بهینه سازی وارزیابی خشک کن نیمه پیوسته خورشیدی شلتوک

داریوش زارع[1]- علی زمردیان[2]- حمی قاسم خانی[3]

چکیده

استفاده از انرژی خورشیدی در جهان امروز جهت خشک کردن غلات و سایر محصولات کشاورزی رو به افزایش است. از دلایل این امر می‌توان به تجدیدپذیر بودن، پایان ناپذیری، نداشتن آلودگی زیست محیطی و رایگان بودن این منبع کلان انرژی اشاره کرد.طرح حاضر یک ایده جدید در بکارگیری انرژی خورشیدی بعنوان سوخت اصلی خشک‌کن می‌باشد و برای اولین بار در ایران طراحی و ساخته شده است. این خشک‌کن خورشیدی از نوع نیمه پیوسته فعال و مختلط بوده که در آن جریان هوا به صورت جابجایی اجباری برقرار می‌گردد. دستگاه مذکور از ۶ عدد گرمکن خورشیدی هوائی، کانال حرارتی، محفظه خشک‌کن و سیستم‌های تأمین و انتقال هوا تشکیل شده است. جمع‌کننده‌های خورشیدی از نوع تخت با صفحه جاذب آلومینیومی و پوشش شیشه‌ای بوده، و مساحت هر کدام از آنها ۲ متر مربع می‌باشد. این جمع‌کننده‌ها در روی دو شاسی که با افق، زاویه ۴۵ درجه بطرف جنوب می‌سازند، قرار گرفته‌اند. محفظه خشک کننده این دستگاه شامل مخزن ورودی، بستر خشک‌کن، دریچه خروجی (الکترومکانیکی)، مخزن خروجی و محفظه آرام کننده می‌باشد، و فرآیند اصلی خشک کردن در این قسمت انجام می‌شود. برای تخلیه خودکار محصول، بستر خشک‌کن بصورت شیب‌دار (زاویه ثابت ۴۵ درجه) ساخته شده است. در انتهای این بستر یک دریچه دوار الکترومکانیکی وجود دارد که با استفاده از یک زمان‌سنج، می‌تواند به فواصل زمانی معین با چرخش خود خروجی خشک‌کن را گشوده، و مقداری از محصول را که رطوبت آن در حد دلخواه رسیده است، به مخزن خروجی منتقل سازد (تخلیه نیمه پیوسته). دبی جرمی هوا توسط صفحات روزنه، درجه حرارت نقاط مختلف جمع‌کننده‌ها و خشک کن به وسیله ترموکوپل های نوع T، انرژی تابشی خورشید توسط شیدسنج، و انرژی الکتریکی مصرفی کانال حرارتی و فن ها توسط وات متر اندازه‌گیری شد. جهت ارزیابی و بهینه‌سازی دستگاه، آزمایشها روی شلتوک انجام شد. اهداف مهم این تحقیق بررسی آماری تأثیر دبی جرمی هوای خشک کننده و زمان تخلیه بر روند خشک شدن محصول داخل بستر و محصول خروجی بود. بنابراین از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار استفاده شد. که فاکتور اول دبی جرمی هوای خشک کننده در سه سطح ۰/۰۱۱، ۰/۰۰۶۶ و ۰/۰۰۴۸ کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه، فاکتور دوم زمان تخلیه محصول در دو سطح ۱۵ و ۳۰ دقیقه و فاکتور سوم موقعیت نقاط مختلف بستر خشک‌کن در چهار سطح بود. که با بررسی این تیمارها اثر تغییر دبی جرمی هوا و همچنین فرکانس باز شدن دریچه الکترو مکانیکی را بر میزان خشک شدن محصول خروجی و محصول داخل

بستر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ظرفیت دستگاه خشک کن، مقدار انرژی مصرف شده (شامل انرژی الکتریکی و خورشیدی) در فرایند خشک کردن محصول، بازده جمع کننده ها و بهترین دبی و زمان تخلیه محصول برای رسیدن به حداکثر بازده خشک کن تعیین شد.نتایج نشان داد که، دبی جرمی هوای خشک کننده و زمان باز شدن دریچه الکترومکانیکی اثر معنی داری بر خشک شدن محصول دارد. بیشترین راندمان جمع‌کننده‌های خورشیدی مربوط به دبی هوای ۰/۰۱۱ کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه که برابر با ۳۷/۱۳٪ بود. بر طبق محاسبات، سهم تأمین انرژی حرارتی توسط کانال حرارتی در مقایسه با انرژی تأمین شده توسط جمع کننده های خورشیدی، ۶ تا ۸ درصد بود. بیشترین ظرفیت دستگاه خشک‌کن مربوط به دبی ۰/۰۱۱ کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه و زمان تخلیه محصول ۳۰ دقیقه بود که ۱۳۲ کیلو گرم شلتوک با رطوبت اولیه ۲۷٪ را به رطوبت ۱۳٪ در مدت ۳ ساعت کاهش می داد.

