

بررسی فرآیند خشک کردن شلتوک در شرایط بستر ثابت و سیال

*محمدهادی خوش تقاضا^۱، مرتضی صادقی^۲ و رضا امیری چایجان^۳

^۱دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، ^۲استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان،

^۳استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا، همدان

تاریخ دریافت: ۸۲/۴/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۵/۶/۶

چکیده

در میان روش‌های جدید خشک کردن، روش بستر سیال از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مطالعه فرآیند خشک کردن شلتوک به روش‌های بستر ثابت و سیال، از نظر راندمان حرارتی، نرخ خشک شدن و میزان ترک خوردگی دانه مورد مقایسه قرار گرفت. آزمایش‌ها به کمک یک دستگاه خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی که قابلیت کنترل دما و دبی هوای ورودی به محفظه و اعمال شرایط بستر ثابت و سیال را داشت، صورت پذیرفت. خشک کردن شلتوک از میزان رطوبت اولیه ۱۷/۷ درصد تا رطوبت نهایی ۱۱ درصد بر پایه خشک در سه دمای هوای ورودی ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. سرعت هوای مورد استفاده در شرایط بستر ثابت، نیمه سیال و سیال کامل به ترتیب ۰/۱، ۱/۱ و ۳/۵ متر بر ثانیه بود. راندمان حرارتی خشک‌کن با توجه به نسبت انرژی لازم جهت تبخیر رطوبت محصول به انرژی حرارتی صرف شده، محاسبه گردید. بیشترین مقدار راندمان حرارتی ۲۲/۸۴ درصد و کمترین مقدار آن ۳/۳۳ درصد، به ترتیب مربوط به شرایط بستر ثابت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سیال کامل در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود. عامل اصلی ترک دانه‌ها، شرایط بستر ثابت تعیین شد، بطوری که بیشترین زمان خشک شدن (۲۸۰ دقیقه) و بیشترین مقدار ترک دانه (۷۸ درصد) مربوط به این حالت و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. کمترین زمان خشک شدن (۴۰ دقیقه) و همچنین کمترین مقدار ترک دانه (۱۷ درصد) نیز مربوط به حالت بستر نیمه سیال به ترتیب با دماهای ۸۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود.

واژه‌های کلیدی: شلتوک، نیمه سیال، راندمان حرارتی، نرخ خشک شدن، ترک خوردگی

مقدمه

خشک کردن محصولات کشاورزی جزء فرآیندهایی به شمار می‌رود که انرژی زیادی مصرف می‌کند. در میان روش‌های جدید خشک کردن، روش بستر سیال از اهمیت خاصی برخوردار است (پهلوانزاده، ۱۳۷۷). هرگاه جریان

خشک کردن یکی از مهم‌ترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی است که دوره انبارداری این محصولات را افزایش می‌دهد. اکثر خشک‌کن‌های صنعتی از جریان هوای داغ جهت خشک کردن استفاده می‌کنند. از سوی دیگر،

به ترتیب نرخ خشک شدن را ۱۵ درصد و ۵۴ درصد در مقایسه با خشک کردن در حالت بستر ثابت در شرایط درجه حرارت یکسان، افزایش داد (آکان و آلکو، ۱۹۸۶). آنها نتیجه گرفتند که سیال سازی نرخ خشک شدن را به علت افزایش سطح تماس خشک کردن ذرات، افزایش می دهد. پراساد و همکاران (۱۹۹۴) فرآیند خشک کردن برنج نیم پز^۴ را در شرایط بستر ثابت، نیمه سیال و سیال کامل مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که برنج نیم پز تحت شرایط بستر نیمه سیال، بدون هیچ تلفات شکستگی خشک شد. همچنین در این حالت زمان خشک شدن نیز به صورت قابل ملاحظه ای در مقایسه با شرایط بستر ثابت کاهش پیدا کرد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که در شرایط سیال کامل، میزان مصرف انرژی و درصد شکستگی افزایش پیدا کرد. در شرایط بستر سیال مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که خشک کردن گندم در شرایط بستر سیال، دارای راندمان حرارتی پائینی (۱۲/۴ درصد) در مقایسه با راندمان حرارتی معمول در خشک کن های بستر ثابت از نوع جریان متقاطع^۵ و جریان مختلط^۶ (۴۵ درصد) بود.

با توجه به موارد ذکر شده، نیاز به تحقیق و بررسی فرآیند خشک کردن شلتوک تحت شرایط بستر ثابت و سیال و مقایسه این روش ها از جنبه های مختلف، امری ضروری به نظر می رسد. بنابراین، هدف از انجام این تحقیق بررسی فرآیند خشک کردن شلتوک در شرایط بستر ثابت، نیمه سیال و سیال کامل براساس تأثیر دبی و دمای هوای ورودی بر راندمان حرارتی عملیات، نرخ خشک شدن و میزان ترک خوردگی دانه برنج بود.

