

مقایسه ترک خوردگی دانه و زمان خشک شدن شلتوک در شرایط بسترهای ثابت و سیال آزمایشگاهی

رضا امیری چایجان، محمدهادی خوش تقاضا^۱

چکیده

سیستم‌های سنتی و قدیمی خشک کردن شلتوک در ایران ضایعات زیادی را به علت خشک شدن غیریکنواخت، در فرایند تولید برنج باعث می‌شود. در این پژوهش برای کاهش میزان ترک خوردگی و افزایش سرعت خشک شدن در دمای بالاتر از دمای متداول، از روش بستر سیال برای خشک کردن شلتوک بهره‌گیری شده است. برای خشک کردن نمونه‌ها از یک دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی بهره‌گیری شد. آزمایش‌های خشک کردن، شامل بررسی زمان خشک کردن و درصد ترک خوردگی دانه‌های شلتوک در سه شرایط بستر ثابت، حداقل سیال‌سازی و سیال کامل و در دماهای ۴۰، ۶۰، ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد.

نتایج نشان داد که در شرایط حداقل سیال‌سازی میزان ترک خوردگی دانه نسبت به شرایط بستر ثابت، در دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب حدود ۰۵٪، ۶۸٪ و ۷۵٪ کاهش یافت. در حالی که این کاهش در شرایط بستر سیال کامل نسبت به بستر ثابت در دماهای مذکور به ترتیب حدود ۴۰٪، ۵۴٪ و ۶۵٪ بود. کمترین زمان خشک کردن شلتوک، در روش حداقل سیال‌سازی و بیشترین زمان، در روش بستر ثابت طول کشید. نتایج به دست آمده نشان داد که روش حداقل سیال‌سازی دارای کمترین مقدار ترک خوردگی و زمان خشک شدن در تمام دماهای مورد آزمایش است.

واژه‌های کلیدی: شلتوک، بستر ثابت، خشک‌کن بسترسیال، زمان خشک شدن، ترک خوردگی دانه، حداقل سیال‌سازی و سیال کامل

مقدمه

برداشت مسئله‌ای جدی است، زیرا کارخانجات برنج‌کوبی موجود در شمال کشور به علت قدیمی بودن تکنولوژی خشک کردن شلتوک برنج، جوابگوی حجم بالای تولید

برداشت مکانیزه شلتوک، به ویژه در شمال ایران افزایش چشم‌گیری یافته است. از این رو رطوبت بالای دانه‌ها در فصل

۱. دانشجوی دکتری و استادیار مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

نخواهند بود. مرحله خشک کردن در چرخه تولید برنج مرحله ای بحرانی است. زیرا مهم ترین عامل ضایعات برنج در مرحله پس از برداشت، ناشی از خشک کردن نادرست آنهاست. (۴). نتایج آزمایش های خوشحال (۴) نشان داد که میزان برنج خرد شده در خشک کن های سنتی موجود در شمال ایران در دمای متداول 40°C حدود ۱۴٪ است. گرایش به بهره گیری از دماهای بالاتر به منظور خشک کردن سریع محصولات کشاورزی به وسیله نوع بهره گیری از آنها محدود می شود. خشک کردن سریع شلتوک با دماهای بالا، به وسیله خشک کن های متداول، باعث ایجاد تنش های حرارتی، باعث ترک خوردن دانه می گردد. بهره گیری از روش بسترسیال جهت خشک کردن پودرها و مواد شیمیایی از چند دهه گذشته در صنایع داروسازی آغاز گردیده ولی حدود یک دهه است که بهره گیری از این روش برای خشک کردن محصولات کشاورزی به ویژه غلات مرسوم شده است.

با افزایش سرعت هوا، اُفت فشار و فاصله دانه ها در بستر مواد افزایش یافته و اُفت فشار استاتیک در یک نقطه بیشترین مقدار است که این نقطه را حداقل سیال سازی (Minimum Fluidization) می گویند. از این مرحله به بعد با افزایش سرعت هوا، اُفت فشار استاتیک مقداری کاهش می یابد و این روند تا انتقال کامل مواد ادامه می یابد. این مرحله را سیال کامل (Full Fluidization) می گویند (۹). لازم به ذکر است که در شرایط حداقل سیال سازی نیروی وزن با نیروی مقاومت (Drag Force) سیال برابر می شود، به طوری که دانه حالت شناور پیدا می کند. ولی در مرحله سیال کامل، افزایش سرعت هوا باعث ایجاد کانال های هوا در بستر مواد و ایجاد جریان فواره ای می گردد که با افزایش بیشتر سرعت هوا، انتقال مواد صورت می گیرد.

در آزمایش های انجام شده توسط پراساد و همکاران (۱۰) روی شلتوک نیم جوش (Parboiled Rough Rice) معلوم شد که با افزایش دما در هر عمقی از بستر سیال، منحنی خشک شدن، شیب تندتری پیدا می کند که بیانگر افزایش در

سرعت خشک شدن است. اوکان و اولکو (۱۴) طی آزمایشی مشاهده کردند که در روش خشک کردن سیال کامل در دماهای زیر ۲۰ درجه سانتی گراد و بالای ۶۵ درجه سانتی گراد به ترتیب ۱۵ و ۵۴ درصد بر سرعت خشک کردن می افزاید. آنها نتیجه گرفتند که این افزایش سرعت در خشک شدن به روش بسترسیال ناشی از افزایش سطح تماس محصولات خشک کردنی با هواست.