۱- دانشجوی دوره دکتری گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس
۲- استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه شیراز
۳- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی

مقدمه

رطوبت شلتوک در هنگام برداشت حدود ۲۵ درصد یا حتی بیشتر است. در صورتی که شلتوک با همین رطوبت انبار یا در فرایند تبدیل وارد شود، دچار کپک زدگی، فساد و متحمل ضایعات زیاد خواهد شد، به همین علت ابتدا شلتوک را با استفاده از خشک کن های مخصوص تا حدود ۱۴ درصد رطوبت(رطوبت مناسب برای انبار داری و فرایند های بعد از برداشت) خشک می‌کنند. کشور ما ایران بدلیل واقع شدن در منطقه نیمه‌گرمسیری و خشک از تابش نور خورشید کافی برخوردار است. همچنین به دلیل افزایش قیمت سوختهای فسیلی و نیز آلودگی‌های شدید و مخرب زیست محیطی ناشی از مصرف آنها می‌بایست به انرژی خورشیدی که منبعی رایگان، تجدیدپذیر و عاری از هرگونه آلودگی و پیامد های خطرناک برای طبیعت است توجه بیشتری نمود. به همین خاطر خشک‌کن‌های خورشیدی این قابلیت را دارند که توسط کشاورزان کشورمان پذیرفته و بکار گرفته شوند.

امکان استفاده از انرژی خورشیدی به منظور خشک نمودن محصولات کشاورزی نخستین بار توسط بیولو بررسی شد(۵). در ابتدای دهۀ ۱۹۶۰ سوبل و بیولو طرح‌هایی دربارۀ جمع کننده های خورشیدی برای گرم کردن هوا جهت استفاده در خشک کردن محصولات کشاورزی و بهبود دما در محل های نگهداری دام و طیور ارائه کردند(۷).

زمان و بالا، (۸) یک سری معادلات تجربی برای خشک کردن خورشیدی شلتوک ارائه دادند. آنها از سه نوع خشک‌کن استفاده کردند که عبارت بودند از خشک کن غیر فعال مختلط، خشک کن غیر فعال غیر مستقیم و خشک کردن به شیوه سنتی. نتایج آزمایشهای آنها نشان داد که بالاترین سرعت خشک شدن با استفاده از خشک کن غیر فعال مختلط بدست می‌آید. این خشک کن همچنین بهترین عملکرد را نسبت به انواع دیگر داشت. بعد از آن خشک کن غیر فعال مستقیم از نظر سرعت خشک شدن قرار می‌گرفت. کمترین سرعت خشک شدن نیز مربوط به شیوۀ سنتی بود که از نظرعملکرد نیز مناسب تشخیص داده نشد.

بالا و زیدان، (۴)مدلی ریاضی برای خشک کردن برنج به روش جابجایی آزاد ارائه کردند. این مدل شامل بر آورد تشعشع خورشیدی، دمای هوا در درون جمع کننده صفحۀ تخت و پیش‌گوئی تغییرات رطوبت و دما در بستر

دانه بود. دماهای شبیه سازی شده بر اساس مدل با دماهای واقعی جمع کننده خورشیدی سازگاری بسیار خوبی داشتند. ولی مدل مذکور رطوبت‌های میانگین را بیشتر از حد واقعی برآورد می‌نمود. همچنین نتایج شبیه‌سازی آنها نشان دادکه ضخامت بستر دانه و اندازۀ جمع کننده از مهمترین عواملی هستند که جابجایی آزاد هوا را از میان بستر دانه کنترل می‌کنند.

زمردیان و علامه،(۲) به بررسی خشک شدن برنج به صورت لایه نازک در یک خشک کن خورشیدی از نوع غیر فعال مختلط پرداخت. جریان هوا در این خشک‌کن بصورت جابجایی آزاد بود. آزمایشها در سه عمق بستر ۲، ۴ و۶ سانتیمتری انجام گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که بستر ۲ سانتیمتری شرایط بستر لایه نازک را در خشک کردن به شیوه خورشیدی را دارا می‌باشد، در صورتیکه بسترهای ۴ و ۶ سانتیمتری چنین چیزی را نشان ندادند. همچنین مشخص شد که محصول در سرتاسر بستر دانه بطور یکنواخت خشک نمی‌شود. این موضوع به دلیل نوع محصول و حالت توزیع دما در محفظه خشک‌کن بود.

