Rahmati, 2007; Khoshtaghaza *et al.*, 2007). از سوی دیگر، با وجود اهمیت کاهش ضایعات شلتوک در حین فرآیند تبدیل، خشک کردن این محصول استراتژیک در کشور، مطالعه اثر فرآیند استراحت‌دهی بر کاهش ضایعات و زمان خشک شدن شلتوک ضروری است. در این تحقیق، تأثیر دماهای خشک کردن و استراحت‌دهی و همچنین مدت فرآیند خشک کردن قبل از هر مرحله استراحت‌دهی بر شاخص ترک تنشی دو رقم شلتوک هاشمی (دانه بلند) و کوهسار (دانه متوسط) در روش‌های خشک کردن متناوب و پیوسته در محدوده دمایی ۳۰ تا ۶۰ °C مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تهیه، نگهداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور مطالعه اثر رقم، رقم‌های شلتوک دانه متوسط و دانه بلند برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شدند. رقم کوهسار به عنوان رقم دانه متوسط از مزارع مرکز تحقیقات برنج آمل (استان مازندران) برداشت شد. رقم طارم هاشمی نیز که از مزرعه‌ای در شهرستان آستانه اشرفیه (استان گیلان) برداشت شده بود، به عنوان رقم دانه بلند انتخاب شد. نمونه‌ها بلافاصله پس از تهیه تمیز شده و کاه و کلش موجود در آن‌ها از دانه‌های شلتوک جدا شد. سپس نمونه‌ها در بسته‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌کیپ بسته‌بندی و در سردخانه با دمای ۴ °C تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند (Iguaz *et al.*, 2006). برای اندازه‌گیری محتوای رطوبتی اولیه، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون آون در دمای ۱۳۰ °C قرار داده شدند (ASAE Standards, 1982). محتوای رطوبتی اولیه رقم‌های هاشمی و کوهسار به ترتیب برابر با ۲۱/۹۷٪ و ۲۰/۱۹٪ بر پایه تر به دست آمد.

آزمایش‌های خشک کردن و استراحت‌دهی

آزمایش‌های خشک کردن پیوسته و متناوب توسط یک خشک‌کن جریان همرفت هوای داغ مجهز به سیستم کنترل دما

به ویژه مواد حساس به حرارت مانند شلتوک، به کار می‌رود. در این روش (روش چند مرحله‌ای) پس از هر مرحله خشک کردن، شلتوک در محلی که اجازه تبادل رطوبت با محیط بیرون را ندارد (محیط بسته) برای یک مدت مشخص در یک دمای معین نگهداری می‌شود که به آن فرآیند استراحت‌دهی^۱ گفته می‌شود. طی این فرآیند، رطوبت از بخش‌های مرکزی به آرامی به سطح دانه انتشار می‌یابد. از آنجا که این فرآیند در یک محیط بسته انجام می‌شود، باعث کاهش گرادیان‌های رطوبتی در داخل دانه شده و در نتیجه از ایجاد ترک تا حد زیادی جلوگیری می‌کند. به علاوه، با انجام فرآیند استراحت‌دهی، حذف رطوبت در مراحل بعدی خشک کردن با سرعت بیشتری انجام خواهد شد و در نتیجه منجر به کاهش مصرف انرژی و افزایش ظرفیت کاری خشک‌کن می‌شود (Steffe & Singh, 1980). طی تحقیقی، اثر تعداد مراحل خشک کردن بر ترک‌خوردگی دانه برنج و شاخص عملکرد برنج سالم مطالعه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که خشک کردن طی دو یا سه مرحله و استفاده از عمل استراحت‌دهی بین مراحل خشک کردن باعث افزایش شاخص عملکرد برنج سالم و کاهش درصد دانه‌های ترک‌خورده می‌شود (Aquerreta *et al.*, 2007). همچنین در تحقیقی دیگر مشاهده شد که در صورت انجام عملیات استراحت‌دهی در مدت مناسب در دمای ۶۰ °C، می‌توان بدون کاهش کیفیت برنج از دماهای بالا (تا ۸۰ °C) برای خشک کردن برنج استفاده کرد. طی این تحقیق همچنین مشخص شد که خشک کردن به صورت متناوب در دمای بالا از تعداد ترک‌ها نسبت به خشک کردن به صورت پیوسته تا ۲۰ درصد می‌کاهد (Iguaz *et al.*, 2006). Nasmnia *et al.* (2012)، اثر شرایط خشک کردن سریع و ملایم در چهار بازه زمانی مختلف در هر مرحله از خشک کردن همراه با انجام فرآیند استراحت‌دهی در زمان‌های مختلف را بر درجه سفیدی جرمی و نوری دو رقم شفق (دانه بلند) و سازندگی (دانه متوسط) مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که با افزایش زمان خشک کردن، در هر دو شرایط خشک کردن سریع و ملایم، درجه سفیدی جرمی و نوری دانه‌های برنج افزایش یافت و انجام فرآیند استراحت‌دهی برای هر دو رقم تحت شرایط خشک کردن آرام نیز بر درجه سفیدی جرمی به طور معنی‌داری مؤثر بود. طی تحقیقی اثر خشک کردن چند مرحله‌ای بر بازده تبدیل و زمان خشک کردن شلتوک رقم خزر بررسی شد، نتایج کاهش زمان خشک کردن را همزمان با افزایش تعداد توقف‌ها حین عملیات خشک کردن نشان داد که این موضوع از نظر

1. Tempering

مشاهده و مطالعه ترک خوردگی

به منظور مطالعه توسعه ترک‌های ایجاد شده درون دانه شلتوک پس از انجام فرآیندهای خشک کردن پیوسته و متناوب، تعداد ترک و چگونگی آن‌ها، از شاخص ترک تنش‌ی^۱ (رابطه ۱) استفاده شد (Kermani et al., 2006).

$$SCI = 5m + 3d + s \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، SCI شاخص ترک تنش‌ی، m تعداد دانه‌های دارای بیش از دو ترک، d تعداد دانه‌های دارای دو ترک و s تعداد دانه‌های دارای یک ترک می‌باشند.

