

مقایسه ترک خوردگی دانه و زمان خشک شدن شلتوك در شرایط بسترهاي ثابت و سيال آزمایشگاهي

رضا اميری چایجان، محمدهادی خوش تقاضا^۱

چکیده

سيستم‌های سنتی و قدیمی خشک کردن شلتوك 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 متدالو، از روش بستر سیال برای خشک کردن شلتوك بهره‌گیری شده است. برای خشک کردن نمونه‌ها از یک دستگاه خشک کن آزمایشگاهی بهره‌گیری شد. آزمایش‌های خشک کردن، شامل بررسی زمان خشک کردن و درصد ترک خوردگی دانه‌های شلتوك 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 ۵۷٪، ۶۸٪ و ۷۵٪ کاهش باخت. 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 شلتوك، 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: شلتوك، بستر ثابت، خشک کن بستر سیال، زمان خشک شدن، ترک خوردگی دانه، حداقل سیال‌سازی و سیال کامل

مقدمه

برداشت مسئله‌ای جدی است، زیرا کارخانجات برنج کوبی

موجود در شمال کشور به علت قدیمی بودن تکنولوژی

خشک کردن شلتوك برنج، جوابگوی حجم بالای تولید

برداشت مکانیزه شلتوك، به ویژه در شمال ایران افزایش

چشم‌گیری یافته است. از این‌رو رطوبت بالای دانه‌ها در فصل

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

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 می‌افزاید. آنها نتیجه گرفتند که این افزایش سرعت در خشک شدن به روش بستر سیال 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 واریته گندم تا رسیدن به دو رطوبت نهایی ۱۲ درصد و ۱۴ درصد (پایه تر) را بررسی کردند. شرایط این آزمایش از طریق بهره‌گیری از هوای گرم در یک خشک کن بستر سیال و ثابت با قطر محفظه ۳۴ سانتی‌متر با دماهای ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی گراد در زمان‌های 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 جوانه‌زنی و ویژگی‌های پخت داشت. در پژوهش دیگری، سادرلندر و غالی (۱۳) خشک کردن سریع شلتونک تحت شرایط بستر سیال را در مناطق مرطوب بررسی کردند. شلتونک با رطوبت بالا تا محتوای رطوبتی ۱۸ درصد (پایه تر) خشک شد. بررسی‌های آزمایشگاهی انجام گرفته نشان می‌دهد که می‌توان شلتونک را با اعمال محدوده دمایی ۴۰ تا ۹۰ درجه سانتی گراد از رطوبت ۲۴ درصد به ۱۸ درصد رساند، بدون این‌که راندمان برنج سالم کاهش یابد. هم‌چنین نتایج به دست آمده نشان داد که به هنگام بهره‌گیری از دمای بالاتر، سرعت کمتر هوای و بسترهای عمیق‌تر دانه، هزینه کمتری صرف می‌شود.

پلی‌استیک (۹) در سال ۱۹۹۵، تأثیر محتوای رطوبتی دانه‌های ذرت و سرعت هوا روی شروع حداقل سیال‌سازی در طی خشک کردن را بررسی کرد. با اندازه‌گیری جریان هوای مورد نیاز به منظور سیال‌سازی لایه ذرت، مشخص شد که نقطه شروع سیال‌سازی، بستگی به ضخامت‌های مختلف ذرت متناسب با رطوبت آن داشت و با تغییر مشخصه‌های فوق، نقطه

