بررسی ارتباط یکنواختی خشک بررسی ارتباط یکنواختی خشک‌شدن و تلفات شلتوک در شرایط بسترهای ثابت، حداقل سیال‌سازی وسیال کامل غیرپیوستهm

رضا امیری چایجان[۱]- محمد هادی خوش تقاضا[۲]

چکیده

در این تحقیق روشهای خشک‌کردن بستر سیال و ثابت از دیدگاه یکنواختی خشک‌شدن و میزان ترک دانه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای انجام آزمایشات خشک‌کردن نمونه‌ها از یک دستگاه خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی استفاده شد. آزمایشات مذکور شامل موارد زیر بود: ۱- بررسی رطوبت لایه‌های شلتوک پس از خشک‌شدن آن در شرایط بسترهای ثابت، سیال و حداقل سیال‌سازی ۲- بررسی تلفات (ترک‌خوردگی) دانه‌های شلتوک پس از خشک‌شدن آن در دمای ^oc ۸۰ و در شرایط بسترهای ثابت، سیال و حداقل سیال‌سازی. برای آزمایشات تلفات شلتوک نیز دماهای ۴۰، ۶۰ و ^oc ۸۰ در شرایط مذکور اعمال شد. نتایج حاصله نشان داد که اختلاف رطوبت بین عمق صفر و m ۰/۲ محفظهٔ خشک‌کن پس از اتمام خشک‌شدن در شرایط حداقل سیال‌سازی نسبت به شرایط بستر ثابت حدود ۹۷٪ کم شده است. در حالیکه این کاهش اختلاف در شرایط سیال کامل نسبت به شرایط بستر ثابت حدود ۹۹٪ بوده است. در شرایط حداقل سیال‌سازی میزان ترک خوردگی دانه نسبت به شرایط بستر ثابت در دماهای ۴۰، ۶۰ و ^oc ۸۰ بترتیب حدود ۵۷٪، ۶۸٪ و ۷۵٪ کاهش یافت و این کاهش در شرایط بستر سیال کامل نسبت به بستر ثابت در دماهای مذکور به ترتیب ۴۰٪، ۵۴٪ و ۶۵٪ بود. نتایج بیانگر این مطلب بود که در روش حداقل سیال‌سازی کمترین مقدار ترک خوردگی حاصل شد و درحالیکه بیشترین یکنواختی خشک‌شدن در شرایط بستر سیال کامل بدست آمد.

۱- دانشجوی دکتری مکانیک ماشینهای کشاورزی
۲- استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

واژه‌های کلیدی: یکنواختی خشک‌شدن، تلفات خشک‌شدن، خشک‌کن بستر سیال

مقدمه

حجم زیاد محصول برداشت‌شده در فصل برداشت برنج سبب ایجاد تقاضای زیاد برای انجام عملیات پوست‌کنی و سفیدکردن این محصول از سوی کشاورزان در مدت زمان اندکی به طور همزمان می‌شود. برای جوابگویی به این حجم زیاد کار، تسریع در خشک‌کردن شلتوک قبل از پوست‌کنی و سفیدکردن، که معمولا بیشترین زمان عملیات پس از برداشت برنج را به خود اختصاص می‌دهد، ضروری است. به طوریکه انجام این کار کمترین تلفات ممکن را در برداشته باشد. در حال حاضر کارخانجات برنجکوبی در شمال کشور از فناوری قدیمی خشک‌کنهای صندوقی خوابیده بستر ثابت برای خشک‌کردن شلتوک استفاده می‌کنند که ارتفاع محصول در آنها تا $۰/۶m$ هم می‌رسد. با توجه به این شرایط، اختلاف رطوبت نسبتا زیادی در لایه‌های شلتوک ایجاد می‌شود که میزان ضایعات برنج را در مراحل پوست کنی و سفیدکردن تشدید می‌کند. دمای مورد استفاده برای خشک‌کردن شلتوک در این خشک‌کنها باید حدود $۴۰^{o}c$ باشد[۲]. از طرفی خشک‌کردن سریع شلتوک با دماهای بالاتر از دمای مذکور به وسیلهٔ این خشک‌کنها، به علت ایجاد تنش‌های حرارتی، ترک‌خوردگی دانه‌ها را درپی خواهد داشت. خشک‌کردن به روش بستر سیال برای خشک‌کردن مواد در صنایع شیمیایی دارای پیشینهٔ طولانی است. اما سابقهٔ استفاده از این روش برای خشک‌کردن محصولات دانه‌ای کشاورزی به چند سال اخیر برمی‌گردد.