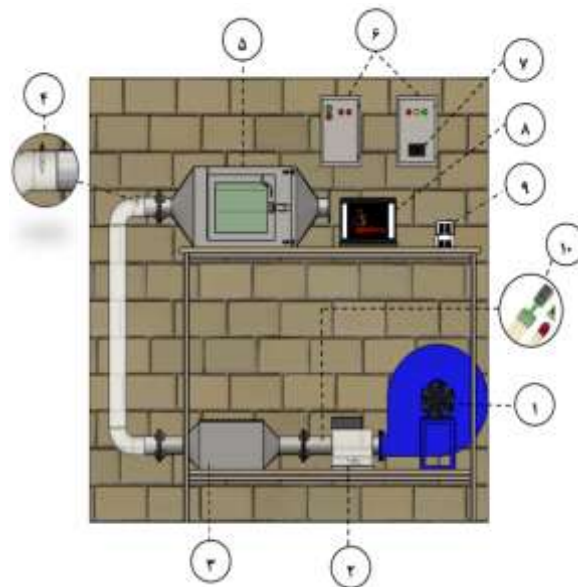
قبل از شروع آزمایش‌های خشک کردن و استراحت دهی، به منظور تعیین تعداد ترک‌هایی که به هنگام برداشت دانه و عملیات تمیز کردن دانه‌ها درون آن‌ها ایجاد شده بود، از هر رقم تعداد ۱۰۰ دانه به صورت تصادفی جدا شد و تعداد ترک‌های موجود قبل از انجام فرآیندهای خشک کردن و استراحت‌دهی بر مبنای شاخص ترک تنش‌ی تعیین شد.

برای تعیین تعداد ترک‌های دانه پس از رسیدن به رطوبت نهایی (۱۲٪ بر پایه تر) نیز از هر تیمار ۱۰۰ دانه به صورت تصادفی جدا شده و پوست آن‌ها به آرامی با دست گرفته شد. سپس تعداد ترک‌ها در هر دانه و همچنین تعداد دانه‌های ترک خورده با مشاهده آن‌ها توسط یک دستگاه بینوکلر تعیین شد. این دستگاه در واقع یک میکروسکوپ نوری بود که به کمک تابش نور و ذره‌بین موجود بر روی آن ترک‌های ایجاد شده درون دانه به راحتی قابل مشاهده بودند. دستگاه مورد استفاده دارای یک عدسی $40\times$ و قابلیت نور پردازی از بالا و پایین نمونه بود. از آن جا که ترک خوردگی شلتوک پس از انجام عملیات خشک کردن نیز ادامه داشته و حدود ۴۸ ساعت پس از آخرین مرحله خشک شدن ثابت خواهد ماند، ترک خوردگی دانه باید پس از سپری شدن این زمان اندازه‌گیری شود (Toshizo, 1971). بنابراین، مشاهده ترک‌ها در دو نوبت یکی بلافاصله پس از مرحله نهایی خشک شدن و دیگری پس از گذشت ۴۸ ساعت از آن انجام گرفت.

طرح آماری مورد استفاده

مهم‌ترین عوامل موثر در شکست دانه قبل از تبدیل عبارتند از نوع رقم، شرایط مزرعه و شرایط خشک کردن شامل نوع فرآیند و خشک‌کن مورد استفاده، دما و زمان خشک کردن و استراحت‌دهی، سرعت جریان هوا، رطوبت نسبی هوای ورودی به خشک‌کن و رطوبت نهایی محصول. در این مطالعه شاخص ترک تنش‌ی به عنوان متغیر وابسته و رقم، دمای خشک کردن،

و رطوبت نسبی هوا در سه دمای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ °C، رطوبت نسبی ۴۰٪ و سرعت هوای ۰/۵ m/s انجام شدند. به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در ورودی هوای داغ به محفظه خشک‌کن از یک سرعت‌سنج سیم داغ (مدل AM-4204 ساخت کشور تایوان) استفاده شد. شکل ۱ طرحواره خشک‌کن مورد استفاده و اجزای آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرحواره خشک‌کن جریان همرفت هوای داغ مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها (۱ دمنده هوا، ۲ سیستم تولید و کنترل رطوبت نسبی هوا، ۳ کوره، ۴ حسگر دما، ۵ محفظه خشک‌کن، ۶ تابلو برق، ۷ سیستم کنترل دما، ۸ سیستم نمایش و ثبت اطلاعات، ۹ اینورتر برای تنظیم سرعت جریان هوا و ۱۰ حسگر رطوبت نسبی و دمای هوا)

در خشک کردن به روش متناوب (چند مرحله‌ای) برای مطالعه اثر زمان خشک کردن بر ترک خوردگی دانه‌ها، آزمایش‌های خشک کردن در هر مرحله به مدت‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ min انجام شدند. به منظور مطالعه اثر دمای استراحت‌دهی بر ترک خوردگی و کل زمان انجام فرآیند خشک کردن، نمونه‌ها بلافاصله پس از انجام هر مرحله از خشک کردن، از خشک‌کن خارج و درون بسته‌های پلی‌اتیلنی در آون در سه سطح دمای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ °C به مدت ۸۰ min قرار می‌گرفتند. لازم به توضیح است که پس از قرارگیری نمونه در بسته‌های پلی‌اتیلنی هوای درون نمونه خارج و درب آن محکم بسته می‌شد. بلافاصله پس از پایان مرحله استراحت‌دهی، نمونه‌ها از آون خارج شده و برای انجام مرحله بعدی خشک کردن آماده می‌شدند (Nasrnia et al., 2012; Dong et al., 2010). آزمایش‌های خشک کردن و استراحت‌دهی تا رسیدن رطوبت نمونه‌ها به ۱۲٪ بر پایه تر ادامه می‌یافت (Hedayatipour & Rahmati, 2007).