نخواهند بود. مرحله خشک کردن در چرخه تولید برنج مرحله‌ای بحرانی است. زیرا مهم‌ترین عامل ضایعات برنج در مرحله پس از برداشت، ناشی از خشک کردن نادرست آنهاست. (۴). نتایج آزمایش‌های خوشحال (۴) نشان داد که میزان برنج خرد شده در خشک کن‌های سنتی موجود در شمال ایران در دمای متداول 40°C حدود ۱۴٪ است. گرایش به بهره‌گیری از دماهای بالاتر به منظور خشک کردن سریع محصولات کشاورزی به وسیله نوع بهره‌گیری از آنها محدود می‌شود. خشک کردن سریع شلتونک با دماهای بالا، به وسیله خشک کن‌های متداول، به علت ایجاد تنفس‌های حرارتی، باعث ترک خوردن دانه می‌گردد. بهره‌گیری از روش بستر سیال جهت خشک کردن پودرها و مواد شیمیایی از چند دهه گذشته در صنایع داروسازی آغاز گردیده ولی حدود یک دهه است که بهره‌گیری از این روش برای خشک کردن محصولات کشاورزی به ویژه غلات مرسوم شده است.

با افزایش سرعت هوا، افت فشار و فاصله دانه‌ها در بستر مواد افزایش یافته و افت فشار استاتیک در یک نقطه بیشترین مقدار است که این نقطه را حداقل سیال‌سازی (Minimum Fluidization) می‌گویند. از این مرحله به بعد با افزایش سرعت هوا، افت فشار استاتیک مقداری کاهش می‌یابد و این روند تا انتقال کامل مواد ادامه می‌یابد. این مرحله را سیال کامل (Full Fluidization) می‌گویند (۹). لازم به ذکر است که در شرایط حداقل سیال‌سازی نیروی وزن با نیروی مقاومت (Drag Force) سیال برابر می‌شود، به طوری که دانه حالت شناور پیدا می‌کند. ولی در مرحله سیال کامل، افزایش سرعت هوا باعث ایجاد کانال‌های هوا در بستر مواد و ایجاد جریان فواره‌ای می‌گردد که با افزایش بیشتر سرعت هوا، انتقال مواد صورت می‌گیرد.

در آزمایش‌های انجام شده توسط پراساد و همکاران (۱۰) روی شلتونک نیم‌جوش (Parboiled Rough Rice) معلوم شد که با افزایش دما در هر عمقی از بستر سیال، منحنی خشک شدن، شبیه تندتری پیدا می‌کند که بیانگر افزایش در

سیال‌سازی (شناوری) در حین انجام آزمایش‌ها، از یک مانومتر آبی U شکل با قدرت تشخیص $0\text{--}100\text{ m}$ استفاده شد. چون این وسیله، افت فشار را در تمام مراحل به‌طور پیوسته نشان می‌داد، می‌توانستیم نقطهٔ حداقل سیال‌سازی را به‌طور مشخص برآورد کرده و ضمن تنظیم دستگاه در روی نقطهٔ موردنظر، آزمایش‌ها را انجام دهیم.

سرعت هوای خروجی توسط یک سرعت‌سنج هوای پرهای از نوع Lutron A-M-4202 با دقت $\pm 1\%$ اندازه‌گیری شد. به‌منظور 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 شلتونک، از دستگاه ترک‌بین استفاده شد^(۳). این دستگاه کوچک، شامل یک لامپ فلوئورسنت است که در زیر یک صفحهٔ شبک نصب می‌شود. صفحهٔ شبک دارای شیارهای طولی است که می‌توان دانه‌های برنج را به‌طور مورب روی آن قرار داد و به‌راحتی به‌کمک یک ذره‌بین، وضعیت ترک دانه‌ها را بررسی کرد. به‌علت شکست نور در مقطع ترک‌خورده، ترک عرضی دانه به‌راحتی قابل تشخیص است.

شرایط آزمایش، انتخاب سطوح دما و سرعت هوای

برای انجام آزمایش‌ها از شلتونک خزر که رقمی دیررس و از ارقام پرمحصول و اصلاح‌شده است، استفاده شد. نخست حدود 100 کیلوگرم شلتونک به‌طور تصادفی انتخاب و سپس داخل کيسه‌های نایلونی 20 کیلوگرمی قرار داده و در آنها کاملاً بسته شد تا از کاهش رطوبت شلتونک جلوگیری شود و در عین حال، تعادل نسبی نیز در بین دانه‌ها ایجاد شود. لازم به ذکر است که ناخالصی‌های شلتونک قبل از وسیلهٔ دستگاه بوجاری جدا شده بود. برای به‌دست آوردن رطوبت دانه‌ها از استاندارد انجمن مهندسین کشاورزی آمریکا به‌روش خشک‌کردن و کاهش وزن به مدت 24 ساعت درون اجاق در دمای 130°C استفاده شد^(۵). میزان رطوبت اولیهٔ شلتونک $17/7\%$ برپایه

شروع سیال‌سازی نیز تغییر می‌کرد.