غالی و تیلور (۸)، در یک فرایند خشک کردن بستر ثابت و سیال، اثرهای کیفی دو وارته گندم تا رسیدن به دو رطوبت نهایی ۱۲ درصد و ۱۴ درصد (پایه تر) را بررسی کردند. شرایط این آزمایش از طریق بهره گیری از هوای گرم در یک خشک کن بسترسیال و ثابت با قطر محفظه ۳۴ سانتی متر با دماهای ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی گراد در زمان های ۵ تا ۱۲۰ دقیقه و مقدار جریان هوای ۱۴۵ لیتر بر ثانیه اعمال شد. بستر سیال در مقایسه با بستر ثابت نقش بسزایی در کاهش ضایعات نسبت به بستر ثابت و بهبود کیفی گندم از نظر جوانه زنی و ویژگی های پخت داشت. در پژوهش دیگری، سادرلند و غالی (۱۳) خشک کردن سریع شلتوک تحت شرایط بسترسیال را در مناطق مرطوب بررسی کردند. شلتوک با رطوبت بالا تا محتوای رطوبتی ۱۸ درصد (پایه تر) خشک شد. بررسی های آزمایشگاهی انجام گرفته نشان می دهد که می توان شلتوک را با اعمال محدوده دمایی ۴۰ تا ۹۰ درجه سانتی گراد از رطوبت ۲۴ درصد به ۱۸ درصد رساند، بدون این که راندمان برنج سالم کاهش یابد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که به هنگام بهره گیری از دمای بالاتر، سرعت کمتر هوا و بسترهای عمیق تر دانه، هزینه کمتری صرف می شود.

پلی استیک (۹) در سال ۱۹۹۵، تأثیر محتوای رطوبتی دانه های ذرت و سرعت هوا روی شروع حداقل سیال سازی در طی خشک کردن را بررسی کرد. با اندازه گیری جریان هوای مورد نیاز به منظور سیال سازی لایه ذرت، مشخص شد که نقطه شروع سیال سازی، بستگی به ضخامت های مختلف ذرت متناسب با رطوبت آن داشت و با تغییر مشخصه های فوق، نقطه

شروع سیال‌سازی نیز تغییر می‌کند.

با توجه به مطالب یادشده، نیاز به تحقیق به منظور یافتن شیوه‌ای مناسب برای خشک کردن سریع شلتوک برنج با کیفیت مناسب، ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اهمیت روش خشک کردن بسترسیال برای خشک کردن سریع محصولات کشاورزی، اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: ۱- بررسی مراحل مختلف سیال‌سازی شلتوک و مطالعه این مراحل برای خشک کردن آن ۲- بررسی میزان ترک خوردگی شلتوک در طی خشک کردن با دماهای بالاتر از دمای متداول در شرایط بسترهای ثابت و سیال ۳- بررسی زمان خشک کردن شلتوک در دو روش بسترثابت و سیال

مواد و روش‌ها

مشخصات خشک‌کن بسترسیال آزمایشگاهی و تجهیزات

مورد بهره‌گیری

به منظور انجام آزمایش‌ها، از یک دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی بهره‌گیری شد که امیری‌چایجان و همکاران (۲) آن را طراحی و ساخته بودند (شکل ۱). محفظه خشک‌کن، استوانه‌ای با ارتفاع ۳۲ cm و قطر ۱۴/۶ cm و جنس شفاف پلکسی‌گلاس (Plexy Glass) بود و سیستم حرارتی آن ۷ المنت برقی داشت. برای کنترل دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن از یک ترموستات دقیق Samwon ساخت کشور کره با دقت $\pm 1^\circ\text{C}$ بهره‌گیری شد. ترموکوپل مورد استفاده از نوع PT 100 و در زیر محفظه خشک‌کن نصب گردیده بود.

دمای محیط، قبل از ورود به دمنده و دمای هوا، قبل و بعد از محفظه خشک‌کن توسط یک دماسنج دیجیتالی از نوع Loutron Tm-915، با دقت $\pm 1^\circ\text{C}$ اندازه‌گیری و ثبت شد. سنسورهای دما از نوع AC TP-02 بود. به منظور اندازه‌گیری اُفت فشار استاتیک ناشی از بستر مواد در داخل محفظه خشک‌کن، از یک فشارسنج دیجیتالی مدل Testo، با دقت $\pm 10\text{Pa}$ بهره‌گیری شد. برای تشخیص مرحله شروع

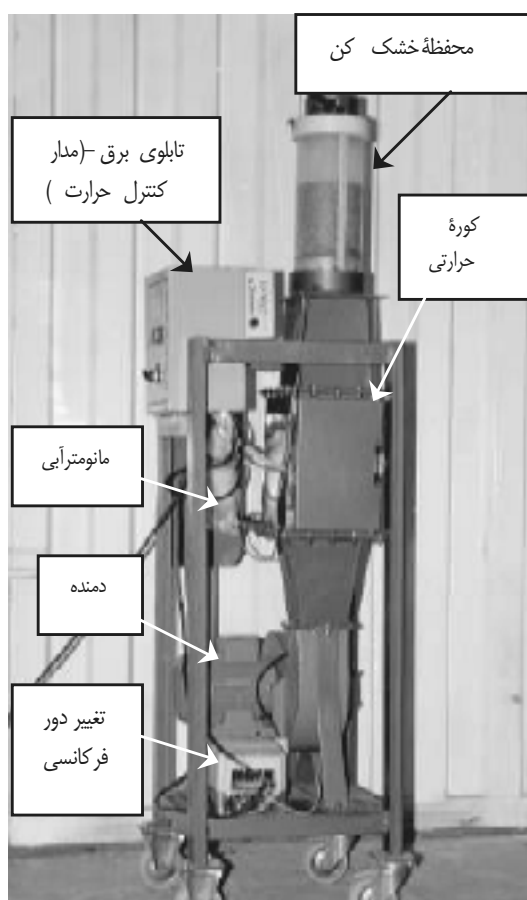
سیال‌سازی (شناوری) در حین انجام آزمایش‌ها، از یک مانومترآبی U شکل با قدرت تشخیص ۰/۰۰۱ m استفاده شد. چون این وسیله، اُفت فشار را در تمام مراحل به‌طور پیوسته نشان می‌داد، می‌توانستیم نقطه حداقل سیال‌سازی را به‌طور مشخص برآورد کرده و ضمن تنظیم دستگاه در روی نقطه مورد نظر، آزمایش‌ها را انجام دهیم.