آزمایش‌های خشک کردن و استراحت‌دهی) برای ارقام هاشمی و کوهسار به ترتیب برابر با ۶ و ۱۰ واحد به دست آمد. نتایج تجزیه واریانس اثر دمای خشک کردن، دمای استراحت‌دهی، زمان خشک کردن، رقم و اثر متقابل آنها بر شاخص ترک تنشی شلتوک در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشخص است، اثر تمامی عوامل آزمایشی و اثر متقابل دمای خشک کردن و دمای استراحت‌دهی، زمان خشک کردن و دمای خشک کردن، زمان خشک کردن و دمای استراحت‌دهی، اثر متقابل سه‌گانه آنها و اثر متقابل رقم و دمای خشک کردن بر شاخص ترک تنشی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بودند. اختلاف معنی‌دار در شاخص ترک تنشی بین ارقام مورد مطالعه را می‌توان به دلیل تفاوت در ترکیبات آنها و همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی آنها دانست. مطابق انتظار ارقام مختلف در مقابل تنش‌های اعمال شده مقاومت مختلفی دارند. این تفاوت هم به مسائل ژنتیکی و هم به خصوصیات ظاهری دانه‌ها بستگی دارد (Lee, 1979).

دمای استراحت‌دهی و زمان خشک کردن به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. برای مطالعه اثر دماهای خشک کردن و استراحت‌دهی، زمان خشک کردن، رقم و اثر متقابل آنها بر شاخص ترک تنشی از روش آماری کورت سه بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی استفاده شد. دمای خشک کردن (۴۵، ۳۰ و ۶۰ °C) به عنوان کرت اصلی و دمای استراحت‌دهی (۴۵، ۳۰ و ۶۰ °C)، زمان خشک کردن (۲۰، ۴۰ و ۶۰ min) و رقم (ارقام کوهسار و هاشمی) به ترتیب به عنوان کرت‌های فرعی در نظر گرفته شدند. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و آزمون مقایسه میانگین‌ها با استفاده از حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) انجام شد.

نتایج و بحث

شاخص ترک تنشی شلتوک

مقادیر شاخص ترک تنشی اولیه (ترک‌خوردگی قبل از انجام

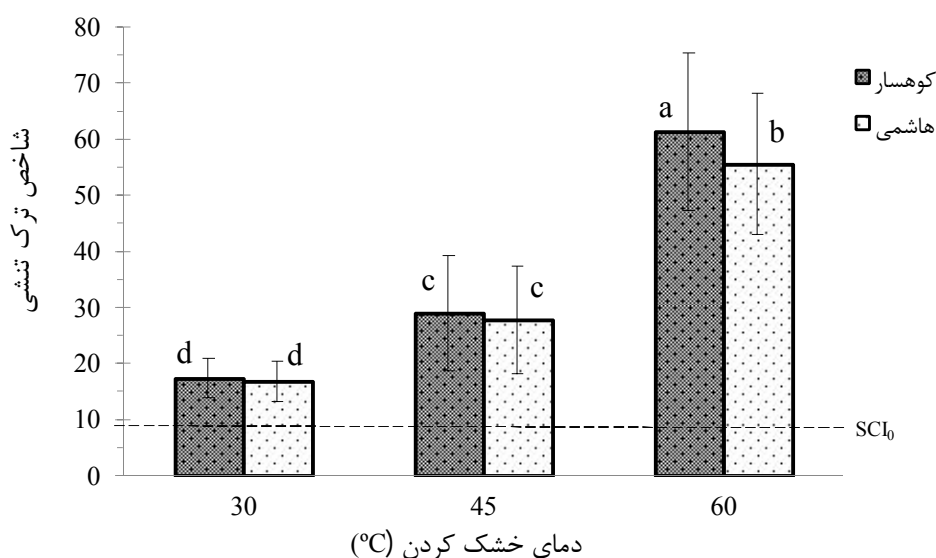
جدول ۱ - نتایج تجزیه واریانس اثر دمای خشک کردن، دمای استراحت‌دهی، زمان خشک کردن، رقم و اثر متقابل آنها بر شاخص ترک تنشی شلتوک