تحقیق حاضر، یک ایده جدید در بکارگیری انرژی خورشیدی بعنوان منبع اصلی تأمین انرژی خشک‌کن می‌باشد که در آن خشک‌کن خورشیدی، طراحی، ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفته است. این نوع خشک کن از نوع خورشیدی فعال مختلط است که بصورت نیمه پیوسته و با قابلیت تغییر در ظرفیت کار می‌کند. بدین صورت که با در نظرگرفتن رطوبت اولیه محصول، رطوبت نهایی خواسته شده محصول، درجه حرارت محیط و میزان انرژی قابل دسترس میتوان ظرفیت خشک‌کن را تغییر داد. جهت ارزیابی دستگاه مزبور، خشک کردن شلتوک در آن مورد بررسی قرار گرفت. از اهدف مهم این تحقیق بررسی آماری تأثیر دبی جرمی هوای خشک کننده و زمان تخلیه محصول بر روند خشک شدن محصول داخل بستر بود و همچنین ظرفیت دستگاه خشک‌کن، مقدار انرژی مصرف شده (شامل انرژی الکتریکی و خورشیدی) در فرایند خشک کردن محصول و راندمان جمع کننده ها تعیین شد.

مواد و روش ها

از اهداف این تحقیق ارزیابی دستگاه خشک‌کن خورشیدی جدید بود، که در آن جریان هوا به روش جابجایی اجباری با استفاده از مکنده برقرار می‌گردد. در این دستگاه علاوه بر انرژی خورشیدی از انرژی الکتریسیته برای به جریان انداختن هوا، چرخش دریچه الکترومکانیکی و همچنین راه‌اندازی یک کانال حرارتی[1] (گرمکن) در صورت نیاز استفاده شده است.

[1] - Heating channel

دستگاه مذکورکه در بخش مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه شیراز طراحی و ساخته شد، از ۶ عـدد گرمکن خورشیدی هوائی، کانال حرارتی، محفظه خشک‌کن و سیستم‌های تأمین و انتقال هوا تشـکیل شـده است(شکل ۱). جمع‌کننده‌های خورشیدی از نوع تخت با صـفحه جـاذب آلومینیـومی و پوشـش شیشـه‌ای بوده، و مساحت هر کدام از آنها ۲ متر مربع می‌باشد. این جمع‌کننده‌ها در روی دو شاسی که با افـق، زاویـه ۴۵ درجه بطرف جنوب می‌سازند، قرار گرفته‌اند. محفظه خشک کننده ایـن دسـتگاه شـامل مخـزن ورودی، بستر خشک‌کن، دریچه خروجی (الکترومکانیکی)، مخزن خروجی و محفظه آرام کننـده می‌باشـد، و فرآینـد اصلی خشک کردن در این قسمت انجام می‌شود. برای تخلیه خودکـار محصـول، بسـتر خشـک‌کن بصـورت شیب‌دار (زاویه ثابت ۴۵ درجه) ساخته شده است. در انتهای این بستر یک دریچه دوار الکترومکانیکی وجود دارد که با استفاده از یک زمان‌سنج، می‌تواند به فواصل زمانی معین با چرخش خـود خروجـی خشـک‌کن را گشوده، و مقداری از محصول را که رطوبت آن در حد دلخواه رسیده است، به مخزن خروجی منتقـل سـازد (تخلیه نیمه پیوسته).

دبی جرمی هوا توسط صفحات روزنه، درجه حـرارت نقـاط مختلـف جمع‌کننـده‌ها و خشـک کـن بـه وسـیله ترموکوپل‌های نوع T، انرژی تابشی خورشید توسط شیدسنج، و انرژی الکتریکی مصرفی کانـال حرارتـی و فـن هـا توسط وات متر اندازه‌گیری شد.