با افزایش سرعت هوا، افت فشار و فاصلهٔ بین دانه‌ها در بستر مواد افزایش یافته و افت فشار استاتیک در یک نقطه بیشترین مقدار خواهد بود. این نقطه را حداقل سیال‌سازی[1] می‌گویند. در این شرایط نیروی

[1] Minimun Fluidization

وزن با نیروی مقاومت[1] سیال برابر می‌شود، به طوریکه دانه‌ها حالت شناور پیدا می‌کنند. با افزایش سرعت هوا، افت فشار استاتیک مقداری کاهش می‌یابد و این روند تا انتقال کامل مواد ادامه می‌یابد. این مرحله را سیال کامل[2] می‌گویند. در این مرحله، افزایش سر عت هوا باعث ایجاد کانالهای هوا در بستر مواد و ایجاد جریان فواره‌ای می‌گردد که با افزایش بیشتر سرعت هوا، انتقال مواد صورت می‌گیرد[۸]. در تحقیقی که توسط سوپونروناریت و همکاران[۹] به منظور ارزیابی کیفیت محصول پس از خشک‌کردن ذرت به وسیلهٔ یک خشک‌کن بستر سیال انجام شد، محصول با رطوبت ۱۹ الی ۴۰٪ پایهٔ خشک مورد استفاده قرار گرفت که هوای ورودی با دماهای بین ۱۳۰ تا ۱۷۵ ^oc به آن اعمال شد. عمق بستر بین ۱۷ تا ۲۲ cm و سرعت هوا ۲/۷ m/s بود. زمان باقی ماندن دانه‌ها در محفظه بین ۳ تا ۷ دقیقه بود. در طی آزمایشات مذکور، کیفیت دانه‌ها مانند شکستگی, ترک ناشی از تنش‌های حرارتی و رنگ، تقریبا ثابت ماند. بجز در حالتی که رطوبت از ۲۱/۱٪ تا ۱۴/۲٪ پایهٔ خشک در دمای ۱۷۰ ^oc دمای ورودی کاهش پیدا می‌کرد. در حالت اخیر ترک‌های ناشی از تنش تا ۳۲٪ نسبت به حالت مبنا با همان جرم افزایش می‌یافت.

غالی و تیلور [۷] در یک فرایند خشک‌کردن بستر ثابت و سیال، اثرات کیفی دو واریتهٔ گندم تا رسیدن آنها به دو رطوبت نهایی ۱۲٪ و ۱۴٪ پایهٔ تر را بررسی کردند. شرایط این آزمایش از طریق استفاده از هوای گرم در یک خشک‌کن بستر سیال و ثابت با قطر محفظهٔ ۳۴cm با دماهای ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰^oc در زمانهای ۵ تا ۱۲۰ دقیقه و دبی هوای ۱۴۵ Lit/s اعمال شد. بستر سیال در مقایسه با بستر ثابت نقش بسزایی در کاهش ضایعات و بهبود کیفی گندم از نظر جوانه‌زنی و خصوصیات پخت داشت. در تحقیق دیگری، سادرلند و غالی[۱۰] خشک‌کردن سریع شلتوک را در شرایط بستر سیال در مناطق مرطوب بررسی کردند. شلتوک با رطوبت بالا تا رطوبت ۱۸٪ خشک می‌شد. بررسی‌های آزمایشگاهی انجام گرفته نشان می‌دهد که می‌توان شلتوک را با اعمال محدودهٔ دمایی ۴۰ تا ۹۰ ^oc از رطوبت ۲۴٪ به ۱۸٪ رساند بدون اینکه راندمان برنج سالم کاهش یابد. با توجه به مطالب فوق، بررسی خشک‌کردن شلتوک در حالت بستر سیال و یافتن حالت‌های مناسب‌تر خشک‌کردن با توجه به سرعت هوا و دمای اعمال شده ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اهمیت روش بستر سیال برای خشک‌کردن محصولات دانه‌ای، اهداف این تحقیق عبارتند از: ۱- بررسی یکنواختی خشک‌شدن شلتوک با توجه به اختلاف رطوبتی لایه‌های مختلف پس از خشک‌شدن آن در شرایط بسترهای ثابت، حداقل سیال‌سازی و سیال کامل ۲- بررسی میزان ترک‌خوردگی شلتوک در طی خشک‌شدن با دماهای اعمال شده در شرایط بسترهای ثابت، حداقل سیال‌سازی و سیال کامل ۳- بررسی روند تغییرات رطوبت و میزان ترک‌خوردگی دانه با توجه به شرایط اعمال شده و تاثیر این دو عامل بر یکدیگر