| F | MS | SS | df | منابع تغیی‌رات |
|------------------------|---------|----------|-----|--|
| | ۹/۴۸ | ۹/۴۸ | ۱ | بلوک |
| ۱۱۸۰۶/۹۱ ^{**} | ۱۸۸۰۳/۶ | ۳۷۶۰۷/۱۸ | ۲ | دمای خشک کردن |
| | ۱/۵۹ | ۳/۱۸ | ۲ | خطای (دمای خشک کردن) |
| | | ۳۷۶۱۹/۸۵ | ۵ | کورت اصلی (MP) |
| ۱۱۶/۴۳ ^{**} | ۶۷۵/۹۵ | ۱۳۵۱/۹۱ | ۲ | دمای استراحت‌دهی |
| ۳۰/۱۶ ^{**} | ۱۷۵/۰۹ | ۷۰۰/۳۷ | ۴ | دمای خشک کردن × دمای استراحت‌دهی |
| | ۵/۸ | ۳۴/۸۳ | ۶ | خطای (دمای استراحت‌دهی) |
| | | ۲۰۸۷/۱۱ | ۱۲ | کورت فرعی (SP) |
| ۶۱۵/۲۲ ^{**} | ۲۶۶۵/۹۵ | ۵۳۳۱/۹۱ | ۲ | زمان خشک کردن |
| ۱۲۴/۶ ^{**} | ۵۳۹/۹۳ | ۲۱۵۹/۷ | ۴ | زمان خشک کردن × دمای خشک کردن |
| ۲۱/۹۷ ^{**} | ۹۵/۲ | ۳۸۰/۸۱ | ۴ | زمان خشک کردن × دمای استراحت‌دهی |
| ۶/۳۹ ^{**} | ۲۷/۷ | ۲۲۱/۵۷ | ۸ | زمان خشک کردن × دمای استراحت‌دهی × دمای خشک کردن |
| | ۴/۳۳ | ۷۸ | ۱۸ | خطای (زمان خشک کردن) |
| | | ۸۱۷۲ | ۳۶ | کورت فرعی فرعی (SSP) |
| ۲۳/۶ ^{**} | ۱۲۸/۹۳ | ۱۲۸/۹۲ | ۱ | رقم |
| ۷/۷۳ ^{**} | ۴۲/۲۶ | ۸۴/۵۱۸ | ۲ | رقم × دمای خشک کردن |
| ۱/۶۱ ^{ns} | ۸/۷۹ | ۱۷/۵۷ | ۲ | رقم × دمای استراحت‌دهی |
| ۰/۳۸ ^{ns} | ۲/۰۶ | ۴/۱۳ | ۲ | رقم × زمان خشک کردن |
| ۱/۱۳ ^{ns} | ۶/۲۰ | ۲۴/۸۱ | ۴ | رقم × دمای خشک کردن × دمای استراحت‌دهی |
| ۰/۱۸ ^{ns} | ۰/۹۸ | ۳/۹۲ | ۴ | رقم × دمای خشک کردن × زمان خشک کردن |
| ۱/۵۰ ^{ns} | ۸/۱۷ | ۳۲/۷ | ۴ | رقم × زمان خشک کردن × دمای استراحت‌دهی |
| ۱/۳۷ ^{ns} | ۷/۴۹ | ۵۹/۹۱ | ۸ | رقم × دمای خشک کردن × دمای استراحت‌دهی × زمان خشک کردن |
| | ۵/۴۶ | ۱۴۷/۵ | ۲۷ | خطای (رقم) |
| | | ۵۰۴ | ۵۴ | کورت فرعی فرعی فرعی (SSSP) |
| | | ۴۸۳۸۲/۹۶ | ۱۰۷ | کل |

^{**}بی‌انگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ns عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

دمای 60°C نسبت به خشک کردن در دماهای 30°C و 45°C را می‌توان ایجاد گرادیان‌های رطوبتی بزرگتر درون دانه هنگام خشک کردن در دمای 60°C و در نتیجه افزایش تعداد دانه‌های دارای بیش از دو ترک دانست. Yang و همکاران (۲۰۰۳) نیز گزارش کردند که با افزایش دمای خشک کردن از 30°C به 60°C عملکرد برنج سالم برای ارقام Cypress و M202 به دلیل ایجاد گرادیان‌های رطوبتی بزرگ درون دانه به طور معنی‌داری کاهش یافت.

شکل ۲ مقادیر میانگین شاخص ترک تنشی دانه‌های شلتوک در خشک کردن به روش متناوب در دماهای 30°C ، 45°C و 60°C و انجام 80 min عملیات استراحت‌دهی بین مراحل خشک کردن را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، در دماهای خشک کردن 30°C و 45°C شاخص ترک تنشی نسبت به خشک کردن در دمای 60°C بسیار کمتر بود. با توجه به اینکه ایجاد گرادیان‌های رطوبتی درون دانه طی فرآیند خشک شدن علت اصلی ایجاد ترک درون دانه است (Sarker et al., 1996)، علت افزایش شاخص ترک تنشی در خشک کردن با



شکل ۲- تغییرات شاخص ترک تنشی دانه‌های شلتوک با دمای خشک کردن در روش متناوب برای ارقام هاشمی و کوهسار (حروف انگلیسی کوچک متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD می‌باشند)

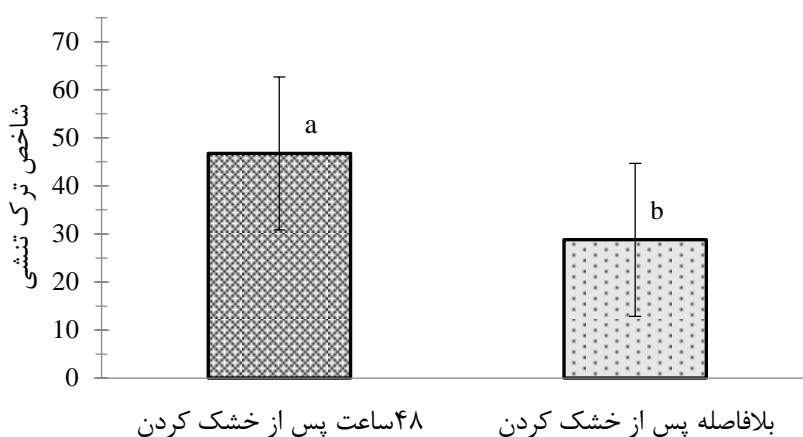
احتمال شکستگی این دانه‌ها در حین فرآیند تبدیل بسیار افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود ۴۸ ساعت پس از خشک شدن، تعداد ترک‌ها نسبت به تعداد آن‌ها بلافاصله پس از عملیات خشک کردن، به دلیل گسترش ترک‌های ریز ایجاد شده درون دانه، افزایش یافته است.