روش انجام آزمایش ها: جهت انجام آزمایش دستگاه خشک‌کن در محوطه آفتـابگیر قـرار داده شـد. زمـان انجام آزمایش‌ها در مهر و آبان ماه ۱۳۸۰ بود. سعی شد شرایط اولیه محصول از لحاظ رطوبتی در تمـام آزمایشـاها یکسان نگه داشته شود. بدین ترتیب که در هر روز آزمایش ۳۰۰ کیلو شلتوک را با رطوبت بین ۲۷-۳۰ ($\%d.b.$) از مزرعه های منطقهٔ زیر سد درودزن واقع در ۵۰ کیلو متری شیراز به صورت تازه توسط کمبـاین درو کـرده و بـرای آزمایش فرایند خشک کردن دستگاه خشک‌کن به محل آزمایش انتقال می‌دادیم. برای بررسی آمـاری تـأثیر دبـی جرمی هوای ورودی به خشک کن روی سرعت خشک شدن محصول خروجی و همچنین بررسی نحوه خشک شدن در طول و عرض بستر شیب دار خشک کن، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش از سه فاکتور مختلف استفاده شد که فاکتور اول (فاکتورA)، دبی جرمی هوای ورودی به خشک‌کن در سه سطح ۰/۰۱۱، ۰/۰۰۶۶ و۰/۰۰۴۸ کیلو گرم بر متر مربع بر ثانیه، فاکتور دوم (فاکتور B)، زمان باز و بسته شدن دریچه الکترومکانیکی در دو سطح ۱۵ و۳۰ دقیقه و فاکتور سوم مکانهای مختلف بسـتر خشـک‌کن (فـاکتورC)، در چهار سطح میباشد. بعد از آزمون نرمـال و همگـن بـودن خطـای میانگین‌هـای آزمایشـی مقایسـه اثـرات اصـلی و

برهمکنش فاکتورهای آزمایش توسط آزمون F و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن در سطح ۱٪ بررسی شد.آزمایشها ساعت ۱۱ صبح شروع و ساعت ۲ بعد از ظهر خاتمه می‌یافت..

نتایج و بحث

با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) نتیجه می‌شود که دبی هوا، زمان تخلیه محصول و موقعیت نمونه‌گیری بسترخشک‌کن و برهمکنش آنها با احتمال ۹۹٪ تأثیر معنی داری بر میانگین کاهش درصد رطوبت محصول داخل بستر خشک‌کن داشته‌اند. با توجه به معنی‌دار بودن برهمکنش دبی هوا و زمان تخلیه محصول، از شکل ۲ مشخص است که در هر مقدار دبی هوای ورودی، اختلاف معنی داری بین اثر دو سطح زمانی بر میانگین کاهش درصد رطوبت محصول داخل بستر وجود دارد. همچنین از شکل ۲ مشخص است که در تمام سطوح دبی هوا، زمان تخلیه ۳۰ دقیقه رطوبت محصول داخل بستر را بیشتر از زمان ۱۵ دقیقه کاهش داده است که علت آن را چنین میتوان توجیه کرد که در یک دبی ثابت هوای ورودی به خشک‌کن هر چه مدت زمان تخلیه محصول افزایش یابد، محصول مدت بیشتری در بستر خشک کن قرار می‌گیرد و رطوبت بیشتری از دست می‌شود. با توجه به معنی‌دار بودن برهمکنش زمان تخلیه محصول و دبی هوا، از شکل ۳ مشخص است که در هر سطح زمان تخلیه محصول، اختلاف معنی داری بین اثر سطوح مختلف دبی هوا بر میانگین کاهش درصد رطوبت محصول داخل بستر وجود دارد. همچنین از شکل ۳ مشخص است که در هر دو زمان تخلیه محصول با افزایش دبی مقدار میانگین کاهش درصد رطوبت داخل بستر نیز افزایش می‌یابد که علت آن را میتوان چنین توجیه کرد که در یک زمان ثابت تخلیه با افزایش دبی هوای خشک کننده اختلاف فشار جزیی بخار آب بین محصول داخل بستر و هوای خشک کننده افزایش می‌یابد در نتیجه سرعت انتقال جرمی بخار آب از محصول داخل بستر به هوای خشک افزایش یافته و کاهش درصد رطوبت افزایش می‌یابد.

از جدول تجزیه واریانس و همچنین از نمودار مقایسه میانگین‌های برهمکنش دبی هوا و زمان تخلیه محصول(شکل۳) مشخص است که اثر سه سطح دبی هوا از اثر دو سطح زمان تخلیه بر کاهش درصد رطوبت محصول داخل بستر بارزتر بوده است. بنابراین در این آزمایش‌ها فاکتور دبی به عنوان فاکتور غالب می‌تواند معرفی شود. از اشکال برهمکنش دبی هوا و زمان تخلیه محصول مشخص است که بیشترین مقدار کاهش درصد رطوبت محصول داخل بستر مربوط به دبی هوای ۰/۰۱۱ کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه و زمان تخلیه ۳۰ دقیقه می‌باشد، یعنی در حداکثر دبی هوا و بیشترین زمان تخلیه محصول بیشترین مقدار برداشت رطوبت از محصول را خواهیم داشت. بنابراین ترکیب این دو سطح از فاکتورهای دبی هوا و زمان تخلیه به عنوان بهترین تیمار جهت بیشترین کاهش درصد رطوبت محصول معرفی می‌شوند.