هوا از میان ذرات یک بستر به سمت بالا هدایت شود، در دبی پایین، سیال فقط از فضای خالی بین ذرات ثابت عبور می کند، در این حالت یک بستر ثابت^۱ به وجود می آید که با افزایش دبی جریان، ذرات از هم فاصله گرفته و اندکی مرتعش شده و در ناحیه محدودی به ارتعاش خود ادامه می دهند. در این حالت بستر را نیمه سیال^۲ می نامند. در نهایت با افزایش بیشتر سرعت سیال، در نقطه ای تمام ذرات به وسیله حرکت رو به بالای سیال، کاملاً معلق شده و انبساط کامل بستر را خواهیم داشت. به این حالت نیز سیال کامل^۳ گویند. به طور کلی هرگونه افزایش در سرعت هوای مورد استفاده، نرخ انتقال حرارت را از هوا به محصول بواسطه افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می دهد که خود باعث افزایش نرخ انتشار رطوبت (انتقال جرم) و در نتیجه نرخ خشک شدن می شود (کانی و لون اسپیل، ۱۹۹۱).

تری بال (۱۹۸۰) گزارش کرد که به منظور جلوگیری از غیریکنواختی توزیع رطوبت در محصول خشک شده، باید حجم بالایی از هوا در سرعت های بالای ۳ تا ۴ متر بر ثانیه بکار گرفته شود. اشمیت و هاکیل (۱۹۵۶) نیز آزمایش هایی را به منظور بررسی تأثیر شرایط هوای مورد استفاده بر درصد شکستگی شلتوک انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که رطوبت اولیه شلتوک تأثیر کمی بر درصد شکستگی شلتوک داشت و با افزایش سرعت هوای خشک کردن در دمای ۳۲ تا ۶۱ درجه سانتی گراد، درصد شکستگی شلتوک کاهش پیدا کرد. مک کیب و همکاران (۱۹۸۵) فواید خشک کردن ذرات مختلف در مقادیر بالای دبی هوا و تحت شرایط سیال سازی را گزارش کردند. خشک کردن با استفاده از این روش در دماهای ۲۰ و ۶۵ درجه سانتی گراد

4- Parboiled Rice
5- Cross Flow
6- Mixed Flow

1- Fixed Bed
2- Semi-Fluidized
3- Complete Fluidization

مواد و روش‌ها

در انجام این تحقیق از یک خشک‌کن آزمایشگاهی با قابلیت کنترل دما و دبی هوای ورودی به محفظه، که در تحقیق دیگری برای محصولات دانه‌ای طراحی و ساخته شده بود، استفاده گردید (امیری چایجان و همکاران، ۱۳۸۳). در خشک‌کن بکار رفته، محفظه خشک‌کن به شکل استوانه از جنس پلکسی گلاس^۱ شفاف بود. کنترل دما توسط المنت‌های الکتریکی و یک مدار کنترل و تنظیم سرعت هوا نیز با تغییر دور دمنده توسط سیستم تغییر دور فرکانسی صورت گرفت (شکل ۱).

توزین نمونه در حین خشک شدن با استفاده از یک ترازو با دقت $\pm 0.1g$ انجام شد. دمای محیط قبل از ورود به دمنده و دمای هوا قبل و بعد از محفظه خشک‌کن، توسط یک دماسنج دیجیتالی لوترون^۲ (مدل TM-9.5) ساخت کشور تایوان با دقت ± 1 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. سرعت

هوای دمیده شده توسط دمنده، بوسیله یک سرعت‌سنج پره‌ای^۳ لوترون (مدل A-M-4202) ساخت کشور تایوان اندازه‌گیری شد که دقت آن ± 2 درصد و حساسیت آن 0.1 متر بر ثانیه بود. با استفاده از سطح مقطع قسمت ورودی و خروجی محفظه خشک‌کن، سرعت ظاهری مربوطه و دبی هوا محاسبه شد.

برای اندازه‌گیری درصد ترک‌خوردگی شلتوک، یک دستگاه ترک‌بین که توسط پیمان و همکاران (۱۳۷۹) طراحی و ساخته شده بود، مورد استفاده قرار گرفت، این دستگاه شامل یک لامپ فلوئورسنت است که در زیر یک صفحه مشبک نصب می‌شود. صفحه مشبک دارای شیارهای طولی می‌باشد که می‌توان دانه‌های برنج را به‌طور مورب روی آن قرار داده و به‌راحتی به کمک یک ذره‌بین، وضعیت ترک دانه‌ها را بررسی نمود. به علت شکست نور در مقطع ترک‌خورده، ترک عرضی دانه به‌راحتی قابل تشخیص است.



شکل ۱- خشک‌کن آزمایشگاهی بکار گرفته شده در انجام آزمایش‌ها (۱).

برای انجام آزمایش‌ها از شلتوک رقم خزر استفاده شد که رقمی متوسط رس و پرمحصول بود. جهت اندازه‌گیری میزان ترک اولیه نمونه‌های شلتوک مورد آزمایش، سه نمونه ۱۰۰ تایی دانه شلتوک به‌طور تصادفی از توده ۱۰۰ کیلوگرمی انتخاب و پوست خارجی آنها با دقت توسط دست از دانه شلتوک جدا شد. سپس دانه‌های بدون پوست برنج قهوه‌ای در روی شیارهای دستگاه ترک‌بین قرار داده شد و دانه‌های ترک‌دار (دانه‌های با ترک عرضی کامل) شمارش شد و به‌صورت درصد، نسبت به کل دانه‌ها در نظر گرفته شد. درصد ترک نمونه اولیه شلتوک ۳/۸ درصد به‌دست آمد. این عدد، ضایعات ناشی از عملیات برداشت، خرم‌نکوبی، حمل و نقل و یا تنش‌های رطوبتی است. پس از انجام هر آزمایش خشک‌کردن، از لایه‌های مختلف بستر شلتوک (بالا، وسط و پائین بستر)، نمونه‌برداری شد و پس از تعیین درصد ترک‌خوردگی، میزان ترک قبل از عملیات (۳/۸ درصد)، از آن کسر گردید.