سرعت هوای خروجی توسط یک سرعت‌سنج هوای پره‌ای از نوع Loutron A-M-4202 با دقت $\pm 1\text{ m/s}$ اندازه‌گیری شد. به منظور تغییر دور موتور سه‌فاز مورد استفاده برای تأمین سرعت هوای مورد نیاز از یک دستگاه تغییر دور فرکانسی Topvert 7200 L-2.2 بهره‌گیری شد.

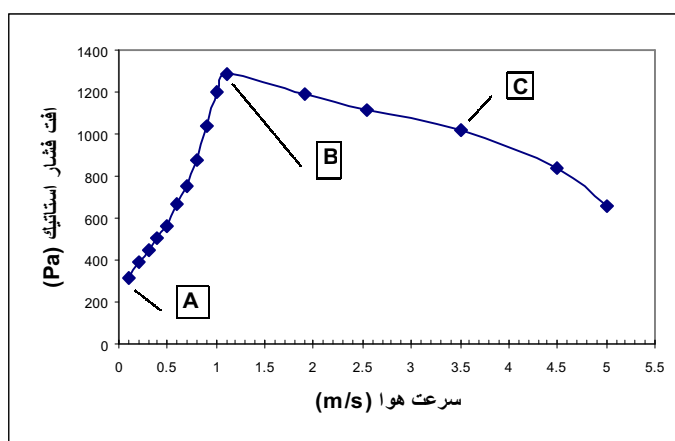
برای اندازه‌گیری درصد ترک شلتوک، از دستگاه ترک‌بین استفاده شد (۳). این دستگاه کوچک، شامل یک لامپ فلوروسنت است که در زیر یک صفحه مشبک نصب می‌شود. صفحه مشبک دارای شیارهای طولی است که می‌توان دانه‌های برنج را به‌طور مورب روی آن قرار داد و به راحتی به کمک یک ذره‌بین، وضعیت ترک دانه‌ها را بررسی کرد. به علت شکست نور در مقطع ترک‌خورده، ترک عرضی دانه به راحتی قابل تشخیص است.

شرایط آزمایش، انتخاب سطوح دما و سرعت هوا

برای انجام آزمایش‌ها از شلتوک خزر که رقمی دیررس و از ارقام پرمحصول و اصلاح‌شده است، استفاده شد. نخست حدود ۱۰۰ کیلوگرم شلتوک به‌طور تصادفی انتخاب و سپس داخل کیسه‌های نایلونی ۲۰ کیلوگرمی قرار داده و در آنها کاملاً بسته شد تا از کاهش رطوبت شلتوک جلوگیری شود و در عین حال، تعادل نسبی نیز در بین دانه‌ها ایجاد شود. لازم به ذکر است که ناخالصی‌های شلتوک قبلاً به وسیله دستگاه بوجاری جدا شده بود. برای به دست آوردن رطوبت دانه‌ها از استاندارد انجمن مهندسان کشاورزی آمریکا به روش خشک کردن و کاهش وزن به مدت ۲۴ ساعت درون اجاق در دمای 130°C استفاده شد (۵). میزان رطوبت اولیه شلتوک ۱۷/۷٪ برپایه



شکل ۱. خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی ساخته شده (امیری چایجان و همکاران، ۱۳۸۰)



شکل ۲. منحنی مشخصه سیال سازی شلتوک خزر در عمق ۰/۲ m با محتوای رطوبتی ۱۷/۷٪ پایه خشک (C=۳/۵m/s, B=۱/۱ m/s, A=۰/۱ m/s)

خشک به دست آمد.

فرایند خشک کردن در شرایط هوایی با دمای 9°C و رطوبت نسبی $41/7\%$ انجام شد. برای انتخاب سطوح مناسب سرعت هوا، از منحنی مشخصه سیال سازی شلتوک مورد آزمایش در عمق $0/2$ متر بهره گیری شد (شکل ۲). در شرایط بستر ثابت، سرعت جریان هوا برابر $0/1\text{ m/s}$ به دست آمد (نقطه A در شکل ۲). البته حدود این میزان سرعت در خشک کن های متداول شمال کشور، که به صورت بستر ثابت هستند، نیز گزارش شده است (۱ و ۴). با افزایش سرعت هوا، اُفت فشار نیز افزایش قابل توجهی یافته و تا نقطه حداقل سیال سازی B (سرعت $1/1\text{ m/s}$) به طور نسبتاً یکنواخت ادامه یافت. پس از این مرحله (با افزایش سرعت هوا)، کاهش قابل توجهی در اُفت فشار حاصل شد، به طوری که در طی مرحله حباب سازی در داخل بستر مواد، این اُفت فشار پس از نقطه سیال کامل C (سرعت $3/5\text{ m/s}$) با شدت بیشتری کاهش یافت. وضعیت پایدار تا نقطه سیال کامل C ادامه داشت که پس از آن با افزایش سرعت هوا مرحله انتقال مواد شروع می شود. با توجه به توضیحات ارائه شده، فاکتور سرعت هوا در سطوح $a_1=0/1\text{ m/s}$ (به عنوان سرعت بستر ثابت)، $a_2=1/1\text{ m/s}$ (به عنوان سرعت حداقل سیال سازی) و $a_3=3/5\text{ m/s}$ (به عنوان سرعت سیال کامل) در آزمایش ها مدنظر قرار گرفت.

