

ارزیابی و بهینه‌سازی یک خشک‌کن بازگردشی کنترل خودکار

محمد طبسی زاده¹، سعید مینایی²، محمد هادی خوش تقاضا³، داریوش زارع⁴

1- استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

2 و 3- دانشیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

4- استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه شیراز

tabasizadeh@um.ac.ir

چکیده

جستجو برای یافتن راهکارهای بهینه سازی مصرف انرژی در خشک کردن ذرت، منجر به شکل گیری ایده استفاده از انرژی گرمایی هوای خروجی از خشک کن گردید. اگرچه در مورد بازیافت هوای خروجی تحقیقاتی انجام شده است، اما در تحقیق حاضر، کنترل میزان هوای بازگردش به صورت پیوسته و نه پله ای، تحت شرایط کنترل خودکار و با بهره گیری از سازوکار اندازه گیری پیوسته رطوبت محصول صورت می پذیرد. برای نیل به این هدف، یک خشک کن وعده ای بستر عمیق در مقیاس آزمایشگاهی بازسازی شد و به سازوکارهای لازم برای بازگردش هوای خروجی و کنترل خودکار آن مجهز گردید. آزمایش‌های تجربی تحت شرایط مختلف خشکاندن ذرت شامل ترکیب سه متغیر مستقل دبی جرمی هوای خشک کننده در سه سطح (0/19، 0/26 و 0/33 kg.m⁻².s⁻¹)، دمای هوای خشک کننده در سه سطح (50، 60 و 70 درجه سلسیوس) و دو حالت بازگردش/عدم بازگردش هوای خروجی، در سه تکرار انجام شد. اثر دبی، دما و بازگردش/عدم بازگردش هوای خروجی بر متغیرهای وابسته شامل انرژی مصرفی و زمان خشک شدن با استفاده از آزمون فاکتوریل بر پایه طرح کامل تصادفی مورد مطالعه قرار گرفت. اثر دبی بر هر دو و اثر دمای هوای ورودی فقط بر زمان خشک شدن معنی دار شد (در سطح 1٪). نتایج حاکی از آن بود که بازگردش هوای خروجی تحت شرایط کنترل خودکار، زمان خشک شدن و انرژی مصرفی را به ترتیب به میزان 2/1٪ و 5/8٪ کاهش می دهد. بیشترین زمان خشک شدن در دبی 0/19 kg.m⁻².s⁻¹، دمای 50°C و بدون بازگردش هوای خروجی، کمترین زمان خشک شدن در دبی 0/33 kg.m⁻².s⁻¹ و دمای 70°C، بیشترین مصرف انرژی در دبی 0/19 kg.m⁻².s⁻¹، دمای 70°C و بدون بازگردش هوای خروجی و کمترین مصرف انرژی در دبی 0/26 kg.m⁻².s⁻¹، دمای 70°C و همراه بازگردش هوای خروجی مشاهده شد.

کلمات کلیدی: انرژی مصرفی ویژه، بازگردش هوا، بازیافت انرژی، خشک‌کن غلات، کنترل خودکار

مقدمه

برای جلوگیری از فاسد شدن ذرت و اجتناب از تلفات کمی و کیفی آن میزان رطوبت محصول هنگام انبارداری یکی از عواملی است که باید به دقت کنترل شود. رطوبت ذرت هنگام برداشت بیشتر از رطوبتی است که برای انبارداری مناسب باشد، از این رو بایستی محصول را تا کاهش رطوبت آن به سطح مطلوب خشک نمود. تامین

انرژی گرمایی مورد نیاز در فرآیند خشک کردن از مواردی است که در همه خشک کن ها انرژی بالایی را مصرف می کند. همواره سعی بر آن است تا از هر طریق ممکن در مصرف انرژی صرفه جویی به عمل آید تا راندمان کاری خشک کن افزایش یابد. صرف نظر از هر روشی که برای دستیابی به این هدف انتخاب می شود با بهره گیری از سامانه های کنترل خودکار نیز می توان در بهینه سازی سیستم سود جست [سپیدنام، 1385].

