

ارزیابی فنی و راندمان دو نوع جمع‌کننده خورشیدی برای خشک کردن شلتوک در شرایط خوزستان

جعفر حبیبی اصل^{۱*} و حسن کاووسی بلوطکی^۲

۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران
۲- مربی پژوهش گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایذه، ایذه، ایران
تاریخ دریافت: ۹۶/۳/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۱۸

چکیده

استان خوزستان با تولید بیش از ۱۲۰ هزار تن برنج در سال، بین استان‌های ایران در مقام چهارم قرار دارد. خشک کردن برنج پس از برداشت، از این لحاظ لازم است که رطوبت آن بیش از حد مجاز در فرآوری یا برای انبارداری است. در بیشتر شالیکوبی‌های استان خوزستان، شلتوک برنج هنوز به روش سنتی با استفاده از خشک‌کن‌های بستر ثابت خشک می‌شود که نتیجه آن افزایش افت کمی و کیفی محصول و افزایش هزینه‌هاست. از این رو برای استفاده از مزایای انرژی خورشیدی در خشک کردن شلتوک در استان خوزستان، خشک‌کن خورشیدی ساخته و ارزیابی شد. متغیرهای اصلی در بررسی عملکرد خشک‌کن دو نوع صفحه جاذب (نوع شیاردار ساده و نوع شیاردار همراه با پوشال آهنی)، دو رقم برنج مرسوم در منطقه (شفق و عنبوری) و تراکم شلتوک در خشک‌کن در سه سطح (یک، دو و سه سینی) بود. رطوبت اولیه محصول در تیمارهای مختلف بین ۱۸ تا ۲۱/۵ درصد (بر پایه تر) تعیین گردید و تا رسیدن رطوبت نهایی به ۹/۸ درصد (بر پایه تر)، فرآیند ادامه یافت. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر رقم، نوع صفحه جاذب و تعداد سینی در خشک‌کن بر مدت زمان خشک شدن شلتوک در خشک‌کن خورشیدی و بر ظرفیت خشک‌کن در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. ولی راندمان خشک‌کن خورشیدی فقط تحت تأثیر نوع خشک‌کن (منظور نوع صفحه جاذب) در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کمترین و بیشترین مدت زمان مورد نیاز برای خشک شدن محصول در خشک‌کن با صفحه جاذب ساده با ۴ و ۶/۱ ساعت به ترتیب به تیمارهای رقم شفق در تراکم یک سینی و رقم عنبوری در تراکم سه سینی تعلق دارد. افزایش تراکم شلتوک در خشک‌کن از یک به دو و از دو به سه سینی، مدت زمان خشک شدن را به ترتیب ۱۶/۴ و ۱۷/۲ درصد افزایش داده است. زمان خشک شدن و رسیدن به رطوبت نهایی در رقم شفق نسبت به رقم عنبوری به‌طور متوسط ۱۲/۸ درصد کمتر بود. کمترین ظرفیت خشک‌کن، به مقدار ۰/۸ کیلوگرم بر ساعت، در رقم عنبوری تحت تراکم یک سینی و استفاده از صفحه جاذب معمولی دیده شد و بالاترین ظرفیت خشک‌کن، به مقدار ۲/۱ کیلوگرم بر ساعت، از تیمار رقم شفق تحت تراکم سه سینی و استفاده از صفحه جاذب با پوشال آهنی به‌دست آمد. تغییرات راندمان صفحه‌های جاذب معمولی و دارای پوشال آهنی به ترتیب بین ۵/۲ تا ۱۸/۴۷ درصد و ۵/۹ تا ۲۳/۶۶ درصد بود.

واژه‌های کلیدی

خشک‌کن خورشیدی، درصد شکستگی، راندمان خشک‌کن، صفحه جاذب

متر مربع در روز، یا ۶۵۷۰ مگاژول بر متر مربع در سال است. یکی از ساده‌ترین و رایج‌ترین راه‌های استفاده از انرژی خورشیدی، تبدیل آن به انرژی

مقدمه
میزان انرژی خورشیدی دریافتی در سطح افقی در ایران به‌طور متوسط برابر با ۱۸ مگاژول بر

نور مستقیم آفتاب است. بهای این خشک‌کن‌ها، نسبت به خشک‌کن‌های مکانیزه، بسیار کمتر است (Diamante & Munro, 1991; El-Sebaei *et al.*, 2002). ولی هنوز موانعی بر سر راه وجود دارد تا خشک‌کن خورشیدی یک تکنولوژی جهانی گردد. روی این موضوع در دهه گذشته تحقیقات زیادی شده است ولی تعدادی محدود خشک‌کن خورشیدی مناسب به صورت تجاری وجود دارد که بتوان آنها را برای کشاورزان یا کارگاه‌های کوچک در کشورهای در حال توسعه پیشنهاد داد. به علاوه، هنوز دانش کافی در زمینه راهکار مناسب چگونگی خشک کردن فرآورده‌های کشاورزی برای ایجاد اطمینان از داشتن محصولی با کیفیت بالا و کاهش تلفات پس از برداشت وجود ندارد (Esper & Muhlbauer, 1998).

انواع خشک‌کن‌های خورشیدی را محققان مختلف ارزیابی کرده‌اند که به برخی از آنها اشاره می‌شود. نتایج بررسی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی کابینتی همرفت اجباری برای خشک کردن انگور، تأثیر جریان هوای خشک‌کن و نحوه به کارگیری آن بر روند کاهش رطوبت و یکنواختی فرآیند خشک شدن محصول نشان داد که مدت زمان لازم برای خشک شدن محصول چهار روز و هر روز به مدت ۶ ساعت است (با میانگین شدت تابش خورشید ۸۷۰ وات بر متر مربع). همچنین مشخص شد که جریان هوا اثر معنی‌داری بر کاهش رطوبت محصول دارد (Dadashzadeh *et al.*, 2008).

در تحقیقی، زمردیان و همکاران (Zomorodian *et al.*, 2007) یک نوع خشک‌کن خورشیدی فعال را برای خشک کردن غلات طراحی و ارزیابی کردند. در این خشک‌کن جریان هوای گرم به صورت عرضی از لایه مواد خشک‌شونده عبور می‌کند که روی یک تسمه نقاله نیمه متحرک قرار دارد. نتایج آزمایش

گرمایی است که به سادگی و با تجهیزات کم‌هزینه عملی خواهد بود. از انرژی گرمایی تولید شده با تابش خورشید می‌توان برای گرم کردن آب مصرفی و گرم کردن محیط خانه و خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی از جمله شلتوک استفاده کرد (Hajsaghati, 2001).

خشک کردن روشی است مرسوم برای نگهداری مواد غذایی و بسیاری از فرآورده‌های غذایی که اگر به درستی اجرا نشود ممکن است آثاری نامطلوب بر کیفیت و کمیت محصول نهایی ایجاد کند. فرآیند خشک کردن، نسبت به دیگر فرایندها، نیاز به مقدار قابل توجهی انرژی برای تولید محصولی یکنواخت از لحاظ رطوبتی دارد (Okos *et al.*, 1992). روش‌های مختلفی برای خشک کردن محصولات کشاورزی وجود دارد که هر یک مستلزم مصرف انرژی است. منبع تأمین انرژی در خشک‌کن‌های مرسوم سوخت‌های فسیلی هستند. محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی، هزینه‌بر بودن تولید آنها و آلودگی‌های زیست محیطی باعث ایجاد نیاز به تحقیق بیشتر برای استفاده از انرژی‌های قابل بازیافت شده است. انرژی خورشیدی فراوان، پایان‌ناپذیر، پاک و یکی از منابع سرشار انرژی تجدیدپذیر در جهان است (Basunai & Abe, 2001; Banerjee, 2005).