در شرایط متداول بستر ثابت دمای حدود 40°C برای خشک کردن شلتوک استفاده می شود. بنابراین برای بررسی ترک خوردگی شلتوک در دماهای بالاتر از دمای متداول، علاوه بر سطح دمایی $b_1=40^{\circ}\text{C}$ ، دو سطح دمایی $b_2=60^{\circ}\text{C}$ و $b_3=80^{\circ}\text{C}$ انتخاب گردید. طرح آزمایشی مورد بهره گیری، طرح فاکتوریل 3×3 بر پایه طرح کاملاً تصادفی انتخاب شد. در این آزمایش ها دما و سرعت هوا (نوع بستر مواد) به عنوان متغیر مستقل و ترک دانه ها به عنوان متغیر وابسته در سه تکرار اندازه گیری و ارزیابی شد. هم چنین مقایسه میانگین ها با بهره گیری از آزمون چنددامنه ای دانکن انجام پذیرفت. برای اندازه گیری میزان ترک اولیه نمونه های شلتوک مورد

آزمایش، سه نمونه 100 تایی دانه شلتوک به طور تصادفی از توده 100 کیلوگرمی انتخاب و پوست خارجی آنها با دقت زیاد با دست از دانه شلتوک برنج جدا شد. سپس دانه های بدون پوست را در روی شیارها دستگاه ترک بین قرار دادیم و دانه های ترک دار (دانه های با ترک عرضی کامل) را شمرده و به صورت درصد، نسبت به کل دانه ها در نظر گرفتیم. درصد ترک نمونه اولیه شلتوک $3/8\%$ به دست آمد. این عدد، ضایعات ناشی از عملیات برداشت، خرمن کوبی، حمل و نقل و یا احیاناً تنش های رطوبتی است که از مقادیر آزمایشی کم شد.

روش انجام آزمایش های خشک کردن شلتوک در شرایط

بسترهای ثابت و سیال

در تمام مراحل انجام آزمایش ها از یک روش مشخص در تنظیم دستگاه و نمونه گیری پیروی شد. برای ریختن شلتوک در داخل محفظه خشک کن از یک قیف بزرگ که روی محفظه قرار داده شده بود، بهره گیری شد تا شرایط یکسانی در حالت های مختلف بر بستر مواد برقرار باشد. پس از رسیدن شلتوک تا ارتفاع 20 سانتی متر، مراحل زیر را به ترتیب انجام دادیم:

۱. نخست برای تنظیم اولیه دستگاه مطابق با شرایط مورد آزمایش از نمونه غیراصلی شلتوک برنج بهره گیری شد.
۲. المنت های کوره را روشن کرده تا این که دمای مورد نظر حاصل شود. سپس حدود 40 دقیقه دستگاه را روشن گذاشته تا این که دستگاه به شرایط تعادل حرارتی برسد. سپس سیستم را به ترتیب روی سرعت های $0/1$ ، $1/1$ و $3/5\text{ m/s}$ تنظیم کرده و پس از حصول دماهای 40 ، 60 و 80°C ، آزمایش های مذکور با نمونه اصلی شلتوک برنج شروع گردید.
۳. وزن محفظه مواد در ابتدای آزمایش و سپس در فواصل 5 دقیقه ای ثبت گردید. برای این که فواصل زمانی وزن کردن نمونه ها در روند خشک کردن تاثیر معنی داری نداشته باشد، حداکثر زمان لازم برای وزن کردن مواد، یک دقیقه توصیه شده است (۶). در عمل، میانگین زمان وزن کردن محفظه مواد در

آزمایش‌ها، حدود ۲۵ ثانیه طول کشید. برای وزن کردن نمونه‌ها از ترازوی دیجیتالی با دقت ± 0.1 g بهره‌گیری شد.

۴. پس از رسیدن رطوبت متوسط شلتوک به حدود ۱۱٪ پایه خشک با مخلوط کردن تمام شلتوک‌های موجود در محفظه مواد، ۳ نمونه ۱۰۰ گرمی را برای آزمایش‌های ترک جدا کردیم.

نتایج و بحث

تأثیر روش‌های خشک کردن بر میزان ترک برنج

نتایج آماری نشان داد که اثرهای مستقل و متقابل دما و سرعت هوا بر میزان ترک برنج معنی‌دار بود (جدول ۱). مقایسه میانگین‌های تیمارها با ذکر حروف مربوطه در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل مذکور، بیشترین مقدار ترک دانه‌های شلتوک به میزان ۷۷٪ مربوط به حالت بستر ثابت (سرعت هوای ۰/۱ m/s) با دمای هوای 80°C است. کمترین مقدار ترک نیز به میزان ۱۷٪ در سرعت هوای ۱/۱ m/s (شرایط حداقل سبال‌سازی) رخ داده است.

شرایط بستر ثابت (سرعت هوای ۰/۱ m/s) را می‌توان عامل اصلی ترک دانه‌ها دانست. در این شرایط به دلیل این که سرعت هوای دمیده شده پایین است، فاصله زمانی نسبتاً زیادی بین خشک شدن لایه‌های زیرین با لایه‌های میانی و بالایی ایجاد می‌شود. این در حالی است که لایه‌های زیرین به رطوبتی پایین‌تر از مقدار توصیه شده رسیده‌اند و لایه‌های بالایی همچنان دارای رطوبتی بالاتر از مقدار میانگین هستند. این امر سبب افزایش ترک دانه‌ها در لایه‌های زیرین شده است. با افزایش دما نیز میزان ترک دانه‌ها افزایش یافته است. بدین دلیل میزان ترک در هر سه دما با یکدیگر تفاوت دارند که با توجه به حروف متفاوت مقایسه میانگین‌ها، از نظر آماری نیز این تفاوت قابل مشاهده است (شکل ۳). بیشترین ترک در دمای 80°C به علت تنش‌های حرارتی زیاد رخ می‌دهد. میزان ترک دانه‌ها در دماهای ۴۰، ۶۰ و 80°C و در بستر ثابت به ترتیب ۴۰٪، ۶۰٪ و ۷۷٪ به دست آمد.