طی تحقیقی به منظور بررسی کارایی بازگردش هوای خروجی مشخص گردید که بازگردش هوای خروجی به میزان 80٪ و 70٪ در خشک کردن سیب و هلو به ترتیب در حدود 50٪ و 46٪ کاهش مصرف انرژی را به دنبال دارد [Liu, 1995]. بررسی میزان صرفه جویی در مصرف انرژی در خشک کردن علوفه با روش سنتی در مقایسه با بازگردش نمودن 30 درصد از هوای خروجی از خشک کن نشان داد که به میزان 27٪ و 17٪ صرفه جویی در مصرف انرژی به ترتیب در پاییز و تابستان حاصل می شود [Schoenau et al., 1996]. بررسی تاثیر بازیافت گرمای هوای خروجی از خشک کن بر مصرف انرژی، در ایستگاه های خشک کن صنعتی مشخص نمود که صرفه جویی قابل توجهی در میزان انرژی مصرفی حاصل می شود که می توان با بهره گیری از سامانه های هوشمند و کنترل خودکار آن را بهینه ساخت [Moraitis and Akritidis, 1996].

نتایج استفاده از هوای بازگشتی در خشک کردن نارگیل و کاکائو نشان داد که زمان لازم برای کاهش رطوبت نارگیل از 60٪ به 7٪ (بر پایه خشک)، بدون بازگردش هوای خروجی 27/8 ساعت و در بازگردش 7/8٪ از هوای خروجی 18/8 ساعت و برای کاکائو در کاهش رطوبت آن از 97/8٪ به 8٪ (بر پایه خشک)، بدون بازگردش هوای خروجی 17/7 ساعت و در بازگردش هوای خروجی 13/8 ساعت می باشد [McDoom et al., 1999]. طی تحقیقی برای تولید چپس سیب زمینی عملکرد خشک کن برای ظرفیت های ورودی مختلف ماده تر، در دماهای مختلف و در دو حالت استفاده از هوای بازگشتی و بدون استفاده از هوای بازگشتی و همچنین ویژگی های محصول خشک شده مورد بررسی قرار گرفت. زمان اولیه برای گرم کردن هوای ورودی بدون استفاده از هوای بازگشتی 25 دقیقه و در حالتی که از 95 درصد هوای بازگشتی استفاده گردید 12 دقیقه به دست آمد و صرفه جویی قابل توجهی در میزان مصرف انرژی مشاهده گردید [Shawik et al., 2001].

در خصوص کارایی و استراتژی کنترل خودکار، خوشحال و مینایی با طراحی و ساخت سیستم کنترل خودکار خشک کن، آزمایش های متعددی را روی فرآیند خشکاندن شلتوک با مقادیر مختلف رطوبت به کمک یک خشک کن آزمایشگاهی انجام داده و مدل رگرسیونی تغییرات رطوبت دانه، دما و رطوبت هوای خروجی را ارائه نمودند. آنها با اندازه گیری دما و رطوبت نسبی هوای خروجی از خشک کن، رطوبت محصول را در هر زمان تخمین زده و بدون آنکه نیازی به نمونه برداری مکرر از شلتوک باشد، از آن در کنترل سیستم بهره بردند [خوشحال و مینایی، 1380]. از دیگر نوآوری هایی که در ارتباط با هوای خروجی می توان انجام داد، معکوس ساختن جریان آن به صورت تناوبی طی زمان خشک شدن محصول است که کاهش مصرف انرژی را سبب می شود. در پژوهشی به منظور بررسی عوامل موثر فیزیکی در ترک خوردگی شلتوک و میزان صرفه جویی در مصرف انرژی در خشک کن با جریان معکوس شونده، مشخص شد که زمان خشک شدن محصول فقط بستگی به دمای هوای ورودی به خشک کن دارد و متاثر از سایر عوامل همچون رقم و جهت جریان نمی باشد. افزایش دما باعث هدر رفتن انرژی از خشک کن و افزایش میزان ترک خوردگی شلتوک گردید. در خشک کن با جریان معکوس شونده هوا، در مقایسه با جریان یکطرفه میزان ترک و ضریب رطوبتی لایه های شلتوک کاهش یافت [کیانمهر، 1380].

