مقایسه ترک‌خوردگی دانه و زمان خشک‌شدن شلتوک در شرایط بسترهای ثابت و سیال آزمایشگاهی

رضا امیری چایجان، محمدهادی خوش‌تقاضا[1]

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]

چکیده

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

نتایج نشان داد که در شرایط حداقل سیال‌سازی میزان ترک‌خوردگی دانه نسبت به شرایط بستر ثابت، در دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد، به‌ترتیب حدود ۵۷٪، ۶۸٪ و ۷۵٪ کاهش یافت. در حالی‌که این کاهش در شرایط بستر سیال کامل نسبت به بستر ثابت در دماهای مذکور به‌ترتیب حدود ۴۰٪، ۵۴٪ و ۶۵٪ بود. کمترین زمان خشک‌کردن شلتوک، در روش حداقل سیال‌سازی و بیشترین زمان، در روش بسترثابت طول کشید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که روش حداقل سیال‌سازی دارای کمترین مقدار ترک‌خوردگی و زمان خشک شدن در تمام دماهای مورد آزمایش است.

واژه‌های کلیدی: *شلتوک، بستر ثابت، خشک‌کن بسترسیال، زمان خشک‌شدن، ترک‌خوردگی دانه، حداقل سیال‌سازی و سیال کامل*

مقدمه

برداشت مکانیزهٔ شلتوک، به‌ویژه در شمال ایران افزایش چشم‌گیری یافته است. از این‌رو رطوبت بالای دانه‌ها در فصل برداشت مسئله‌ای جدی است، زیرا کارخانجات برنج‌کوبی موجود در شمال کشور به‌علت قدیمی بودن تکنولوژی خشک‌کردن شلتوک برنج، جوابگوی حجم بالای تولید

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

نخواهند بود. مرحلهٔ خشک‌کردن در چرخهٔ تولید برنج مرحله‌ای بحرانی است. زیرا مهم‌ترین عامل ضایعات برنج در مرحلهٔ پس از برداشت، ناشی از خشک‌کردن نادرست آنهاست. (٤).نتایج آزمایش‌های خوشحال (٤) نشان داد که میزان برنج خرد شده در خشک‌کن‌های سنتی موجود در شمال ایران در دمای متداول ٤٠°C حدود ١٤٪ است. گرایش به بهره‌گیری از دماهای بالاتر به‌منظور خشک‌کردن سریع محصولات کشاورزی به‌وسیلهٔ نوع بهره‌گیری از آنها محدود می‌شود. خشک‌کردن سریع شلتوک با دماهای بالا، به‌وسیلهٔ خشک‌کن‌های متداول، به‌علت ایجاد تنش‌های حرارتی، باعث ترک‌خوردن دانه می‌گردد. بهره‌گیری از روش بسترسیال جهت خشک‌کردن پودرها و مواد شیمیایی از چند دههٔ گذشته در صنایع داروسازی آغاز گردیده ولی حدود یک دهه است که بهره‌گیری از این روش برای خشک‌کردن محصولات کشاورزی به‌ویژه غلات مرسوم شده است.

با افزایش سرعت هوا، اُفت فشار و فاصلهٔ دانه‌ها در بستر مواد افزایش یافته و اُفت 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، اُفت 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، به‌طوری‌که دانه حالت شناور پیدا می‌کند. ولی در مرحلهٔ 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 (١٠) روی شلتوک نیم‌جوش (Parboiled Rough Rice) معلوم شد که با افزایش دما در هر عمقی از بستر سیال، منحنی خشک‌شدن، شیب تندتری پیدا می‌کند که بیانگر افزایش در سرعت خشک‌شدن است. اوکان و اولکو (١٤) طی آزمایشی مشاهده کردند که در روش خشک‌کردن سیال‌کامل در دماهای زیر ٢٠ درجهٔ سانتی‌گراد و بالای ٦٥ درجهٔ سانتی‌گراد به‌ترتیب ١٥ و ٥٤ درصد بر سرعت خشک‌کردن می‌افزاید. آنها نتیجه گرفتند که این افزایش سرعت در خشک‌شدن به‌روش بسترسیال ناشی از افزایش سطح تماس محصولات خشک‌کردنی با هواست.