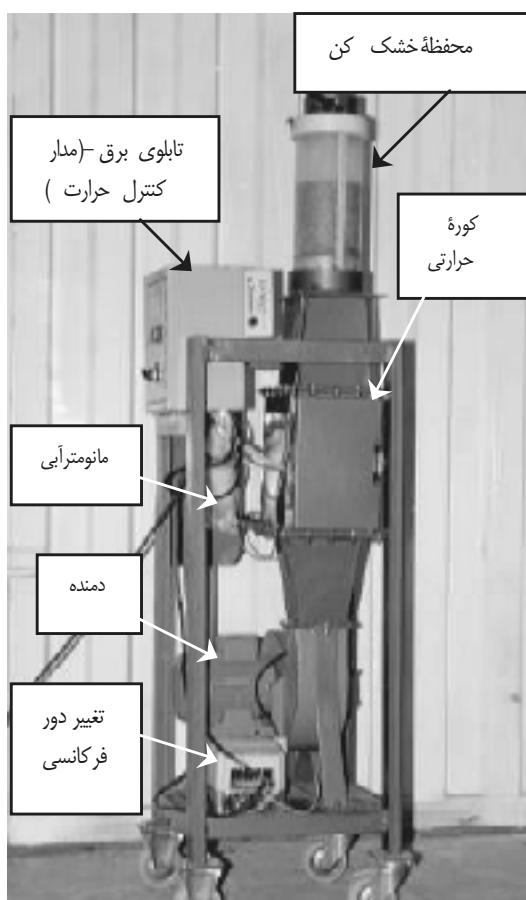
با توجه به مطالب یادشده، نیاز به تحقیق به‌منظور یافتن شیوه‌ای مناسب برای خشک‌کردن سریع شلتونک برنج با کیفیت مناسب، ضروری به‌نظر می‌رسد. با توجه به اهمیت روش خشک‌کردن بسترسیال برای خشک‌کردن سریع محصولات کشاورزی، اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: ۱- بررسی مراحل مختلف سیال‌سازی شلتونک و مطالعهٔ این مراحل برای خشک‌کردن آن ۲- بررسی میزان ترک خوردگی شلتونک در طی خشک‌کردن با دماهای بالاتر از دمای متدالو در شرایط بسترهای ثابت و سیال ۳- بررسی زمان خشک‌کردن شلتونک در دو روش بسترناث بت و سیال

مواد و روش‌ها

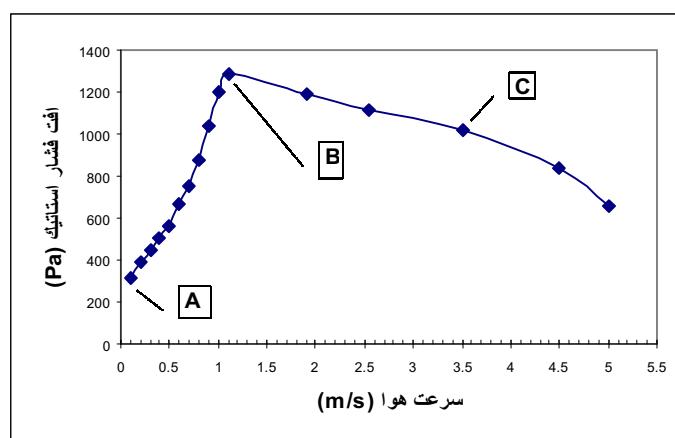
مشخصات خشک‌کن بسترسیال آزمایشگاهی و تجهیزات مورد بهره‌گیری