جدول ۲ تعداد دانه‌های دارای بیش از دو ترک، دانه‌های دارای دو ترک و دانه‌های دارای یک ترک را بلافاصله پس از اتمام عملیات خشک شدن و ۴۸ ساعت پس از آن نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل می‌توان نتیجه گرفت که در دمای 60°C ، تعداد دانه‌های دارای دو ترک و بیش از دو ترک نسبت به مقادیر مشابه در دو دمای دیگر بیشتر است. در نتیجه،

جدول ۲- تعداد دانه‌های دارای بیش از دو ترک، دارای دو ترک و دارای یک ترک، بلافاصله پس از اتمام عملیات خشک شدن و ۴۸ ساعت پس از آن

| دمای خشک کردن ($^{\circ}\text{C}$) | میانگین تعداد دانه‌های دارای بیش از دو ترک | میانگین تعداد دانه‌های دارای دو ترک | میانگین تعداد دانه‌های دارای یک ترک | ترک |
|--------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| ۳۰ | ۰ | ۱/۶۲ | ۱۱/۸۵ | ۴۸ ساعت پس از خشک شدن |
| ۴۵ | ۰/۹۴ | ۳/۸۹ | ۱۱/۹۴ | |
| ۶۰ | ۵/۲۲ | ۶/۷۷ | ۱۱/۳۳ | |
| ۳۰ | ۰ | ۰/۴۲ | ۱۰/۲۸ | بلافاصله پس از خشک شدن |
| ۴۵ | ۰/۲۵ | ۲/۳۹ | ۱۰/۳۶ | |
| ۶۰ | ۳/۱۷ | ۴/۹۸ | ۹/۵۰ | |

خارج می‌شود، خنک شده و قابلیت جذب رطوبت از محیط پیرامون خود را دارد، اما از آنجا که گرما و جریان هوا برای انتقال رطوبت وجود ندارد، تغلیظ رطوبت در سلول‌های نزدیک سطح اندوسپرم باعث انبساط و به هم فشردگی این سلول‌ها می‌شود (Toshizo, 1971). در نتیجه، یک تنش و کشش درونی به وجود می‌آید که باعث شکست داخلی می‌شود. این نتیجه با توجه به مقادیر جدول ۱ نیز قابل تأیید است. به طوری که بیشتر ترک‌های درونی و دانه‌های دارای بیش از دو ترک، ۴۸ ساعت پس از فرآیند خشک شدن در دانه ایجاد شده‌اند.



شکل ۳- میانگین شاخص ترک تنشی دانه بلافاصله پس از پایان عملیات خشک کردن و ۴۸ ساعت پس از آن (حروف انگلیسی کوچک متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD می‌باشند)

رطوبتی کاهش می‌یابند (Steffe & Singh, 1980). بنابراین، در روش خشک کردن متناوب به دلیل کاهش گرادیان‌های محتوای رطوبتی طی مرحله استراحت‌دهی که در مرحله خشک شدن درون دانه ایجاد شده‌اند، تنش‌های کمتری درون دانه ایجاد شده و در نتیجه ترک‌خوردگی کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات Tajaddodi Talab (2005) بر روی رقم خزر نیز نشان داد که استفاده از روش خشک کردن چند مرحله‌ای نسبت خشک کردن پیوسته باعث افزایش معنی‌دار بازده تبدیل برنج شد. Iguaz et al. (2006) نیز نشان دادند، خشک کردن به صورت متناوب در دمای بالا از تعداد ترک‌ها نسبت به خشک کردن به صورت پیوسته تا ۲۰٪ می‌کاهد.

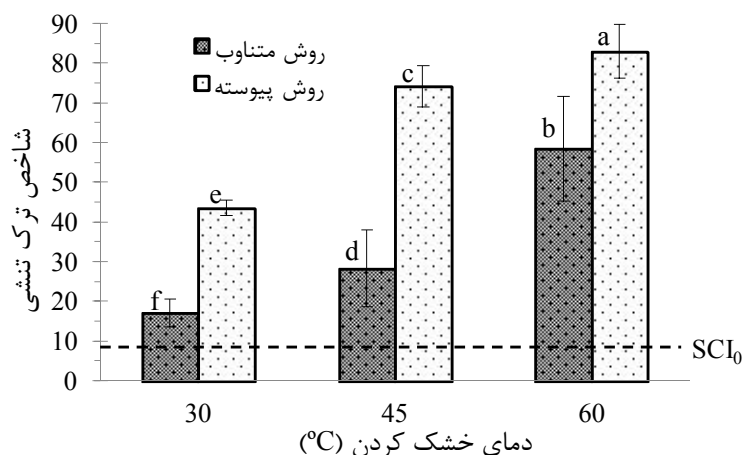
شکل ۵ مقادیر میانگین شاخص ترک تنشی دانه‌های شلتوک به هنگام خشک کردن به روش متناوب و انجام عملیات استراحت‌دهی به مدت ۸۰ min در دماهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ °C می‌شود، با افزایش دمای استراحت‌دهی شاخص ترک تنشی کاهش یافت، به طوری که اختلاف آن در دمای ۳۰ °C با

شکل ۳ مقادیر میانگین شاخص ترک تنشی را بلافاصله پس از پایان عملیات خشک کردن و ۴۸ ساعت پس از آن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار شاخص ترک تنشی ۴۸ ساعت پس از عملیات خشک کردن به صورت معنی‌داری در مقایسه با مقدار آن بلافاصله پس از عملیات خشک کردن افزایش یافت. علت این امر را می‌توان گسترش ترک‌های ریز ایجاد شده درون دانه طی عملیات خشک کردن به دلیل تنش‌های حرارتی وارد به دانه در اثر سرد شدن دمای آن یا جذب رطوبت از محیط اطراف توسط دانه دانست. زیرا پس از رسیدن دانه به رطوبت نهایی، هنگامی که دانه از خشک‌کن

