اثر شرایط خشک کردن متناوب بر درصد ترک‌خوردگی و زمان فرآیند برای ارقام دانه‌بلند و دانه‌متوسط شلتوک

علی قاسمی[۱]، مرتضی صادقی[۲*] و سید احمد میره‌ای[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۴)

چکیده

از جمله عوامل تأثیرگذار بر کیفیت تبدیل برنج، ترک‌های درونی ایجاد شده طی فرآیند خشک کردن و پس از آن می‌باشند. اکثر کشورهای صنعتی برای تسریع در خشک شدن دانه و حفظ کیفیت محصول نهایی از روش متناوب برای کاهش رطوبت شلتوک استفاده می‌کنند. با توجه به درصد بالای شکستگی برنج کشور در شالیکوبی‌ها، انجام فرآیند خشک کردن متناوب و بهینه‌سازی آن برای ارقام برنج ایرانی ضروری به‌نظر می‌رسد. در این تحقیق اثر فرآیندهای خشک کردن متناوب (خشک‌کردن - استراحت‌دهی چند مرحله‌ای) و پیوسته (فاقد استراحت‌دهی) بر درصد ترک‌خوردگی و زمان خشک شدن شلتوک دو رقم هاشمی (دانه‌بلند) و کوهسار (دانه‌متوسط) مطالعه شد. آزمایش‌های خشک کردن متناوب و پیوسته در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، زمان‌های خشک کردن ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه و زمان‌های استراحت‌دهی صفر (خشک کردن پیوسته)، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ دقیقه انجام شدند. نتایج نشان داد که انجام فرآیند استراحت‌دهی، اثر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش مدت فرآیند خشک کردن و درصد ترک‌خوردگی دانه دارد. هم‌چنین مشاهده شد که پس از گذشت زمانی مشخص، افزایش زمان استراحت‌دهی اثر معنی‌داری بر درصد ترک‌خوردگی دانه ندارد. در مجموع، برای بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن متناوب از نظر کاهش مصرف انرژی و ضایعات برای ارقام کوهسار و هاشمی به‌ترتیب انجام عملیات استراحت‌دهی به‌مدت‌های ۱۶۰ و ۲۰۰ دقیقه بعد از خشک کردن، به‌مدت ۴۰ دقیقه نتیجه‌گیری شد. هم‌چنین با توجه به بالاتر بودن درصد ترک‌خوردگی شلتوک کوهسار نسبت به رقم هاشمی، می‌توان چنین نتیجه گرفت که خواص فیزیکی دانه مانند ضریب رعنایی در ترک‌خوردگی آن مؤثر است.

واژه‌های کلیدی: استراحت‌دهی، ترک‌خوردگی، خشک کردن متناوب، شلتوک، شیب‌های رطوبتی

۱، ۲ و ۳. به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیار، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*. مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sadeghimor@cc.iut.ac.ir

مقدمه

برنج یکی از قدیمی‌ترین محصولات غله‌ای است که پس از گندم بیشترین سطح زیر کشت اراضی جهان را به خود اختصاص داده و بنابراین، یکی از مهم‌ترین مواد غذایی بشر محسوب می‌شود. عمده کشت این محصول در استان‌های گیلان و مازندران صورت می‌گیرد که حدود ۷۵ درصد کل برنج کشور را تشکیل می‌دهد. واردات برنج در سال ۱۳۹۲، ۱/۸۷ میلیون تن بوده است و خودکفایی در تولید آن از اهداف راهبردی کشور است (۵). با توجه به افزایش جمعیت و لزوم خودکفایی در تولید برنج، کاهش ضایعات در فرآیند تبدیل شلتوک به برنج سفید از موارد مهم در افزایش تولید محسوب می‌شود. برنج عموماً در رطوبت بالا (۲۵ تا ۳۵ درصد بر پایهٔ تر) برداشت می‌شود که برای انجام فرآیند تبدیل و هم‌چنین جلوگیری از فساد محصول در انبار باید محتوای رطوبتی آن به مقداری مشخص (۱۲ – ۱۴ درصد بر پایهٔ تر) کاهش یابد (۱۸).

از جمله عواملی که کیفیت برنج را تحت تأثیر قرار می‌دهند، ترک‌های درونی ایجاد شده طی فرآیند خشک کردن و پس از آن می‌باشند. این ترک‌ها مقاومت دانه به شکست را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند (۱۳ و ۱۴). خشک کردن فرآیندی است که طی آن پدیده‌های انتقال حرارت از منبع گرمایش به سطح محصول و از سطح محصول به مرکز آن و انتقال جرم (رطوبت) از قسمت‌های داخلی محصول به سطح آن و از سطح به محیط به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند. از آنجا که دفع رطوبت از دانه، از سطوح بیرونی شروع می‌شود، در هنگام خشک کردن، سطوح بیرونی نسبت به سطوح درونی رطوبت کمتری پیدا می‌کنند. این شیب‌های رطوبتی درون دانه 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 درون دانه برنج می‌شوند (۱۹). ترک‌های ایجاد شده درون دانه طی فرآیند خشک کردن، حین انجام فرآیند تبدیل شلتوک به برنج سفید شکسته شده و سبب افزایش خرده برنج می‌شوند. ارقام مختلف در مقابل تنش‌های اعمال شده مقاومت مختلفی دارند. این تفاوت‌ها هم به مسائل ژنتیکی و هم به خصوصیات ظاهری دانه‌ها بستگی دارند. به‌طورکلی ارقام دانه‌بلند مقاومت کمتری در مقابل نیروهای خمشی و فشاری دارند. خواص فیزیکی دانه برنج از عوامل مؤثر بر کیفیت تبدیل آن می‌باشد. بنابراین، نوع رقم می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر شکنندگی آن داشته باشد (۱۰).