به‌منظور انجام آزمایش‌ها، از یک دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی بهره‌گیری شد که امیری چایجان و همکاران^(۲) آن را طراحی و ساخته بودند (شکل ۱). محفظهٔ خشک‌کن، استوانه‌ای با ارتفاع 32 cm و قطر $14/6\text{ cm}$ و جنس شفاف پلکسی‌گلاس (Plexy Glass) بود و سیستم حرارتی آن 7 المثت برقی داشت. برای کنترل دمای هوای ورودی به محفظهٔ خشک‌کن از یک ترمومترات دقیق Samwon ساخت کشور کره با دقت 1°C بهره‌گیری شد. ترموموکوپل مورد استفاده از نوع 100 PT و در زیر محفظهٔ خشک‌کن نصب گردیده بود.

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



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



شکل ۲. منحنی مشخصه سیال‌سازی شلتوك خزر در عمق ۰/۲ m با محتوای رطوبتی ۷/۱٪ پایه خشک
(C=۴/۵ m/s , B=۱/۱ m/s , A=۰/۱ m/s)

آزمایش، سه نمونه ۱۰۰ تایی دانه شلتوك به طور تصادفی از توده ۱۰۰ کیلوگرمی انتخاب و پوست خارجی آنها با دقیق زیاد با دست از دانه شلتوك برنج جدا شد. سپس دانه های بدون پوست را در روی شیارها دستگاه ترکبین 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 شلتوك $\frac{3}{8}$ % بود. 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 شلتوك 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 شلتوك 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 شلتوك تا ارتفاع ۲۰ سانتی متر، مراحل زیر را به ترتیب انجام دادیم:

۱. نخست برای تنظیم اولیه دستگاه مطابق با شرایط مورد آزمایش از نمونه غیر اصلی شلتوك برنج بهره گیری شد.
۲. المنت های کوره را روشن کرده تا این که دمای موردنظر حاصل شود. سپس حدود ۴۰ 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 $3/5$ m/s تنظیم کرده و پس از حصول دمای های 40°C ، 60°C و 80°C آزمایش های مذکور با نمونه اصلی شلتوك برنج شروع گردید.

۳. وزن محفظه مواد در ابتدای آزمایش و سپس در فواصل ۵ دقیقه ای ثبت گردید. برای این که فواصل زمانی وزن کردن نمونه ها در روند خشک کردن تاثیر معنی داری نداشته باشد، حداقل زمان لازم برای وزن کردن مواد، یک دقیقه توصیه شده است (۶). در عمل، میانگین زمان وزن کردن محفظه مواد در

خشک به دست آمد.

فرایند خشک کردن در شرایط هوایی با دمای 40°C و رطوبت نسبی $41/7\%$ انجام شد. برای انتخاب سطوح مناسب سرعت هوا، از منحنی مشخصه سیال سازی شلتوك مورد آزمایش در عمق $0/2$ متر بهره گیری شد (شکل ۲). در شرایط بستر ثابت، سرعت جریان هوا برابر $0/1$ m/s بود. این میزان سرعت در خشک کن های 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، افت فشار نیز افزایش قابل توجهی یافته و تا نقطه حداقل سیال سازی B (سرعت $1/1$ m/s) به طور نسبتاً یکنواخت ادامه یافت. پس از این مرحله (با افزایش سرعت هوا)، کاهش قابل توجهی در افت فشار حاصل شد، به طوری که در طی مرحله حباب سازی در داخل بستر مواد، این افت فشار پس از نقطه سیال کامل C (سرعت $3/5$ 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 $a_1=0/1$ m/s (به عنوان سرعت بستر ثابت)، $a_2=1/1$ m/s (به عنوان سرعت حداقل سیال سازی) و $a_3=3/5$ 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 شلتوك استفاده می شود. بنابراین برای بررسی ترک خوردگی شلتوك در دمای های بالاتر از دمای متداول، علاوه بر سطح دمایی C ، دو سطح دمایی $b_1=40^{\circ}\text{C}$ و $b_2=60^{\circ}\text{C}$ 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 وایسته در سه تکرار اندازه گیری و ارزیابی شد. همچنین مقایسه میانگین ها با بهره گیری از آزمون چند دامنه ای دانکن انجام پذیرفت.