غالی و تیلور (٨)، در یک فرایند خشک‌کردن بستر ثابت و سیال، اثرهای کیفی دو واریتهٔ گندم تا رسیدن به دو رطوبت نهایی ١٢ درصد و ١٤ درصد (پایهٔ تر) را بررسی کردند. شرایط این آزمایش از طریق بهره‌گیری از هوای گرم در یک خشک‌کن بسترسیال و ثابت با قطر محفظهٔ ٣٤ سانتی‌متر با دماهای ٦٠، ٨٠، ١٠٠ و ١٢٠ درجهٔ سانتی‌گراد در زمان‌های ٥ تا ١٢٠ دقیقه و مقدار جریان هوای ١٤٥ 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. درپژوهش دیگری، سادرلند و غالی (١٣) خشک‌کردن سریع شلتوک تحت شرایط بسترسیال را در مناطق مرطوب بررسی کردند. شلتوک با رطوبت بالا تا محتوای رطوبتی ١٨ درصد (پایهٔ‌تر) خشک شد. بررسی‌های آزمایشگاهی انجام گرفته نشان می‌دهد که می‌توان شلتوک را با اعمال محدودهٔ دمایی ٤٠ تا ٩٠ درجهٔ سانتی‌گراد از رطوبت ٢٤ درصد به ١٨ درصد رساند، بدون این‌که راندمان برنج سالم کاهش یابد. هم‌چنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که به هنگام بهره‌گیری از دمای بالاتر، سرعت کمتر هوا و بسترهای عمیق‌تر دانه، هزینهٔ کمتری صرف می‌شود.

پلی‌استیک (٩) در سال ١٩٩٥، تأثیر محتوای رطوبتی دانه‌های ذرت و سرعت هوا روی شروع حداقل سیال‌سازی در طی خشک‌کردن را بررسی کرد. با اندازه‌گیری جریان هوای مورد نیاز به‌منظور سیال‌سازی لایهٔ ذرت، مشخص شد که نقطهٔ شروع سیال‌سازی، بستگی به ضخامت‌های مختلف ذرت متناسب با رطوبت آن داشت و با تغییر مشخصه‌های فوق، نقطهٔ

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]

شروع سیال‌سازی نیز تغییر می‌کرد.

با توجه به مطالب یادشده، نیاز به تحقیق به‌منظور یافتن شیوه‌ای مناسب برای خشک‌کردن سریع شلتوک 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 شلتوک و مطالعهٔ این مراحل برای خشک‌کردن آن ۲- بررسی میزان ترک‌خوردگی شلتوک در طی خشک‌کردن با دماهای بالاتر از دمای متداول در شرایط بسترهای ثابت و سیال ۳- بررسی زمان خشک‌کردن شلتوک در دو روش بسترثابت و سیال

مواد و روش‌ها

مشخصات خشک‌کن بسترسیال آزمایشگاهی و تجهیزات مورد بهره‌گیری

به‌منظور انجام آزمایش‌ها، از یک دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی بهره‌گیری شد که امیری‌چایجان و همکاران (۲) آن را طراحی و ساخته بودند (شکل ۱). محفظهٔ خشک‌کن، استوانه‌ای با ارتفاع ۳۲ cm و قطر ۱٤/٦ cm و جنس شفاف پلکسی‌گلاس (Plexy Glass) بود و سیستم حرارتی آن ۷ المنت برقی داشت. برای کنترل دمای هوای ورودی به محفظهٔ خشک‌کن از یک ترموستات دقیق Samwon ساخت کشور کره با دقت ۱°C± بهره‌گیری شد. ترموکوپل مورد استفاده از نوع PT 100 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 دماسنج دیجیتالی از نوع Loutron Tm-915، با دقت ۱°C± اندازه‌گیری و ثبت شد. سنسورهای دما از نوع AC TP-02 بود. به‌منظور اندازه‌گیری اُفت فشار استاتیک ناشی از بستر مواد در داخل محفظهٔ خشک‌کن، از یک فشارسنج دیجیتالی مدل Testo، با دقت ۱۰Pa± بهره‌گیری شد. برای تشخیص مرحلهٔ 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 نقطهٔ حداقل سیال‌سازی را به‌طور مشخص برآورد کرده و ضمن تنظیم دستگاه در روی نقطهٔ مورد نظر، آزمایش‌ها را انجام دهیم.

سرعت هوای خروجی توسط یک سرعت‌سنج هوای پره‌ای از نوع Loutron A-M-4202 با دقت ۱٪ m/s± 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.