امروزه اکثر کشورهای صنعتی به‌منظور تسریع در عملیات خشک شدن دانه و حفظ کیفیت محصول نهایی از روش خشک کردن متناوب برای کاهش محتوای رطوبتی محصولات حساس به حرارت از جمله شلتوک استفاده می‌کنند (۲). در این روش در بین مراحل خشک کردن، محصول در محلی که اجازه تبادل رطوبت با محیط بیرون را ندارد، برای زمانی مشخص و در یک دمای معین نگهداری می‌شود که به آن فرآیند استراحت‌دهی گفته می‌شود. فرآیند استراحت‌دهی با کاهش شیب‌های رطوبتی از ایجاد ترک در داخل دانه تا حد زیادی جلوگیری می‌کند و باعث افزایش عملکرد برنج سالم می‌گردد. هم‌چنین با انجام فرآیند استراحت‌دهی، حذف رطوبت در مراحل بعدی خشک کردن با سرعت بیشتری انجام خواهد شد که در نتیجه، کاهش مصرف انرژی و افزایش ظرفیت کاری خشک‌کن را به‌دنبال خواهد داشت (۱۵).

طبق استاندارد ۱۲۷ مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، براساس طول و ضریب رعنایی (نسبت طول به قطر)، برنج دانه‌بلند به برنجی گفته می‌شود که طول آن حداقل ۶/۸ میلی‌متر بوده و نسبت طول به قطر آن حداقل ۳ باشد. برنج دانه‌متوسط به برنجی گفته می‌شود که طول آن حداقل ۶ میلی‌متر بوده و نسبت طول به قطر آن حداقل ۲/۱ باشد و برنج دانه‌کوتاه برنجی است که طول آن حداقل ۵ میلی‌متر و نسبت طول به قطر آن ۲ باشد (۶).

اکثر تحقیقات انجام شده در کشور در زمینه مطالعه و مدل‌سازی سینتیک خشک شدن شلتوک به‌شیوه مرسوم (بدون عملیات استراحت‌دهی) بوده و تحقیقات کمی در رابطه با تأثیر روش‌های مختلف خشک کردن بر کیفیت نهایی شلتوک انجام

گرفته است. طی تحقیقی اثر شرایط خشک کردن سریع و ملایم در چهار بازهٔ زمانی مختلف در یک مرحله از خشک کردن همراه با انجام فرآیند استراحت‌دهی در زمان‌های مختلف بر درجه سفیدی جرمی و نوری دو رقم شفق (دانه‌بلند) و سازندگی (دانه‌متوسط) مورد مطالعه قرار گرفت (۱۲). نتایج نشان داد که با افزایش زمان خشک کردن، تحت هر دو شرایط خشک کردن سریع و ملایم، درجه سفیدی جرمی و نوری دانه‌های برنج افزایش می‌یابد که شیب این افزایش، در شرایط خشک کردن سریع نسبت به شرایط خشک کردن ملایم بیشتر بود. انجام فرآیند استراحت‌دهی برای هر دو رقم تحت شرایط خشک کردن آرام نیز بر درجه سفیدی جرمی به‌طور معنی‌داری مؤثر بود. در تحقیقی دیگر نشان داده شد که افزایش دما از ۳۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، افزایش سرعت جریان هوا از ۰/۵ به ۲ متر بر ثانیه و کاهش رطوبت نهایی از ۱۴ به ۱۰/۵ درصد (بر پایهٔ تر) باعث افزایش شکستگی محصول می‌شود. طی این مطالعه مشخص شد که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر شکستگی برنج، نخست دما و سپس رطوبت نهایی محصول است. هم‌چنین مشخص شد که اثر نامطلوب حاصل از افزایش دما و سرعت جریان هوا را می‌توان با ممانعت از کاهش زیاد از حد رطوبت محصول حین خشک شدن کنترل کرد (۹). تحقیقات انجام شده برای شلتوک رقم خزر، کاهش زمان خشک کردن را هم‌زمان با افزایش تعداد توقف حین عملیات خشک کردن نشان داد. این موضوع از نظر صرفه‌جویی انرژی در کارخانه‌های برنج‌کوبی اهمیت دارد (۱۶). بررسی اثر دما و سرعت جریان هوا بر ترک‌خوردگی شلتوک رقم هاشمی طی خشک کردن به دو روش مادون قرمز و جریان هوای گرم نشان داد که در هر دو روش، دمای شلتوک و سرعت جریان هوا اثر معنی‌داری بر ترک‌خوردگی شلتوک دارند و با افزایش دما و کاهش سرعت جریان هوا ترک‌خوردگی افزایش می‌یابد که تأثیر دما بیشتر از سرعت جریان هوا گزارش شد (۱۱). هم‌چنین نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از روش مادون قرمز نسبت به روش هوای گرم سبب کاهش زمان خشک کردن و ترک‌خوردگی دانه شد. طی تحقیقی فرآیند خشک کردن شلتوک به روش بستر ثابت، نیمه‌سیال و سیال از نظر مقدار ترک‌خوردگی مقایسه شد. آزمایش‌های خشک کردن در سه سطح دمای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سلسیوس انجام شد (۸). نتایج نشان داد که روش نیمه‌سیال نسبت به دو روش دیگر کمترین مقدار ترک‌خوردگی دانه را به‌دنبال داشت. هم‌چنین با افزایش دما ترک‌خوردگی دانه افزایش نشان داد. در تحقیق انجام شده بر روی ارقام برنج بنگال (دانه‌متوسط) و ساپیرس (دانه‌بلند) مشخص شد که انجام عملیات استراحت‌دهی بلافاصله پس از عملیات خشک کردن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد برنج سالم داشت و سبب افزایش آن گردید (۳).