برای اندازه گیری میزان ترک اولیه نمونه های شلتوك مورد

حداقل سیال‌سازی (سرعت هوای 1m/s) به ترتیب ۱۷٪، ۱۷٪ و ۱۸٪ به دست آمد. در این شرایط اعمال سرعت مناسب هوای تماس بهتر دانه‌ها با هوای 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 هوای 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 دمایها 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 دمایهای 40°C و 60°C در شرایط سیال کامل (سرعت هوای 3m/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 سریع تر 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 هوای 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 بدن محفظه خشک‌کن، اصطکاک داخلی شدید بین دانه‌ها و کانالیزه شدن هوای ذکر کرد (شکل ۴). عوامل یادشده سبب ایجاد ضربه‌های پی‌درپی به دانه‌ها و افزایش ترک خوردگی

آزمایش‌ها، حدود ۲۵ ثانیه طول کشید. برای وزن کردن نمونه‌ها از ترازوی دیجیتالی با دقت $0.1\text{ g} \pm 0.1\%$ بهره‌گیری شد.

۴. پس از رسیدن رطوبت متوسط شلتوك به حدود ۱۱٪ پایه خشک با مخلوط کردن تمام شلتوك‌های موجود در محفظه مواد، ۳ نمونه 100 g 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 هوای 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 شلتوك به میزان ۷۷٪ مربوط به حالت بستر ثابت (سرعت هوای 0.1 m/s) با دمای هوای 80°C است. کمترین مقدار ترک نیز به میزان ۱۷٪ در سرعت هوای 1 m/s (شرایط حداقل سیال‌سازی) رخ داده است.

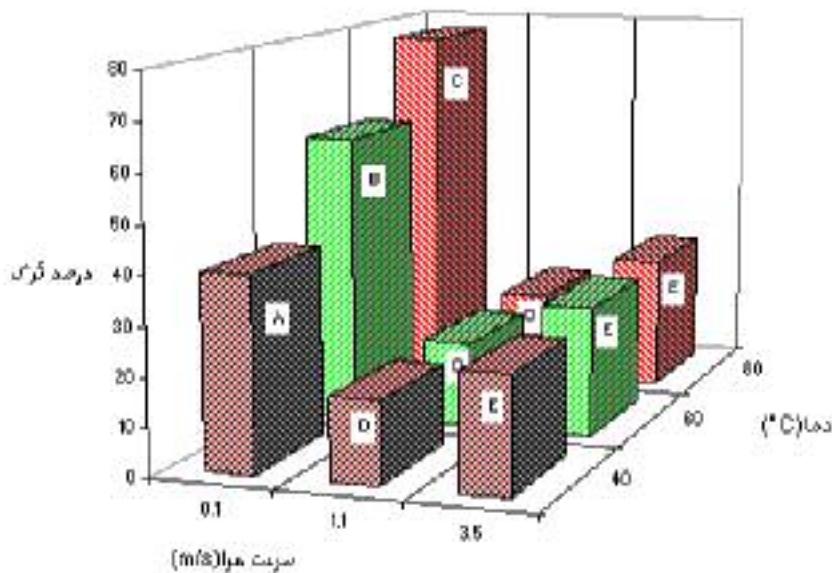
شرایط بستر ثابت (سرعت هوای 0.1 m/s) را می‌توان عامل اصلی ترک دانه‌ها دانست. در این شرایط به دلیل این‌که سرعت هوای دمیده شده پایین است، فاصله زمانی نسبتاً زیادی بین خشک شدن لایه‌های زیرین با لایه‌های میانی و بالایی ایجاد می‌شود. این در حالی است که لایه‌های زیرین به رطوبتی پایین‌تر از مقدار توصیه شده رسیده‌اند و لایه‌های بالایی همچنان دارای رطوبتی بالاتر از مقدار میانگین هستند. این امر سبب افزایش ترک دانه‌ها در لایه‌های زیرین شده است. 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 دمایهای 40°C و 60°C و در بستر ثابت به ترتیب ۴۰٪، ۶۰٪ و ۷۷٪ به دست آمد.