توجیه استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی آن است که آنها محصولات را با سرعت مناسب، یکنواخت و بهداشتی خشک می‌کنند که مزیت مهمی در صنعت خشک کردن به حساب می‌آید. محصولات در زمان خشک شدن از باران، گرد و خاک، حشرات و جانوران به طور کامل محافظت می‌شوند. سرعت خشک شدن در این نوع خشک‌کن‌ها بیشتر از سرعت خشک شدن در معرض

آزمایش‌ها نشان داد که انرژی تابشی در صفحه جمع‌کننده، انرژی حرارتی جذب شده در جمع‌کننده و انرژی لازم برای خشک شدن محصول رابطه‌ای مستقیم و خطی با دما دارند. حداکثر و حداقل بازده انرژی در آزمایش‌ها به ترتیب ۴۹ و ۱۴/۷ درصد بود (Bagheri *et al.*, 2009).

تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که خشک کردن با خشک‌کن‌های خورشیدی کم هزینه و با صرفه است و محصول خشک شده با این روش کیفیت مناسب خواهد داشت و بهداشتی است. در حال حاضر استان خوزستان با تولید بیش از ۱۲۰ هزار تن برنج در سال، از این لحاظ در مقام چهارم کشور قرار دارد. خشک کردن برنج پس از برداشت از این رو لازم است که رطوبت آن بیش از حدی است که در فرآوری یا انبارداری به آن نیاز باشد. بنابراین در تحقیق حاضر، امکان‌سنجی استفاده از خشک‌کن خورشیدی از نظر تنش‌های وارد شده به دانه برنج، با اندازه‌گیری درصد شکست و نیز درجه سفیدشدگی دانه برنج بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات خشک‌کن خورشیدی مورد استفاده

در پژوهش حاضر، یک خشک‌کن خورشیدی کابینتی با محفظه خشک‌کن به ابعاد ۸۰×۸۰×۱۰۰ سانتی‌متر و کلکتور شیاری به ابعاد ۱×۲ متر ساخته و در استان خوزستان ارزیابی گردید (Habibi-Asl, 2016) (شکل ۱). صفحه‌های جاذب دو نوع در نظر گرفته شدند: شیاردار ساده (صفحه جاذب A) (شکل ۲) و شیاردار حاوی پوشال فلزی (صفحه جاذب B) (شکل ۳). شیارها در هر دو صفحه جاذب مثلی متساوی‌الساقین هستند و طول هر ضلع آنها ۷ سانتی‌متر است. از پوشال آهنی در صفحه جاذب

روی برنج نشان داد که حداکثر راندمان سیستم (با میانگین دمای ۵۵ درجه سلسیوس) ۲۱/۲۴ درصد است. حداکثر ظرفیت این خشک‌کن، ۱۳۲ کیلوگرم برنج با رطوبت اولیه ۲۷ درصد است که رطوبت پس از ۳ ساعت به ۱۳ درصد کاهش یابد.

با استفاده از یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی طبقه‌ای از نوع مختلط، سبزی شوید در شرایط همرفت طبیعی و همرفت اجباری و در سه عمق مختلف ۳، ۶ و ۱۰ سانتی‌متر خشک گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که در تراکم کمتر از ۶ سانتی‌متر، بین حالت‌های همرفت طبیعی و اجباری تفاوت آماری معنی‌داری وجود ندارد در حالی که برای تراکم‌های ۶ و ۱۰ سانتی‌متر سرعت خشک شدن در سیستم همرفت اجباری بیشتر از سرعت خشک شدن در حالت همرفت طبیعی است. در بررسی دمای کاری دستگاه خشک‌کن نیز مشاهده شد که در شرایط همرفت طبیعی، دمای نقاط مختلف دستگاه به دلیل افت فشار استاتیکی بالاتر از شرایط همرفت اجباری است (Almasi *et al.*, 2003).

در تحقیقی، یک خشک‌کن خورشیدی که می‌توانست دمای ۵۰ تا ۵۵ درجه سلسیوس را تأمین کند، ساخته و ارزیابی شد. آنالیز کیفی روی انگور خشک شده با این خشک‌کن نشان داد که خشک کردن سنتی در سایه و در معرض تابش خورشید به ترتیب به ۱۵ و ۷ روز نیاز دارد در صورتی که استفاده از خشک‌کن خورشیدی در همان شرایط تنها ۴ روز به طول می‌انجامد و کیفیت محصول نیز بهتر است (Pangavhane *et al.*, 2002). پارامترهای موثر بر خشک شدن نعنا در لایه‌های به ضخامت ۵ سانتی‌متر، در یک خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری در یک تحقیق ارزیابی شد. نتایج

گردید (شکل ۴). این دستگاه از دو قسمت تشکیل شده است، یکی دستگاه کنترل مرکزی و دیگری اندازه‌گیرها. وظیفه دستگاه کنترل مرکزی راه‌اندازی و کنترل اندازه‌گیرها و ثبت اطلاعات اندازه‌گیری شده با آنهاست. اندازه‌گیرها شامل حسگرهای دیجیتال SHT15 مدل ساخت کشور سوئیس هستند که با دقتی نسبتاً بالا دما و رطوبت محیط را اندازه‌گیری می‌کنند. این حسگرها دما را در محدوده ۴۰ تا ۱۲۳ درجه سلسیوس با دقت ± 0.1 درجه سلسیوس و رطوبت را در محدوده صفر تا ۱۰۰ درصد با دقت ± 0.3 درصد اندازه‌گیری می‌کنند. حسگرها با دریافت فرمان از دستگاه مرکزی، دما و رطوبت را اندازه‌گیری و به دستگاه مرکزی می‌فرستند. تعداد اندازه‌گیرها محدودیت ندارد، می‌توان آنها را به تعداد مورد نیاز به دستگاه کنترل مرکزی وصل کرد. در خشک‌کن ساخته شده، ۶ حسگر دما و رطوبت در نقاط مختلف خشک‌کن از جمله ورودی و خروجی کلکتور، اتاق خشک‌کنی و خروجی خشک‌کن نصب گردید. شکل ۵ شماتیک خشک‌کن خورشیدی و نحوه عبور جریان هوا و محل حسگرهای نصب شده را نشان می‌دهد.

با این فرض استفاده شد که می‌تواند باعث افزایش میزان جذب انرژی خورشیدی و در نتیجه کاهش زمان خشک‌کردن محصول گردد. پوشال آهنی از ضایعات تراشکاری قطعات آهن و فولاد تهیه شد. زاویه استقرار و جهت استقرار صفحه جذب نیز با توجه به عرض جغرافیایی منطقه و فصل خشک کردن تعیین گردید. آزمایش‌ها در شهر اهواز (موقعیت جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی) و در فاصله زمانی ۲۰ آبان تا ۱۵ آذر اجرا شد و از این‌رو برای جذب بیشینه انرژی خورشیدی، زاویه استقرار صفحه جذب روی ۴۵ درجه تنظیم شد. در این زاویه (با توجه به تاریخ آزمایش) سطح صفحه جذب عمود بر جهت تابش نور خورشید قرار می‌گیرد (Pangavhane *et al.*, 2002; Fudholi *et al.*, 2010)

شلتوک مرطوب جهت خشک شدن روی سینی‌های مشبک در سه طبقه پهن گردید. برای ایجاد همرفت اجباری، یک دمنده با دبی ۰/۰۰۶ متر مکعب بر ثانیه در قسمت ورودی صفحه جذب تعبیه شد. برای اندازه‌گیری و ثبت دما و رطوبت هوا در قسمت‌های مختلف خشک‌کن، دستگاه داده‌بردار دیجیتال ساخته و روی خشک‌کن خورشیدی نصب



شکل ۲- صفحه جذب شیاردار ساده (A)