در ایران برای خشک کردن شلتوک از روش خشک کردن پیوسته استفاده می‌شود که سبب افزایش درصد ترک‌خوردگی دانه و کاهش ارزش کیفی و تجاری دانه می‌شود. با توجه به درصد بالای شکستگی برنج در شالیکوبی‌ها (حدود ۳۰ – ۲۰ درصد) از یک سو و مطالعات کم انجام شده در زمینه بهینه‌سازی خشک کردن متناوب برنج‌های ایرانی از سوی دیگر، این تحقیق با هدف مطالعهٔ اثر فرآیند خشک کردن و استراحت‌دهی بر درصد ترک‌خوردگی دانه، زمان فرآیند و تعیین شرایط مناسب انجام این فرآیند برای ارقام هاشمی (دانه‌بلند) و کوهسار (دانه‌متوسط) صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش به‌منظور مطالعه اثر رقم، آزمایش‌ها برای دو رقم شلتوک دانه‌متوسط و دانه‌بلند انجام شدند. رقم کوهسار (IRTON2) به‌عنوان رقم دانه‌متوسط که در شهریور ماه سال ۱۳۹۰ از مزرعه مرکز تحقیقات برنج آمل برداشت شده بود، انتخاب شد. هم‌چنین رقم طارم هاشمی که در شهریور ماه سال ۱۳۹۰ از مزرعه‌ای در شهرستان آستانه‌اشرفیه استان گیلان برداشت شده بود، به‌عنوان رقم دانه‌بلند انتخاب گردید. نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت تمیز شده و کاه‌وکلش موجود در آنها

از دانه‌های شلتوک جدا شده و سپس محتوای رطوبتی اولیه آنها تعیین شد. مقدار رطوبت اولیه برای ارقام هاشمی و کوهسار به‌ترتیب برابر با ۲۱/۹۷ درصد و ۲۰/۱۹ درصد بر پایهٔ تر به‌دست آمد. سپس نمونه‌ها در بسته‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌کیپ بسته‌بندی شده (به‌منظور ممانعت از تبادل رطوبتی با محیط) و در یک سردخانه با دمای ۴ درجه سلسیوس تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند.

ضریب رعنایی نمونه‌ها

قبل از انجام آزمایش‌های خشک کردن به‌منظور تعیین ضریب رعنایی دو رقم مورد آزمون و مطالعه تأثیر آن بر ترک‌خوردگی شلتوک طی خشک شدن، از هر رقم صد دانه به‌صورت تصادفی جدا و ابعاد آنها شامل طول و قطر با استفاده از یک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. سپس با محاسبه نسبت طول به قطر نمونه‌ها ضریب رعنایی هر رقم طبق استاندارد ۱۲۷ مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران تعیین گردید (۶).

شرایط و روش انجام آزمایش‌های خشک کردن متناوب

آزمایش‌های خشک کردن توسط یک دستگاه خشک‌کن هوای داغ جریان همرفت مجهز به سیستم کنترل دما و رطوبت نسبی هوا در رطوبت نسبی ۴۰ درصد و سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه انجام شدند. به‌منظور مطالعه اثر زمان خشک کردن و استراحت‌دهی بر درصد ترک‌خوردگی دانه‌ها، آزمایش‌های خشک کردن در زمان‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و عملیات استراحت‌دهی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس در سطوح زمانی ۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ دقیقه با روش خشک کردن بستر نازک (ضخامت ۳ تا ۵ میلی‌متر) تا رسیدن رطوبت محصول به رطوبت نهایی ۱۲ درصد بر پایهٔ تر و در دو تکرار انجام شدند.

قبل از انجام هر آزمایش، ۳۰ گرم نمونه از بسته‌های پلاستیکی خارج و در یک آون با دمای ۲۰ درجه سلسیوس قرار می‌گرفتند تا دمای آنها به تعادل برسد. پس از انجام هر مرحله خشک کردن، نمونه‌ها از خشک‌کن خارج و درون بسته‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌کیپ قرار گرفته و در آون با دمای ۶۰ درجه سلسیوس نگهداری شدند. بلافاصله پس از پایان زمان استراحت‌دهی، هر کدام از نمونه‌ها از آون خارج شده و برای انجام مراحل بعدی خشک کردن آماده می‌شدند. از آنجا که محتوای رطوبتی مطلوب برای انجام عملیات پوست‌کنی ۱۴ – ۱۲ درصد (بر پایهٔ تر) می‌باشد (۱۲)، در مراحل بعدی آزمایش، نمونه‌ها تا محتوای رطوبتی ۱۲ درصد خشک شدند. آزمایش‌های خشک کردن و استراحت‌دهی تا رسیدن نمونه‌ها به رطوبت نهایی ادامه یافت.