برای انجام آزمایش‌های خشک‌کردن، در ابتدا توده ۱۰۰ کیلوگرمی شلتوک که به‌صورت تصادفی از مرکز تحقیقات برنج شمال کشور انتخاب شده بود، در داخل کیسه‌های پلاستیکی ۱۰ کیلوگرمی قرار داده و درب آنها محکم بسته شد، تا ضمن به تعادل رسیدن، با محیط نیز تبادل رطوبتی نداشته باشد. سپس کیسه نمونه‌ها در یخچال نگهداری شد. کیسه نمونه، قبل از شروع آزمایش از یخچال خارج شد و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاه قرار داده شد تا با دمای محیط به تعادل برسد. رطوبت اولیه نمونه‌های شلتوک مورد آزمایش، با استفاده از روش استاندارد وزنی اندازه‌گیری شد که به مقدار ۱۷/۷ درصد بر پایه خشک به‌دست آمد (ASAE, 2000).

سه سطح دمای هوای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد در تمام آزمایش‌های بستر ثابت،

نیمه‌سیال و سیال کامل مورد استفاده قرار گرفت، زیرا در شرایط متداول بستر ثابت، دمای حدود ۴۰ درجه‌سانتی‌گراد برای خشک‌کردن شلتوک استفاده می‌شود. با توجه به اینکه یکی از مزایای خشک‌کن‌های بستر سیال استفاده از دمای بالاست، بنابراین برای بررسی راندمان حرارتی و ترک‌خوردگی دانه‌های شلتوک در دماهای بالاتر از دمای متداول، علاوه بر دمای ۴۰ درجه‌سانتی‌گراد، دو سطح دمای ۶۰ و ۸۰ درجه‌سانتی‌گراد نیز در نظر گرفته شد.

برای حالت بستر ثابت، سرعت هوای مورد استفاده ۰/۱ m/s و دبی آن $0/0016 \text{ m}^3/\text{s}$ بود. در این دبی، هیچ‌گونه افزایشی در عمق بستر مورد آزمایش و حتی تا عمق بستر ۱۰ سانتی‌متر مشاهده نشد. در حالت بستر نیمه سیال، سرعت هوا ۱/۱ m/s و دبی آن $0/018 \text{ m}^3/\text{s}$ بود، به‌طوری‌که افزایش دبی هوا به میزان کمی از این مقدار باعث سیال‌سازی بستر شد. در مورد بستر سیال کامل نیز سرعت هوا ۳/۵ m/s و دبی متناظر با آن m^3/s ۰/۰۵۷ محاسبه شد، به‌طوری‌که در این دبی اختلاط کامل ذرات بستر مشاهده شد. عمق بستر ۲۰ سانتی‌متر در تمام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این عمق با توجه به ارتفاع محفظه استوانه‌ای و میزان انبساط ذرات شلتوک در حالت سیال کامل انتخاب گردید. در طی عمل خشک‌کردن، وزن محفظه خشک کن اندازه‌گیری شد که با توجه به رطوبت اولیه شلتوک، رطوبت دانه در زمان‌های مختلف قابل محاسبه بود. عمل خشک‌کردن در تمام حالت‌های آزمایش تا رطوبت نهایی ۱۱ درصد بر پایه خشک ادامه داشت. بنابراین، آزمایش‌ها در سه سطح دمای هوای ورودی، سه سطح سرعت هوای ورودی (سه سطح شرایط بستر) و سه تکرار در قالب طرح آزمایش فاکتوریل انجام شد.

آزمایش‌ها در محیطی با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۴۱ درصد انجام شد.

نرخ خشک‌شدن با استفاده از داده‌های حاصل از درصد محتوای رطوبتی خارج شده از شلتوک در هر زمان، تقسیم بر فواصل زمانی مربوطه به دست آمد. انرژی حرارتی لازم برای خشک‌کردن نمونه‌ها، با استفاده از حاصلضرب کل توان حرارتی اعمال شده در مدت زمان خشک‌شدن برای هر مرحله از آزمایش محاسبه شد. کل توان حرارتی (E_h) از رابطه ترمودینامیکی (۱) محاسبه شد (پراساد و همکاران، ۱۹۹۴):

$$E_h = \frac{Q \times (C_{pa} + C_{pv} \times h_a)(T_{in} - T_{am})}{V_h} \quad (1)$$