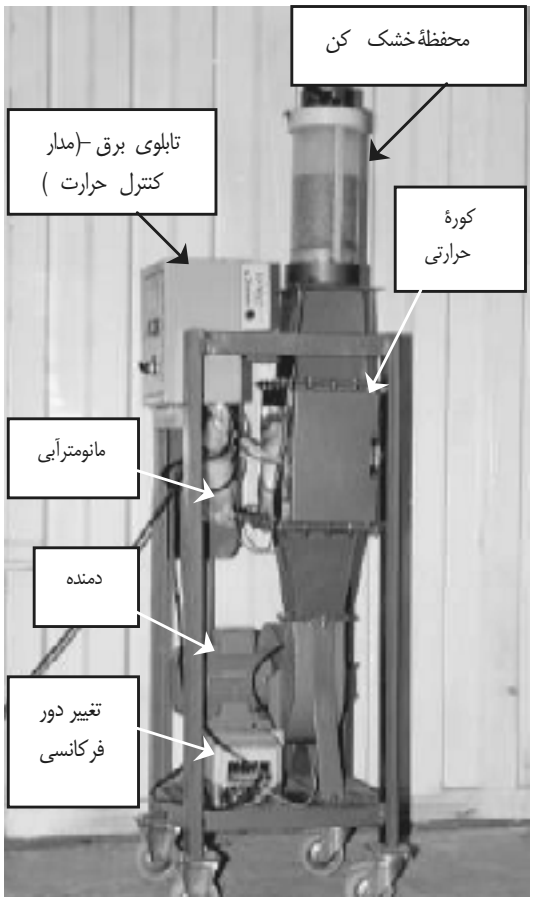
برای اندازه‌گیری درصد ترک شلتوک، از دستگاه ترک‌بین استفاده شد (۳). این دستگاه کوچک، شامل یک لامپ فلوئورسنت است که در زیر یک صفحهٔ مشبک نصب می‌شود. صفحهٔ مشبک دارای شیارهای طولی است که می‌توان دانه‌های برنج را به‌طور مورب روی آن قرار داد و به‌راحتی به‌کمک یک ذره‌بین، وضعیت ترک دانه‌ها را بررسی کرد. به‌علت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

شرایط آزمایش، انتخاب سطوح دما و سرعت هوا

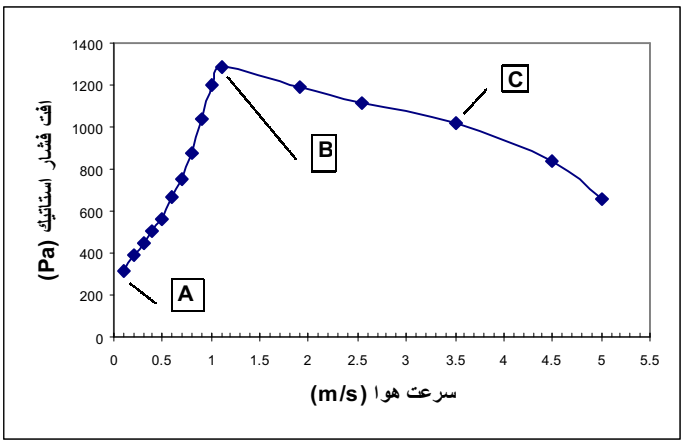
برای انجام آزمایش‌ها از شلتوک خزر که رقمی دیررس و از ارقام پرمحصول و اصلاح‌شده است، استفاده شد. نخست حدود ۱۰۰ کیلوگرم شلتوک به‌طور تصادفی انتخاب و سپس داخل کیسه‌های نایلونی ۲۰ کیلوگرمی قرار داده و در آنها کاملاً بسته شد تا از کاهش رطوبت شلتوک جلوگیری شود و در عین‌حال، تعادل نسبی نیز در بین دانه‌ها ایجاد شود. لازم به ذکر است که ناخالصی‌های شلتوک قبلاً به وسیلهٔ دستگاه بوجاری جدا شده بود. برای به‌دست‌آوردن رطوبت دانه‌ها از استاندارد انجمن مهندسین کشاورزی آمریکا به‌روش خشک‌کردن و کاهش وزن به مدت ۲٤ ساعت درون اجاق در دمای ۱۳۰°C استفاده شد (۵) . میزان رطوبت اولیهٔ شلتوک ۱۷/۷٪ برپایهٔ

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]



شکل۱. خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی ساخته شده
(امیری چایجان و همکاران، ۱۳۸۰)



شکل۲. منحنی مشخصه سیال‌سازی شلتوک خزر در عمق m ۰/۲ با محتوای رطوبتی ۱۷/۷٪ پایهٔ خشک
(C=۳/۵m/s , B=۱/۱ m/s, A=۰/۱ m/s)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]

خشک به‌دست آمد.