---

[1] Drag Forces

[2] Full Fluidization

مواد و روشها

ابزار اندازه‌گیری و دستگاههای مورد استفاده

آزمایشهای مربوط به خشک‌کردن نمونه‌های شلتوک به وسیلهٔ یک دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی انجام گرفت که توسط امیری چایجان و همکاران[۱] طراحی و ساخته شده بود (شکل۱). محفظهٔ خشک‌کن استوانه‌ای به ارتفاع cm ۳۲و قطر cm ۱۴/۶ و از جنس پلکسی‌گلاس[1] شفاف بود. سیستم حرارتی آن شامل ۷ المنت برقی بود. برای کنترل دمای هوای ورودی به محفظهٔ خشک‌کن از یک ترموستات دقیق مدل $Samwon$ ساخت کشور کره و با دقت ^oc ۱± استفاده شد. ترموکوپل مورد استفاده از نوع $\mathcal{L}utron\ \mathcal{T}m\text{-}915$ با دقت ^oc ۱± اندازه‌گیری و ثبت شد. سنسورهای دما از نوع $\mathcal{AC}$ $\mathcal{TP}\text{-}02$ بود. به منظور اندازه‌گیری افت فشار استاتیک ناشی از بستر مواد داخل محفظهٔ خشک‌کن، از یک فشارسنج دیجیتالی مدل $Testo$ با دقت Pa ۱۰± استفاده شد. برای تشخیص مرحلهٔ شروع سیال‌سازی در حین انجام آزمایشات از یک مانومتر آبی $\mathcal{U}$ شکل استفاده گردید که دارای قدرت تشخیص m ۰/۰۰۱ بود. سرعت هوای خروجی توسط یک سرعت‌سنج هوای پره‌ای از نوع $\mathcal{L}utron\ \mathcal{A}\text{-}\mathcal{M}\text{-}4202$ با دقت m/s ۰/۱± اندازه‌گیری شد. به منظور تغییر دور موتور سه‌فاز مورد استفاده برای تامین سرعت هوای مورد نیاز از یک دستگاه تغییر دور فرکانسی $\mathcal{T}opvert\ 7200\ \mathcal{L}\text{-}2.2$ استفاده گردید. برای اندازه‌گیری درصد ترک شلتوک، از دستگاه ترک‌بین استفاده شد[۳]. این دستگاه کوچک شامل یک لامپ فلؤرسنت است که در زیر یک صفحهٔ مشبک نصب می‌شود.

روش انتخاب سطوح متغیرها در آزمایشهای فاکتوریل

برای انجام آزمایشات، از شلتوک خزر استفاده شد که رقمی دیررس بوده و از ارقام پرمحصول و اصلاح شده می‌باشد. ابتدا حدود ۱۰۰ کیلوگرم شلتوک را به طور تصادفی انتخاب و سپس داخل کیسه‌های نایلونی ۲۰ کیلوگرمی قرار داده شد و درِ آنها کاملا بسته شد تا از کاهش رطوبت شلتوک جلوگیری شود و در عین حال تعادل نسبی نیز بین دانه‌ها ایجاد شود. لازم به ذکر است که ناخالصی‌های شلتوک قبلا توسط دستگاه بوجاری جدا شده بود. برای تعیین رطوبت دانه‌ها از استاندارد انجمن مهندسین کشاورزی آمریکا به روش خشک‌کردن و کاهش وزن به مدت ۲۴ ساعت درون اجاق با دمای ^oc ۱۳۰ استفاده شد[۴]. میزان رطوبت اولیهٔ شلتوک ۱۷/۷٪ بر پایهٔ خشک بدست آمد. فرایند خشک‌کردن شلتوک در شرایط محیطی ^oc ۹ و رطوبت نسبی ۴۱/۷٪ انجام شد. برای انتخاب سطوح مناسب سرعت هوا، از

[1] PlexiGlass

منحنی مشخصهٔ سیال‌سازی شلتوک برای عمق m ۰/۲ استفاده شد (شکل۲). در شرایط بستر ثابت، سرعت جریان هوا برابر m/s ۰/۱ بدست آمد (نقطهٔ A در شکل ۲). البته حدود همین میزان سرعت هوا در خشک‌کنهای شمال کشور، که به صورت بستر ثابت هستند نیز گزارش شده است[۱و۲]. با افزایش سرعت هوا، افت فشار نیز افزایش قابل توجهی یافته و تا نقطهٔ حداقل سیال‌سازی (سرعت m/s ۱/۱) بطور نسبتا یکنواخت ادامه یافت. پس از این مرحله (با افزایش سرعت هوا)، کاهش قابل توجهی در افت فشار حاصل شد، بطوریکه در طی مرحلهٔ حباب‌سازی در داخل بستر مواد، این افت فشار پس از نقطهٔ سیال کامل C (سرعت m/s ۳/۵) 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 m/s a_1=۰/۱ (به عنوان سرعت هوا در شرایط بستر ثابت)، a_2=۱/۱ m/s (به عنوان سرعت هوا در شرایط حداقل سیال‌سازی)، و m/s a_3=۳/۵ (به عنوان سرعت سیال کامل در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت. آزمایشات یکنواختی خشک‌شدن در دمای ^oc ۸۰ و در سه شراسط بسترثابت، حداقل سیال‌سازی و سیال کامل انجام شد. پس از اتمام خشک شدن شلتوک از هر یک از عمقهای صفر، m ۰/۱ و m ۰/۲ سه نمونهٔ شلتوک برای بررسی رطوبت لایه‌ها جمع آوری شد. در این آزمایشات عمق و سرعت هوا به عنوان متغیر مستقل و رطوبت دانه‌ها به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد و آزمایشات در سه تکرار صورت گرفت. در شرایط متداول بستر ثابت، دمای حدود ^oc ۴۰ برای خشک‌کردن شلتوک استفاده می‌شود. لذا برای بررسی ترک‌خوردگی شلتوک در دماهای بالاتر از دمای متداول، علاوه بر دمای مذکور ، دو سطح دمایی b_2=۶۰ ^oc و b_2=۸۰ ^oc نیز انتخاب گردید. طرح آزمایشی مورد استفاده، طرح فاکتوریل ۳*۳ بر پایهٔ طرح کاملا تصادفی انتخاب شد. در این آزمایشات دما و سرعت هوا (نوع بستر مواد) به عنوان متغیر مستقل و ترک دانه‌ها به عنوان متغیر وابسته در سه تکرار مورد اندازه‌گیری و ارزیابی قرار گرفت. مقایسهٔ میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام پذیرفت.