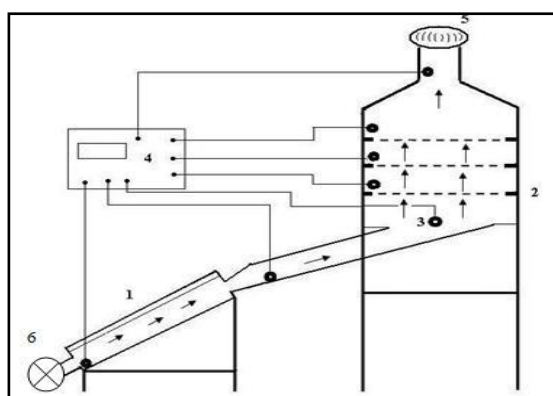
شکل ۱- نمای روبرو از خشک‌کن خورشیدی مورد آزمایش



شکل ۴- دستگاه داده بردار دیجیتال دما و رطوبت



شکل ۳- صفحه جاذب شیاردار با پوشال فلزی



شکل ۵- نمای شماتیک قسمت‌های مختلف خشک‌کن خورشیدی

(۱) صفحه جاذب خورشیدی، (۲) محفظه خشک‌کنی، (۳) حسگرهای دما و رطوبت، (۴) دستگاه داده‌بردار دیجیتال، (۵) هواکش طبیعی و (۶) فن دمنده برای حالت همرفت اجباری

این آزمایش اندازه‌گیری و ارزیابی شدند، شامل کل زمان خشک شدن و روند تغییر رطوبت محصول طی زمان خشک شدن، ظرفیت خشک‌کن و راندمان خشک‌کن بودند.

ارقام برنج شفق و عنبروری به این دلیل انتخاب شدند که از لحاظ قطر و طول دانه متفاوت‌اند. زیرا سرعت از دست دادن رطوبت تابعی از خواص ظاهری دانه نیز هست. متغیر تراکم شلتوک در محفظه خشک‌کن برای بررسی ظرفیت خشک‌کن انتخاب گردید. هر سینی شامل یک توری فلزی با سوراخ‌هایی به ابعاد $1/5 \times 1/5$ میلی‌متر است که یک لایه نازک از شلتوک برنج به ضخامت $1/6$

ارزیابی خشک‌کردن برنج با خشک‌کن خورشیدی

برای ارزیابی عملکرد فنی دستگاه خشک‌کن خورشیدی ساخته شده، از روش آماری آزمایش فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی با $12 (2 \times 2 \times 3)$ تیمار در سه تکرار استفاده شد. سطوح اصلی تیمارهای آزمایشی (متغیرهای مستقل) شامل (۱) صفحه جاذب در دو سطح شیار دار ساده (A) و شیاردار پوشیده شده با پوشال آهنی (B)، (۲) رقم برنج مرسوم در منطقه در دو سطح شفق و عنبروری و (۳) تراکم شلتوک در محفظه خشک‌کن در سه سطح یک، دو و سه سینی بودند. پارامترهای وابسته که در

رطوبت نمونه‌ها عملی شد. پس از پایان گرفتن همه مراحل آزمایشی و جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه واریانس روی شاخص‌های مورد نظر در هر آزمایش به صورت جداگانه اجرا و میانگین صفات به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن با یکدیگر مقایسه شد.

نحوه تعیین پارامترهای مورد ارزیابی در این تحقیق به شرح زیر بوده است:

روند تغییر رطوبت طی زمان خشک شدن:

نمونه‌برداری‌ها برای اندازه‌گیری رطوبت در ابتدای هر آزمایش، به دلیل سرعت بالای رطوبت‌دهی محصول، هر ۳۰ دقیقه و سپس هر یک ساعت یک‌بار تکرار و میزان رطوبت نمونه‌ها با دستگاه رطوبت‌سنج دانه، مدل GMK-303RS، اندازه‌گیری شد (شکل ۶). منحنی روند تغییرات رطوبتی محصول خشک‌شونده برای روش‌های مختلف خشک کردن معادل با تغییرات وزن نمونه طی فرآیند به دست آمد (Esper & Muhlbauer, 1998).

میلی‌متر روی آن پهن می‌شود و در معرض هوای خشک‌کننده قرار می‌گیرد. رطوبت اولیه محصول در تیمارهای مختلف بین ۱۸ تا ۲۱/۵ درصد (بر پایه تر) اندازه‌گیری شد و فرآیند خشک شدن تا رسیدن رطوبت نهایی به ۹/۸ درصد (بر پایه تر) ادامه یافت.

برای بررسی پارامترهای کیفی برنج، مانند درصد شکستگی و درجه سفیدشدگی، نیز از روش آماری آزمایش فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی با ۱۲ تیمار، (۳×۲×۲)، در سه تکرار استفاده شد. ولی به منظور مقایسه بین میانگین تیمارهای خشک‌کن خورشیدی و خشک‌کن بستر ثابت (مرسوم منطقه) از لحاظ درصد شکستگی و درجه سفیدشدگی برنج، از آزمون t استفاده گردید. در کلیه تیمارها، محصول خشک‌شونده تا زمانی خشک شد که رطوبت درونی آن به نقطه تعادل رطوبتی^۱ در شرایط دمایی و رطوبتی خشک‌کن برسد. این کار با نمونه‌گیری متوالی از محصول خشک‌شونده و تعیین درصد



شکل ۶- دستگاه رطوبت‌سنج دانه مدل GMK-303RS

شرایط دمایی یکسان از رابطه ۱ محاسبه گردید (Gazor, 2011):

$$\eta_d = \frac{mC_p(T_o - T_i)}{A_c I_T + Q_f} \quad (1)$$

ظرفیت خشک‌کن: ظرفیت خشک‌کن بر اساس جرم شلتوک خشک شده در واحد زمان (کیلوگرم بر ساعت) محاسبه گردید.

راندمان خشک‌کن: راندمان خشک‌کن برای صفحات جاذب مورد استفاده در تحقیق حاضر و در

۱- نقطه تعادل رطوبتی نقطه‌ای است که رطوبت موجود در ماده غذایی با مقدار رطوبت هوای اطراف خود در حال تعادل باشد. در چنین شرایطی هیچگونه تبادل آبی بین ماده غذایی و محیط اطراف آن رخ نخواهد داد (Hajsaghati, 2001).

$$D_m = \frac{W_b - W_w}{W_b} \quad (2)$$

که در آن،
 D_m = درجه سفیدشدگی برنج؛ W_b = وزن هزار دانه
 برنج قهوه‌ای (گرم)؛ و W_w = وزن هزار دانه برنج
 سفید (گرم).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثر رقم، نوع صفحه جاذب و تعداد سینی در خشک‌کن بر مدت زمان خشک شدن شلتوک در خشک‌کن خورشیدی و ظرفیت خشک‌کن در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. ولی راندمان خشک‌کن خورشیدی فقط تحت تأثیر نوع خشک‌کن (منظور نوع صفحه جاذب) در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است. اثر متقابل تیمارها بر هیچ‌یک از فاکتورهای مورد بررسی معنی‌دار نیست (جدول ۱). جدول ۲ نیز مقایسه و گروه‌بندی میانگین شاخص‌های فنی را در سطوح مختلف تیمارهای خشک‌کن خورشیدی نشان می‌دهد که در زیر به آن پرداخته می‌شود.

که در آن،
 m = دبی جرمی هوا (کیلوگرم بر ثانیه)؛ C_p = گرمای ویژه هوا (کیلوژول بر کیلوگرم.درجه سلسیوس)؛
 T_o = دمای خروجی از خشک‌کن (درجه سلسیوس)؛
 T_i = دمای ورودی به خشک‌کن (درجه سلسیوس)؛
 A_c = مساحت کلکتور (متر مربع)؛ I_T = شار تابشی خورشید در منطقه (وات بر متر مربع)؛ و Q_f = توان الکتریکی فن (وات).

درصد شکستگی برنج: از نمونه‌های ۱۵۰ گرمی که مخلوطی از برنج سالم و شکسته است، دانه‌های بزرگتر و کوچکتر از سه چهارم طول یک دانه برنج سفید کامل جدا گردید. نسبت وزن برنج‌های بزرگتر و کوچکتر از سه چهارم طول یک دانه به کل وزن نمونه به ترتیب درصد برنج سفید سالم و درصد شکستگی برنج در نظر گرفته شد (Heidari-Soltanabadi et al., 2010).