گزارش شده است که درصد ترک‌خوردگی شلتوک حدود ۴۸ ساعت پس از آخرین مرحله خشک شدن ثابت خواهد ماند و از این‌رو، ترک‌خوردگی دانه باید پس از سپری شدن این زمان اندازه‌گیری شود (۱۷)، بنابراین برای تعیین تعداد ترک‌های ایجاد شده در دانه، ۴۸ ساعت پس از خشک شدن نمونه‌ها، از هر نمونه صد دانه به‌صورت تصادفی جدا شده و پوست آنها به آرامی با دست گرفته شد. سپس تعداد دانه‌های ترک‌خورده با مشاهده دانه‌ها توسط یک دستگاه بینوکولر تعیین و درصد ترک‌خوردگی دانه‌ها محاسبه شد.

طرح آماری و روش آنالیز داده‌ها

در این مطالعه درصد ترک‌خوردگی حاصل از آزمایش‌های خشک کردن و استراحت‌دهی به‌عنوان متغیر وابسته و نوع رقم و مدت انجام عملیات‌های خشک کردن و استراحت‌دهی به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. اثر زمان استراحت‌دهی، زمان خشک کردن، رقم و اثرات متقابل آنها بر درصد ترک‌خوردگی با استفاده از روش آماری کرت دو بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی مورد مطالعه قرار گرفت. به‌نحوی‌که زمان استراحت‌دهی به‌عنوان کرت اصلی (در سطوح ۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ دقیقه)، زمان خشک کردن (در سطوح ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه) و نوع رقم (ارقام

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر زمان استراحت‌دهی، زمان خشک کردن، رقم و اثر متقابل آنها بر درصد ترک‌خوردگی

منابع تغییرات	df	SS	MS	F
بلوک	۱	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	
زمان استراحت‌دهی	۶	۱۲۰/۶۱۹	۲۰/۱۰۳	۶/۹۹*
خطا (زمان استراحت‌دهی)	۶	۱۸/۲۳۸	۲/۸۷۳	
کرت اصلی (MP)	۱۳	۱۳۷/۸۶۹		
زمان خشک کردن	۲	۱۲۴/۰۹۵	۶۲/۰۴۸	۵۲/۶۴۶**
زمان خشک کردن × زمان استراحت‌دهی	۱۲	۱۰۲/۷۳۸	۸/۵۶۱	۷/۲۶۴**
خطا (زمان خشک کردن)	۱۴	۱۶/۵	۱/۱۷۸	
کرت فرعی (SP)	۲۸	۲۴۳/۳۳۳		
رقم	۱	۷۴/۲۹۷	۷۴/۲۹۷	۵۲/۴۴۵**
زمان استراحت‌دهی × رقم	۶	۲۸/۶۱۹	۴/۷۶۹	۳/۳۶۷ns
زمان خشک کردن × رقم	۲	۲/۶۶۶	۱/۳۳۳	۰/۹۴۱ns
زمان خشک کردن × زمان استراحت‌دهی × رقم	۱۲	۴/۱۶۶	۰/۳۴۷	۰/۲۴۵ns
خطا (رقم)	۲۱	۲۹/۷۵	۱/۴۱۶	
کرت فرعی فرعی (SSP)	۴۲	۱۳۹/۵		
کل	۸۳	۵۲۰/۷۰۲		

** و *. به‌ترتیب بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد و ns بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

کوهسار و هاشمی) به‌عنوان کرت‌های فرعی با نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در صورت معنی‌دار بودن مقدار F از آزمون LSD برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

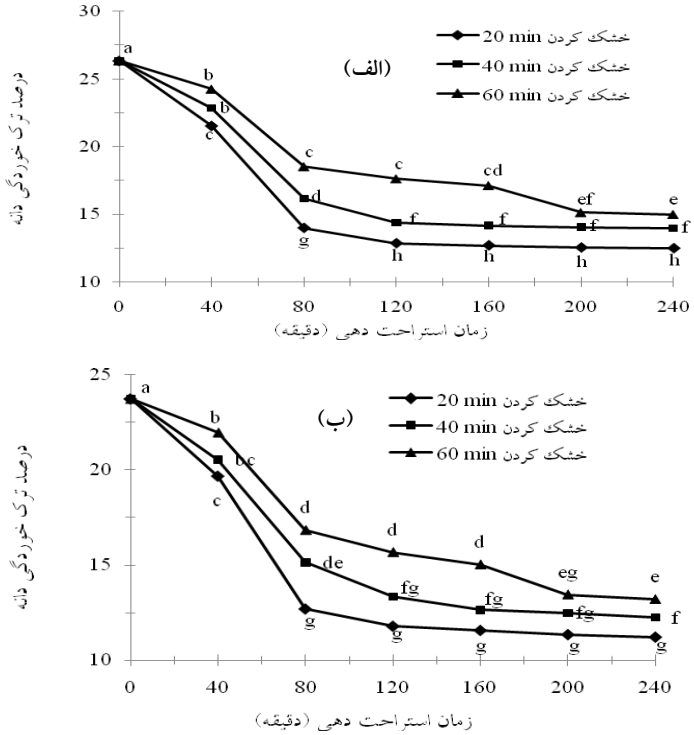
نتایج و بحث

درصد ترک‌خوردگی دانه‌ها

نتایج تجزیه واریانس اثر زمان استراحت‌دهی، زمان خشک کردن، رقم و اثر متقابل آنها بر درصد ترک‌خوردگی شلتوک در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طورکه مشخص است، اثر زمان استراحت‌دهی در سطح احتمال ۵ درصد و اثر رقم و زمان خشک کردن به‌همراه اثر متقابل زمان خشک کردن و زمان استراحت‌دهی در سطح احتمال ۱ درصد بر ترک‌خوردگی شلتوک معنی‌دار بود. هم‌چنین اثر متقابل زمان استراحت‌دهی و رقم، زمان خشک کردن و رقم و اثر متقابل سه‌گانه آنها بر درصد ترک‌خوردگی معنی‌دار نبود.