تغییرات رطوبت محصول در خشک کن: در شکل ۴ تغییرات رطوبت محصول خروجی از خشک‌کن بر حسب گذشت زمان تحت تأثیر سه دبی جرمی هوا ۰/۰۱۱ ،۰/۰۰۶۶ و ۰/۰۰۴۸ کیلو گرم بر متر مربع در ثانیه و زمان ۱۵ دقیقه تخلیه نشان داده شده است. با توجه به این شکل دیده می‌شود که در دبی هوای بیشتر محصول سریع‌تر خشک شده است، که علت آن این است که با افزایش دبی هوای خشک کننده، اختلاف فشار جزئی بخار آب بین محصول و هوای خشک کننده افزایش می‌یابد. در نتیجه سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوای خشک کننده افزایش یافته و محصول زودتر خشک می‌گردد. با توجه به شیب منحنی تغییرات رطوبت این شکل‌ها میتوان فهمید که سرعت خشک شدن در ابتدای عملیات خشک شدن سریع تر بوده (مخصوصاً در دبی های بالاتر) ولی با گذشت زمان سرعت خشک شدن کمتر شده و آن آهنگ اولیه وجود ندارد. از این شکل چنین بر می آید که هر چه محصول خشک تر شود میزان نرخ از دست دادن رطوبت نیز کاهش می یابد. خوشحال و مینایی در مورد خشکاندن شلتوک (برنج) به روش مداوم به روند مشابه تغییرات رطوبت محصول نسبت به زمان رسیده‌اند(۱). قاسم خانی در مورد خشک‌کردن ذرت دانه‌ای توسط همین دستگاه خشک‌کن، به روند مشابه تغییرات رطوبت محصول نسبت به زمان رسیده است(۳).

بازده حرارتی جمع کننده های خورشیدی با افزایش دبی جرمی هوا افزایش می یابد و در بیشترین دبی به طور متوسط برابر ۳۷/۱۳ ٪ بود. این افزایش بازده به دو دلیل اتفاق می افتد : اول اینکه هر چه مقدار عبور جریان هوا از سطح جمع کننده‌ها بیشتر باشد ، مقدار انرژی حرارتی بیشتری از سطح جمع کننده ها توسط همرفتی اجباری[1] برداشت می گردد. دوم اینکه با افزایش دبی جرمی هوا مقدار افت حرارتی از سطح جمع کننده ها به علت کاهش درجه حرارت صفحه جاذب کاهش مییابد که خود نیز باعث افزایش بازده حرارتی می گردد. سازمان جهانی انرژی در مورد جمع‌کننده‌های حرارتی خورشیدی به نتایج مشابه‌ای رسیده است(۶).

بیشترین محصول خشک شده از ساعت ۱۱ صبح تا ۲ بعد از ظهر مربوط به تیمار با دبی هوای ۰/۰۱۱ کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه و زمان تخلیه محصول برابر ۳۰ دقیقه که معادل ۱۳۲ کیلو گرم شلتوک با رطوبت ۱۳٪ که مناسب انبار داری است، می باشد.

[1] -Forced convection

سهم تأمین انرژی حرارتی در فرایند خشک کردن شلتوک، توسط سیستم کانال حرارتی در دبی های جرمی مختلف هوای ورودی به خشک کن حدود ۶٪ تا ۸ ٪ بود. همچنین مشخص است که در دبی های جرمی بالاتر هوا سهم انرژی تأمین شده در فرایند خشک کردن توسط کانال حرارتی افزایش می یابد. علت آن را می توان چنین توجیه کرد که در دبی‌های جرمی بالاتر هوا، درجه حرارت خروجی از جمع کننده‌ها با کاهش روبروست و سیستم ترموستات درون محفظه خشک کن توسط کانال حرارتی سعی بر ثابت نگه داشتن درجه حرارت ورودی به خشک کن دارد که در نتیجه میزان مصرف انرژی الکتریکی توسط کانال حرارتی افزایش می یابد. البته با توجه به محاسبات تلفات حرارتی خط انتقال هوای گرم مشخص می شود که اگر تلفات حرارتی خط انتقال هوای گرم را با به کار بردن عایق با کیفیت بهتر کاهش دهیم، در ساعات یاد شده آزمایش سیستم بدون نیاز به کانال حرارتی میتواند با استفاده از انرژی خورشیدی فرایند خشک کردن محصول را با موفقیت انجام دهد.