درجه سفیدشدگی برنج: برای اندازه‌گیری این پارامتر وزن هزار دانه برنج قهوه‌ای سالم و وزن هزار دانه برنج سفید سالم تعیین و با استفاده از رابطه ۲، درجه سفیدشدگی به دست آمد (Heidariesoltanabadi et al., 2010).

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف تیمارهای خشک کردن خورشیدی بر فاکتورهای فنی

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)	
		زمان خشک شدن	ظرفیت خشک‌کن
نوع خشک‌کن (A)	۱	۲/۷۲**	۰/۲۴**
نوع رقم (B)	۱	۴/۱۹**	۰/۲۷**
AB	۱	۰/۱۳ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}
تراکم شلتوک (C)	۲	۱۰/۰۷**	۲/۷۵**
AC	۲	۰/۲۲ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}
BC	۲	۰/۰۵ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}
ABC	۲	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}
خطا	۲۴	۱/۵۰	۰/۰۰۵
ضریب تغییرات (CV)		%۵/۲۹	%۴/۹۹
			%۴/۸۳

* اختلاف تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد و ^{ns}: نبود تفاوت معنی‌دار

جدول ۲- مقایسه و گروه‌بندی میانگین شاخص‌های فنی در سطوح مختلف تیمارهای خشک‌کن خورشیدی

میانگین شاخص‌ها و مقایسه آنها با آزمون دانکن (در سطح احتمال ۵٪)*				
تیمار	زمان خشک شدن (ساعت)	ظرفیت خشک‌کن (کیلوگرم بر گرم)	راندمان خشک‌کن (درصد)	
خشک‌کن خورشیدی با صفحه جاذب A	۵/۰۱a	۱/۳۷b	۱۸/۴۷b	نوع خشک‌کن
خشک‌کن خورشیدی با صفحه جاذب B	۴/۴۵b	۱/۵۳a	۲۳/۶۶a	
شفق	۴/۳۹b	۱/۵۴a	۲۰/۴۱a	رقم
عنبروری	۵/۰۷a	۱/۳۶b	۲۰/۷۳a	
یک سینی	۳/۸۱c	۰/۹۵c	۲۰/۴۷a	تراکم شلتوک در خشک‌کن
دو سینی	۴/۷۴b	۱/۵۱b	۲۰/۶۱a	
سه سینی	۵/۶۴a	۱/۹۰a	۲۰/۶۳a	

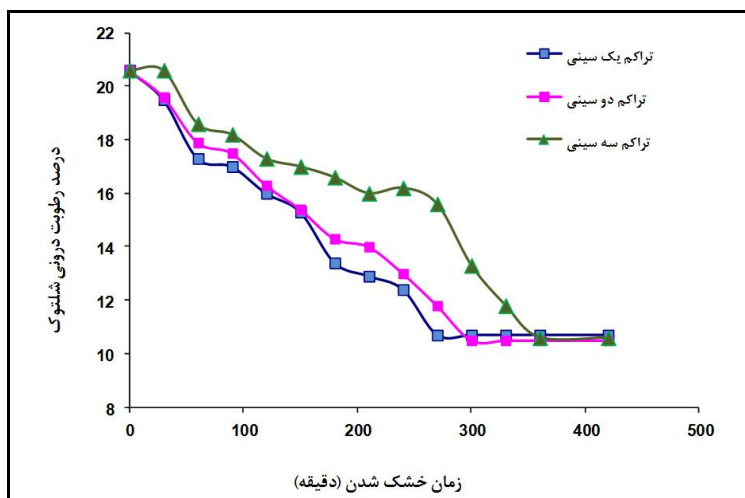
* : در هر ستون، تفاوت بین میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند معنی‌دار نیست.

روند تغییر رطوبت محصول در استفاده از صفحه جاذب معمولی (A)

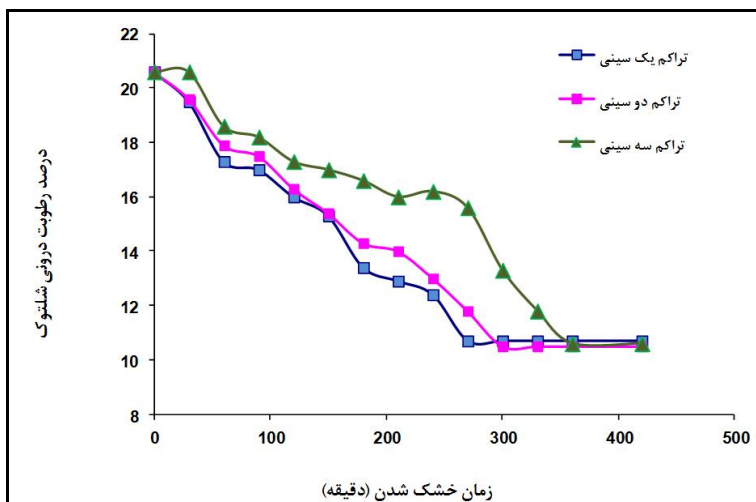
مدت زمان مورد نیاز برای خشک شدن شلتوک در خشک‌کن خورشیدی با صفحه جاذب A، بسته به تعداد سینی‌ها، ۴ تا ۶/۱ ساعت دیده شده که میانگین آن ۵/۰۱ ساعت است (جدول ۲). شکل‌های ۷ و ۸ روند تغییر رطوبت شلتوک در خشک‌کن با صفحه جاذب ساده را در سینی‌های مختلف به ترتیب برای رقم عنبروری و رقم شفق نشان می‌دهد. در این منحنی‌ها دیده می‌شود که رطوبت محصول با روندی نزولی نسبت به زمان خشک شدن تغییر می‌کند. نتیجه به دست آمده با نتایج تحقیقات محققان دیگر روی محصولات مشابه مطابقت دارد (Moradi & Zomorodian, 2008; Ethmane et al., 2009).

شیب منحنی تراکم با یک سینی کمی بیشتر از شیب منحنی تراکم با دو و سه سینی است (شکل‌های ۷ و ۸). دلیل این موضوع می‌تواند جریان سریع‌تر هوا از میان توده شلتوک در حالت یک سینی باشد. مقایسه روند تغییرات رطوبت نشان

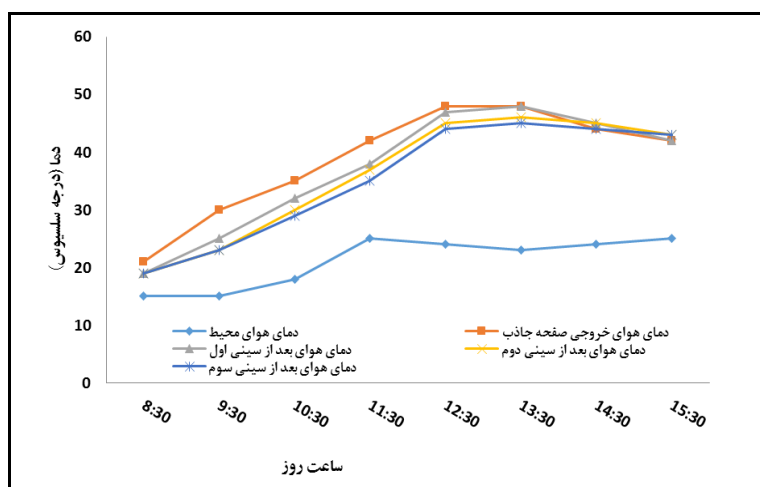
می‌دهد که هرچه تراکم محصول بیشتر شود، به دلیل کندتر شدن جریان هوا در خشک‌کن، رسیدن محصول به رطوبت نهایی کندتر خواهد بود. کندتر شدن جریان هوا باعث تجمع رطوبت در محفظه خشک‌کن می‌شود و روند از دست دادن رطوبت محصول را کاهش می‌دهد (Almasi et al., 2003). مشاهدات اندازه‌گیری دما و رطوبت هوای خشک‌کننده در نقاط مختلف خشک‌کن نیز مؤید این مطلب است (شکل‌های ۹ و ۱۰). مقایسه بین ارقام شلتوک خشک شده نشان می‌دهد که مدت زمان خشک شدن و رسیدن به رطوبت نهایی در رقم شفق، نسبت به رقم عنبروری، به‌طور متوسط ۱۲/۸ درصد کمتر است. قطر کمتر و نسبت سطح به حجم بیشتر در رقم شفق، نسبت به رقم عنبروری، باعث شده است که مدت زمان خشک شدن رقم شفق کمتر از مدت زمان خشک شدن عنبروری باشد. این عامل همچنین باعث شده است که رطوبت اولیه در زمان برداشت، در رقم شفق کمی کمتر از رطوبت اولیه در زمان برداشت در رقم عنبروری باشد.