شکل‌های ۱ الف و ب به‌ترتیب روند تغییرات میانگین درصد ترک‌خوردگی دانه با زمان استراحت‌دهی را برای ارقام کوهسار (دانه‌متوسط) و هاشمی (دانه‌بلند) تحت شرایط خشک کردن و استراحت‌دهی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و زمان‌های خشک کردن ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه نشان می‌دهند.

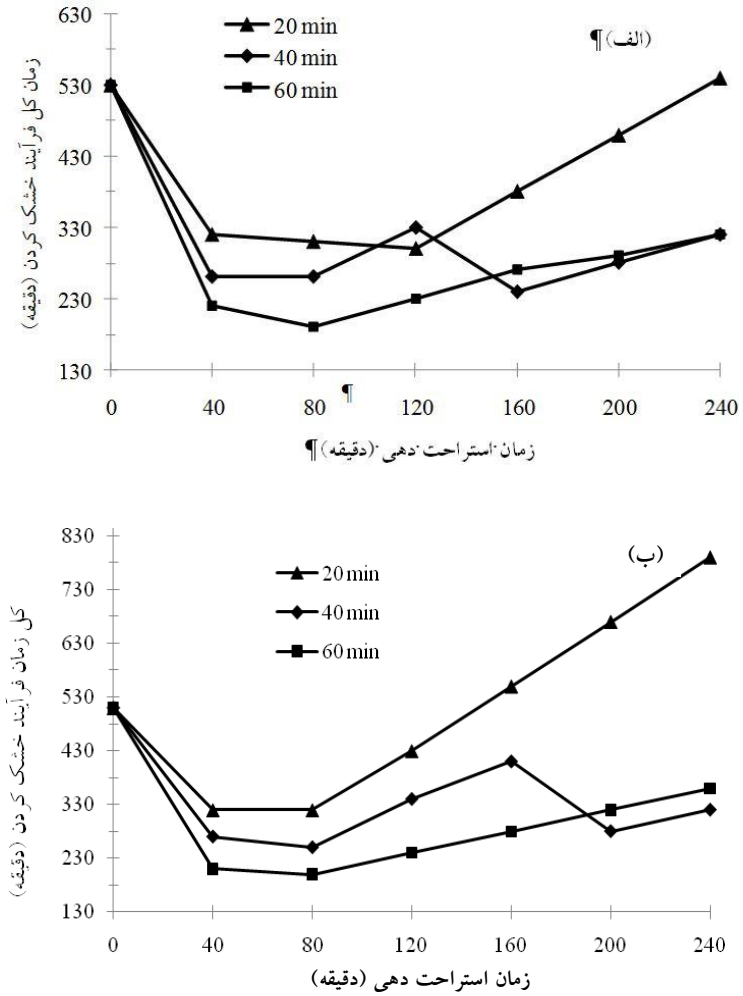
همان‌طورکه در شکل ۱ قابل مشاهده است، در تمامی زمان‌های خشک کردن، استفاده از روش متناوب نسبت به روش پیوسته (بدون انجام عملیات استراحت‌دهی) سبب کاهش معنی‌دار درصد ترک‌خوردگی شده است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که با افزایش مدت استراحت‌دهی، درصد ترک‌خوردگی دانه به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. افزایش زمان استراحت‌دهی با یکنواخت‌تر کردن رطوبت بخش‌های مختلف دانه (کاهش شیب‌های رطوبتی)، تأثیر مثبتی بر کاهش



شکل ۱. تغییرات درصد ترک‌خوردگی دانه‌های شلتوک با زمان استراحت‌دهی در زمان‌های خشک کردن ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه برای الف- رقم کوهسار و ب- رقم هاشمی (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD نیستند).

ترک‌خوردگی دانه و در نتیجه افزایش کیفیت محصول نهایی دارد. از آنجا که فرآیند استراحت‌دهی در یک محیط بسته انجام می‌شود و دانه اجازه تبادل رطوبت با محیط بیرون را ندارد؛ طی فرآیند نگهداری رطوبت بخش‌های مرکزی به آرامی به سطح دانه انتشار یافته و باعث کاهش شیب‌های رطوبتی در داخل دانه می‌شود، هرچند که با افزایش زمان استراحت‌دهی این تأثیر کاهش نشان داده است. به‌عبارت دیگر، بعد از یک زمان مشخص به‌دلیل یکنواخت شدن رطوبت در اکثر بخش‌های مختلف دانه، ادامه عملیات استراحت‌دهی تأثیر معنی‌داری بر کاهش درصد ترک‌خوردگی شلتوک ندارد. البته طی خشک کردن به‌مدت ۶۰ دقیقه به‌مدت زمان استراحت‌دهی بیشتری برای حذف شیب‌های رطوبتی در مقایسه با خشک کردن به‌مدت‌های ۲۰ و ۴۰ دقیقه برای هر دو رقم نیاز بوده است. دلیل این موضوع، شیب‌های رطوبتی بزرگ‌تر ایجاد شده طی خشک کردن به‌مدت ۶۰ دقیقه است.