میزان ترک دانه‌ها در دمایهای 40°C و 60°C در شرایط

جدول ۱. تجزیه واریانس ترک دانه‌های شلتوك

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.



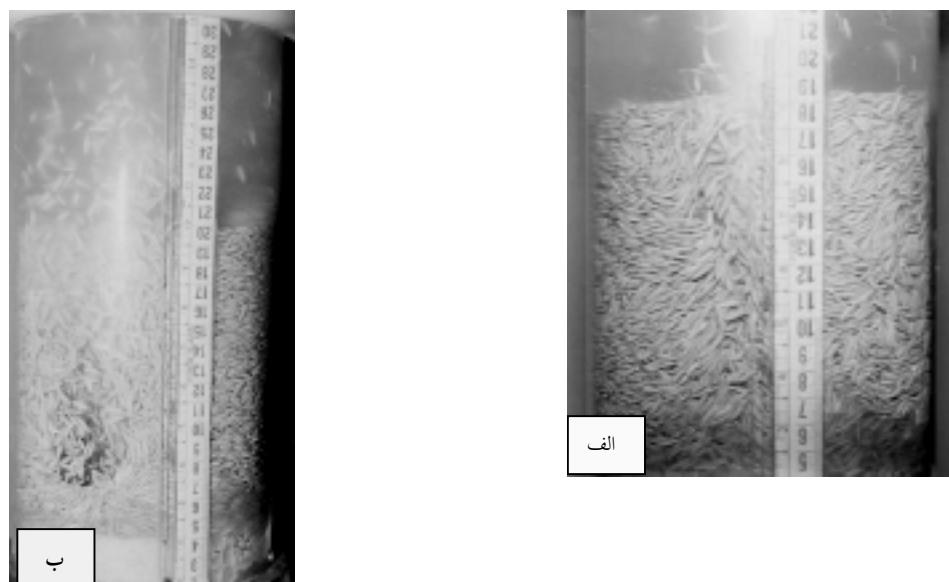
شکل ۳. مقایسه ترک تیمارهای مختلف در سرعت‌ها و دماهای مختلف هوا

بررسی روش خشک کردن سریع شلتوك در دمای بالاتر از ۴۰°C و در شرایط بستر سیال نتایج مشابهی در جهت کاهش ضایعات برجسته نمودند.