که C_{pv} و C_{pa} به ترتیب ظرفیت گرمای ویژه هوا و بخار ($J/kg \cdot ^\circ C$)، Q دبی هوای ورودی به محفظه h_a ، (m^3/s) رطوبت مطلق هوا ($kg_{vapor}/kg_{dry\ air}$) دمای هوای ورودی به محفظه (درجه سانتی‌گراد)، T_{am} دمای هوای محیط (درجه سانتی‌گراد) و V_h حجم ویژه^۱ هوا (m^3/kg) می‌باشد. مقادیر گرمای ویژه هوا و بخار به ترتیب برابر با $1004/16$ و $1828/8 J/kg \cdot ^\circ C$ بود (مک‌کیب و همکاران، ۱۹۸۵). به منظور محاسبه راندمان حرارتی عملیات خشک‌کردن نیز از رابطه (۲) استفاده شد:

$$\eta = \frac{q_u}{q_s} \times 100 \quad (2)$$

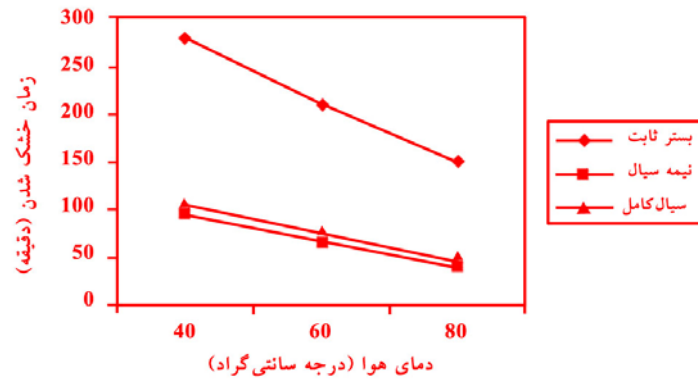
که q_u ، انرژی حرارتی متوسط مورد نیاز برای تبخیر آب از محصول خشک شده در دمای مربوطه (J) و q_s ، انرژی حرارتی داده شده به هوای مورد استفاده (J) است. متوسط گرمای نهان تبخیر شلتوک، $2/5104$ مگاژول بر کیلوگرم رطوبت گزارش شده است (رامارائو، ۱۹۷۴).

نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج حاصل از تجزیه واریانس آزمایش‌های خشک کردن را نشان می‌دهد. از تجزیه آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که دمای هوای ورودی تأثیر معنی‌داری (در

سطح ۱ درصد) بر متغیرهای وابسته مورد بررسی شامل: مدت زمان خشک شدن، انرژی حرارتی لازم، راندمان حرارتی کل و میزان ترک خوردگی دانه داشته است (T_{in}^{**}). تمامی متغیرهای وابسته اندازه‌گیری و محاسبه شده، عکس‌العمل بسیار متفاوتی نسبت به سطوح سرعت هوای ورودی بکار رفته در آزمایش (شرایط بستر) داشته‌اند (u_a^{**}) و این عکس‌العمل برای سطوح دمایی ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد متفاوت است که حاکی از اندرکنش معنی‌دار (در سطح ۱ درصد) بین دمای هوای ورودی و سرعت هوای ورودی می‌باشد ($T_{in} \times u_a^{**}$).

تغییرات زمان خشک‌شدن با درجه حرارت در شکل ۲ نشان داده شده است. در تمام سطوح دما، زمان خشک‌شدن در شرایط بستر ثابت بیشترین مقدار و در شرایط بستر نیمه سیال، کمترین مقدار را دارا بود، به طوری که کمترین زمان لازم برای خشک‌کردن شلتوک از محتوای رطوبتی ۱۷/۷ به ۱۱ درصد بر پایه خشک مربوط به حالت بستر نیمه سیال در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد، زیرا با توجه به افزایش سرعت هوا از حالت بستر ثابت به بستر نیمه سیال، از یک سو سطح تماس ذرات با هوا افزایش یافته و از سوی دیگر نرخ انتقال حرارت از هوا به دانه‌های شلتوک بواسطه افزایش در ضریب انتقال حرارت جابجایی، افزایش پیدا می‌کند که خود باعث افزایش نرخ انتقال جرم می‌شود. این نکته نتایج تحقیق آکان و آکو را تأیید می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، در شرایط سیال کامل نیز، مدت زمان خشک‌شدن دانه‌های شلتوک در هر سه دما نسبت به شرایط بستر ثابت، کاهش (معنی‌دار در سطح آماری ۱ درصد) ولی نسبت به شرایط نیمه سیال، افزایش نشان می‌دهد (معنی‌دار در سطح ۱ درصد). این امر احتمالاً به دلیل کانالیزه شدن هوا و تماس غیرمؤثر دانه‌ها با هوای گرم در اثر این پدیده می‌باشد.



شکل ۲- تغییرات زمان خشک‌شدن با دمای هوای ورودی در شرایط مختلف بستر.

بکار رفته را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، هر چند با افزایش دمای هوای ورودی، توان حرارتی اعمال شده با توجه به رابطه ۱ افزایش پیدا می‌کند، اما با توجه به کاهش مدت زمان خشک‌شدن، مقدار انرژی حرارتی مورد نیاز برای حذف واحد رطوبت از محصول کاهش پیدا می‌کند. با استفاده از داده‌های به دست آمده رابطه رگرسیون درجه دوم زیر میان میزان انرژی حرارتی لازم (q_s بر حسب J) و پارامترهای خشک‌کردن در این تحقیق، حاصل شد:

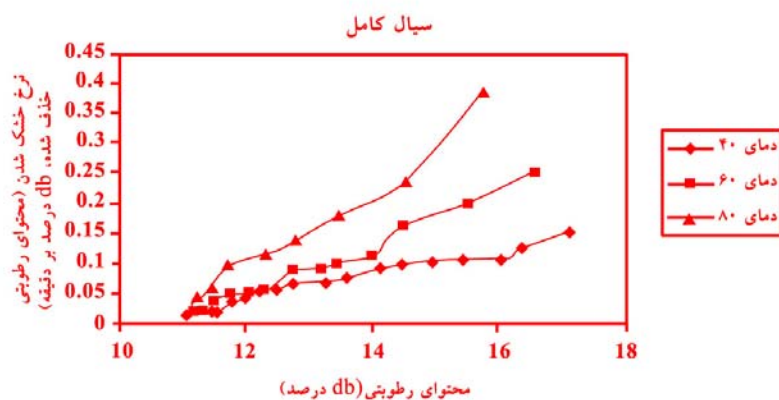
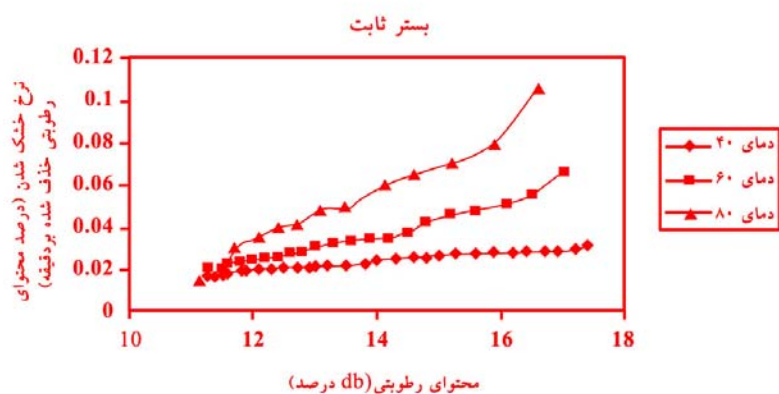
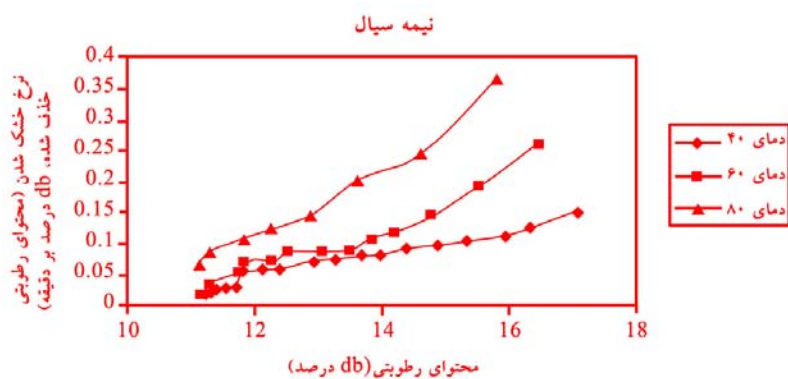
$$R^2 = 0.98 \quad (3)$$

$$q_s = 46.85 + 24.36 \times u_a - 1.01 \times T_{in} - 0.1 \times T_{in} u_a - 0.83 \times u_a^2 + 0.01 \times T_{in}^2$$

که در آن u_a سرعت هوای ورودی به محفظه (m/s) که شرایط بستر را مشخص می‌کند و T_{in} دمای هوای ورودی به محفظه (درجه سانتی‌گراد) است. رابطه مشابهی نیز توسط پراساد و همکاران (۱۹۹۴) به دست آمده است.

شکل ۳ تغییرات نرخ خشک‌شدن را با محتوای رطوبتی نشان می‌دهد. با افزایش درجه حرارت برای تمام شرایط آزمایش، شیب منحنی خشک‌شدن بیشتر می‌شود که افزایش نرخ خشک‌شدن را با افزایش درجه حرارت نشان می‌دهد. این امر بخصوص برای افزایش دمای هوا از ۶۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر مشهود بود. همچنین، در تمام شرایط مورد آزمایش و در یک دمای مشخص، نرخ خشک‌شدن در ابتدا بالا بود و به تدریج کاهش پیدا می‌کرد. این نکته مرحله خشک‌شدن با آهنگ نزولی^۱ را طی فرآیند خشک‌شدن شلتوک نشان می‌دهد. در مراحل اولیه خشک‌شدن یعنی در محتوای رطوبتی بالاتر، نرخ خشک‌شدن در حالت بستر نیمه سیال در مقایسه با دو حالت دیگر بیشتر بود، ولی با پیشرفت فرآیند این اختلاف کاهش پیدا کرد.

جدول ۲ تغییرات انرژی حرارتی لازم برای خشک‌کردن نمونه‌ها را در سه حالت مختلف بستر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای هوای ورودی به محفظه، مقدار این انرژی کاهش پیدا کرده است، که بهبود وضعیت استفاده از هوای



شکل ۳- تغییرات نرخ خشک شدن با محتوای رطوبتی در شرایط مختلف بستر و دماهای مختلف.

جدول ۲- انرژی حرارتی لازم برای خشک کردن شلتوک (q_s) در شرایط مختلف بستر (مگا ژول بر کیلوگرم رطوبت).