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

نحوهٔ خشک‌کردن شلتوک در شرایط مختلف بوسیلهٔ دستگاه خشک‌کن بستر سیال

در تمام مراحل انجام آزمایشها مطابق یک شیوهٔ مشخص در تنظیم دستگاه و نمونه‌گیری عمل شد. پس از ریختن شلتوک تا ارتفاع cm ۲۰، در داخل محفظهٔ خشک‌کن مراحل زیر را به ترتیب انجام دادیم:

ابتدا از یک نمونهٔ شلتوک برای تنظیم اولیهٔ دستگاه بر طبق شرایط آزمایش استفاده شد. سپس المنتهای کوره را روشن کرده تا دمای مورد نظر حاصل شود و حدود ۴۰ دقیقه دستگاه را روشن گذاشتیم تا دستگاه به حالت تعادل حرارتی برسد و پس از آن سیستم را به ترتیب روی سرعتهای ۰/۱، ۱/۱ و m/s ۳/۵ تنظیم کردیم و دماهای ۴۰، ۶۰ و ^oc ۸۰ را اعمال کردیم و آزمایشات با نمونه‌های شلتوک انجام گرفت. وزن مواد را در ابتدای آزمایش و در فواصل ۵ دقیقه‌ای ثبت کردیم که حداکثر فواصل زمانی وزن‌کردن حدود ۲۵ ثانیه طول کشید که تاثیر معنی‌داری روی روند خشک‌کردن نداشت[۵]. برای وزن کردن نمونه‌ها از ترازوی دیجیتالی با دقت gr ۰/۱ استفاده شد. پس از خشک‌شدن شلتوک تا حدود ۱۱٪ پایهٔ خشک برای بررسی یکنواختی توزیع رطوبت، ارتفاع بستر مواد را به سه بخش تقسیم نمودیم. بدین ترتیب که از ارتفاعهای صفر، ۰/۱ و m ۰/۲ پس از اتمام خشک‌شدن نمونه‌برداری شده و رطوبت نمونه‌ها طبق استاندارد انجمن مهندسین کشاورزی آمریکا به روش خشک‌کردن و کاهش وزن تعیین شد. سپس با مخلوط کردن تمام شلتوک‌های موجود درمحفظهٔ مواد، ۳ نمونهٔ ۱۰۰ گرمی را برای آزمایشهای ترک دانه‌ها جدا کردیم.