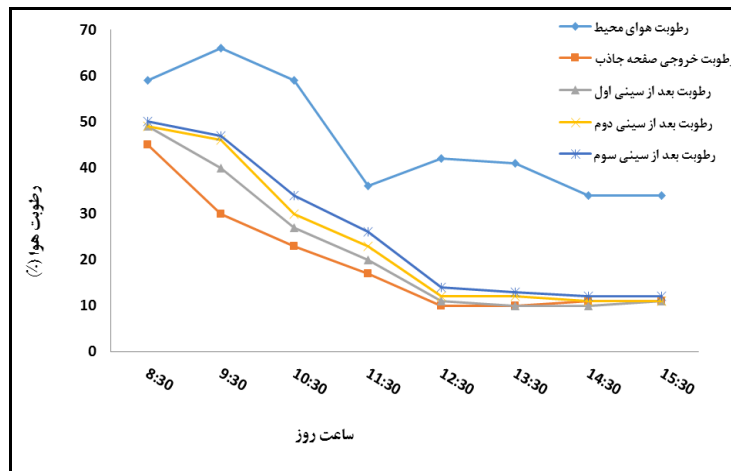
شکل ۷- تغییر رطوبت شلتوک رقم عنبری در تراکم‌های مختلف با صفحه جاذب A



شکل ۸- تغییر رطوبت شلتوک رقم شفق در تراکم‌های مختلف با صفحه جاذب A



شکل ۹- دمای هوای نقاط مختلف خشک‌کن با صفحه جاذب A در ساعات مختلف روز

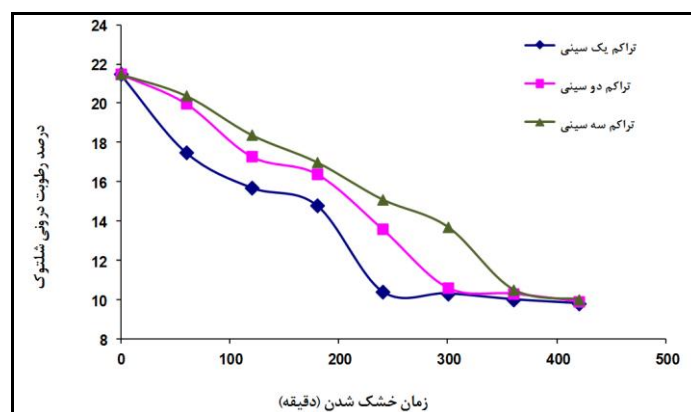


شکل ۱۰- رطوبت هوای نقاط مختلف خشک‌کن با صفحه جاذب A در ساعات مختلف روز

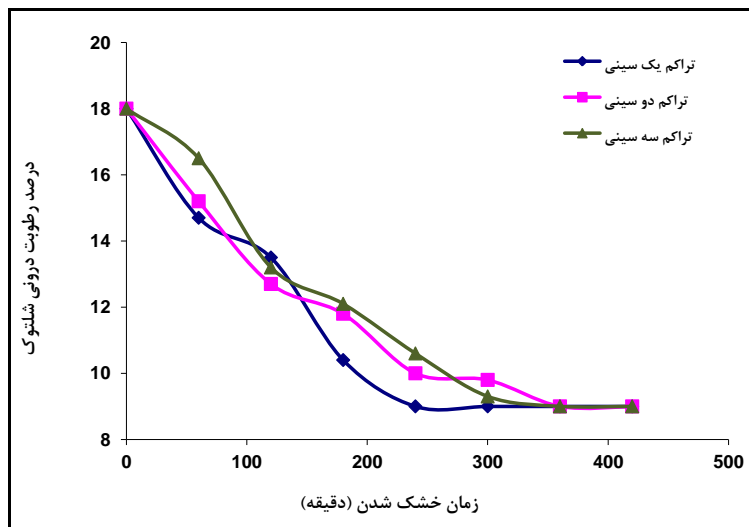
می‌شود که رطوبت محصول با روندی نزولی نسبت به مدت زمان خشک شدن تغییر می‌کند. مقایسه میانگین زمان‌های خشک شدن شلتوک در خشک‌کن با صفحه جاذب B نیز نشان می‌دهد که با افزایش تراکم شلتوک در خشک‌کن از یک به دو سینی و از دو به سه سینی، مدت زمان خشک شدن به ترتیب ۳۲ و ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب تغییرات ساعتی دما و رطوبت هوای خشک‌کننده در نقاط مختلف خشک‌کن با صفحه جاذب B را نشان می‌دهند.

روند تغییر رطوبت محصول در استفاده از صفحه جاذب با پوشال فلزی (B)

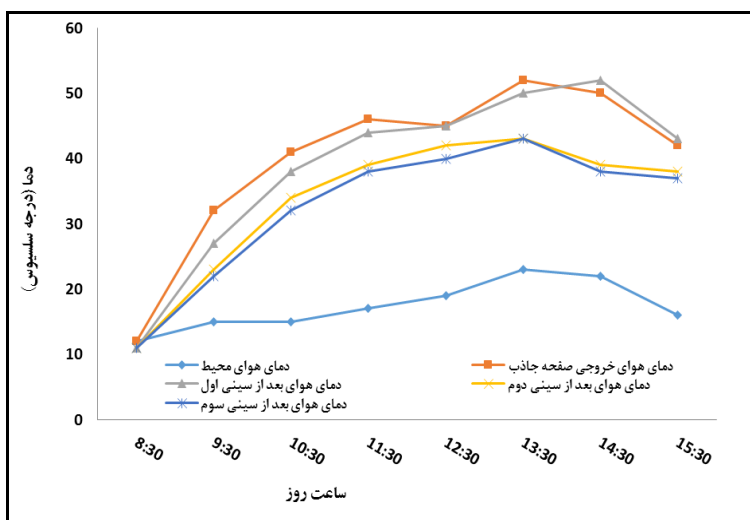
نتایج آزمایش نشان داده است زمان مورد نیاز برای خشک شدن شلتوک در خشک‌کن خورشیدی با صفحه جاذب B در تیمارهای مختلف تراکم، ۳/۱ تا ۵/۹ ساعت و میانگین و ۴/۴۵ ساعت است (جدول ۲). شکل‌های ۱۱ و ۱۲ روند تغییر رطوبت شلتوک در خشک‌کن با صفحه جاذب B را در سینی‌های مختلف به ترتیب برای رقم عنبوری و رقم شفق نشان می‌دهند. در اینجا نیز مانند صفحه جاذب A دیده