طی پژوهشی مشخص شد که بازگردش نمودن 80٪ تا 95٪ از هوای خروجی در خشک کردن سبزیجات، کاهش انرژی مصرفی به میزان 21٪ تا 38/5٪ را به دنبال دارد، در حالیکه راندمان حرارتی خشک کن 28٪ تا 63٪ افزایش یافت. با این وجود ظرفیت خشک کن کاهش و زمان لازم برای رسیدن محصول به رطوبت نهایی با افزایش

درصد هوای خروجی به طور خطی افزایش یافت [Iguaz *et al.*, 2002]. در یک واحد قدیمی تولیدی قهوه بازیافت گرمای اتلافی خروجی طی فرآیند برشته کردن قهوه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که این کار نه تنها از جنبه اقتصادی بلکه از نظر زیست محیطی و حفظ منابع نیز اهمیت دارد [De Monte *et al.*, 2003]. بازیافت گرمای اتلافی هوای خروجی و بهره گیری مجدد از آن در فرآیند خشک کردن نه تنها در خشک کن های محصولات کشاورزی بلکه در دیگر صنایع نیز مورد توجه قرار دارد و مقدمات کاهش هزینه های خشک کردن و اقتصادی شدن بیش از پیش فرآیند را فراهم می آورد [Ogulata, 2004].

با توجه به رشد و توسعه سیستم های کنترل خودکار، کاربرد آنها در زمینه خشک کردن محصولات کشاورزی به سرعت در حال توسعه است. در یک کار تحقیقاتی برای خشک کردن ذرت درون سیلو (با بکارگیری گرمای کمکی و افزایش دمای محیط به میزان 5°C) از یک سیستم کنترلی استفاده شد تا رطوبت نسبی هوای گرم ورودی را در یک سطح ثابت حفظ نماید. چندین آزمایش تحت شرایط مختلف به منظور تعیین عملکرد سیستم کنترل انجام گرفت که نتایج آن حاکی از مناسب بودن عملکرد سیستم مذکور و توانایی آن برای ایجاد یک شرایط یکنواخت در ضمن فرآیند خشک کردن بود [Srzednicki *et al.*, 2006].

خشک کردن ذرت با دماهای بالا اگرچه سریع است اما انرژی زیادی مصرف می کند و سبب افزایش چشمگیر هزینه های خشک کردن می شود. برای صرفه جویی در مصرف انرژی می توان از بازیافت انرژی گرمایی موجود در هوای خروجی از خشک کن و گردش دادن مجدد آن در چرخه خشک کردن بهره جست. در خشک کن های جریان پیوسته با استفاده از این کار می توان حداقل به میزان 15-20 درصد در مصرف سوخت صرفه جویی نمود [Spieser, 2008]. در ارزیابی یک خشک کن بستر ثابت در خشک کردن هویج مشخص گردید که معکوس ساختن جریان هوا علاوه بر کاهش مصرف انرژی، باعث یکنواختی توزیع رطوبت و دما در بستر محصول در مقایسه با حالت بدون معکوس سازی جریان هوا، می گردد [Ruiz-Lopez *et al.*, 2008]. ارزیابی یک خشک کن سنتی با مکانیزم جابه جایی نشان داد که راندمان حرارتی آن کمتر از 30٪ می باشد. این در حالی است که حدود 35 تا 45٪ از انرژی، توسط هوای خروجی وارد محیط اطراف خشک کن شده و تلف می گردد. در این راستا برای افزایش راندمان خشک کن، اصلاحاتی در آن انجام گرفت و از بازگردش هوای خروجی، حسگرهای کنترل دما و رطوبت نسبی هوای خروجی و عایق های حرارتی استفاده شد. نتایج نشان داد که راندمان حرارتی خشک کن اصلاح شده 35٪ و خشک کن سنتی 29٪ بوده و مصرف ویژه انرژی 19٪ کاهش یافت [Tippayawong *et al.*, 2008].