بیشترین بازده سیستم خشک کن در مصرف انرژی بازاء یک کیلوگرم محصول خشک شده در فرایند خشک کردن برابر ۲۱/۲۴٪ که مربوط به دبی جرمی هوای ۰/۰۱۱ کیلو گرم بر متر مربع در ثانیه و زمان کمتر تخلیه محصول(۱۵ دقیقه) بود. زیرا هر چه که دبی جرمی هوا زیاد تر شود پتانسیل برداشت رطوبت نیز بیشتر شده و بازده سیستم خشک کن را بالاتر می برد در صورتی که با کاهش طول مدت زمان تخلیه بازده سیستم خشک کن به علت افزایش دبی جرمی محصول از سیستم خشک کن افزایش می یابد و انرژی مصرفی بازاء واحد جرم رطوبت از دست داده کمتر میشود.

به طور کلی نتایج ارزیابی نشان داد که این خشک‌کن با راندمان بالای مصرف انرژی می‌تواند رطوبت محصول را در مدت زمان مناسب به حد مطلوب انبارداری برساند.

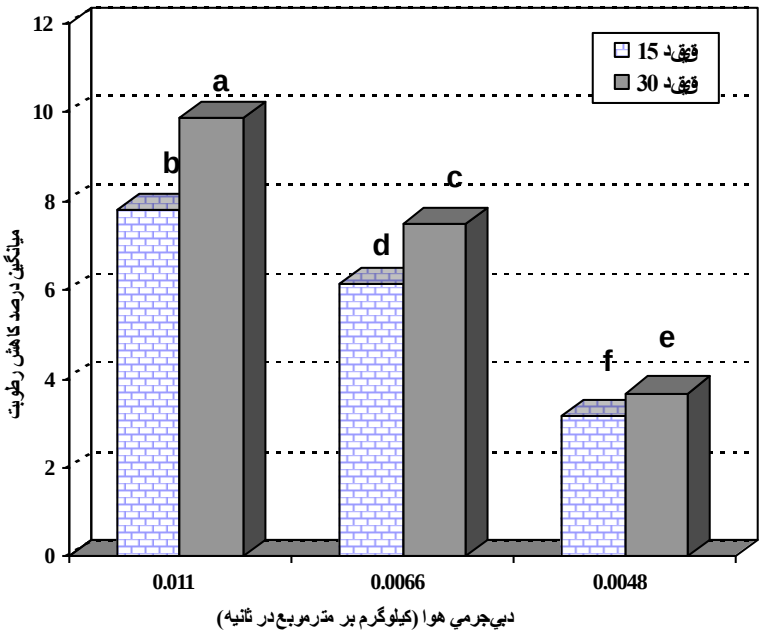
جدول ۱. تجزیه واریانس اثرات اصلی و برهمکنش دبی هوای، زمان باز و بسته شدن دریچه تخلیه و موقعیت نمونه‌گیری از بستر بر میانگین کاهش درصد رطوبت محصول داخل بستر خشک‌کن

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات *(SS)*	میانگین مجموع مربعات *(MS)*	*FS*
فاکتور A	۲	۳۵۷/۸۱۳	۱۷۸/۹۰۷	/۳۴** ۱۳۰۱
فاکتور B	۱	۳۰/۸۳۷	۳۰/۸۳۷	۲۲۴/۳۱**
برهمکنش AB	۲	۶/۹۵۴	۳/۴۷۷	۲۵/۳**
فاکتور C	۳	۵۷/۵۳۷	۱۹/۱۷۹	۱۳۹/۵۱**

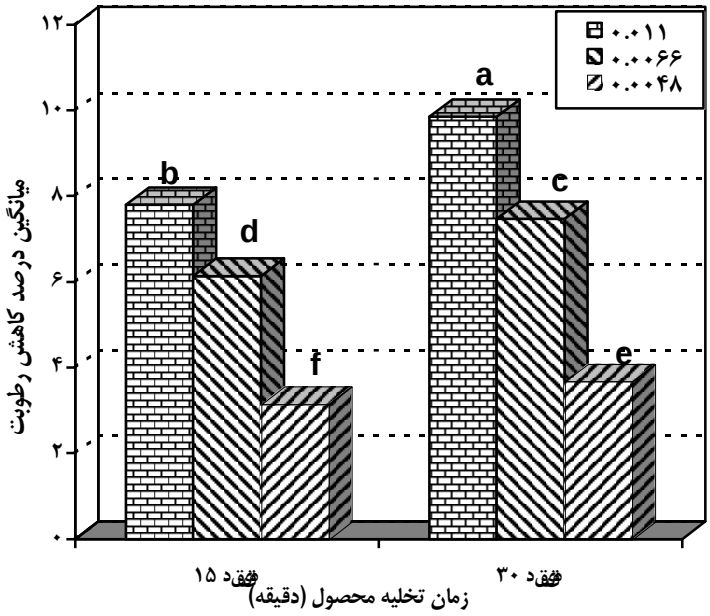
برهمکنش AC	۶	۱۴/۱۸۱	۲/۳۶۴	۱۷/۲۰**
برهمکنش BC	۶	۱/۷۳۱	۰/۵۷۷	۴/۲۰*
برهمکنش ABC	۶	۵/۰۰۴	۰/۸۳۴	۶/۰۷**
خطای آزمایشی	۴۸	۶/۵۹۹	۰/۱۳۷	---
کـــل	۷۲	---	---	---