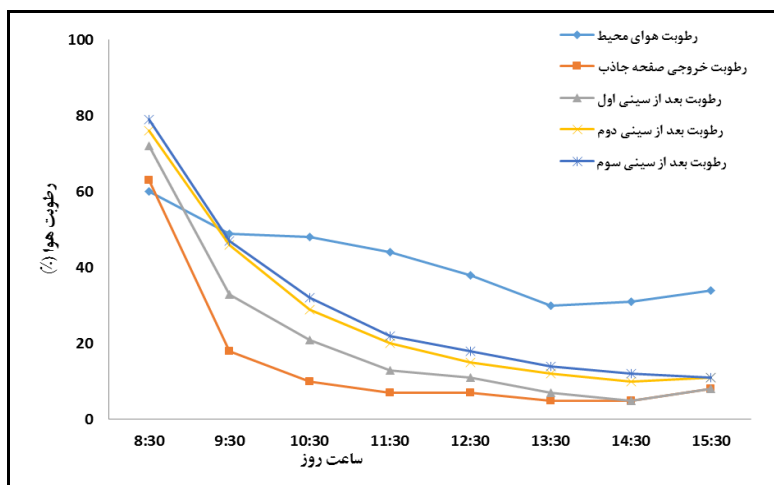
شکل ۱۱- تغییر رطوبت شلتوک رقم عنبوری در تراکم‌های مختلف با صفحه جاذب B



شکل ۱۲- تغییر رطوبت شلتوک رقم شفق در تراکم‌های مختلف با صفحه جاذب B



شکل ۱۳- دمای هوای نقاط مختلف خشک‌کن با صفحه جاذب B در ساعات مختلف روز

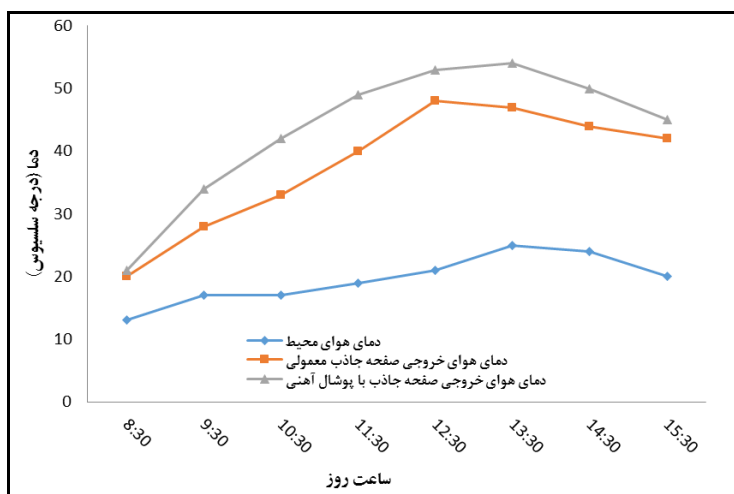


شکل ۱۴- رطوبت هوای نقاط مختلف خشک‌کن با صفحه جاذب B در ساعات مختلف روز

مقایسه صفحه‌های جاذب A و B از نظر روند تغییر رطوبت محصول

مقایسه میانگین داده‌ها نشان می‌دهد که مدت زمان خشک شدن شلتوک در صفحه جاذب B، نسبت به صفحه جاذب A، در کلیه تیمارها کاهش پیدا کرده است (جدول ۲). بنابر این، به‌درستی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از صفحه جاذب حاوی پوشال فلزی توانسته گرمای بیشتری از تابش خورشید را دریافت و خشک کردن را سریع‌تر

کند. وجود پوشال فلزی در صفحه جاذب سطح جذب انرژی خورشیدی را افزایش می‌دهد و بنابراین هوای خشک‌کننده محصول گرم‌تر خواهد بود. اندازه‌گیری دمای هوای خروجی از صفحات جاذب در خلال خشک شدن شلتوک نیز نشان می‌دهد که دمای هوای خشک‌کننده در صفحه جاذب B به‌طور میانگین ۷ درجه سلسیوس بیش از دمای هوای خشک‌کننده در صفحه جاذب A است (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- روند تغییرات ساعتی دمای هوای خروجی از صفحات جاذب مورد استفاده در تحقیق

مدت زمان رسیدن به رطوبت نهایی شلتوک در خشک‌کن با صفحه جاذب B، در مقایسه با صفحه جاذب A، به‌طور متوسط ۱۱ درصد کاهش نشان می‌دهد. کاهش این مدت زمان در تراکم‌های یک، دو و سه سینی به ترتیب ۲۰، ۹ و ۶ درصد است. با افزایش تعداد سینی‌ها در خشک‌کن، تفاوت بین صفحه‌های جاذب A و B کمتر می‌شود. این کاهش اختلاف در رسیدن به رطوبت نهایی، بیشتر مربوط به سینی‌های بالاتر به‌ویژه در مراحل اولیه خشک کردن است، زیرا بیشتر انرژی گرمایی هوای ورودی به خشک‌کن را ابتدا برنج‌هایی

می‌گیرند که در سینی‌های پایین‌تر هستند و در نتیجه هوای با دمای پایین‌تر به سینی‌های بالاتر می‌رود.

افزایش تعداد سینی خشک‌کن، یا همان تراکم شلتوک در خشک‌کن، به‌طور معنی‌داری باعث افزایش مدت زمان خشک شدن شلتوک و ظرفیت خشک‌کن گردید (جدول ۲). افزایش تعداد سینی‌ها در خشک‌کن باعث افت فشار و کندتر شدن جریان هوای خشک‌کننده می‌شود و در نتیجه مدت زمان خشک شدن شلتوک با افزایش تعداد سینی‌ها طولانی‌تر خواهد شد.

ظرفیت خشک‌کن

معنی‌دار دارد (جدول ۱). شکل ۱۶ منحنی روند تغییرات راندمان صفحه‌های جاذب در طول روز را نشان می‌دهد. مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که حداکثر راندمان خشک‌کن با صفحه جاذب B، به‌طور متوسط ۱۰ درصد بیش از حداکثر راندمان خشک‌کن با صفحه جاذب A است (جدول ۲). بیشترین اختلاف راندمان صفحه‌های جاذب در ساعت ۱۱ تا ۱۳، یعنی به هنگام حداکثر تابش خورشید رخ داده است. تغییرات راندمان صفحه‌های جاذب معمولی و دارای پوشال آهنی به ترتیب بین ۵/۲ تا ۱۸/۴۷ درصد و ۵/۹ تا ۲۳/۶۶ درصد است. استفاده از مواد جاذب به‌میزان بیشتر و افزایش سطح جذب انرژی در صفحه جاذب با پوشال آهنی، ظرفیت جذب انرژی خورشیدی را افزایش داده است؛ این افزایش ظرفیت در ساعات میانی روز نمایان‌تر است.

بررسی پارامترهای کمی و کیفی برنج سفید

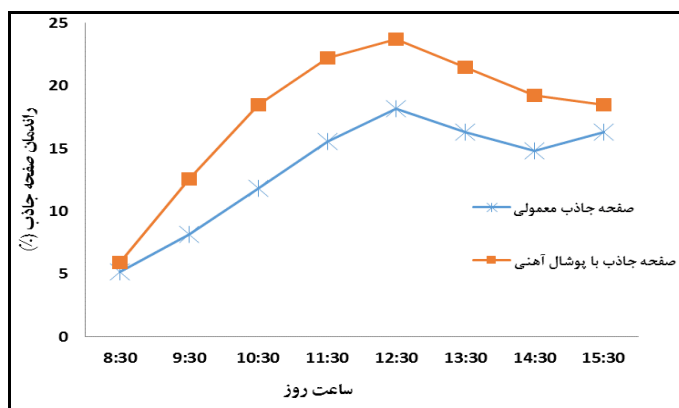
نتایج تجزیه واریانس پارامترهای کمی و کیفی شلتوک خشک شده در خشک‌کن خورشیدی با دو صفحه جاذب A و B و نیز در خشک‌کن بستر ثابت در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که بین این سیستم‌ها از لحاظ برخی پارامترهای فنی تفاوت معنی‌دار وجود دارد که اغلب به رقم شلتوک و تراکم محصول خشک‌شونده ارتباط دارد. جدول ۴ نیز مقایسه میانگین داده‌های مربوط به پارامترهای مورد ارزیابی را نشان می‌دهد.