فرایند خشک‌کردن در شرایط هوایی با دمای ۹ °C و رطوبت نسبی ۴۱/۷٪ انجام شد. برای انتخاب سطوح مناسب سرعت هوا، از منحنی‌مشخصهٔ سیال‌سازی شلتوک مورد آزمایش در عمق ۰/۲ متر بهره‌گیری شد (شکل ۲). در شرایط بستر ثابت، سرعت جریان هوا برابر ۰/۱m/s به‌دست آمد (نقطهٔ A در شکل ۲). البته حدود این میزان سرعت در خشک‌کن‌های متداول شمال کشور، که به‌صورت بستر ثابت هستند، نیز گزارش شده است (۱ و ٤). با افزایش سرعت هوا، اُفت فشار نیز افزایش قابل‌توجهی یافته و تا نقطهٔ حداقل سیال‌سازی B (سرعت ۱/۱ m/s) به‌طور نسبتاً یکنواخت ادامه یافت. پس از این مرحله (با افزایش سرعت هوا)، کاهش قابل توجهی در اُفت‌فشار حاصل شد، به‌طوری‌که در طی مرحلهٔ حباب‌سازی درداخل بستر مواد، این اُفت فشار پس از نقطهٔ سیال کامل C (سرعت ۳/۵ m/s) با شدت بیشتری کاهش یافت. وضعیت پایدار تا نقطهٔ سیال کامل C ادامه داشت که پس از آن با افزایش سرعت هوا مرحلهٔ انتقال مواد شروع می‌شود. با توجه به توضیحات ارائه شده، فاکتور سرعت هوا در سطوح a_1=۰/۱m/s (به‌عنوان سرعت بستر ثابت)، a_2=۱/۱ m/s (به‌عنوان سرعت حداقل سیال‌سازی) و a_3=۳/۵ m/s (به‌عنوان سرعت سیال کامل) در آزمایش‌ها مدنظر قرار گرفت.

در شرایط متداول بستر ثابت دمای حدود ٤۰°C برای خشک‌کردن شلتوک استفاده می شود. بنابراین برای بررسی ترک‌خوردگی شلتوک در دماهای بالاتر از دمای متداول، علاوه‌بر سطح دمایی b_1=٤۰°C، دو سطح دمایی b_2=٦۰°C و b_3=۸۰°C انتخاب گردید. طرح آزمایشی مورد بهره‌گیری، طرح فاکتوریل ۳×۳ برپایهٔ طرح کاملاً تصادفی انتخاب شد. در این آزمایش‌ها دما و سرعت هوا (نوع بستر مواد) به‌عنوان متغیر مستقل و ترک دانه‌ها به‌عنوان متغیر وابسته در سه تکرار اندازه‌گیری و ارزیابی شد. هم‌چنین مقایسهٔ میانگین‌ها با بهره‌گیری از آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام پذیرفت.

برای اندازه‌گیری میزان ترک اولیه نمونه‌های شلتوک مورد آزمایش، سه نمونهٔ ۱۰۰تایی دانه شلتوک به‌طور تصادفی از تودهٔ ۱۰۰ کیلوگرمی انتخاب و پوست خارجی آنها با دقت زیاد با دست از دانهٔ شلتوک برنج جدا شد. سپس دانه‌های بدون پوست را در روی شیارها دستگاه ترک‌بین قرار دادیم و دانه‌های ترک‌دار (دانه‌های با ترک عرضی کامل) را شمرده و به‌صورت درصد، نسبت به کل دانه‌ها در نظر گرفتیم. درصد ترک نمونهٔ اولیهٔ شلتوک ۳/۸٪ به‌دست آمد. این عدد، ضایعات ناشی از عملیات برداشت، خرمن‌کوبی، حمل ونقل و یا احیاناً تنش‌های رطوبتی است که از مقادیر آزمایشی کم شد.

روش انجام آزمایش‌های خشک‌کردن شلتوک در شرایط بسترهای ثابت و سیال

در تمام مراحل انجام آزمایش‌ها از یک روش مشخص در تنظیم دستگاه و نمونه‌گیری پیروی شد. برای ریختن شلتوک در داخل محفظه خشک‌کن ازیک قیف بزرگ که روی محفظه قرار داده شده بود، بهره‌گیری شد تا شرایط یکسانی در حالت‌های مختلف بر بستر مواد برقرار باشد. پس از رسیدن شلتوک تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، مراحل زیر را به‌ترتیب انجام دادیم:

۱. نخست برای تنظیم اولیهٔ دستگاه مطابق با شرایط مورد آزمایش از نمونهٔ غیراصلی شلتوک برنج بهره‌گیری شد.

۲. المنت‌های کوره را روشن کرده تا این‌که دمای موردنظر حاصل شود. سپس حدود ٤۰ دقیقه دستگاه را روشن گذاشته تا این‌که دستگاه به شرایط تعادل حرارتی برسد. سپس سیستم را به‌ترتیب روی سرعت‌های ۰/۱، ۱/۱ و ۳/۵ m/s تنظیم کرده و پس از حصول دماهای ٤۰، ٦۰ و ۸۰°C، آزمایش‌های مذکور با نمونهٔ اصلی شلتوک برنج شروع گردید.