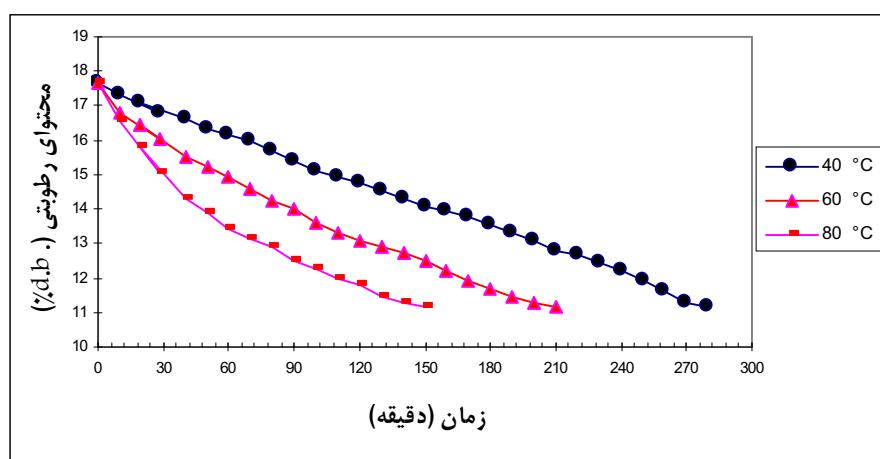
بررسی زمان خشک شدن شلتوك

در این بخش، تغییرات محتوای رطوبتی در طی زمان، برای ۹ حالت آزمایش در قالب سه نمودار ارائه می‌شود تا تفاوت زمان مورد نیاز برای خشک کردن شلتوك 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 شلتوك در معرض دمای بالا قرار می‌گیرند و این امر نیز به دلیل ایجاد تنفس‌های 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 ۶۰ و ۸۰°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 سادرلن و غالی (۱۳) در



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

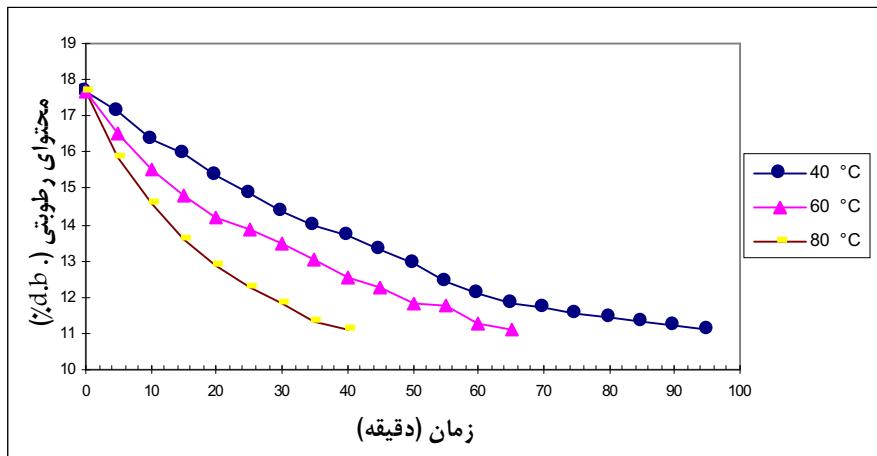


شکل ۵. متحنی محتوای رطوبتی- زمان برای شرایط بستر ثابت شلتوك در دماهای مختلف (سرعت هوای ۰/۱ m/s)

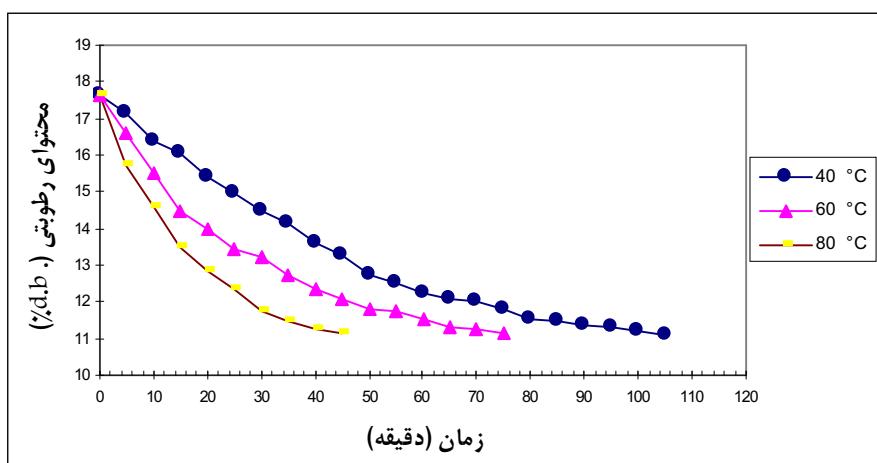
۴۰ به $^{\circ}\text{C}$ مدت زمان خشکشدن حدود ۵۸٪، کاهش یافت. در این شرایط میزان ترک‌خوردگی دانه تغییری نداشته است. در شرایط سیال کامل، مدت زمان خشکشدن مواد در دماهای یادشده، به ترتیب ۴۵، ۷۵ و ۱۰۵ دقیقه بوده است (شکل ۷). این زمان نسبت به شرایط بستر ثابت، بسیار کم ولی نسبت به شرایط حداقل سیال‌سازی، اندکی افزایش را نشان می‌دهد. این امر به دلیل کانالیزه شدن هوا و تماس غیر مؤثر 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 شلتوك در شرایط بستر ثابت و در دماهای ۶۰ و $^{\circ}\text{C}$ به ترتیب ۲۱۰، ۲۸۰ و ۱۵۰ دقیقه مورد نیاز بود تا به رطوبت ۱۱٪ پایه خشک برسد. به طوری که با دو برابر شدن دما از ۴۰ به $^{\circ}\text{C}$ زمان خشکشدن نیز در حدود ۴۳٪ کاهش یافت.