پیشتر اشاره شد که ظرفیت خشک‌کن خورشیدی تحت تأثیر نوع صفحه جاذب، رقم شلتوک و تعداد سینی معنی‌دار شده است (جدول ۱). مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت خشک‌کن با استفاده از صفحه جاذب با پوشال آهنی به دلیل کاهش مدت زمان خشک شدن شلتوک، نسبت به صفحه جاذب معمولی، حدود ۱۲ درصد افزایش یافته است. رقم شفق نیز به دلیل سریع‌تر خشک شدن نسبت به رقم عنبوری، ظرفیت خشک‌کن را به مقدار ۱۳ درصد افزایش داده است. افزایش تعداد سینی نیز به‌طور معنی‌دار و قابل توجهی باعث افزایش ظرفیت خشک‌کن شده است. با افزایش تعداد سینی‌ها از یک به دو و از دو به سه، ظرفیت خشک‌کن به ترتیب ۵۶ و ۲۶ درصد بیشتر شده است (جدول ۲).

مقایسه کل میانگین داده‌ها نشان می‌دهد که کمترین ظرفیت خشک‌کن، به مقدار ۰/۸ کیلوگرم بر ساعت، در رقم عنبوری با تراکم یک سینی و به‌کارگیری صفحه جاذب معمولی دیده می‌شود. بالاترین ظرفیت خشک‌کن، به مقدار یک‌دوم کیلوگرم بر ساعت، در تیمار رقم شفق با تراکم سه سینی و به‌کارگیری صفحه جاذب با پوشال آهنی به‌دست آمده است.

راندمان خشک‌کن

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که فقط نوع صفحه جاذب بر راندمان خشک‌کن تأثیر



شکل ۱۶- روند تغییرات راندمان صفحه جاذب‌های A و B در ساعات مختلف روز

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف تیمارهای خشک کردن خورشیدی بر فاکتورهای کیفی ارقام برنج

میانگین مربعات (MS)				درجه آزادی	منبع تغییرات
درجه سفیدشدگی برنج	درصد خرد شدگی برنج سفید	درصد برنج سفید	درصد برنج قهوه‌ای		
۰/۰۰۲**	۱۴/۳۶**	۲/۲۸**	۰/۰۴ ^{ns}	۱	نوع خشک کن (A)
۰/۰۳۶*	۱۸۲/۷۰ ^{ns}	۲۲۹/۸۳ ^{ns}	۱/۱۱ ^{ns}	۱	نوع رقم (B)
۰/۰۰۴**	۱۰۰/۹۴ ^{ns}	۶/۳۶ ^{ns}	۱/۳۸ ^{ns}	۱	AB
۰/۰۲۱**	۳۱۹/۵۰**	۱/۱۱ ^{ns}	۲/۵۱ ^{ns}	۲	تراکم شلتوک (C)
۰/۰۰۲ ^{ns}	۱۹/۲۵ ^{ns}	۰/۳۲ ^{ns}	۱/۳۲ ^{ns}	۲	AC
۰/۰۰۱ ^{ns}	۷/۹۲ ^{ns}	۱/۵۷ ^{ns}	۱۱/۰۷ ^{ns}	۲	BC
۰/۰۰۱ ^{ns}	۱۱/۳۱ ^{ns}	۰/۳۸ ^{ns}	۲/۹۵ ^{ns}	۲	ABC
۰/۰۰۱	۵/۸۵	۰/۴۵	۲/۹۷	۲۲	خطا
٪۳/۰۹	٪۴/۵۰	٪۱/۰۲	٪۲/۱۲		ضریب تغییرات (CV)

*: اختلاف تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد و ns: نبود تفاوت معنی‌دار

جدول ۴- مقایسه و گروه‌بندی میانگین شاخص‌های کیفی برنج در سطوح مختلف تیمارهای خشک کن خورشیدی

میانگین شاخص‌ها و مقایسه آنها با آزمون دانکن (در سطح احتمال ٪۵)				تیمار
درصد برنج قهوه‌ای	درصد برنج سفید	درصد خرد شدگی برنج سفید	درجه سفیدشدگی برنج (درصد)	
۸۱/۳ ^a	۶۶/۲ ^a	۲۴/۱ ^a	۶۱/۷ ^a	خشک کن خورشیدی با صفحه جاذب A
۸۱/۴ ^a	۶۵/۷ ^a	۲۵/۳ ^a	۶۳/۱ ^a	خشک کن خورشیدی با صفحه جاذب B
۸۱/۲ ^a	۶۳/۵ ^b	۲۶/۳ ^a	۶۵/۵ ^a	رقم شفق
۸۱/۵ ^a	۶۸/۵ ^a	۲۴/۵ ^b	۵۹/۲ ^b	رقم عنبروری
۸۱/۶ ^a	۶۵/۹ ^a	۲۶/۴ ^a	۶۶/۸ ^a	یک سینی
۸۰/۸ ^a	۶۶/۳ ^a	۲۵/۹ ^b	۶۱/۷ ^b	دو سینی
۸۱/۵ ^a	۶۵/۷ ^a	۲۴/۷ ^c	۵۸/۶ ^c	سه سینی
۸۱/۳ ^a	۶۶/۰ ^a	۲۵/۳ ^a	۶۲/۴ ^a	میانگین خشک کن خورشیدی
۸۱/۱ ^a	۶۵/۵ ^a	۲۵/۷ ^a	۵۶/۷ ^b	میانگین خشک کن مرسوم بستر ثابت

*: در هر ستون، تفاوت بین میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند معنی‌دار نیست.

درصد خردشدگی برنج سفید

میزان شکست برنج سفید پارامتر مهمی است که مستقیماً به نحوه خشک کردن شلتوک ارتباط دارد. در این تحقیق نتایج آزمون t نشان می‌دهد که از لحاظ این پارامتر، بین خشک‌کن‌های خورشیدی و خشک‌کن بستر ثابت اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۴). این نتایج حاکی از آن است که اختلاف عملکردی خشک‌کن‌ها تأثیری معنی‌دار بر میزان ضایعات برنج سفید نگذاشته است و بنابراین خشک‌کن خورشیدی شرایطی مشابه با خشک‌کن‌های مرسوم داشته است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که تراکم محصول در خشک‌کن خورشیدی تأثیر معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر میزان خرد شدگی برنج سفید گذاشته است (جدول ۳). افزایش تعداد سینی‌ها از یک به دو و سه، به‌طور مستقیم باعث کاهش درصد خردشدگی برنج سفید شده است. جدول ۳ نشان می‌دهد که خردشدگی برنج سفید برای تراکم‌های یک، دو و سه سینی در خشک‌کن به ترتیب ۲۶/۴، ۲۵/۹ و ۲۴/۷ درصد است. در مقایسه دو رقم برنج شفق و عنبوری، نشان داده شده است که درصد شکست برنج سفید در رقم شفق به‌طور معنی‌داری (حدود ۷ درصد) بیش از آن مقداری است که در رقم عنبوری به‌دست آمده است. کشیده و باریک‌تر بودن رقم شفق نسبت به رقم عنبوری، مقاومت فیزیکی آن را کاهش داده و در نتیجه میزان ضایعات آن کمی بالا برده است.

درصد برنج قهوه‌ای و سفید

درصد برنج سفید و قهوه‌ای در این تحقیق تحت تأثیر روش خشک کردن قرار نگرفته و بین خشک‌کن‌ها از نظر این دو پارامتر اختلاف معنی‌داری دیده نمی‌شود. تنها اختلاف بین ارقام در درصد برنج سفید وجود دارد که آن هم مربوط به ماهیت رقم

است و ارتباطی به نوع خشک‌کن ندارد (جدول‌های ۳ و ۴).