پرسی یک خشک کن بستر سیال نشان داد که بازگردش 60٪ از هوای خروجی در خشک کردن دانه کنجد، برنج، نمک، سنگ آهک، خاک اره و پلیمرها می تواند تا 30٪ هزینه های انرژی مصرفی را کاهش دهد. این در حالی است که در خشک کن های تجاری با 50٪ هوای بازگشتی می توان 20٪ در انرژی مصرفی صرفه جویی نمود [Washington, 2010].

طی مرور پژوهش های اخیر، گزارشی در زمینه استفاده از هوای بازگردشی برای خشک کردن بستر ثابت غلات بصورت کنترل پیوسته هوای خروجی (و نه پله ای) یافت نشد. در روش پله ای درصد ثابتی از هوای خروجی (10، 20، 30 و ... درصد) بازگردش شده و اثر آن بر کاهش مصرف انرژی مورد بررسی قرار می گیرد، اما در روش کنترل پیوسته که مدنظر این تحقیق می باشد، با توجه به دما و رطوبت نسبی هوای خروجی در هر لحظه و با استفاده از یک سیستم کنترل خودکار، درصدهای مختلفی از هوای خروجی بازگردش می شود. در روش کنترل پیوسته میزان هوای بازگشتی، در طول فرآیند خشک شدن محصول میزان بازگردش هوای خروجی می تواند بارها افزایش و یا کاهش یابد بگونه ای که با توجه به دما و رطوبت نسبی آن همواره استفاده بهینه از هوای خروجی به عمل می آید.

مواد و روشها

خشک کن آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر خشک کردن از طریق جابجایی هوای گرم صورت می گیرد و با عبور هوای گرم از درون محصول، رطوبت آن تبخیر و از خشک کن خارج می شود. به منظور بهره گیری از انرژی گرمایی موجود در هوای خروجی، مقداری از این هوا با توجه به رطوبت نسبی آن به قسمت ورودی منتقل شده و پس از اختلاط با هوای تازه به سیستم برگشت داده می شود. بدین منظور یک خشک کن وعده ای بستر عمیق آزمایشگاهی (به ابعاد 40×40×40cm) به یک سامانه بازگردش هوای خروجی و سامانه کنترل خودکار هوای ورودی مجهز گردید. بخشی از هوای خروجی از بالای مخزن خشک کن تحت شرایط کاملاً کنترل شده، از طریق کانال هوای بازگشتی به قسمت ورودی هدایت می شود و با عبور از یک محفظه و ترکیب با هوای تازه محیط، مجدداً توسط دمنده وارد خشک کن می شود. این محفظه دارای یک دریچه کشویی است که نسبت ترکیب هوای بازگشتی و هوای محیط را بصورت خودکار، بسته به میزان رطوبت نسبی هوای خروجی تنظیم می نماید. خشک کن به یک مکانیزم اندازه گیری آنلاین رطوبت محصول و سامانه داده برداری رایانه ای نیز تجهیز گردید که همگی تحت نرم افزار کنترل خودکار سیستم عمل می کنند. طرحواره این خشک کن در شکل 1 مشاهده می شود.

پارامترهایی که در این تحقیق اندازه گیری می شوند عبارتند از: زمان خشک شدن، دما و رطوبت نسبی هوا (در محیط آزمایشگاه، ورودی، لایه های سه گانه و خروجی مخزن خشک کن)، سرعت هوای ورودی به بستر (به منظور محاسبه دبی آن)، رطوبت متوسط محصول (مشخص کننده زمان پایان خشک شدن).