۳. وزن محفظهٔ مواد در ابتدای آزمایش و سپس در فواصل ۵ دقیقه‌ای ثبت گردید. برای این‌که فواصل زمانی وزن‌کردن نمونه‌ها در روند خشک‌کردن تاثیر معنی‌داری نداشته باشد، حداکثر زمان لازم برای وزن کردن مواد، یک دقیقه توصیه شده است (٦). در عمل، میانگین زمان وزن‌کردن محفظه مواد در

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]

آزمایش‌ها، حدود ۲۵ ثانیه طول کشید. برای وزن کردن نمونه‌ها ازترازوی دیجیتالی با دقت g ۰/۱± بهره‌گیری شد.

٤. پس از رسیدن رطوبت متوسط شلتوک به حدود ۱۱٪ پایهٔ خشک با مخلوط‌کردن تمام شلتوک‌های موجود در محفظهٔ مواد، ۳ نمونهٔ ۱۰۰گرمی را برای آزمایش‌های ترک جدا کردیم.

نتایج و بحث

تأثیر روش‌های خشک‌کردن بر میزان ترک برنج

نتایج آماری نشان داد که اثرهای مستقل و متقابل دما و سرعت هوا برمیزان ترک برنج معنی‌دار بود (جدول ۱). مقایسهٔ 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 ۸۰°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 ۰/۱m/s) را می‌توان عامل اصلی ترک دانه‌ها دانست. در این شرایط به‌دلیل این‌که سرعت هوای دمیده شده پایین است، فاصلهٔ زمانی نسبتاً زیادی بین خشک‌شدن لایه‌های زیرین با لایه‌های میانی و بالایی ایجاد می‌شود. این در حالی است که لایه‌های زیرین به رطوبتی پایین‌تر از مقدار توصیه‌شده 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 مقایسهٔ میانگین‌ها، از نظر آماری نیز این تفاوت قابل مشاهده است (شکل۳). بیشترین ترک در دمای ۸۰°C به علت تنش‌های حرارتی زیاد رخ می‌دهد. میزان ترک دانه‌ها در دماهای ٤۰، ٦۰ و ۸۰°C و در بستر ثابت به‌ترتیب ٤۰٪، ٦۰٪ و ۷۷٪ به‌دست آمد.

میزان ترک دانه‌ها در دماهای ٤۰، ٦۰ و ۸۰°C و در شرایط حداقل سیال‌سازی (سرعت هوای ۱/۱m/s) به‌ترتیب ۱۷٪، ۱۷/۷٪ و ۱۸/٦٪ به‌دست 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 خشک‌کردن را کاهش می‌دهد، بدون این که تأثیر منفی بر ترک خوردگی دانه بگذارد. هم‌چنین می‌توان دریافت که درشرایط 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 خشک‌کردن سریع محصول از بیشترین دما (۸۰°C) بهره‌گیری کرد، بدون اینکه کیفیت محصول کاهش یابد.

میزان ترک دانه‌ها در دماهای ٤۰، ٦۰ و ۸۰°C و در شرایط سیال کامل (سرعت هوای ۳/۵m/s) به‌ترتیب ۲٤٪، ۲۷٪ و ۲۸٪ به‌دست 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. به‌طوری که تغییر دمای ۲۰°C تأثیر چندانی بر ترک‌خوردگی 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 محفظهٔ خشک‌کن، اصطکاک داخلی شدید بین دانه‌ها و کانالیزه شدن هوا ذکر کرد (شکل ٤). عوامل یادشده سبب ایجاد ضربه‌های پی‌درپی به دانه‌ها و افزایش ترک خوردگی

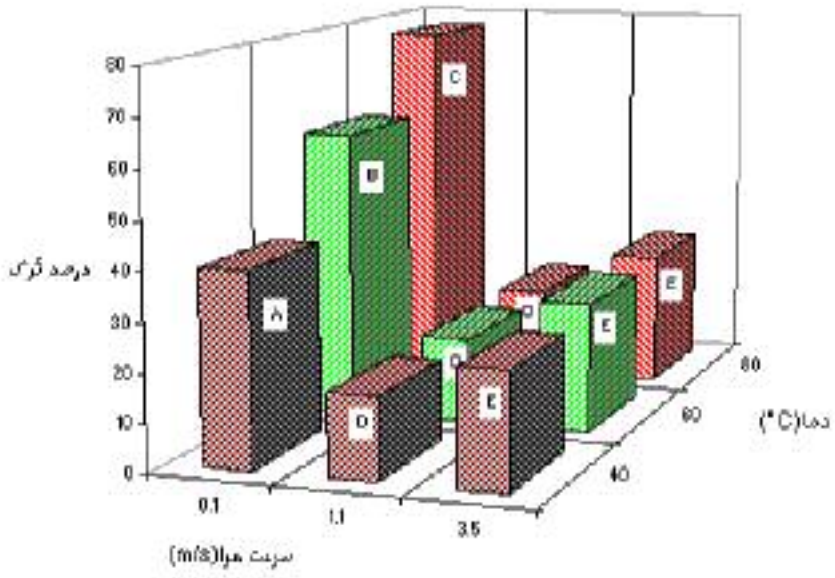
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]