نتایج و بحث

بررسی یکنواختی خشک‌شدن در شرایط بسترهای ثابت، حداقل سیال‌سازی و سیال کامل

پس از تعیین رطوبت همهٔ نمونه‌ها، نتایج نشان داد که در شرایط بستر ثابت، اختلاف معنی‌داری بین درصد رطوبت عمقهای در نظر گرفته شده وجود داشت (جدول۱). به طوریکه رطوبت در عمقهای صفر، ۱۰ و cm ۲۰ به ترتیب ۱۰/۸۵٪، ۱۱/۷۲٪ و ۱۲/۰۲٪ بر پایهٔ خشک بود. در شرایط حداقل سیال‌سازی و سیال کامل، شلتوک با یکنواختی قابل ملاحظه‌ای خشک شد به طوریکه اختلاف رطوبت شلتوک در بالاترین و پایین‌ترین عمق در شرایط حداقل سیال‌سازی و سیال کامل به ترتیب ۰/۰۳٪ و ۰/۰۱٪ رطوبت بود. میانگین رطوبت عمقهای صفر، ۰/۱ و m ۰/۲ در شرایط حداقل سیال‌سازی به ترتیب ۱۱/۲۸٪، ۱۱/۲۹٪ و ۱۱/۳۱٪ پایهٔ خشک بود. این مقادیر برای شرایط سیال کامل به ترتیب برابر ۱۱/۵۳٪، ۱۱/۵۵٪ و ۱۱/۵۴٪ پایهٔ خشک بود. میانگین رطوبت عمقهای مختلف در سرعتهای مشخص، در شکل(۳) نشان داده شده است. حروف یکسان بیانگر سطوح رطوبتی یکسان و حروف مختلف بیانگر تفاوت آماری رطوبت بین عمقهای مذکور است. در حالت $\mathcal{B}$ که سرعت m/s ۰/۱ و عمق صفر است، رطوبت حداقل بوده و تفاوت معنی‌داری با رطوبت عمقهای ۰/۱ و m ۰/۲ دارد. علت یکنواختی توزیع رطوبت در شرایط حداقل سیال‌سازی را می‌توان ، افزایش فاصلهٔ بین دانه‌ها و در نتیجه تماس مؤثر تک‌تک دانه‌ها با هوای اطراف دانست. در نتیجه تماس دانه‌ها با هم کم شده و سطح تماس دانه‌ها با هوا افزایش می‌یابد و انتقال حرارت از شرایط هدایت حرارتی به سمت همرفت یا جابجایی در تمام عمق بستر سوق داده می‌شود. در شرایط

بستر سیال کامل نیز به دلیل اختلاط کامل مواد، شرایط یکنواخت در داخل محفظهٔ سیال‌سازی حاکم می‌شود که باعث خشک‌شدن همگن مواد می‌شود.

بررسی میزان ترک‌خوردگی برنج در شرایط بسترهای ثابت، حداقل سیال‌سازی و سیال کامل

نتایج آماری نشان داد که اثرات مستقل و متقابل دما و سرعت هوا بر میزان ترک برنج معنی‌دار بود (جدول۲). مقایسهٔ میانگین‌های تیمارها با ذکر حروف مربوط در شکل(۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور، بیشترین مقدار ترک دانه‌های شلتوک به میزان ۷۷٪ مربوط به حالت بسترثابت (سرعت هوای ۰/۱ m/s) با دمای هوای ۸۰ ^oc است. کمترین مقدار ترک نیز به میزان ۱۷٪ در سرعت هوای ۱/۱m/s (شرایط حداقل سیال‌سازی) رخ داده است. شرایط بستر ثابت (سرعت هوای ۰/۱ m/s) را می‌توان عامل اصلی ترک دانه‌ها دانست. در این شرایط بدلیل اینکه سرعت هوای دمیده شده پایین است، فاصلهٔ زمانی نسبتا 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 متوسط هستند. این امر سبب افزایش ترک دانه‌ها در لایه‌های زیرین شده است. با افزایش دما نیز میزان ترک دانه‌ها افزایش یافته است. به دلیل اینکه میزان ترک در هر سه دما با هم تفاوت دارند، حروف متفاوت در روی مقایسهٔ میانگین‌ها قرار داده شده است، که بیانگر تفاوت قابل مشاهده است (شکل۴). بیشترین میزان ترک در شرایط بستر ثابت و در دمای ۸۰ ^oc به علت تنش‌های حرارتی زیاد رخ داده است. میزان ترک دانه‌ها در دمای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ ^oc و در شرایط حداقل سیال‌سازی (سرعت هوای ۱/۱ m/s) به ترتیب ۱۷٪، ۱۷/۷٪ و ۱۸/۶٪ بدست آمد. در این شرایط، اعمال سرعت مناسب هوا و تماس بهتر دانه‌ها با هوا سبب کاهش چشمگیر ترک دانه‌ها شده است. زیرا دانه‌ها در این شرایط به حالت معلق (شناور) قرار می‌گیرند. 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 اینکه تاثیر منفی بر ترک‌خوردگی دانه بگذارد. همچنین می‌توان دریافت که در شرایط حداقل سیال‌سازی و در تمام دماها با توجه به حروف مشترک D، مقدار میانگین ترک با هم در یک سطح قرار دارند (شکل۴). لذا در شرایط حداقل سیال‌سازی می‌توان برای خشک‌کردن سریع شلتوک از بیشترین دما استفاده نمود بدون اینکه کیفیت محصول کاهش یابد. میزان ترک دانه‌ها در دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰^oc و در شرایط سیال کامل (سرعت 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 یافته است. همچنین اختلاف میزان ترک در سه دمای مورد آزمایش معنی‌دار نشده است (شکل۴). 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 را به هم، می‌توان شرایط یکنواخت حاکم بر لایه‌های مختلف بستر دانه ذکر کرد. به طوریکه تغییر دمای ^oc ۲۰ تاثیر چندانی بر ترک‌خوردگی دانه نداشته است. با افزایش سرعت هوا و ایجاد شرایط سیال کامل، مقدار ترک نسبت به شرایط حداقل‌سیال‌سازی افزایش یافته است. علت این امر را می‌توان حرکت ناگهانی مواد، برخورد شدید مواد به بدنه محفظهٔ خشک‌کن، اصطکاک داخلی شدید بین دانه‌ها و کانالیزه‌شدن هوا ذکر کرد. عوامل یاد شده سبب ایجاد ضربه‌های پی‌درپی به دانه‌ها شده و باعث ایجاد ترک‌خوردگی می‌شوند. 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 ^oc ۸۰ توانسته است میزان ترک‌خوردگی 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 تحقیقات دی‌متیا و همکاران در مورد گندم است*[۶]*. سادرلند و غالی نیز در بررسی روش خشک‌کردن سریع شلتوک در دماهای بالاتر از ^oc۴۰ و در شرایط بستر سیال نتایج مشابهی در جهت کاهش ضایعات برنج مشاهده کردند*[۱۰]*.