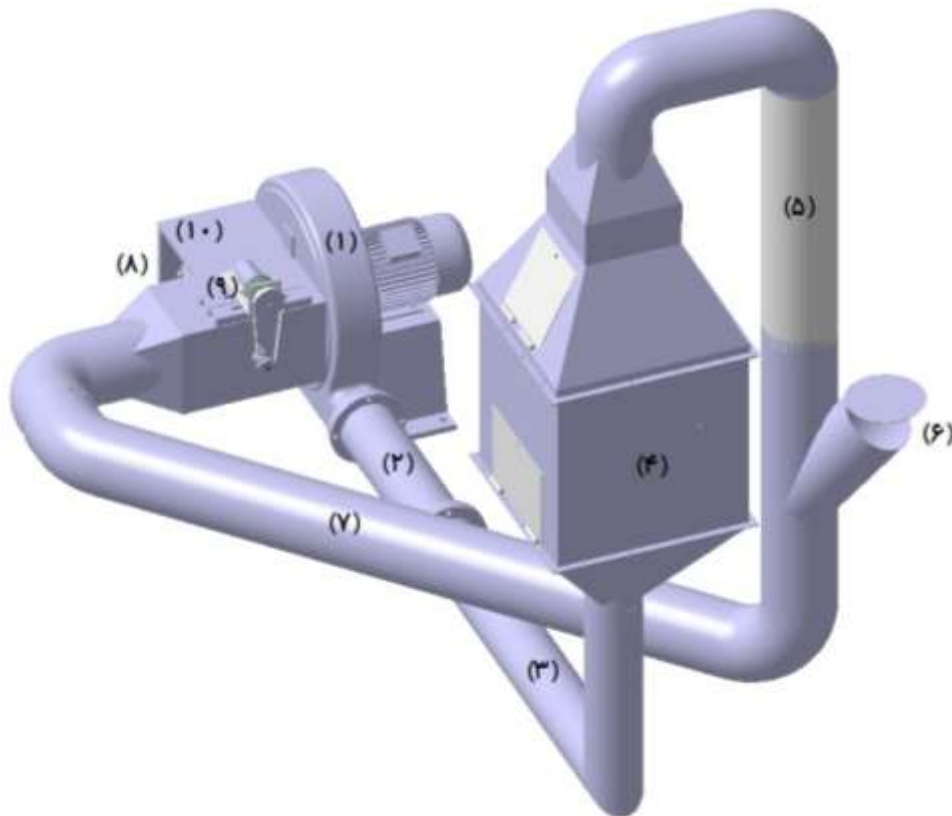
ابزار و روش اندازه گیری، جمع آوری داده ها و کنترل سیستم

برای اندازه گیری دما از حسگر دما LM35 استفاده شد که قادر به اندازه گیری دما در محدوده 55- تا 150 درجه سلسیوس با دقت اندازه گیری $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ می باشد. برای اندازه گیری رطوبت نسبی هوا از حسگر سرامیکی HIH3610 با قابلیت اندازه گیری رطوبت نسبی در محدوده 0-100٪ و دقت اندازه گیری ± 2 ٪ و برای اندازه گیری سرعت هوا از سرعت سنج پره ای دیجیتالی مدل Loutron AM-4202 با دقت اندازه گیری 0.1 m.s^{-1} استفاده شد. با قرار دادن مخزن خشک کن بر روی یک حسگر بار 20 کیلوگرمی مدل Zemic L6D و واسنجی آن، تغییرات وزن مخزن که در واقع جرم آب خارج شده از محصول می باشد، بطور پیوسته اندازه گیری می شود. با توجه به معلوم بودن وزن و رطوبت اولیه محصول، رطوبت لحظه ای متوسط آن با اندازه گیری جرم آب خارج شده بوسیله حسگر بار قابل محاسبه خواهد بود. با توجه به حسگرهای تعبیه شده در قسمت های مختلف خشک کن، برای جمع آوری داده ها و کنترل سیستم از یک کارت جمع آوری داده مدل USB-4711A ساخت شرکت ADVANTECH استفاده و برنامه نویسی کارت مذکور و کنترل سیستم با بهره گیری از نرم افزار ویژوال بیسیک انجام شد. در این تحقیق کنترل خودکار خشک کن بصورت حلقه بسته انجام شد.