جدول۱. تجزیه واریانس ترک دانه‌های شلتوک

منابع تغییرات	درجهٔ آزادی (DF)	میانگین مربعات (MS)
سرعت هوا	۲	۰/۳۸٤**
دما	۲	۰/٦۸٥**
سرعت هوا×دما	٤	۰/۲۹۷**
خطا	۱۸	۰/۰٤۲
کل	۲٦	

** در سطح ۱٪ معنی‌دار است.



شکل۳. مقایسه ترک تیمارهای مختلف در سرعت‌ها و دماهای مختلف هوا

می‌شود. از طرف دیگر در شرایط سیال کامل به‌علت ایجاد کانال‌های هوا در داخل بستر، دانه‌های شلتوک در معرض دمای بالا قرار می‌گیرند و این امر نیز به‌دلیل 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 ٤۰، ٦۰ و ۸۰°C توانسته میزان ترک‌خوردگی را به‌ترتیب معادل٤۰٪، ٥٤٪ و ٦٥٪ کاهش دهد. در شرایط حداقل سیال‌سازی نیز نسبت به بستر ثابت و در دماهای مذکور، این کاهش معادل ٥۷٪، ٦۸٪ و ۷٥٪ بود.

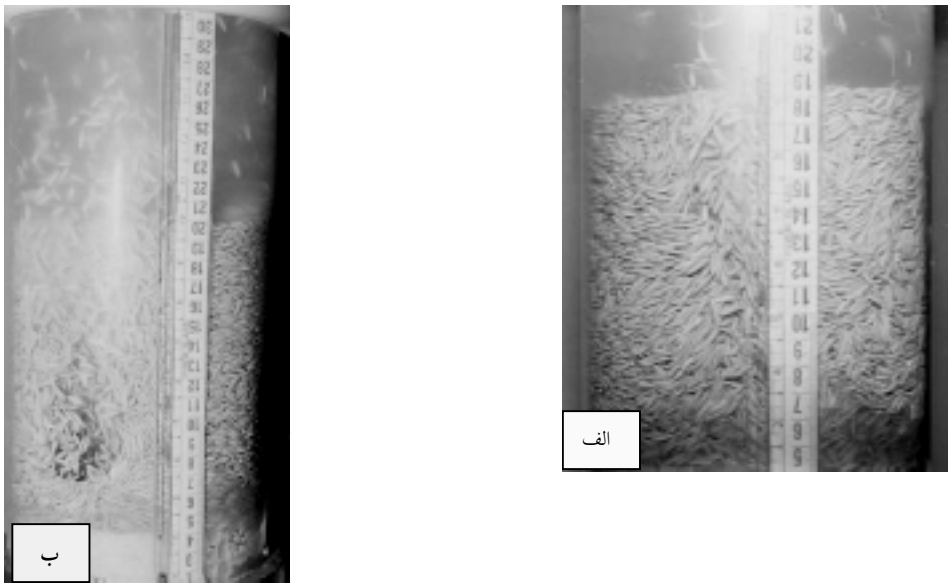
این نتایج مشابه یافته‌های پژوهش‌های دی‌متیا و همکاران (۷) در مورد گندم است. هم‌چنین سادرلند و غالی (۱۳) در بررسی روش خشک‌کردن سریع شلتوک در دمای بالاتر از ٤۰°C و در شرایط بستر سیال نتایج مشابهی در جهت کاهش ضایعات برنج مشاهده نمودند.