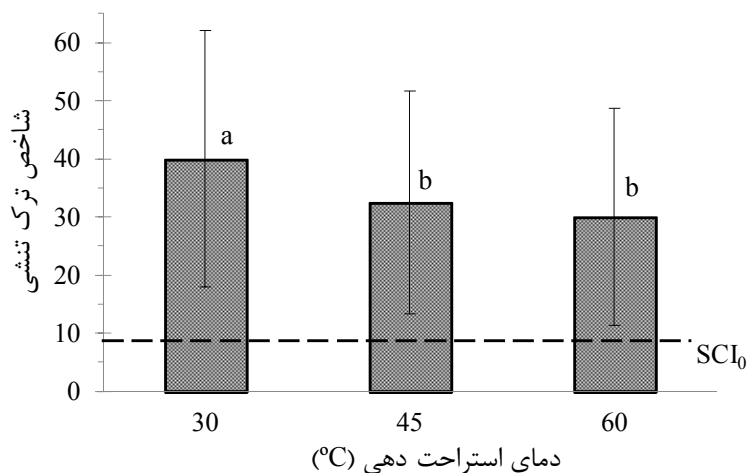
روند تغییرات شاخص ترک تنشی دانه‌های شلتوک با دمای خشک کردن در روش‌های متناوب و پیوسته در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمام دماهای خشک کردن، شاخص ترک تنشی هنگام خشک کردن به روش متناوب نسبت به روش پیوسته به طور معنی‌داری کاهش یافته است. از آنجا که حجم هوای موجود درون کیسه‌های پلی‌اتیلنی استفاده شده برای انجام عملیات استراحت‌دهی بسیار ناچیز و کم بود و همچنین به دلیل این که طی این فرآیند امکان هیچ‌گونه تبادل رطوبتی بین دانه‌های برنج و محیط بیرون وجود نداشت، با گذشت زمان کمی از استراحت‌دهی رطوبت نسبی بسته به تعادل رسیده و دیگر امکان ظرفیت جذب رطوبت از دانه‌های شلتوک را ندارد. بدین ترتیب با گرم شدن دانه و گذشت زمان، رطوبت از قسمت‌های مرکزی دانه به لایه‌های بیرونی منتقل می‌شود، اما از آنجا که هوای اطراف به حالت اشباع رسیده است، رطوبت از سطوح بیرونی دانه‌ها دفع نمی‌گردد. بدین ترتیب رطوبت لایه‌های بیرونی دانه به تدریج افزایش یافته و متعاقب آن گرادیان‌های

دمای °C ۶۰ مشاهده کردند که با افزایش دمای استراحت دهی از ۴۰ به ۶۰ °C، ترک خوردگی دانه‌ها به صورت معنی‌داری کاهش یافت که سبب افزایش عملکرد برنج سالم شد.

دماهای ۴۵ و ۶۰ °C معنی‌دار بود. زیرا با افزایش دمای استراحت دهی رطوبت سریع‌تر از قسمت‌های مرکزی دانه به سطح منتقل شده و در نتیجه رطوبت درون دانه یکنواخت‌تر شده و گرادیان‌های رطوبتی سریع‌تر فروکش می‌کنند. (Aquerreta et al. 2007) نیز پس از خشک کردن شلتوک در



شکل ۴- تغییرات شاخص ترک تنشی دانه‌های شلتوک با دمای خشک کردن در روش‌های متناوب و پیوسته (حروف انگلیسی کوچک متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD می‌باشد)



شکل ۵- تغییرات شاخص ترک تنشی دانه‌های شلتوک با دمای استراحت دهی در روش متناوب (حروف انگلیسی کوچک متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD می‌باشند)

مرحله خشک کردن در دو دمای ۴۵ و ۶۰ °C باعث افزایش معنی‌دار شاخص ترک تنشی شلتوک شد. در حالی که هنگام خشک کردن در دمای ۳۰ °C، افزایش زمان خشک کردن تنها در مدت ۶۰ min نسبت به دو زمان دیگر باعث افزایش معنی‌دار شاخص ترک تنشی شد.

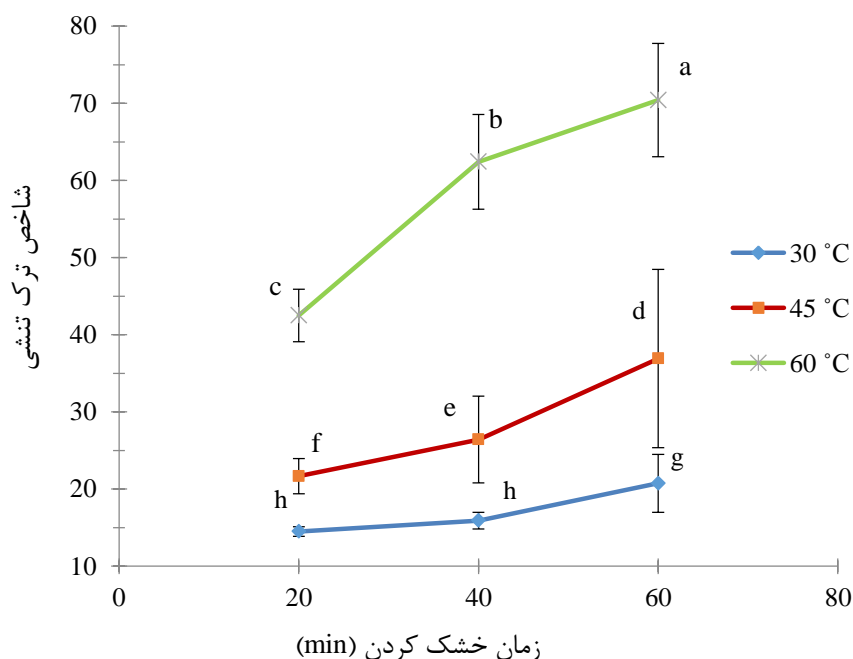
تأثیر فرآیند استراحت دهی بر زمان خشک شدن دانه