آماده سازی نمونه ها

مقطع مخزن خشک به شکل مربع به ابعاد 40×40cm بوده و تا ارتفاع 30cm (سه لایه 10 سانتیمتری) درون آن ذرت ریخته می شود. ظرفیت این مخزن 31/5 کیلوگرم ذرت تر می باشد. نمونه های تازه ذرت پس از توزین در وزن های مذکور درون کیسه های پلاستیکی دوجداره قرار داده شدند و پس از درزبندی، برای جلوگیری از

کاهش رطوبت نمونه، کیسه ها در دمای 5°C یخچال نگهداری شدند. چند ساعت قبل از انجام هر آزمایش، کیسه های حاوی نمونه ها در دمای محیط آزمایشگاه قرار داده می شدند تا با دمای محیط به تعادل برسند. رطوبت اولیه نمونه ها 25٪ (پایه تر) بود و تا رطوبت نهایی 14٪ (پایه تر) که مناسب برای انبارداری ذرت می باشد خشک شدند.



شکل 1- خشک کن بازگردشی کنترل خودکار: (1) دمنده، (2) گرمکن، (3) مسیر انتقال هوای گرم ورودی، (4) مخزن خشک کن، (5) مسیر بازگشت هوا، (6) هوای خروجی، (7) هوای بازگشتی، (8) هوای تازه، (9) سازوکار کنترل میزان هوای بازگشتی و (10) محفظه اختلاط هوا

ارزیابی دستگاه

متغیرهای مستقل در این آزمایش ها شامل دو حالت بازیافت و عدم بازیافت هوای خروجی، سه سطح دبی جرمی هوای ورودی (0/19، 0/26 و $0/33 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) که بر اساس مقادیر توصیه شده برای خشک کردن ذرت انتخاب شده اند [Brooker *et al.*, 1992] و سه سطح دمای هوای ورودی (50، 60 و 70 درجه سلسیوس) و متغیرهای وابسته شامل انرژی مصرفی و زمان خشک شدن می باشند. علاوه بر رطوبت محصول، دما و رطوبت نسبی هوا در ورودی، لایه های سه گانه (در عمق های 10، 20 و 30 سانتی متری بستر)، خروجی و محیط آزمایشگاه به صورت پیوسته اندازه گیری و ثبت شد. طرح آماری آزمون فاکتوریل (2x3x3) بر پایه طرح کامل تصادفی بکار گرفته شد و با استفاده از نرم افزار SPSS و انجام تجزیه واریانس و مقایسه میانگین ها با روش دانکن، اثر تیمارهای مختلف بر متغیرهای وابسته بررسی گردید.

نتایج و بحث

انرژی مصرفی

نتایج تجزیه آماری مربوط به اثر فاکتورهای دبی (Q)، دما (T) و بازیافت/عدم بازیافت هوای خروجی (C) بر انرژی مصرفی نشان داد که اثر اصلی Q و اثر متقابل Q×T بر انرژی مصرفی معنی دار بود (در سطح 0.1٪) اما سایر اثرات معنی دار نشد (جدول 1). دلیل احتمالی معنی دار شدن اثر دبی و معنی دار نشدن اثر دما بر انرژی مصرفی را می توان در میزان انرژی مصرفی بالاتر دمنده و اینورتر (ایجاد سطوح مختلف دبی) (بسیار با هم مقایسه با گرمکن (ایجاد سطوح مختلف دما) خصوصاً در دبی های بالاتر و دماهای پایین تر در طول یک چرخه خشک شدن دانست، درحالیکه کنتور اندازه گیری انرژی مصرفی مجموع این دو را اندازه گیری می کند. علت احتمالی معنی دار نشدن اثر فاکتور C بر مصرف انرژی علیرغم کاهش آن به میزان 5/8٪ در حالت بازگودش هوای خروجی، ناشی از کم بودن میزان بازگودش هوای خروجی می باشد. به دلیل بالا بودن رطوبت نسبی هوای خروجی در طول فرآیند خشک شدن، بازگودش هوای خروجی در بعضی تیمارها از نیمه و در اکثر تیمارها در مراحل پایانی خشک شدن آغاز شد. مقایسه میانگین اثرات متقابل Q×T نشان داد که دبی هوای ورودی $0/19 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ در دمای خشک کردن 70°C با بیشترین مصرف انرژی (4/88kWh) در کلاس a و دبی $0/26 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ در دمای 70°C با کمترین مصرف انرژی (4/40 kWh) در کلاس f قرار می گیرد (شکل 2). بیشترین انرژی مصرفی در دبی $0/19 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و کمترین آن در دبی $0/26 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ مشاهده شد. با افزایش دمای هوای ورودی در دبی $0/19 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ انرژی مصرفی افزایش، اما در دبی $0/26 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و $0/33 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ انرژی مصرفی کاهش می یابد.