بررسی زمان خشک‌شدن شلتوک

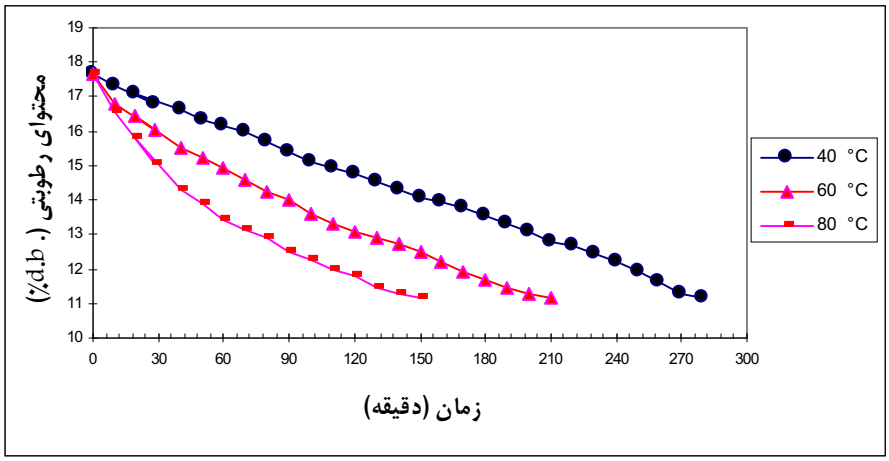
در این بخش، تغییرات محتوای رطوبتی در طی زمان، برای ۹ حالت آزمایش در قالب سه نمودار ارائه می‌شود تا تفاوت زمان مورد نیاز برای خشک‌کردن شلتوک با محتوای ۱۷/۷٪ پایهٔ خشک به‌وضوح مشخص شود. منحنی‌های مربوط به محتوای رطوبتی- زمان در شکل‌های ٥ تا ۷ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش دما در تمام

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]



شکل٤. مراحل سیال‌سازی شلتوک (الف- حداقل سیال‌سازی ب- سیال کامل)



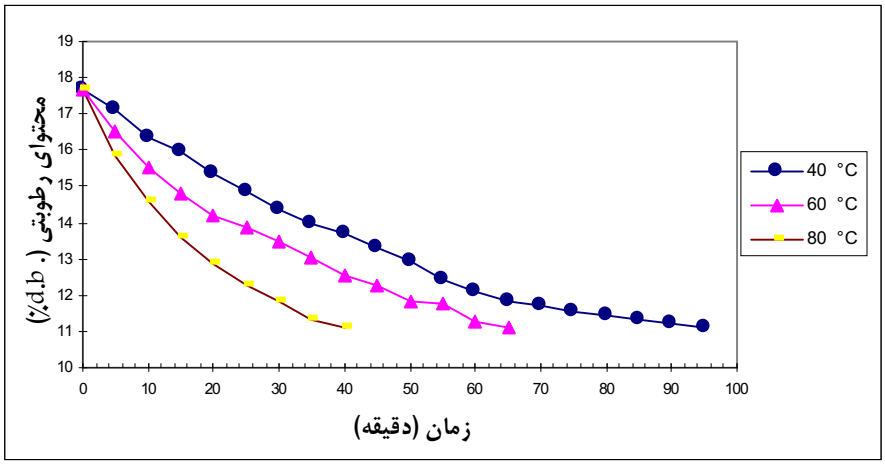
شکل۵. منحنی محتوای رطوبتی- زمان برای شرایط بستر ثابت شلتوک در دماهای مختلف (سرعت هوا ۰/۱ m/s)

شرایط، سرعت خشک‌شدن افزایش یافته است. به‌منظور خشک‌شدن شلتوک در شرایط بستر ثابت و در دماهای ٤٠، ٦٠ و ٨٠°C به‌ترتیب ٢٨٠، ٢١٠ و ١٥٠ دقیقه مورد نیاز بود تا به رطوبت ١١٪ پایهٔ خشک برسد. به‌طوری که با دو برابر شدن دما از ٤٠ به ٨٠°C، زمان خشک‌شدن نیز در حدود ٤٣٪ کاهش یافت.

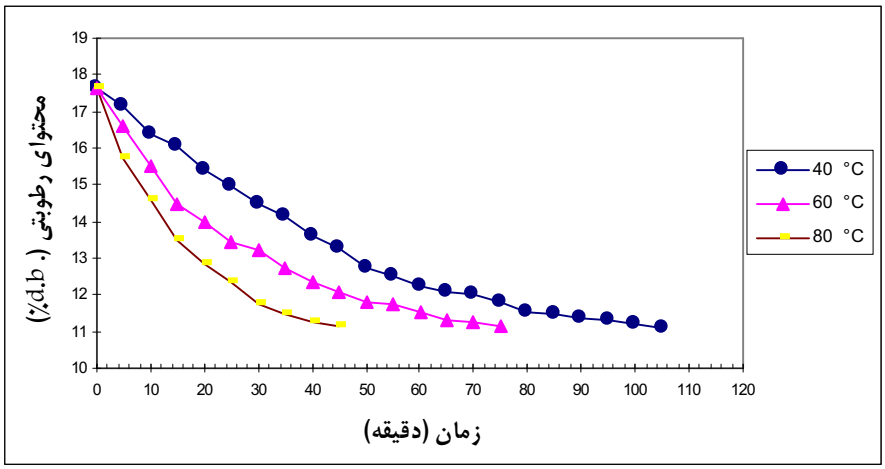
در شرایط حداقل سیال‌سازی، مدت زمان لازم برای خشک‌کردن شلتوک در دماهای ٤٠، ٦٠ و ٨٠°C به‌ترتیب ٩٥، ٦٥ و ٤٠ دقیقه بود (شکل ٦). در این شرایط با افزایش دما از ٤٠ به ٨٠°C، مدت زمان خشک‌شدن حدود ٥٨٪ کاهش یافت. در این شرایط میزان ترک‌خوردگی دانه تغییری نداشته است. در شرایط سیال کامل، مدت زمان خشک‌شدن مواد در دماهای یادشده، به‌ترتیب ١٠٥، ٧٥ و ٤٥ دقیقه بوده است (شکل٧). 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.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]