میزان ترک دانه‌ها در دماهای ۴۰، ۶۰ و 80°C و در شرایط

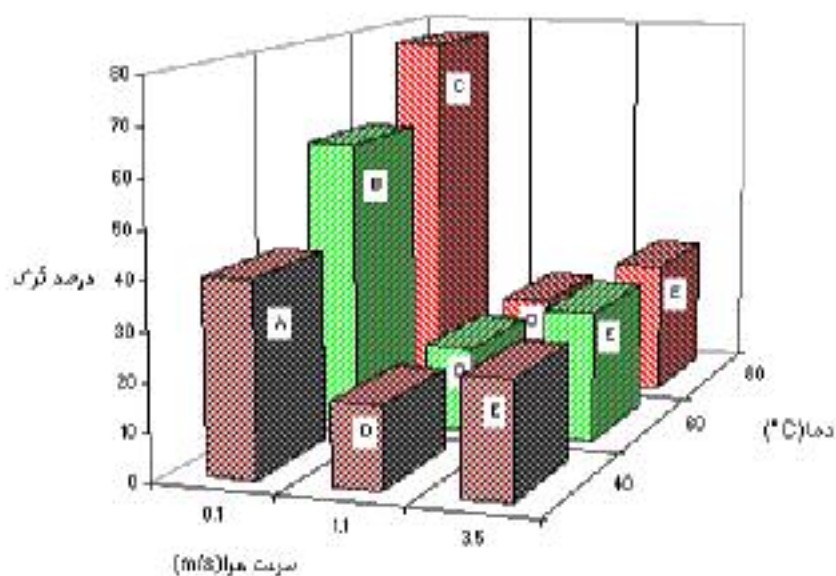
حداقل سیال‌سازی (سرعت هوای ۱/۱ m/s) به ترتیب ۱۷٪، ۱۷/۷٪ و ۱۸/۶٪ به دست آمد. در این شرایط اعمال سرعت مناسب هوا و تماس بهتر دانه‌ها با هوا، سبب کاهش چشم‌گیر ترک دانه‌ها شده، زیرا دانه‌ها در این شرایط به حالت معلق (شناور) قرار دارند. این امر سبب افزایش سرعت انتقال جرم و حرارت در این شرایط می‌شود و سطح مؤثر تماس دانه‌ها با هوای محیط، به میزان چشم‌گیری نسبت به شرایط بستر ثابت افزایش یافته است. بنابراین افزایش دمای هوا، زمان خشک کردن را کاهش می‌دهد، بدون این که تأثیر منفی بر ترک خوردگی دانه بگذارد. هم‌چنین می‌توان دریافت که در شرایط حداقل سیال‌سازی و در تمام دماها با توجه به حروف مشترک D، مقدار میانگین ترک‌ها با هم در یک سطح قرار دارند (شکل ۳). بنابراین در شرایط حداقل سیال‌سازی می‌توان برای خشک کردن سریع محصول از بیشترین دما (80°C) بهره‌گیری کرد، بدون اینکه کیفیت محصول کاهش یابد.

میزان ترک دانه‌ها در دماهای ۴۰، ۶۰ و 80°C و در شرایط سیال کامل (سرعت هوای ۳/۵ m/s) به ترتیب ۲۴٪، ۲۷٪ و ۲۸٪ به دست آمد. در این شرایط نیز که اختلاط کامل مواد رخ می‌دهد، مقدار ترک دانه‌ها نسبت به بستر ثابت کاهش داشته است. هم‌چنین اختلاف میزان ترک در سه دمای مورد آزمایش معنی‌دار نشده است (شکل ۳). چرخش مواد در داخل بستر، باعث انتقال سریع‌تر حرارت و جرم می‌شود که در نتیجه میانگین ترک دانه‌ها از حالت بستر ثابت کمتر شده است. دلیل نزدیکی مقادیر میانگین‌ها به هم را می‌توان شرایط یکنواخت حاکم بر لایه‌های مختلف بستر دانه ذکر کرد. به طوری که تغییر دمای 20°C تأثیر چندانی بر ترک خوردگی دانه نداشته است. با افزایش سرعت هوا و ایجاد شرایط سیال کامل مقدار ترک نسبت به شرایط حداقل سیال‌سازی افزایش یافته است. علت این امر را می‌توان، حرکت ناگهانی مواد، برخورد شدید مواد به بدنه محفظه خشک‌کن، اصطکاک داخلی شدید بین دانه‌ها و کانالیزه شدن هوا ذکر کرد (شکل ۴). عوامل یادشده سبب ایجاد ضربه‌های پی‌درپی به دانه‌ها و افزایش ترک خوردگی

جدول ۱. تجزیه واریانس ترک دانه‌های شلتوک

منابع تغییرات	درجه آزادی (DF)	میانگین مربعات (MS)
سرعت هوا	۲	۰/۳۸۴**
دما	۲	۰/۶۸۵**
سرعت هوا×دما	۴	۰/۲۹۷**
خطا	۱۸	۰/۰۴۲
کل	۲۶	