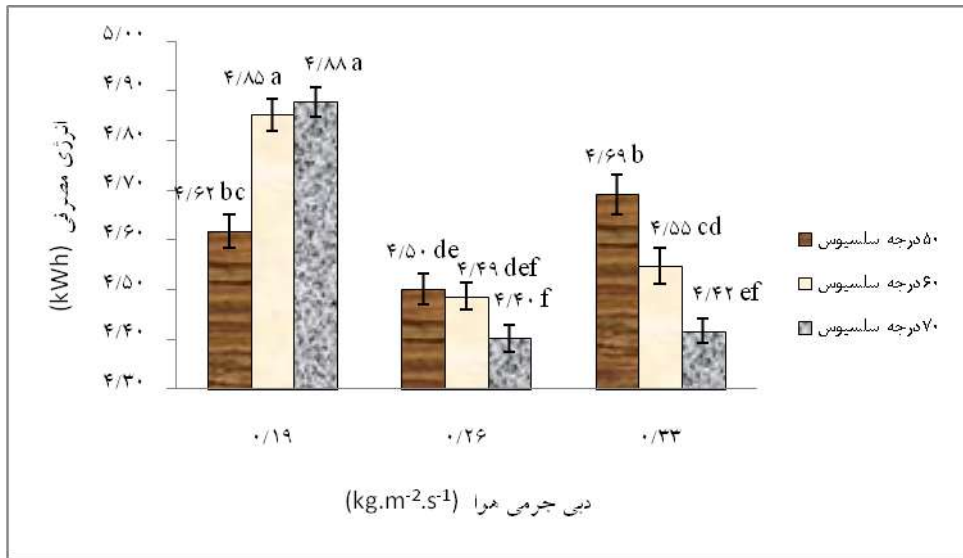
جدول 1- تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل

میانگین مربعات (MS)		درجه آزادی	منبع تغییر
انرژی مصرفی	زمان خشک شدن		
0/487 **	7/843 **	2	دبی Q
0/018 ns	6/183 **	2	دما T
0/012 ns	0/013 ns	1	با/بدون بازگودش C
0/119 **	0/365 **	4	اثر متقابل Q × T
0/011 ns	0/013 ns	2	اثر متقابل Q × C
0/002 ns	0/013 ns	2	اثر متقابل T × C
0/003 ns	0/013 ns	4	اثر متقابل Q × T × C
0/006	0/006	36	خطای آزمایشی