دمای ورودی (درجه سانتی گراد)			
بستر	۴۰	۶۰	۸۰
بستر ثابت	۱۴/۷۶۸۳۹	۱۱/۷۱۰۴۹	۱۰/۹۸۷۰۱
نیمه سیال	۴۴/۰۹۲۸۱	۲۵/۲۸۱۲۸	۲۰/۳۱۹۲۶
سیال کامل	۷۵/۳۲۴۸۶	۶۵/۲۲۴۰۷	۵۴/۱۸۳۶۳

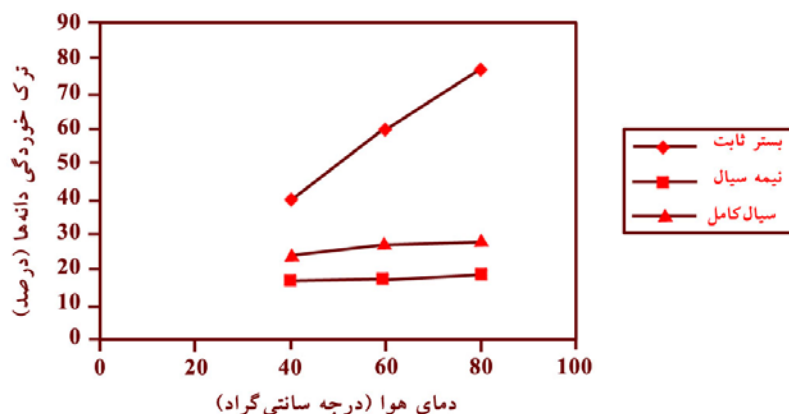
نتایج حاصل از محاسبه راندمان حرارتی کل (رابطه ۲) در شرایط مختلف بستر نیز در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین راندمان حرارتی (۲۲/۸۴ درصد)، مربوط به حالت بستر ثابت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار آن (۳/۳۳ درصد)، مربوط به حالت بستر سیال کامل در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در تمام موارد تحت شرایط بستر سیال، راندمان حرارتی فرآیند خشک‌کردن در مقایسه با شرایط بستر ثابت کمتر است. این نتایج با نتایج گزارش شده در تحقیقات دیگر مطابقست دارد (راوال، ۱۹۷۸؛ پراساد و همکاران، ۱۹۹۴). دلیل این نکته افزایش سرعت هوا در حالت بستر سیال در مقایسه با بستر ثابت می‌باشد. به عبارت دیگر، در یک دمای ثابت، افزایش سرعت هوا راندمان حرارتی را کاهش داده است، زیرا هر چند با تغییر شرایط بستر از حالت ثابت به حالت بستر سیال، زمان خشک‌شدن کاهش پیدا کرده است، اما تأثیر افزایش سرعت هوا در مخرج کسر راندمان حرارتی بیشتر از تأثیر کاهش زمان خشک‌شدن در مخرج این کسر بوده است. دمای هوای ورودی به محفظه نیز همانند سرعت سیال در مخرج کسر رابطه ۲ ظاهر می‌شود، اما از

آنجا که با افزایش درجه حرارت هوای ورودی، زمان خشک‌شدن با تأثیر بیشتری کاهش پیدا کرده است، راندمان حرارتی فرآیند در تمام موارد با افزایش دما افزایش پیدا کرده است.

نتایج مربوط به میزان ترک دانه‌ها در دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد تحت شرایط مختلف بستر در شکل ۴ نشان داده شده است. با استفاده از این شکل شرایط بستر ثابت را می‌توان عامل اصلی ترک دانه‌ها دانست، زیرا در تمام دماهای مورد استفاده، میزان ترک دانه‌ها در شرایط بستر ثابت، اختلاف چشمگیری با شرایط بستر نیمه سیال و سیال کامل دارد، زیرا در شرایط بستر ثابت، به دلیل پائین بودن سرعت هوای دمیده شده، فاصله زمانی نسبتاً زیادی بین خشک‌شدن لایه‌های زیرین با لایه‌های میانی و بالایی ایجاد می‌شود. این در حالی است که لایه‌های زیرین به رطوبتی پائین‌تر از مقدار توصیه شده رسیده‌اند و لایه‌های بالایی همچنان دارای رطوبتی بالاتر از مقدار متوسط هستند. این امر سبب افزایش ترک دانه‌ها در لایه‌های زیرین می‌شود. در این شرایط، با افزایش دما نیز میزان ترک دانه‌ها افزایش یافته است و بیشترین ترک در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به علت تنش‌های حرارتی زیاد رخ می‌دهد.

جدول ۳- راندمان حرارتی عملیات خشک‌کردن (۱) در شرایط مختلف بستر (درصد).

دمای ورودی (درجه سانتی‌گراد)			
	۴۰	۶۰	۸۰
بستر ثابت	۱۶/۹۹	۲۱/۴۳	۲۲/۸۴
نیمه سیال	۵/۶۹	۹/۹۲	۱۲/۴۵
سیال کامل	۳/۳۳	۳/۸۴	۴/۶۳



شکل ۴- تغییرات میزان ترک‌خوردگی دانه‌های شلتوک با دمای هوای ورودی در شرایط مختلف بستر.

در شرایط بستر نیمه‌سیال، اعمال سرعت مناسب هوا و تماس بهتر دانه‌ها با هوا نسبت به بستر ثابت، سبب کاهش چشمگیر ترک دانه‌ها شده است. بنابراین، تحت این شرایط افزایش دمای هوا ضمن اینکه مدت زمان خشک‌کردن را کاهش می‌دهد، تأثیر منفی نیز بر روی ترک‌خوردگی دانه ندارد. از این‌رو، در شرایط نیمه سیال می‌توان برای خشک‌کردن سریع محصول از بیشترین دما (۸۰ درجه سانتی‌گراد) استفاده نمود، بدون اینکه ترک خوردگی محصول افزایش یابد.