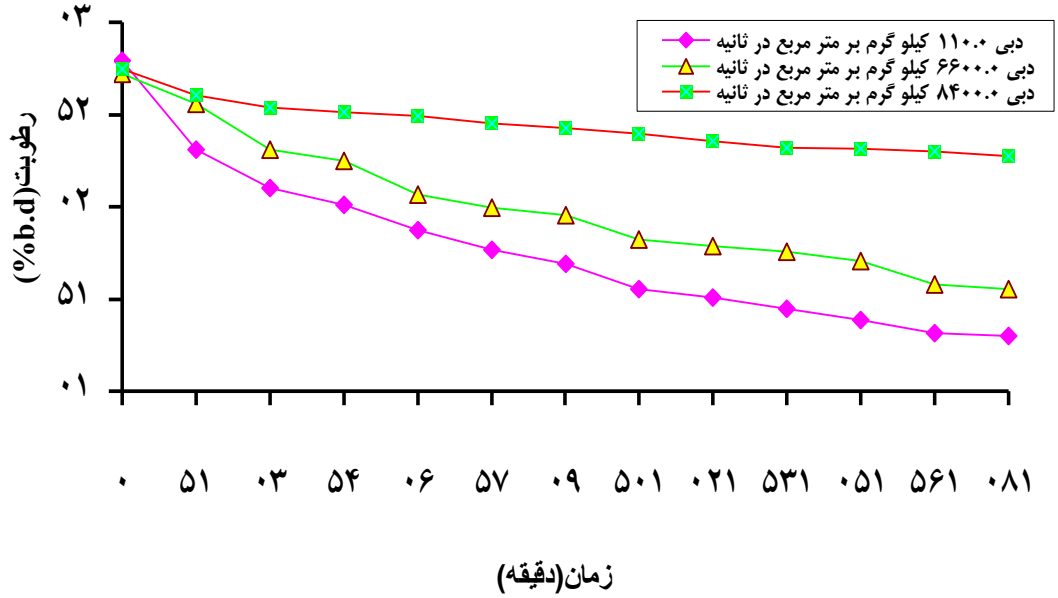
علامت ** نشان گر معنی دار بودن آزمون F در سطح ۹۹٪ میباشد.
علامت * نشان گر معنی دار بودن آزمون F در سطح ۹۵٪ میباشد.

شکل۲. بررسی برهمکنش دبی هوا و زمان تخلیه محصول بر کاهش درصد رطوبت محصول داخل بستر خشک‌کن (دانکن در سطح ۱٪).



شکل۳. بررسی برهمکنش زمان تخلیه محصول و دبی هوا بر کاهش درصد رطوبت محصول داخل بستر خشک‌کن (دانکن در سطح ۱٪).





شکل ۴. تغییرات رطوبت محصول خروجی بر حسب گذشت زمان در سه دبی هوا و زمان تخلیه محصول برابر ۱۵ دقیقه

منابع مورد استفاده:

۱. خوشحال، م. و س. مینایی.۱۳۸۰. تعیین روابط بین پارامترهای موثر در فرایند خشکاندن شلتوک (برنج) به روش مداوم. مجله علوم کشاورزی منابع طبیعی. سال هشتم،شماره سوم ۱۳۳-۱۲۳.

۲. زمردیان، ع. و ع. علامه. ۱۳۸۱ . بررسی خشک کردن شلتوک به روش لایه نـازک و تعیـین ضـخامت بهینـه بـا بکارگیری یک خشک کن خورشیدی با جریان جابجای آزاد. مجله علوم و فنـون کشـاورزی و منـابع طبیعـی. جلـد ششم ،شماره چهارم.۲۱۸-۲۰۹

۳. قاسم خانی، ح . ۱۳۸۰. طراحی، ساخت و ارزیابی یک خشک کن نیمه پیوسته خورشیدی غـلات (ذرت، بـرنج و ...). پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی. دانشگاه شیراز.