شرایط مناسب خشک‌کردن شلتوک در این آزمایشات

ملاکهای بیان شده در این تحقیق عبارت بودند از: یکنواختی خشک‌شدن و ترک دانه‌های شلتوک. با توجه به موارد یاد شده، شرایط حداقل سیال‌سازی و دمای ^oc ۸۰ که بیشترین کاهش تلفات را نسبت به شرایط بستر ثابت نشان می‌دهد و می‌تواند به عنوان بهترین حالت برای خشک‌کردن شلتوک از لحاظ تلفات مطرح شود. ولی شرایط سیال کامل نیز بهترین شرایط را برای خشک‌کردن محصولات از لحاظ یکنواختی خشک‌کردن دارد. بنابراین با توجه به اهمیت کاهش تلفات، شرایط حداقل سیال‌سازی برای خشک‌کردن شلتوک ترجیح داده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در شرایط بستر ثابت، اختلاف معنی‌داری بین محتوای رطوبتی عمقهای صفر، ۰/۱ و m ۰/۲ وجود داشت. در حالیکه شلتوک در حالتهای حداقل سیال‌سازی و سیال‌کامل با یکنواختی قابل ملاحظه‌ای خشک شد و اختلافات جزیی در رطوبت نیز به دلیل اختلاف در رطوبت تک‌تک دانه‌ها با یکدیگر است.

به علت تنشهای حرارتی، میزان ترک دانه‌ها در شرایط بستر ثابت، با افزایش دما، افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. در صورتیکه در شرایط حداقل سیال‌سازی و سیال کامل، تفاوت چندانی در ترک دانه‌ها

در دماهای اعمال شده ، مشاهده نشد. از طرف دیگر، به علت توزیع یکنواخت حرارت و حصول حرکت آرام بستر مواد، میزان ترک دانه‌ها در شرایط حداقل سیال‌سازی کمتر از حالت سیال کامل بود.

با یکنواختی بیشتر در خشک کردن شلتوک و کاهش اختلاف رطوبت بین لایه‌های مختلف شلتوک، در شرایط حداقل سیال‌سازی و سیال کامل، تلفات حاصل از خشک‌کردن شلتوک نسبت به بستر ثابت کاهش یافته است. در حالیکه با افزایش اختلاف رطوبت بین لایه‌های شلتوک در شرایط بستر ثابت، بطور قابل توجهی ترک‌خوردگی دانه‌ها افزایش یافت.

با یکنواختی بیشتر حالت سیال نسبت به حداقل سیال‌سازی انتظار می‌رفت که میزان ترک دانه‌ها کمتر از حالت حداقل سیال‌سازی باشد ولی به دلیل ضربه‌های مداوم به دانه‌ها به علت حرکت ناگهانی مواد، برخورد شدید مواد به بدنهٔ محظهٔ خشک‌کن، اصطکاک داخلی زیاد بین دانه‌ها و کانالیزه شدن هوا کمی بر ترک دانه‌ها افزوده است. بنابراین مطالعه، طراحی و ساخت سیستمی که مزیتهای هر دو سیستم را داشته باشد ضروری است.

سپاسگزاری

لازم است از آقای مهندس کریمی مدیر عامل محترم شرکت‌تولیدی-صنعتی کارینو به جهت همکاری و کمک مؤثر در ساخت دستگاه تشکر و قدردانی شود.

منابع

۱. **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 پنجمین کنفرانس بین‌المللی مکانیک. دانشگاه گیلان. رشت. ایران.