شکل ۷ تغییرات کل زمان فرآیند خشک شدن متناوب دانه‌های شلتوک (مجموع زمان‌های تمام مراحل خشک کردن و استراحت دهی) با دماهای خشک کردن و استراحت دهی را نشان

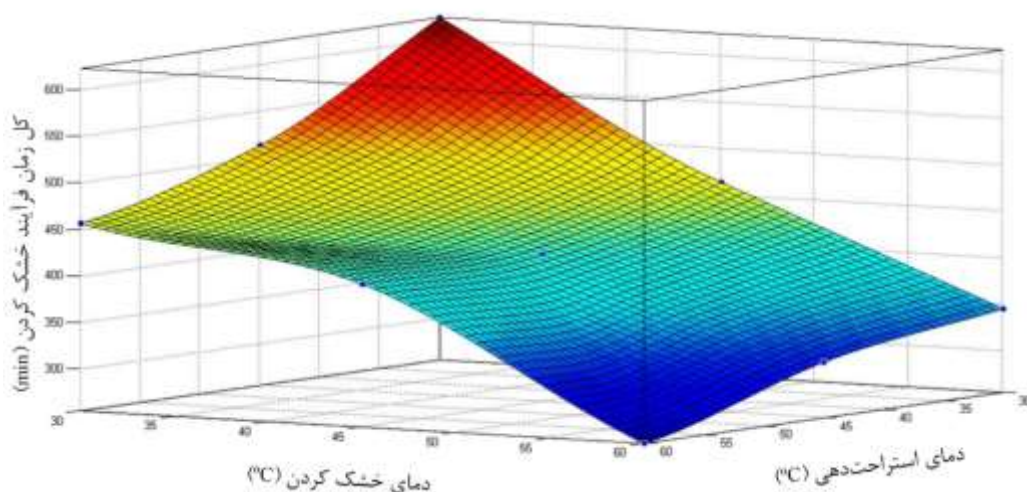
شکل ۶ تغییرات میانگین شاخص ترک تنشی در زمان‌ها و دماهای مختلف خشک کردن را نشان می‌دهد. کمترین شاخص ترک تنشی برای تمامی دماها مربوط به شرایط خشک کردن به مدت ۲۰ min در هر مرحله از خشک کردن می‌باشد. زیرا با افزایش زمان خشک کردن، گرادیان‌های رطوبتی بزرگ‌تری درون دانه ایجاد شده و در نتیجه تنش‌های درونی ناشی از گرادیان‌های رطوبتی افزایش خواهند یافت که باعث ایجاد تنش‌های کششی در سطح و تنش‌های فشاری در مرکز دانه شده و سبب ترک خوردگی دانه می‌گردند. افزایش زمان

زمان فرآیند خشک شدن دانه کاهش می‌یابد. این نتیجه منجر به کاهش مصرف انرژی و افزایش ظرفیت کاری خشک‌کن می‌شود. بنابراین، انجام عملیات استراحت‌دهی به دلیل کاهش رطوبت مرکز دانه و افزایش رطوبت سطح دانه نرخ خشک شدن دانه را در مرحله بعدی خشک شدن افزایش داده و همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، سبب کاهش کل زمان فرآیند خشک شدن دانه نسبت به خشک شدن پیوسته شده است که مقدار این کاهش برای دماهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰°C به ترتیب برابر با ۳۴٪، ۳۲٪ و ۴۱٪ بود. این موضوع از نظر صرفه‌جویی انرژی در کارخانه‌های تبدیل برنج اهمیت بسیاری دارد.

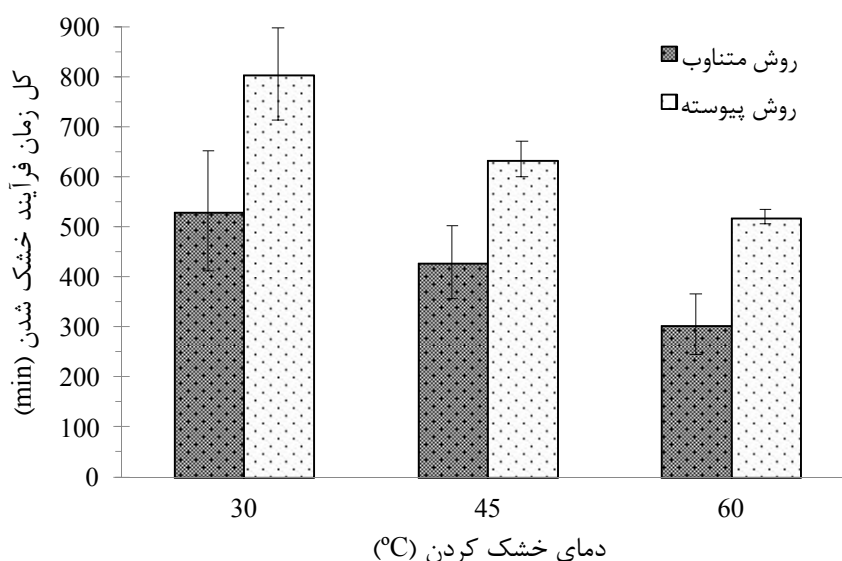
می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای خشک کردن از ۳۰ به ۶۰°C کل زمان فرآیند خشک کردن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. این کاهش برای ارقام هاشمی و کوهسار به ترتیب برابر با ۴۲٪ و ۴۳٪ بود. علت کاهش کل زمان فرآیند خشک شدن با افزایش دما به دلیل افزایش نرخ از دست دادن رطوبت دانه به دلیل تبخیر سطحی بیشتر و انتقال سریع‌تر رطوبت از مرکز به سطح دانه می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش دمای استراحت‌دهی به علت یکنواخت شدن سریع‌تر رطوبت درون دانه، طی مرحله بعدی خشک کردن رطوبت با نرخ بیشتری از سطح دانه تبخیر شده و در نتیجه کل