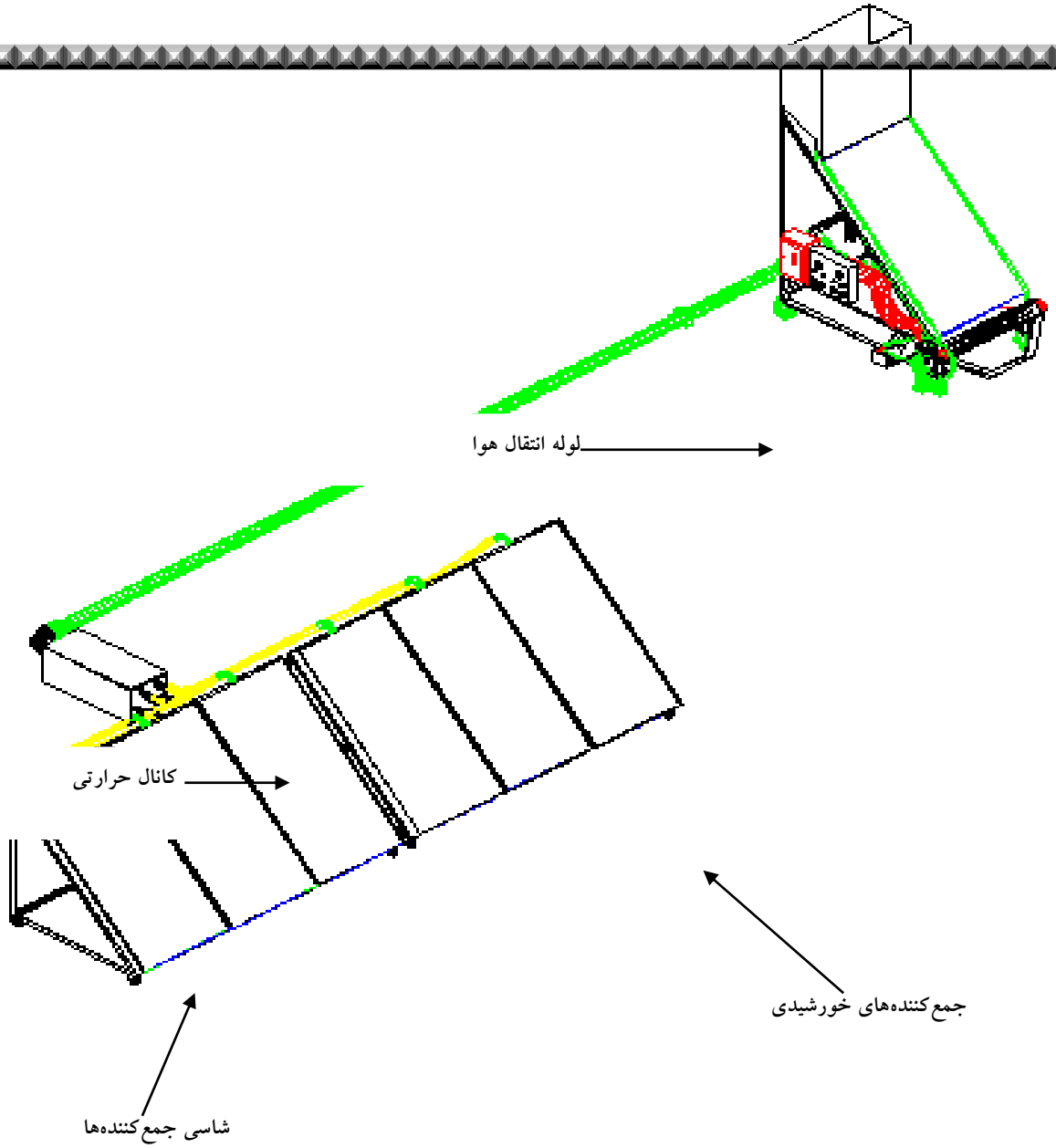
4. Bala, B. K., and A. T. M. Ziauddin. 1990. Simulation of solar drying of rough rice. Proceeding of the 1st World Renewable Energy Congress. Reading, UK.

5. Buelow, F. H. 1958. Drying grain with solar energy. Mich. State Univ., Agric. Exp. Stn.Q. Bull. 41:421-429.

6. International Energy Agency (IEA), Design and Performance of large Solar Thermal Collector Arrays, Proc. of the IEA Workshop, San Diego, CA (1985).

7. Sobel, A. T. and F. H. Buelow. 1963. Galvanized steel roof constraction for solar heating. Agric. Eng., 44:312-313,316-317.

8. Zaman, M. A., and B. K. Bala. 1989. Thin layer solar drying of rough rice. Solar Energy, 42:167-171.



شکل ۱. طرحواره‌ای از مجموعه دستگاه خشک‌کن