** در سطح ۱٪ معنی دار است.



شکل ۳. مقایسه ترک تیمارهای مختلف در سرعت‌ها و دماهای مختلف هوا

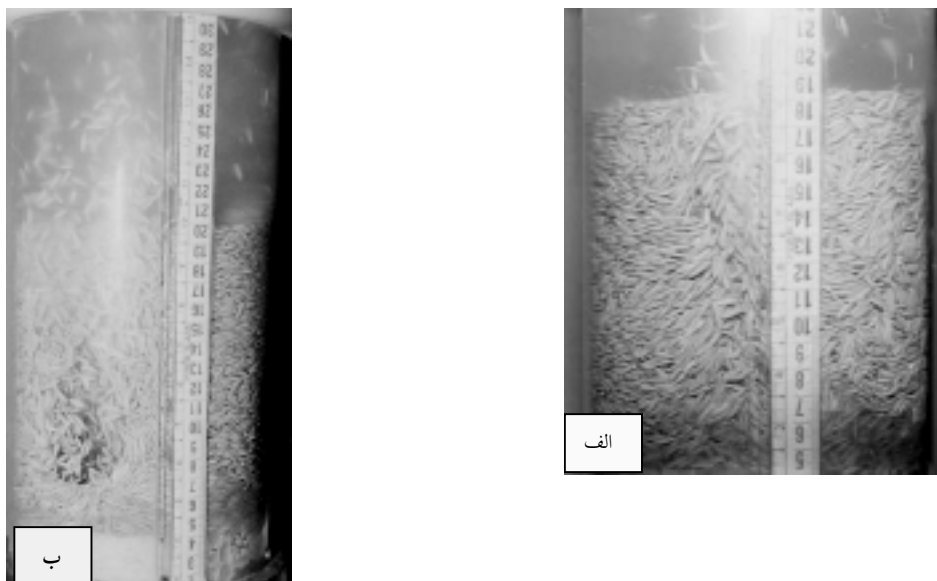
بررسی روش خشک کردن سریع شلتوک در دمای بالاتر از 40°C و در شرایط بستر سیال نتایج مشابهی در جهت کاهش ضایعات برنج مشاهده نمودند.

بررسی زمان خشک شدن شلتوک

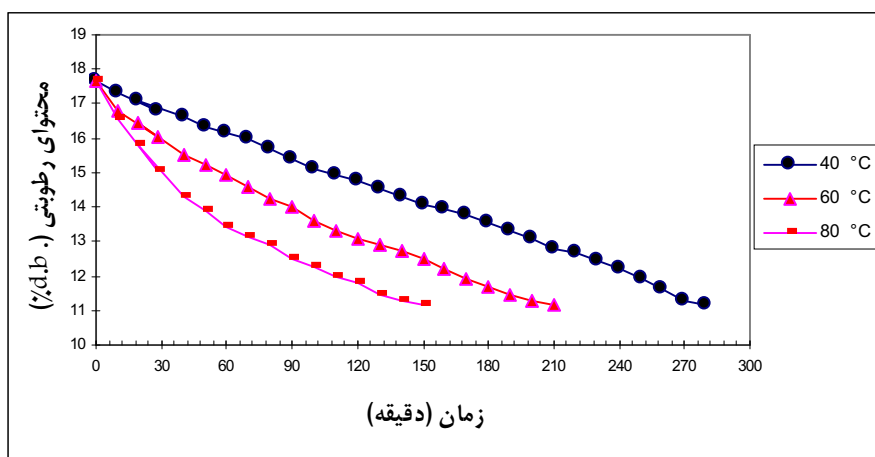
در این بخش، تغییرات محتوای رطوبتی در طی زمان، برای ۹ حالت آزمایش در قالب سه نمودار ارائه می شود تا تفاوت زمان مورد نیاز برای خشک کردن شلتوک با محتوای ۱۷/۷٪ پایه خشک به وضوح مشخص شود. منحنی‌های مربوط به محتوای رطوبتی- زمان در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش دما در تمام

می‌شود. از طرف دیگر در شرایط سیال کامل به علت ایجاد کانال‌های هوا در داخل بستر، دانه‌های شلتوک در معرض دمای بالا قرار می‌گیرند و این امر نیز به دلیل ایجاد تنش‌های حرارتی زیاد، به ایجاد ترک در آنها کمک می‌کند. در مقام مقایسه می‌توان بیان کرد که شرایط سیال کامل نسبت به بستر ثابت در دماهای ۴۰، ۶۰ و 80°C توانسته میزان ترک خوردگی را به ترتیب معادل ۴۰٪، ۵۴٪ و ۶۵٪ کاهش دهد. در شرایط حداقل سیال‌سازی نیز نسبت به بستر ثابت و در دماهای مذکور، این کاهش معادل ۵۷٪، ۶۸٪ و ۷۵٪ بود.

این نتایج مشابه یافته‌های پژوهش‌های دی‌متیا و همکاران (۷) در مورد گندم است. هم‌چنین سادرلند و غالی (۱۳) در



شکل ۴. مراحل سیال‌سازی شلتوک (الف- حداقل سیال‌سازی ب- سیال کامل)