با توجه به شکل ۱ الف، به هنگام خشک کردن شلتوک رقم کوهسار در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به‌مدت‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه، به‌ترتیب انجام عملیات استراحت‌دهی به‌مدت‌های ۱۲۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ دقیقه، برای کاهش درصد ترک‌خوردگی دانه توصیه می‌شود. هم‌چنین با توجه به شکل ۱ ب، به هنگام خشک کردن شلتوک رقم هاشمی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به‌مدت‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه، به‌ترتیب انجام عملیات استراحت‌دهی به‌مدت‌های ۸۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ دقیقه، برای کاهش درصد ترک‌خوردگی دانه توصیه می‌شود. مشابه نتایج این تحقیق، در منابع گزارش شده است که خشک کردن طی دو یا سه مرحله و استفاده از عمل متعادل‌سازی رطوبتی باعث افزایش شاخص عملکرد برنج سالم تولیدی و کاهش درصد دانه‌های ترک‌خورده می‌شود (۱).



شکل ۲. تغییرات کل زمان فرآیند خشک شدن متناوب (دماهای خشک کردن و استراحت‌دهی ۶۰ درجه سلسیوس) با زمان استراحت‌دهی در زمان‌های خشک کردن ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه برای الف- رقم کوهسار (دانه‌متوسط) و ب- رقم هاشمی (دانه‌بلند)

زمان کل فرآیند خشک کردن دانه

شکل‌های ۲ الف و ب روند تغییرات کل زمان فرآیند خشک کردن متناوب شلتوک (مجموع زمان‌های خشک کردن و استراحت‌دهی تا رسیدن به رطوبت نهایی) را با زمان استراحت‌دهی تحت شرایط خشک کردن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و زمان‌های خشک کردن ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه به‌ترتیب برای ارقام کوهسار (دانه‌متوسط) و هاشمی (دانه‌بلند) نشان می‌دهند. از آنجا که طی فرآیند استراحت‌دهی رطوبت از بخش‌های مرکزی دانه به سطح آن انتقال می‌یابد، رطوبت بخش‌های نزدیک به سطح دانه افزایش یافته و در مرحله بعدی خشک کردن، انتقال رطوبت از سطح دانه به محیط با سرعت بیشتری انجام شده و در نتیجه انجام عملیات استراحت‌دهی کل زمان خشک شدن دانه را کاهش می‌دهد و باعث افزایش ظرفیت کاری خشک‌کن می‌شود، هرچند حذف سریع‌تر رطوبت باعث افزایش شیب‌های رطوبتی درون دانه می‌گردد.

همان‌طورکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، افزایش زمان استراحت‌دهی تا یک زمان مشخص باعث کاهش کل زمان فرآیند خشک شدن دانه شد و پس از آن افزایش زمان

استراحت‌دهی کل زمان فرآیند خشک شدن دانه را افزایش داد. در زمان خشک کردن ۲۰ دقیقه، فرصت تبادل رطوبت کم بوده است و در هنگام خشک کردن به‌مدت ۶۰ دقیقه نیز به‌دلیل بالا بودن شیب‌های رطوبتی درون دانه، ادامه انجام عملیات استراحت‌دهی نتوانسته از تعداد مراحل خشک کردن کم کند، اما در خشک کردن به‌مدت ۴۰ دقیقه در هر مرحله، از آنجا که شیب‌های رطوبتی کمتری درون دانه ایجاد شده و هم‌چنین در مرحله خشک کردن دانه فرصت تبادل رطوبت کافی نیز وجود داشته است، برای رقم کوهسار با افزایش زمان استراحت‌دهی از ۱۲۰ به ۱۶۰ دقیقه و برای رقم هاشمی با افزایش زمان استراحت‌دهی از ۱۶۰ به ۲۰۰ دقیقه هم‌چنان کل زمان خشک کردن دانه به‌دلیل کم کردن تعداد مراحل استراحت‌دهی کاهش یافته است.

اثر رقم بر درصد ترک‌خوردگی دانه

طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده میانگین ضریب رعنایی ارقام کوهسار و هاشمی به‌ترتیب برابر ۲/۳۸ و ۴/۸۹ به‌دست آمد. هم‌چنین میانگین طول ارقام کوهسار و هاشمی به‌ترتیب برابر با ۸/۸ و ۱۰/۱ میلی‌متر بود، بنابراین، طبق استاندارد ۱۲۷ مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران رقم کوهسار جزء ارقام دانه متوسط و رقم هاشمی در دسته دانه بلند طبقه‌بندی می‌شوند.

جدول ۲ نتایج مقایسه میانگین درصد ترک‌خوردگی دانه‌ها برای ارقام کوهسار (دانه‌متوسط) و هاشمی (دانه‌بلند) در زمان‌های استراحت‌دهی ۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ دقیقه را نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در کلیه شرایط خشک کردن متناوب به‌جز خشک کردن به‌مدت‌های ۱۲۰ و ۲۰۰ دقیقه درصد ترک‌خوردگی رقم کوهسار (دانه‌متوسط) نسبت به رقم هاشمی (دانه‌بلند) به‌طور معنی‌داری بیشتر بوده است. دلیل این امر را می‌توان به‌علت کمتر بودن ضریب رعنایی و در نتیجه بزرگ‌تر بودن قطر رقم کوهسار نسبت به هاشمی دانست، با توجه به اینکه مقاومت در برابر انتقال جرم در جهت قطر کمتر از طول دانه است بنابراین، فرآیند انتقال جرم در جهت قطر دانه انجام می‌شود، پس هرچه قطر دانه بیشتر باشد، به‌دلیل انتقال کندتر رطوبت بخش‌های مرکزی به سطح دانه شیب‌های رطوبتی درون دانه افزایش می‌یابد و در نتیجه امکان ترک‌خوردگی دانه افزایش می‌یابد.