۲. **خوشحال، م. ۱۳۸۱**. بررسی و ارزیابی روش کنترل متناوب فرایند خشکاندن شلتوک، رسالهٔ دکتری مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی. دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۴۱ص

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. سال پنجم. شمارهٔ ۲۰: ۶۲-۴۹

4. ***Anonymous.*** *2000. ASAE Standard. S352.2 DEC92: Moisture measurement-unground grain and seeds. 47th edn. ST. Joseph. MI: U.S.A.*

5. ***Basunia, M. A. and T. Abe.*** *1997. Diffusion coefficients for predicting rough rice drying behavior from low to high temperatures. Agricultural Engineering Journal. 7(3&4): 147-158*

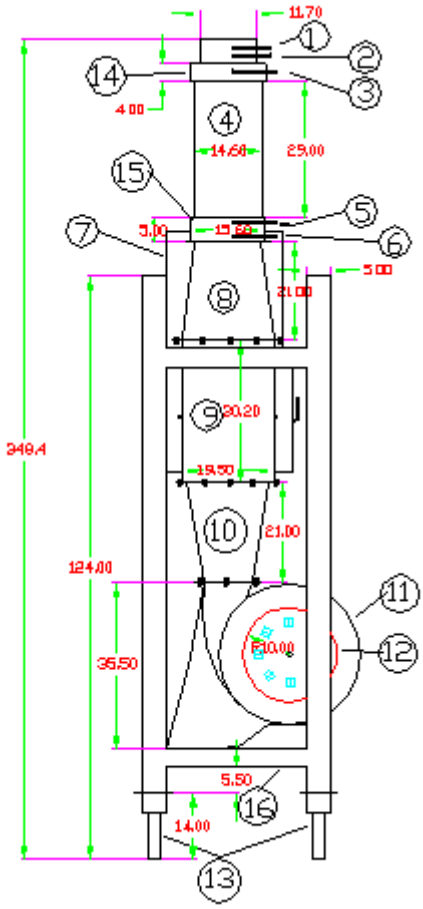
6. **Di Mattia, D. G., P.R. Amyotte** and **F. Hamdullahpur.** 1996. Fluidized bed drying of large particles. Transactions of the ASAE. 39(5): 1745-1750

7. **Ghaly, T. F.** and **P. A. Taylor.** 1982. Quality effects of two wheat varieties. Journal of Agricultural Engineering Research. 27(3): 227-234

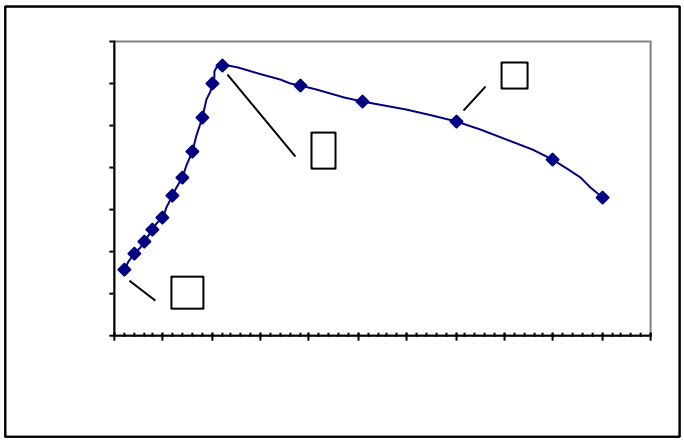
8. **Pliestic, S.** 1995. The dependence of the BC492 hybrid maize grain beginning fluidization upon the grain moisture content and the air velocity during the drying process. Poljoprivredna Znadstvena Smotra. 60(1): 5-25

9. **Soponronnarit, S., K, Kittiporn** and **S. Prachayawarakorn.** (1999). Corn drying in a continuous fluidized bed dryer. International Agricultural Engineering Journal, 8(4): 223-231

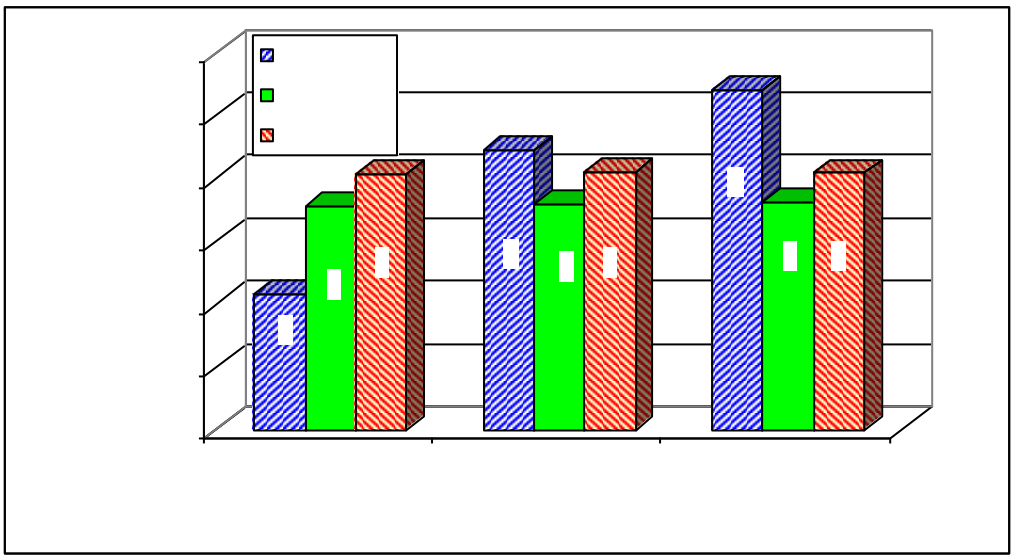
10. **Sutherland, J. W.** and **T. F. Ghaly.** 1990. Rapid fluid bed drying of paddy rice in the humid tropics. Proceedings of ASEAN Seminar on Postharvest Technology. Brunei Darussalam. 19- 30