درجه سفیدشدگی برنج

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که درجه سفیدگی برنج تحت تأثیر نوع خشک‌کن خورشیدی قرار نگرفته است ولی آزمون t نشان می‌دهد که بین خشک‌کن‌های خورشیدی و خشک‌کن بستر ثابت، از لحاظ درجه سفیدی، اختلاف معنی‌دار وجود دارد. درجه سفیدی در برنج خشک شده در خشک‌کن بستر ثابت به‌طور میانگین ۱۰ درصد کمتر از درجه سفیدی در خشک‌کن‌های نوع خورشیدی است (جدول ۴). نوع انتقال گرما و شدت آن در خشک‌کن‌های مختلف احتمالاً بر فاکتورهای کیفی، نظیر درجه سفیدشدگی برنج، اثر گذاشته است.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که کمترین و بیشترین مدت زمان لازم برای خشک شدن محصول در خشک‌کن با صفحه جاذب ساده با ۴ و ۶/۱ ساعت به ترتیب به تیمارهای رقم شفق در تراکم یک سینی و رقم عنبوری در تراکم سه سینی تعلق دارد. مقایسه میانگین مدت زمان خشک شدن نیز نشان می‌دهد که افزایش تراکم شلتوک در خشک‌کن از یک به دو و از دو به سه سینی، مدت زمان خشک شدن را به ترتیب ۱۶/۴ و ۱۷/۲ درصد افزایش می‌دهد. مقایسه بین ارقام شلتوک خشک شده نشان می‌دهد که مدت زمان خشک شدن و رسیدن به رطوبت نهایی در رقم شفق، نسبت به رقم عنبوری، به‌طور متوسط ۱۲/۸ درصد کمتر است. افزایش تعداد سینی‌ها از یک به دو و سه، به‌طور مستقیم باعث کاهش درصد خردشدگی برنج سفید شده

است. کمترین ظرفیت خشک‌کن، به مقدار کیلوگرم بر ساعت ۰/۸، مربوط به رقم عنبری در تراکم یک سینی و استفاده از صفحه جاذب معمولی است. بالاترین ظرفیت خشک‌کن، به مقدار ۲/۱ کیلوگرم بر ساعت، از تیمار رقم شفق در تراکم سه سینی و کاربرد صفحه جاذب با پوشال آهنی به دست آمده است. تغییرات راندمان صفحه‌های جاذب معمولی و دارای پوشال آهنی به ترتیب بین ۵/۲ تا ۱۸/۴۷ درصد و ۵/۹ تا ۲۳/۶۶ درصد است. افزایش تعداد سینی‌ها از یک به دو و سه، به‌طور مستقیم باعث کاهش درصد خرد شدگی برنج سفید شده است.

مراجع

- Almasi, M., Zomorodian, A. A. and Sahebi, Y. 2003. Utilizing solar energy for dill drying. First Iranian Farm Machinery Students Conference. 8-9 May. Orumieh University, Orumieh, Iran. (in Persian)
- Bagheri, N., Keihani, A., Mohtasabi, S. S. and Alimardani, R. 2009. Observation of effecting parameters on drying leafy vegetables in an active solar dryer. J. Agric. Eng. Res. 10(4): 73-88. (in Persian)
- Banerjee, R. 2005. Capacity building for renewable energy in India. Proceedings of International Congress on Renewable Energy (ICORE). 7-8 Nov. Beijing, China.
- Basunai, M. A. and Abe, T. 2001. Thin layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. J. Food Eng. 47(4): 295-301.
- Dadashzadeh, M., Zomorodian, A. and Mesbahi, G. R. 2008. The effect of drying airflow rates and modes of drying on moisture content reduction for grapes in a cabinet type solar dryer. J. Hort. Sci. 22(1): 23-34. (in Persian)
- Diamante, L. M. and Munro, P. A. 1991. Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices. Int. J. Food Sci. Technol. 26, 99-109.
- El-Sebaei, A. A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R. I. and El-Gohary, H. G. 2002. Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables. Energy. 27(9): 845-859.
- Esper, A. and Muhlbauer, W. 1998. Solar drying - an effective means of food preservation. Renew. Energ. 15(1-4): 95-100.
- Ethmane, C. S., Kane1, M. A. O. Sid, A. and Kouhila, M. 2009. Evaluation of drying parameters and sorption isotherms of mint leaves (*M. Pulegium.*). Renew. Energ. 12(3): 449-470.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M.H., Alghoul, M.A. and Sulaiman, M.Y. 2010. Review of solar dryers for agricultural and marine products. Renew. Sustain. Energ. Rev. 14(2101): 1-30.
- Gazor, H. R. 2011. Fabrication and assessment of a pilot solar dryer for agricultural products. Research Report. Agricultural Engineering Research Institute. No. 39567. (in Persian)
- Habibi-Asl, J. 2016. Technical evaluation of possibility of air heating by solar energy for paddy drying in Khuzestan. Research Report. Agricultural Engineering Research Institute. No. 50242. (in Persian)
- Hajsaghati, A. 2001. Principles and application of solar energy. First Ed. Elm-o Sanat-e Iran University Pub. Tehran, Iran. (in Persian)

- Heidarie-Soltanabadi, M., Malek, S., Ghazvini, H. R., Shaaker, M. and Hedayatizadeh, M. 2010. Losses in blade and abrasive systems by moisture content for three rice varieties. *J. Agric. Eng. Res.* 11(1): 67-84 (in Persian)
- Moradi, M. and Zomorodian, A. 2008. Best mathematical drying model selection for indirect solar drying of cumin in forced convection solar dryer. The 5th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. 27-28 Aug. Ferdosi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian)
- Okos, M. R., Narasimhan, G., Singh, R. K. and Witnaurer, A. C. 1992. Food Dehydration. In D. R. Hedman and D. B. Lund (Eds.) *Hand Book of Food Engineering*, NewYork, Marcel Dekker.
- Pangavhane, D. R., Sawhney, R. L. and Sarsavadia, P. N. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*. 27, 579-590.
- Zomorodian, A., Zare, D. and Ghasemkhani, H. 2007. Optimization and evaluation of a semi-continuous solar dryer for cereals (Rice, etc). *Desalination*. 209, 129-135.

Technical Evaluation and Efficiency of two Solar Collector Types for Paddy Drying in Khuzestan Province

J. Habibi Asl* and H. Kavooosi-Balootaki

* Corresponding Author: Assistant Professor, Agriculture Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahwaz, Iran. Email: jhabibi139@yahoo.com
Received: 7 June 2017, Accepted: 7 February 2018

Abstract

Khuzestan province produces 120,000 tones rice every year and possesses the forth rank in rice production in Iran. Paddy rice must be dried before milling. In some regions in Khuzestan, paddy is dried in traditional bed driers, resulting high costs and high losses from the point of quantity and quality. An indirect cabinet solar dryer with three trays and grooved collector was constructed to use solar energy, a project that could help farmers to increase their income and to reduce paddy losses. To measure and to record drying air temperature and humidity at different places (collector air incoming and outgoing and the drying chamber), a Digital Data Logger was designed, fabricated and mounted on the solar dryer. The dryer performance was evaluated by drying two paddy varieties (Shafagh and Anboori) in three levels of mass density of 1, 2, and 3 trays at two different solar dryer types of collectors: simple grooved collector (collector A) and grooved filled by turnery iron chaff collector (collector B). The results showed that maximum and minimum drying period required in different solar dryer treatments were 4 and 6.1 hours for Shafagh with 1 tray and for Anboori with 3 trays respectively. Longer time required for drying paddy rice in upper trays as the air flowing decreased due to increase in mass density. Mean time required for drying Shafagh variety was 12.8% shorter than that of Anboori variety. Increasing in number of trays in the solar dryer resulted in less rice losses. Results showed that utilizing solar energy, as a clean renewable energy source and appropriate method for reducing costs of drying paddy rice, could be recommended to use in Khuzestan province condition.

Keywords: Broken Rice, Dryer Capacity, Paddy Rice, Solar Dryer