نتایج مشابهی برای ارقام دانه‌بلند (L201) و دانه‌کوتاه (Akitakomachi) گزارش شده است. به‌طوری‌که طی فرآیند خشک کردن برنج دانه‌بلند، تعداد ترک کمتری نسبت به برنج دانه‌کوتاه ایجاد شد که بیشتر ترک‌ها در برنج دانه‌بلند از نوع سطحی و در برنج دانه‌کوتاه از نوع عمیق بود (۴). هم‌چنین کرمانی و همکاران چنین نتیجه‌ای را برای ارقام هاشمی (دانه‌بلند) و خزر (دانه‌متوسط) به‌دست آوردند (۷). بنابراین، با توجه به بیشتر بودن درصد ترک‌خوردگی شلتوک کوهسار (دانه‌متوسط) نسبت به رقم هاشمی (دانه‌بلند)، می‌توان چنین نتیجه گرفت که خواص مکانیکی و فیزیکی دانه مانند ضریب رعنایی در ترک‌خوردگی دانه مؤثر است.

بهینه‌سازی خشک کردن متناوب

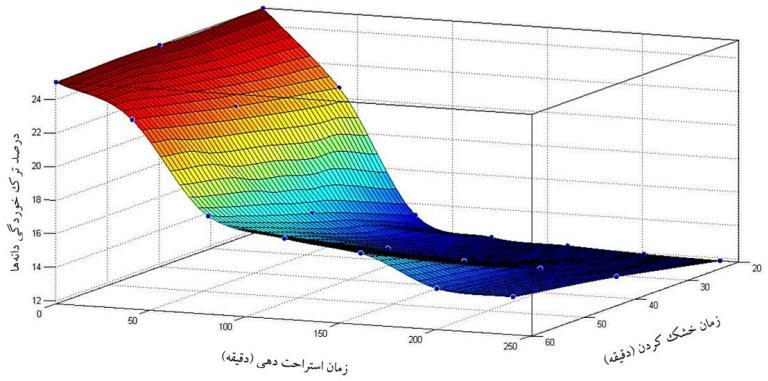
شکل ۳ نمودار تغییرات درصد ترک‌خوردگی دانه‌ها را با زمان‌های خشک کردن و استراحت‌دهی نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، با افزایش زمان خشک کردن، درصد ترک‌خوردگی دانه‌ها افزایش یافت. با افزایش زمان فرآیند استراحت‌دهی نیز تا یک زمان مشخص، درصد ترک‌خوردگی دانه‌ها کاهش یافت و پس از آن تقریباً ثابت ماند. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با گذشت زمان مشخصی از فرآیند استراحت‌دهی تقریباً شیب‌های رطوبتی درون دانه از بین می‌روند و پس از آن افزایش زمان استراحت‌دهی تأثیر معنی‌داری بر کاهش درصد ترک‌خوردگی دانه ندارد. بنابراین، تعیین زمان بهینه عملیات استراحت‌دهی دانه به‌نحوی‌که تقریباً تمام بخش‌های مختلف دانه دارای رطوبت یکسانی باشند و شیب‌های رطوبتی درون دانه از بین رفته باشند، اهمیت بسیاری دارد.

همان‌طورکه از شکل ۲ مشاهده می‌شود، کمترین زمان

جدول ۲. مقایسه میانگین درصد ترک‌خوردگی دانه‌ها برای ارقام کوهسار (دانه‌متوسط) و هاشمی (دانه‌بلند) در زمان‌های استراحت‌دهی ۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ دقیقه

زمان استراحت‌دهی	درصد ترک‌خوردگی	
	کوهسار (دانه‌متوسط)	هاشمی (دانه‌بلند)
صفر (خشک کردن پیوسته)	۲۶/۳**	۲۳/۷**
۴۰	۲۲/۹*	۲۰/۷*
۸۰	۱۶/۲*	۱۴/۹*
۱۲۰	۱۴/۹	۱۳/۶
۱۶۰	۱۴/۶*	۱۳/۱*
۲۰۰	۱۳/۹	۱۲/۴
۲۴۰	۱۳/۸*	۱۲/۲*

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد



شکل ۳. تغییرات درصد ترک‌خوردگی دانه طی خشک شدن شلتوک به‌روش متناوب با زمان‌های مختلف خشک کردن و استراحت‌دهی

فرآیند خشک شدن هنگام خشک کردن به‌مدت ۲۰ دقیقه و به‌دنبال آن ۸۰ دقیقه انجام عملیات استراحت‌دهی حاصل شده است که زمان آن برای ارقام هاشمی و کوهسار به‌ترتیب برابر ۲۰۰ و ۱۹۰ دقیقه بود. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در این حالت مدت کل فرآیند خشک شدن نسبت به حالت خشک کردن بدون استراحت‌دهی تقریباً ۳/۵ برابر کمتر است که این امر، مصرف انرژی را بسیار کاهش می‌دهد. به‌هر صورت، درصد ترک‌خوردگی دانه در این حالت نسبتاً زیاد است. بنابراین، به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن متناوب از نظر هر دو فراسنجه کیفی (کاهش مصرف انرژی و کاهش ضایعات) برای ارقام کوهسار و هاشمی به‌ترتیب انجام عملیات استراحت‌دهی به‌مدت‌های ۱۶۰ دقیقه و ۲۰۰ دقیقه بعد از خشک کردن به‌مدت ۴۰ دقیقه پیشنهاد می‌شود. در این حالت زمان کل فرآیند خشک کردن برای ارقام کوهسار و هاشمی به‌ترتیب برابر ۲۴۰ و ۲۸۰ دقیقه و درصد ترک‌خوردگی نیز برابر ۱۴/۱۷ درصد و ۱۲/۴۹ درصد به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از روش خشک کردن متناوب نسبت به روش خشک کردن پیوسته (انجام ندادن