در شرایط بستر سیال کامل نیز که اختلاط کامل مواد رخ می‌دهد، مشابه متغیر وابسته زمان خشک شدن، مقدار ترک دانه‌ها نسبت به بستر ثابت کاهش داشته است (معنی‌دار در سطح آماری ۱ درصد). همچنین در این شرایط از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در میانگین ترک دانه‌ها در سه دمای مورد آزمایش وجود ندارد (براساس آزمون دانکن حتی در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار نبود). چرخش مواد در داخل بستر، باعث انتقال یکنواخت تر حرارت و جرم می‌شود که در نتیجه میانگین ترک دانه‌ها از حالت بستر ثابت کمتر شده است. دلیل نزدیکی مقادیر ترک دانه‌ها در سه دمای هوا را نیز می‌توان به علت شرایط یکنواخت حاکم بر لایه‌های مختلف بستر دانه ذکر نمود. با افزایش سرعت هوا و ایجاد

شرایط سیال کامل، مقدار ترک دانه‌ها نسبت به شرایط نیمه سیال افزایش یافته است (معنی‌دار در سطح آماری ۱ درصد). دلیل این امر را احتمالاً می‌توان، حرکت ناگهانی مواد، برخورد شدید مواد به بدنه محفظه خشک‌کن، اصطکاک داخلی شدید بین دانه‌ها و کانالیزه شدن هوا ذکر کرد. از طرف دیگر، در شرایط بستر 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. این نتایج یافته‌های دی‌متیا و همکاران (۱۹۹۶) در مورد گندم را تأیید می‌کند. همچنین سادرلند و غالی (۱۹۹۰) در بررسی خشک‌کردن سریع شلتوک در دمای بالاتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد و در شرایط بستر سیال، نتایج مشابهی در جهت کاهش ضایعات برنج مشاهده کردند.

با توجه به نتایج فوق و معیارهای مورد بررسی، روش بستر نیمه‌سیال (سرعت هوای ۱/۱ متر بر ثانیه) با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، را می‌توان به عنوان بهترین حالت ممکن در آزمایش‌های انجام شده نام برد، زیرا این روش دارای مزایایی از قبیل بالا بودن نرخ خشک‌شدن و همچنین میزان ترک‌خوردگی پائین دانه می‌باشد و تنها بایستی راندمان حرارتی آن را به نحوی بهبود بخشید. در

در شرایط بستر نیمه‌سیال، اعمال سرعت مناسب هوا و تماس بهتر دانه‌ها با هوا نسبت به بستر ثابت، سبب کاهش چشمگیر ترک دانه‌ها شده است. بنابراین، تحت این شرایط افزایش دمای هوا ضمن اینکه مدت زمان خشک‌کردن را کاهش می‌دهد، تأثیر منفی نیز بر روی ترک‌خوردگی دانه ندارد. از این‌رو، در شرایط نیمه سیال می‌توان برای خشک‌کردن سریع محصول از بیشترین دما (۸۰ درجه سانتی‌گراد) استفاده نمود، بدون اینکه ترک خوردگی محصول افزایش یابد.

در شرایط بستر سیال کامل نیز که اختلاط کامل مواد رخ می‌دهد، مشابه متغیر وابسته زمان خشک شدن، مقدار ترک دانه‌ها نسبت به بستر ثابت کاهش داشته است (معنی‌دار در سطح آماری ۱ درصد). همچنین در این شرایط از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در میانگین ترک دانه‌ها در سه دمای مورد آزمایش وجود ندارد (براساس آزمون دانکن حتی در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار نبود). چرخش مواد در داخل بستر، باعث انتقال یکنواخت تر حرارت و جرم می‌شود که در نتیجه میانگین ترک دانه‌ها از حالت بستر ثابت کمتر شده است. دلیل نزدیکی مقادیر ترک دانه‌ها در سه دمای هوا را نیز می‌توان به علت شرایط یکنواخت حاکم بر لایه‌های مختلف بستر دانه ذکر نمود. با افزایش سرعت هوا و ایجاد

این راستا می‌توان راهکارهایی از قبیل بازیافت بخشی از هوای خروجی و همچنین کاربرد ارتعاش را در خشک‌کن‌های بستر سیال پیشنهاد نمود.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از انجام این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- کمترین زمان لازم برای خشک‌کردن شلتوک از محتوای رطوبتی ۱۷/۷ به ۱۱ درصد بر پایه خشک و همچنین کمترین مقدار ترک دانه مربوط به حالت بستر نیمه سیال بود.
- روش بستر سیال کامل بیشترین مقدار مصرف انرژی و در نتیجه کمترین مقدار راندمان حرارتی را در مقایسه با دو روش دیگر دارا بود.

- با توجه به معیارهای مورد بررسی، روش بستر نیمه سیال با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، در مقایسه با دو روش دیگر، برای خشک‌کردن شلتوک مناسب‌تر می‌باشد، زیرا بالاترین نرخ خشک‌شدن و کمترین مقدار ترک خوردگی دانه را در مقایسه با دو روش دیگر دارا بود.