شکل٦. منحنی محتوای رطوبتی- زمان برای شرایط حداقل سیال‌سازی شلتوک در دماهای مختلف (سرعت هوا ١/١ m/s)



شکل٧. منحنی محتوای رطوبتی- زمان برای شرایط سیال کامل شلتوک در دماهای مختلف (سرعت هوا ٣/٥ m/s)

طبق نتایج آزمایش‌های انجام شده، زمان خشک شدن شلتوک از محتوای رطوبتی ١٧/٧٪ پایهٔ خشک تا حدود ١١٪ پایهٔ خشک برای شرایط سیال کامل نسبت به شرایط بستر ثابت در دماهای ٤٠، ٦٠ و ٨٠ درجهٔ سانتی‌گراد، به‌ترتیب حدود ٧٠٪، ٦٤٪ و ٦٢/٥٪ کاهش یافت و این کاهش زمان برای شرایط حداقل سیال‌سازی نسبت به بستر ثابت دردماهای مذکور، به‌ترتیب حدود ٧٣٪، ٦٩٪ و ٦٦٪ 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 سرعت خشک‌شدن در شرایط سیال را تایید می‌کند (١٠، ١٣، ١١و ٧). ضمن این که شرایط بهینهٔ دیگری را در وضعیت حداقل سیال سازی معرفی می‌کند.

بهترین شرایط برای خشک‌کردن سریع شلتوک

معیارهای بیان‌شده در آزمایش‌های خشک‌کردن سریع شلتوک عبارت از ترک دانه‌ها و زمان خشک‌شدن بود که در سرعت هوای مختلف و دماهای بالاتر از دمای متداول خشک‌کردن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به موارد فوق، شرایط حداقل سیال‌سازی (سرعت هوای ١/١m/s) با دمای ٨٠°C را به‌عنوان

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]

بهترین حالت ممکن در این آزمایش‌ها می‌توان انتخاب کرد. زیرا ترک دانه‌ها در شرایط حداقل سیال‌سازی کمترین مقدار و زمان خشک‌کردن 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 به‌طورکلی خواص فیزیکی دانه نیزتأثیر 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 شلتوک برنج باشد.

نتیجه‌گیری

۱. به‌علت تنش‌های حرارتی، میزان ترک دانه‌ها در شرایط بستر ثابت، با افزایش دما، افزایش چشم‌گیری را نشان داد. در صورتی‌که در شرایط حداقل سیال سازی و سیال کامل، تفاوت چندانی درترک دانه‌ها دردماهای اعمال شده، دیده نشد. از طرف دیگر، به‌علت توزیع یکنواخت حرارت و حصول حرکت آرام بستر مواد، میزان ترک دانه‌ها در شرایط حداقل سیال‌سازی کمتر از حالت سیال کامل بود.

۲. مدت زمان مورد نیاز برای خشک‌کردن شلتوک از محتوای رطوبتی ۱۷/۷٪ تا محتوای رطوبتی ۱۱٪ بر پایهٔ 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 سیال سازی (سرعت هوای 1/1m/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 خشک‌کردن شلتوک برنج مطرح شود.

سپاسگزاری

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

منابع مورد استفاده

۱. امیری چایجان، ر. ۱۳۷۹. طراحی و ساخت خشک‌کن بسترسیال آزمایشگاهی برای محصولات دانه‌ای. پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲. امیری چایجان، ر.، م. ه. خوش‌تقاضا، ت. توکلی هشجین 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 هشجین و س. مینایی. ۱۳۷۹. تعیین فاصلهٔ مناسب بین غلتک‌ها در پوست‌کن غلتک لاستیکی برای تبدیل سه رقم برنج در استان گیلان. مجلهٔ علمی پژوهشی علوم کشاورزی ۲۰: ۴۹-۶۲.

٤. خوشحال، م. ۱۳۸۱. بررسی و ارزیابی روش کنترل متناوب فرایند خشکاندن شلتوک. پایان‌نامه دکتری، دانشکدهٔ 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.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]

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.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.4.19.9]