شکل ۶- تغییرات شاخص ترک تنشی با زمان و دماهای مختلف خشک کردن در روش متناوب (حروف انگلیسی کوچک متفاوت بی‌انگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمون LSD می‌باشند)



شکل ۷- تغییرات کل زمان فرآیند خشک شدن دانه با دماهای خشک کردن و استراحت‌دهی در روش متناوب



شکل ۸- تغییرات کل زمان فرآیند خشک شدن دانه‌های شلتوک با دمای خشک کردن در روش‌های متناوب و پیوسته

رطوبتی بیش از حد درون دانه جلوگیری گردد می‌توان از ترک خوردگی دانه به مقدار قابل توجهی جلوگیری کرد. بنابراین، با توجه به ضایعات زیاد برنج کشور استفاده از روش خشک کردن متناوب در شرایط کنترل شده می‌تواند ضمن کاهش زمان عملیات خشک کردن تا حدود زیادی از شکستگی دانه طی عملیات تبدیل جلوگیری کند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد که انجام عملیات استراحت‌دهی در دمای بالا نسبت به روش خشک کردن پیوسته (عدم انجام عملیات استراحت‌دهی) می‌تواند سبب کاهش شاخص ترک خوردگی و کل زمان خشک شدن دانه گردد. همچنین هنگامی که دما و زمان خشک کردن به گونه‌ای کنترل شود که قبل از انجام عملیات استراحت‌دهی از ایجاد گرادیان‌های

REFERENCES

- Aquerreta, J., Iguaz, A., Arroqui, C. & Virseda, P. (2007). Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality. *Journal of Food Engineering*, 80, 611-618.
- ASAE Standards. (1982). *Moisture measurement-grain and seeds*, S352.129th^{ed}, St. Joseph, Mich.
- Cnossen, A. G., Siebenmorgen, T. J. & Yang, W. (2002). The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect of drying rate. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 45, 759-766.
- Dong, R., Lu, Z., Liu, Z., Koide, S. & Cao, W. (2010). Effect of drying and tempering on rice fissuring analyzed by integrating intra-kernel moisture distribution. *Journal of Food Engineering*, 97, 161-167.
- Hedayatipour, A. & Rahmati, M. (2007). Study of the effect of drier temperature and paddy moisture content on broken percentage and milling yield in high varieties of Mazandaran Province. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Researchers*, 13(6), 93-100. (In Farsi)
- Iguaz, A., Rodriguez, M. & Virseda, P. (2006). Influence of handling and processing of rough rice on fissures and head rice yields. *Journal of Food Engineering*, 77, 803-809.
- Jia, C. C., Sun, D. W. & Cao, C. W. (2000). Mathematical simulation of stresses within a corn kernel during drying. *Drying Technology*, 18, 887-906.
- Kermani, A. M., Tavakol-Hashjin, T. & Khoshtaghaza, M. H. (2006). Stress cracking susceptibility of rice kernels (Hashemi and Khazar) during thin-layer drying of rough rice. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 37, 697-705. (In Farsi)
- Khoshtaghaza, M. H., Sadeghi, M. & Amirichayjan, R. (2007). Study of rough rice drying process in fixed and fluidized bed conditions. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Researchers*, 14(2), 127-137.
- Lee, K. W. (1979). Fissuring of the rice grain after heated air drying. *Transactions of the ASAE*, 22, 1197-1199.
- Minaei, S., Roohi, G. R. & Alizadeh, M. R. (2005). Investigation of the effects of drying parameters on rice cracking and breakage during milling. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 97-112. (In Farsi)
- Nasrnia, E., Sadeghi, M. & Masoumi, A. A. (2012). Effect of drying and tempering conditions on degree of milling during the two-stage drying. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 8, 40-48. (In Farsi)
- 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.
- Steffe, J. F. & Singh, R. P. (1980). Theoretical and practical aspect of rough rice tempering. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 23, 775-782.
- Toshizo, B. (1971). Rice cracking in high rate drying. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 6, 113-116.
- Tajaddodi Talab, K. (2005). The effect of multi passes drying on milling yield and drying time of paddy. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 113-124. (In Farsi)
- Yang, W., Jia, C. C., Siebenmorgen, T. J. & Cnossen, A. G. (2000). Intra-kernel moisture gradients and glass transition temperature in relation to head rice yield variety on during heated air drying of rough rice. Paper No. 069, *Proceedings of the 12th International Drying Symposium IDS2000.Noordwijkerhout*. The Netherlands.
- Yang, W., Jia, C. C., Siebenmorgen, T. J., Pan, Z. & Cnossen, A. G. (2003). Relationship of kernel moisture content gradients and glass transition temperatures to head rice yield. *Biosystems Engineering*, 85, 467-476.
- Zamani, GH. & Alizadeh, M. (2007). *Characterization and processing of different varieties of rice in Iran*. Pelke Publication. Tehran. (In Farsi)
- Zhang, Q., Yang, W. & Sun, Z. (2005). Mechanical properties of sound and fissured rice kernels and their implication for rice breakage. *Journal of Food Engineering*, 68, 65-72.