- با توجه به مزایای اثبات شده در مورد روش بستر نیمه‌سیال، جهت استفاده موثرتر از آن بایستی راندمان حرارتی آنها را با راهکارهایی از قبیل بازیافت هوای خروجی و کاربرد ارتعاش در خشک‌کن بهبود بخشید.

منابع

۱. امیری چایجان، ر.، خوش تقاضا، م. ه.، و کیانمهر، م. ح. ۱۳۸۳. اصول طراحی یک خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی برای برخی محصولات دانه‌ای زراعی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. سال پنجم. شماره ۲۰: ۳۵-۵۲.
۲. پهلوانزاده، ح. ۱۳۷۷. خشک‌کردن: اصول، کاربرد و طراحی. (تألیف سزلا استرامیلو و تادیوز کودرا) چاپ اول. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس. ۴۵۵ ص.
۳. پیمان، م. ح.، توکلی‌هشجین، ت. و مینائی، س. ۱۳۷۸. تعیین فاصله مناسب بین غلتک‌ها در پوست‌کن غلتک لاستیکی برای تبدیل سه رقم برنج در استان گیلان. مجله علمی پژوهشی علوم کشاورزی. سال پنجم. شماره ۲۰: ۳۷-۴۸.
4. ASAE. 2000. ASAE Standard S352.2: Moisture measurement-unground grain and seeds. 47th edn. ST. Joseph. MI: U.S.A.
5. Di Mattia, D.G., Amyotte, P.R., and Hamdullahpur, F. 1996. Fluidized bed drying of large particles. Transactions of the ASAE. 39: 1745-1750.
6. Giner, S.A., and De Michelis, A. 1988. Evaluation of the thermal efficiency of wheat drying in fluidized bed: Influence of air temperature and heat recovery. Journal of Agricultural Engineering Research, 41: 11-23
7. Kunii, D., and Levenspiel, O. 1991. Fluidization Engineering. Stoneham: Butterworth-Heinemann, U.S.A.
8. McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriott, P. 1985. Unit operations of chemical engineering, 4th Edition. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
9. Prasad, B.V.S., Chandra, P.K., and Bal, S. 1994. Drying parboiled rough rice in stationary, semi-fluidized and fluidized conditions. Transactions of the ASAE, 37(2): 589-594.
10. Rama Rao, V.V. 1974. Some studies on drying of parboiled paddy. Ph.D. thesis, Department of agricultural engineering, Indian Institute of Technology, Kharapur, India.
11. Rawal, S.R. 1978. Studies on performance evaluation of heated air paddy driers. M. Tech. Diss., Department of agricultural engineering, Indian Institute of Technology, Kharapur, India.
12. Schimdt, J.L., and Hukill, W.V. 1956. The effect of artificial drying on the yield of head rice and the germination of rice. Rice Journal, 59(13): 29-31.
13. Sutherland, J.W., and Ghaly, T.F. 1990. Rapid fluid bed drying of paddy rice in the humid tropics. Proceeding of ASEAN Seminar on Postharvest Technology. Brunei Darussalam. 19-30.
14. Treybal, R.E. 1980. Mass transfer operations, 3rd Edition. Tokyo: Mc Graw-Hill International Book Co.
15. Uckan, G., and Ulku, S. 1986. Drying of grains in a batch fluidized bed dryer. In Drying of Solids-Recent International Developments, ed. A. S. Majumdar. New Dehli, India: Wiley Eastern Ltd.

Study of rough rice drying process in fixed and fluidized bed conditions

M.H. Khoshtaghaza¹, M. Sadeghi² and R. Amirichayjan³

¹Associate Prof. of Agricultural machinery engineering Dept. of Tarbiat Modares University, ²Assistant Prof. of Farm machinery Dept., Isfahan University of Technology, ³Assistant Prof. Farm machinery Dept. Buali sina University

Abstract

Fluidized bed drying method is one of the most important new drying methods of agricultural materials. In this study the rough rice drying process by fixed and fluidized methods was compared based on thermal efficiency, drying rate and kernel fissuring percent. The experiments were conducted by a laboratory fluidized bed dryer with ability of the inlet air temperature and airflow rate control to operate in fixed and fluidized conditions. The rough rice samples were dried from 17.7 initial moisture content to 11% final moisture content (dry basis) at three temperatures of 40, 60 and 80°C. The air velocity in fixed, semi-fluidized and fluidized bed conditions was 0.1, 1.1 and 3.5 m/s, respectively. The thermal efficiency of dryer was calculated based on the ratio of thermal energy utilized for evaporating water from the drying product to thermal energy supplied to the drying air. The maximum and minimum thermal efficiency of 22.84 and 3.3% were belonged to the fixed bed condition at 80°C and the fluidized bed condition at 40°C, respectively. The fixed bed condition was determined as the main factor influencing kernels fissuring, so that the maximum drying time of 280 minutes and the maximum kernel fissuring of 78% were measured in this condition at 80°C. The minimum drying time of 40 minutes and the minimum kernel fissuring of 17% were belonged to the semi-fluidized bed condition at 80 and 40°C, respectively.

Keywords: Rough rice; Semi-fluidized; Thermal efficiency; Drying rate; Kernel fissuring