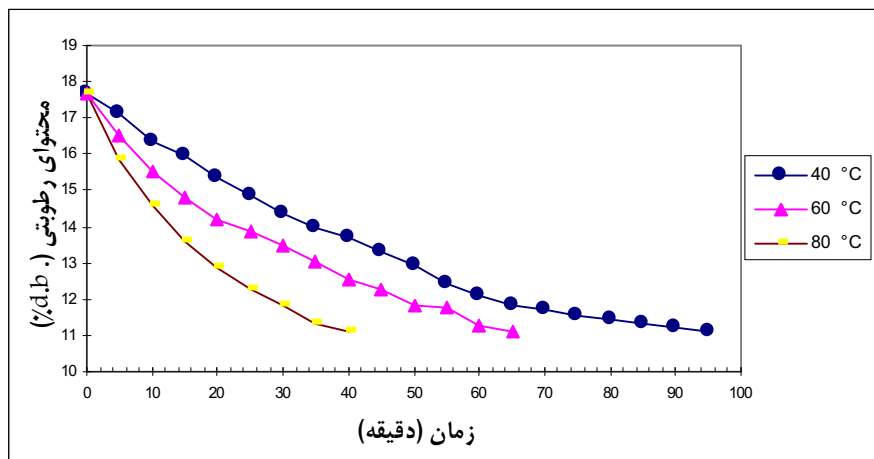


شکل ۵. منحنی محتوای رطوبتی- زمان برای شرایط بستر ثابت شلتوک در دماهای مختلف (سرعت هوا ۱ m/s)

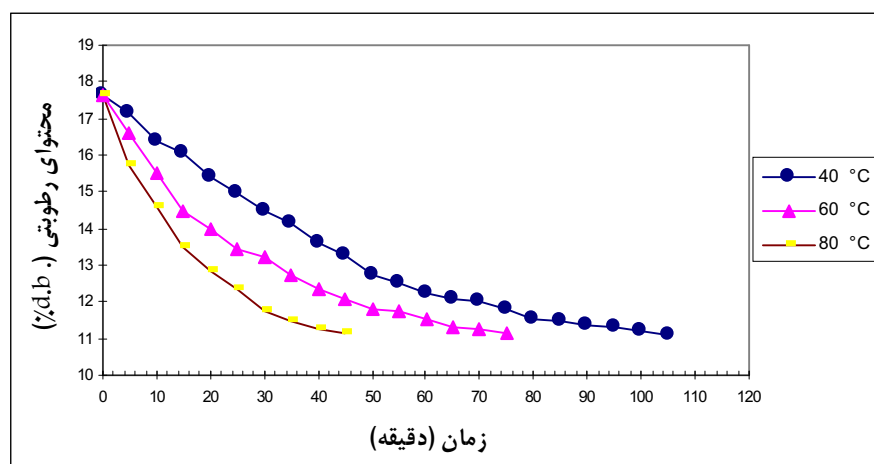
۴۰ به ۸۰°C مدت زمان خشک‌شدن حدود ۰/۵۸٪ کاهش یافت. در این شرایط میزان ترک‌خوردگی دانه تغییری نداشته است. در شرایط سیال کامل، مدت زمان خشک‌شدن مواد در دماهای یادشده، به ترتیب ۱۰۵، ۷۵ و ۴۵ دقیقه بوده است (شکل ۷). این زمان نسبت به شرایط بستر ثابت، بسیار کم ولی نسبت به شرایط حداقل سیال‌سازی، اندکی افزایش را نشان می‌دهد. این امر به دلیل کانالیزه‌شدن هوا و تماس غیرمؤثر دانه‌ها با هوای گرم است. بنابراین توصیه می‌شود به هنگام خشک‌کردن مواد دانه‌ای، از ایجاد شرایط اختلاط کامل و یا سیال کامل اجتناب شود.

شرایط، سرعت خشک‌شدن افزایش یافته است. به منظور خشک‌شدن شلتوک در شرایط بستر ثابت و در دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰°C به ترتیب ۲۸۰، ۲۱۰ و ۱۵۰ دقیقه مورد نیاز بود تا به رطوبت ۱۱٪ پایه خشک برسد. به طوری که با دو برابر شدن دما از ۴۰ به ۸۰°C، زمان خشک‌شدن نیز در حدود ۴۳٪ کاهش یافت.

در شرایط حداقل سیال‌سازی، مدت زمان لازم برای خشک‌کردن شلتوک در دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰°C به ترتیب ۹۵، ۶۵ و ۴۰ دقیقه بود (شکل ۶). در این شرایط با افزایش دما از



شکل ۶. منحنی محتوای رطوبتی- زمان برای شرایط حداقل سیال سازی شلتوک در دماهای مختلف (سرعت هوا ۱/۱ m/s)



شکل ۷. منحنی محتوای رطوبتی- زمان برای شرایط سیال کامل شلتوک در دماهای مختلف (سرعت هوا ۳/۵ m/s)

سرعت خشک شدن در شرایط سیال را تایید می کند (۱۰، ۱۳، ۱۱ و ۷). ضمن این که شرایط بهینه دیگری را در وضعیت حداقل سیال سازی معرفی می کند.

بهترین شرایط برای خشک کردن سریع شلتوک

معیارهای بیان شده در آزمایش های خشک کردن سریع شلتوک عبارت از ترک دانه ها و زمان خشک شدن بود که در سرعت هوای مختلف و دماهای بالاتر از دمای متداول خشک کردن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به موارد فوق، شرایط حداقل سیال سازی (سرعت هوای ۱/۱ m/s) با دمای ۸۰ °C را به عنوان

طبق نتایج آزمایش های انجام شده، زمان خشک شدن شلتوک از محتوای رطوبتی ۱۷/۷٪ پایه خشک تا حدود ۱۱٪ پایه خشک برای شرایط سیال کامل نسبت به شرایط بستر ثابت در دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد، به ترتیب حدود ۷۰٪، ۶۴٪ و ۶۲/۵٪ کاهش یافت و این کاهش زمان برای شرایط حداقل سیال سازی نسبت به بستر ثابت در دماهای مذکور، به ترتیب حدود ۷۳٪، ۶۹٪ و ۶۶٪ کاهش نشان می دهد. بنابراین در تمام دماهای مورد آزمایش شرایط حداقل سیال سازی، کاهش زمان بیشتری نسبت به سایر شرایط حاصل شده است. یافته های این آزمایش، نتایج محققین قبلی را مبنی بر افزایش

آرام بستر مواد، میزان ترک دانه‌ها در شرایط حداقل سیال‌سازی کمتر از حالت سیال کامل بود.