در شرایط حداقل سیال‌سازی، مدت زمان لازم برای خشک‌کردن شلتوك در دماهای ۶۰ و $^{\circ}\text{C}$ 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 سیال‌سازی شلتوك در دماهای مختلف (سرعت هوا ۱/۱ m/s)



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

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

بهترین شرایط برای خشک کردن سریع شلتوك
معیارهای بیان شده در آزمایش‌های خشک کردن سریع شلتوك عبارت از ترک دانه‌ها 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 سیال‌سازی (سرعت هوا ۱/۱ m/s) با دمای ۸۰°C را به عنوان

طبق نتایج آزمایش‌های انجام شده، زمان خشک شدن شلتوك از محتوای رطوبتی ۱۷/۷٪ پایه خشک تا حدود ۱۱٪ پایه خشک برای شرایط سیال کامل نسبت به شرایط بسته 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 سیال‌سازی نسبت به بسته ثابت در دماهای مذکور، به ترتیب حدود ۷۳٪، ۶۹٪ و ۶۶٪ کاهش نشان می‌دهد. بنابراین در تمام دماهای مورد آزمایش شرایط حداقل سیال‌سازی، کاهش زمان بیشتری نسبت به سایر شرایط حاصل شده است. یافته‌های 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 خشک‌کردن شلتوك 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 خشک‌کردن، شرایط حداقل سیال‌سازی (سرعت هوای $1/1\text{m/s}$) با دمای 80°C را می‌توان به عنوان بهترین حالت ممکن در این آزمایش‌ها انتخاب کرد. در نتیجه روش بستر سیال می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی سیستم سنتی خشک‌کردن شلتوك برنج مطرح شود.

بهترین حالت ممکن در این آزمایش‌ها می‌توان انتخاب کرد. زیرا ترک دانه‌ها در شرایط حداقل سیال‌سازی کمترین مقدار و زمان خشک‌کردن نیز در دمای 80°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 به‌طورکلی 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 خشک‌کردن شلتوك برنج باشد.

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

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

- امیری چایجان، ر. ۱۳۷۹. طراحی و ساخت خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی برای محصولات دانه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- امیری چایجان، ر. م. ه. خوش‌تقاضا، ت. توکلی هشجین و م. ح. کیان‌مهر. ۱۳۸۰. طراحی، ساخت و ارزیابی خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی برای محصولات دانه‌ای. نهمین کنفرانس سالانه و پنجمین کنفرانس بین‌المللی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت.
- پیمان، م. ح.، ت. توکلی هشجین و س. مینایی. ۱۳۷۹. تعیین فاصله مناسب بین غلتک‌ها در پوست کن غلتک لاستیکی برای تبدیل سه رقم برنج در استان گیلان. مجله علمی پژوهشی علوم کشاورزی ۲۰: ۴۹-۶۲.
- خوشحال، م. ۱۳۸۱. بررسی و ارزیابی روش کترل متناوب فرایند خشکاندن شلتوك. پایان‌نامه دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- Anonymous, 2000. ASAE Standard. S352.2 DEC92: Moisture measurement-unground grain and seeds. 47th ed., ST. Joseph, MI, USA.
- 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.