عملیات استراحت‌دهی) در تمامی زمان‌های خشک کردن سبب کاهش معنی‌دار درصد ترک‌خوردگی دانه شد. افزایش زمان استراحت‌دهی تا یک زمان مشخص، به‌دلیل یکنواخت کردن محتوای رطوبتی بخش‌های مختلف درون دانه، باعث کاهش معنی‌دار درصد ترک‌خوردگی دانه و کل زمان خشک کردن دانه شد و افزایش زمان استراحت‌دهی پس از آن به‌دلیل کامل شدن فرآیند استراحت‌دهی تأثیر معنی‌داری بر درصد ترک‌خوردگی دانه نداشت. هم‌چنین با توجه به بیشتر بودن درصد ترک‌خوردگی شلتوک کوهسار (دانه‌متوسط) نسبت به رقم هاشمی (دانه‌بلند) می‌توان نتیجه گرفت که خواص مکانیکی و فیزیکی دانه مانند ضریب رعنایی در ترک‌خوردگی دانه مؤثر است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت، به‌منظور انجام بهینه فرآیند خشک کردن متناوب (زمان عملیات خشک کردن متناوب کمتر و کیفیت محصول بالاتر)، طی عملیات خشک کردن و استراحت‌دهی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس برای ارقام هاشمی و کوهسار به‌ترتیب انجام عملیات استراحت‌دهی به‌مدت‌های ۲۰۰ و ۱۶۰ دقیقه پس از خشک کردن به‌مدت ۴۰ دقیقه توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از کارکنان مؤسسه تحقیقات برنج کشور معاونت مازندران (آمل) که در تهیه نمونه‌های آزمایش همکاری لازم را مبذول داشتند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Aquerreta, J., A. Iguaz, C. Arroqui and P. Vírseda. 2007. Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality. *Journal of Food Engineering* 80: 611–618.
2. Chandan, K., M. A. Karim and M. U. H. Joardder. 2014. Intermittent drying of food products: A critical review. *Journal of Food Engineering* 121: 48-57.
3. Cnossen, A. G. and T. J. Siebenmorgen. 2000. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect on milling quality. *Transactions of the ASAE* 43:1661-1667.
4. Dong R., Z. Lu, Z. Liu, Y. Nishiyama and W. Cao. 2009. Moisture distribution in a rice kernel during tempering drying. *Journal of Food Engineering* 91: 126-132.
5. FAOSTAT. 2013. Rice production. Available online at: http://www.faostat.org. Accessed 27 November 2013.
6. Iranian National Standards. No. 127. Rice-Specifications and Test Methods. First Revision. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. Tehran. (In Farsi).
7. Kermani, A. M., T. Tavakoli Hashjin and M. H. Khoshtaghaza. 2006. Stress cracking susceptibility of rice kernels (Hashemi and Khazar) during thin-layer drying of rough rice. *Iranian Journal of Agricultural Science* 37(4): 697-706. (In Farsi).
8. Khoshtaghaza, M. H., M. Sadeghi and R. Amirichayjan. 2007. Study of rough rice drying process in fixed and fluidized bed conditions. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 14(2): 127-137. (In Farsi).
9. Khoshtaghaza, M. H., M. Soleimani and M. Shahedi. 2001. Correlation of head rice yield (HRY) with rough rice fissuring and bending strength in drying process. *Iranian Journal of Agricultural Science* 33: 115-121. (In Farsi).
10. Lee, K. W. 1979. Fissuring of the rice grain after heated air drying. *Transactions of the ASAE* 22: 1197-1199.
11. Mohajeran, S. H., M. H. Khoshtaghaza and A. Moazami Gudarzi. 2006. Effect of rough rice temperature and air velocity on grain crack during infrared radiation drying. *Journal of Food Science and Technology* 3(2): 57-66. (In Farsi).
12. Nasrnia, E., M. Sadeghi and A. A. Masoumi. 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).
13. Sarker, N. N., O. R. Kunze and T. Strouboulis. 1996. Transient moisture gradients in rough rice mapped with finite element model and related to fissures after heated air drying. *Transactions of the ASABE* 39: 625-631.
14. Siebenmorgen, T. J., G. Qin and C. Jia. 2005. Influence of drying on rice fissure formation rates and mechanical strength distributions. *Transactions of the ASABE* 48: 1835-1841.
15. Stefe, J. F. and R. P. Singh. 1980. Theoretical and practical aspect of rough rice tempering. *Transactions of the ASAE* 23: 775–82.

16. 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).
17. Toshizo, B. 1971. Rice cracking in high rate drying. *Japan Agricultural Research Quarterly* 6: 113-116.
18. Zamani, G. H. and M. Alizadeh. 2007. Characterization and Processing of Different Varieties of Rice in Iran. Pelk Publication. Tehran. (In Farsi).
19. Zhang, Q., W. Yang and Z. Sun. 2005. Mechanical properties of sound and fissured rice kernels and their implication for rice breakage. *Journal of Food Engineering* 68: 65-72.