۲. مدت زمان مورد نیاز برای خشک کردن شلتوک از محتوای رطوبتی ۱۷/۷٪ تا محتوای رطوبتی ۱۱٪ بر پایه خشک در شرایط حداقل سیال‌سازی و در تمام دماهای مورد آزمایش کمترین مقدار را داشت.

۳. با توجه به معیارهای ترک دانه و مدت زمان خشک کردن، شرایط حداقل سیال‌سازی (سرعت هوای ۱/۱ m/s) با دمای ۸۰°C را می‌توان به‌عنوان بهترین حالت ممکن در این آزمایش‌ها انتخاب کرد. در نتیجه روش بستر سیال می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی سیستم سنتی خشک کردن شلتوک برنج مطرح شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از آقای مهندس کریمی مدیر عامل محترم شرکت تولیدی-صنعتی کارینو برای همکاری و کمک مؤثر در ساخت دستگاه، تشکر و قدردانی می‌شود.

نتیجه‌گیری

بهترین حالت ممکن در این آزمایش‌ها می‌توان انتخاب کرد. زیرا ترک دانه‌ها در شرایط حداقل سیال‌سازی کمترین مقدار و زمان خشک کردن نیز در دمای ۸۰°C و در این شرایط حداقل مقدار را دارا بود. لازم به ذکر است، در این پژوهش فقط یکی از پارامترهای کیفی (درصد ترک) حاصل از تنش‌های حرارتی بررسی شد، ولی تنش‌های حرارتی روی موارد دیگر مثل جوانه‌زنی و به‌طور کلی خواص فیزیکی دانه نیز تأثیر دارد که باید در این موارد نیز بررسی شود. همچنین می‌توان روش‌های مورد استفاده در این پژوهش را از لحاظ مصرف انرژی نیز مقایسه و بررسی دقیق کرد. ولی به‌طور کلی چنین نتیجه می‌شود که روش بستر سیال می‌تواند، یکی از روش‌های بهینه‌سازی سیستم سنتی خشک کردن شلتوک برنج باشد.

۱. به‌علت تنش‌های حرارتی، میزان ترک دانه‌ها در شرایط بستر ثابت، با افزایش دما، افزایش چشم‌گیری را نشان داد. در صورتی که در شرایط حداقل سیال‌سازی و سیال کامل، تفاوت چندانی در ترک دانه‌ها در دماهای اعمال شده، دیده نشد. از طرف دیگر، به‌علت توزیع یکنواخت حرارت و حصول حرکت

منابع مورد استفاده

۱. امیری چایجان، ر. ۱۳۷۹. طراحی و ساخت خشک‌کن بسترسیال آزمایشگاهی برای محصولات دانه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
۲. امیری چایجان، ر. م. ه. خوش تقاضا، ت. توکلی هاشجین و م. ح. کیان‌مهر. ۱۳۸۰. طراحی، ساخت و ارزیابی خشک‌کن بسترسیال آزمایشگاهی برای محصولات دانه‌ای. نهمین کنفرانس سالانه و پنجمین کنفرانس بین‌المللی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت.
۳. پیمان، م. ح.، ت. توکلی هاشجین و س. مینایی. ۱۳۷۹. تعیین فاصله مناسب بین غلتک‌ها در پوست‌کن غلتک لاستیکی برای تبدیل سه رقم برنج در استان گیلان. مجله علمی پژوهشی علوم کشاورزی ۲۰: ۶۲-۴۹.
۴. خوشحال، م. ۱۳۸۱. بررسی و ارزیابی روش کنترل متناوب فرایند خشکاندن شلتوک. پایان‌نامه دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
5. Anonymous, 2000. ASAE Standard. S352.2 DEC92: Moisture measurement-unground grain and seeds. 47th ed., ST. Joseph, MI, USA.
6. Basunia, M. A. and T. Abe. 1997. Diffusion coefficients for predicting rough rice drying behavior from low to high temperatures. Agric. Eng. J. 7(3&4): 147-158.

7. Di Mattia, D. G., P.R. Amyotte and F. Hamdullahpur. 1996. Fluidized bed drying of large particles. *Trans. ASAE* 39(5): 1745-1750.
8. Ghaly, T. F. and P. A. Taylor. 1982. Quality effects of two wheat varieties. *J. Agric. Eng. Res.* 27(3): 227-234.
9. Pliestic, S. 1995. The dependence of the BC492 hybrid maize grain beginning fluidization upon the grain moisture content and the air velocity during the drying process. *Poljoprivredna Znadstvena Smotra.* 60(1): 5-25.
10. Prasad, B. V. S., P. K. Chandra and S. Bal. 1994. Drying parboiled rough rice in stationary, semi-fluidized and fluidized conditions. *Trans. ASAE* 37(2): 589-594.
11. Sombat, K. 1992. Study on designing small scale fluidized bed dryer and test its efficiency for drying of corn grain. *Research Reports Kasetsart The Univ. of Thailand.*
12. Soponronnarit, S., B. R. Champ, E. Highley and G. I. Johnson. 1996. Fluidized bed paddy drying. *Grain Drying in Asia. Proceedings of an International Conference held at the FAO Regional Office for Asia and the Pacific.*
13. Sutherland, J. W. and T. F. Ghaly. 1990. Rapid fluid bed drying of paddy rice in the humid tropics. *Proceedings of ASEAN Seminar on Postharvest Technology. Brunei Darussalam.*
14. Uckan, G. and S. Ulku. 1986. Drying of grains in a batch fluidized bed dryer. *Drying of Solids.* 14: 13-20.