شکل۱- خشک‌کن بسترسیال آزمایشگاهی ساخته شده (امیری چایجان و همکاران، ۱۳۸۰)



شکل۲- منحنی‌مشخصهٔ سیال‌سازی شلتوک خزر در عمق ۰/۲m با محتوای رطوبتی۱۷/۷٪ پایهٔ خشک
($\mathcal{A}$=۰/۱m/s، $\mathcal{B}$=۱/۱m/s و $\mathcal{C}$=۳/۵m/s)



شکل۳- مقایسهٔ میانگین رطوبت تیمارهای مختلف در سرعتها و عمقهای مختلف در دمای $80^{0}C$

جدول۱- تجزیهٔ واریانس یکنواختی توزیع رطوبت در شرایط بسترهای ثابت، حداقل سیال سازی و سیال کامل

بستر ثابت

منابع تغییرات	درجهٔ آزادی	MS	F
تیمار	۲	۰/۹۳۷۱	۶۶/۱۴**
خطای آزمایشی	۶	۰/۰۱۴۲	
کل	۸		

** = در سطح ۱٪ معنی‌دار است.

$\%Cv=$ ۰/۶۹۹۴

حداقل سیال سازی

منابع تغییرات	درجهٔ آزادی	MS	F
تیمار	۲	۰/۰۰۰۲۳	۰/۹۶^{ns}
خطای آزمایشی	۶	۰/۰۰۰۲۴	
کل	۸		

^{ns} = معنی‌دار نیست.

$\%Cv=$۰/۰۷۸

سیال کامل

منابع تغییرات	درجهٔ آزادی	MS	F
تیمار	۲	۰/۰۰۰۱۷	۰/۵۱^{ns}
خطای آزمایشی	۶	۰/۰۰۰۳۳	
کل	۸		

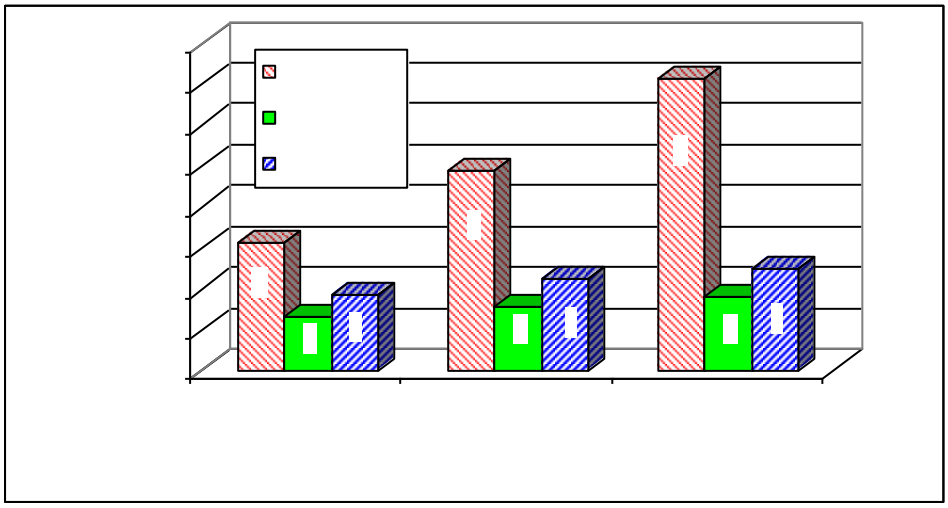
^{ns} = معنی‌دار نیست.

$\%Cv=$۰/۰۹۱

جدول۲- تجزیهٔ واریانس ترک دانه‌های شلتوک در شرایط بسترهای ثابت، حداقل سیال سازی و سیال کامل

منابع تغییرات	درجهٔ 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٪ معنی‌دار است.



شکل۴- مقایسهٔ میانگین ترک تیمارهای مختلف در سرعتها و دماهای مختلف هوا