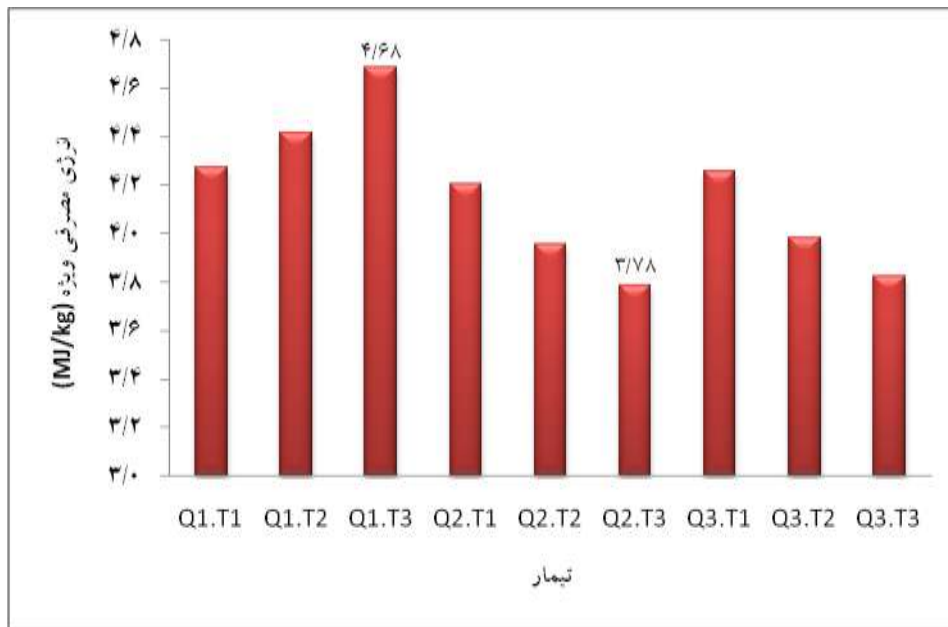
* معنی دار بودن آزمون F در سطح 5٪

** معنی دار بودن آزمون F در سطح 1٪

ns معنی دار نبودن آزمون F در سطح 5٪



شکل 2- اثر متقابل دبی و دمای هوای ورودی بر انرژی مصرفی



شکل 3- انرژی مصرفی ویژه

بیشتر بودن مصرف انرژی در دبی $0/19 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ با توجه به ظرفیت حمل رطوبت هوا در این دبی، این گونه توجیه می شود که به علت پایین بودن دبی، هوای خشک کننده در لایه های پایین بستر محصول اشباع می شود و عملاً نمی تواند رطوبت لایه های بالاتر را کاهش دهد لذا زمان خشک شدن در این دبی بیشتر از سایر دبی ها می باشد (شکل 4) که تاثیر قابل ملاحظه ای بر انرژی مصرفی دارد، به عبارت دیگر با افزایش زمان خشک شدن انرژی مصرفی افزایش پیدا می کند [Khoshtaghaza et al., 2007]. روند صعودی انرژی مصرفی ویژه با افزایش دما در دبی $0/19 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (شکل 3) منطقی به نظر می رسد و این گونه توجیه می شود که با افزایش دمای هوا، انرژی مصرفی گرمکن افزایش می یابد. اما روند نزولی مصرف انرژی با افزایش دما در دبی

$0/26 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و $0/33 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ در شکل 3 این گونه توجیه می شود که با افزایش دمای هوای ورودی، ظرفیت آن برای جذب رطوبت محصول افزایش می یابد و کاهش زمان خشک شدن و نتیجتاً کم شدن مصرف انرژی را به دنبال خواهد داشت.

علت بیشتر بودن مصرف انرژی در دبی $0/33 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ در مقایسه با دبی $0/26 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ نیز بدیهی بوده و به مصرف انرژی بیشتر دمنده در دبی $0/33 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ مربوط می شود. روند نزولی مصرف انرژی با افزایش دما به این دلیل است که با افزایش دما ظرفیت جذب رطوبت هوا افزایش یافته و سبب افزایش شدت خشک شدن محصول شده و محصول سریع تر خشک می شود.

در شکل 5 زمان خشک شدن و انرژی مصرفی تحت تیمارهای مختلف مشاهده می شود. محور افقی تیمارها، محور عمودی سمت چپ زمان خشک شدن (ساعت) و محور عمودی سمت راست انرژی مصرفی (کیلو وات ساعت) را نشان می دهد. Q_1 ، Q_2 و Q_3 به ترتیب برابر $0/19$ ، $0/26$ و $0/33$ کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه و T_1 ، T_2 و T_3 به ترتیب برابر با 50 ، 60 و 70 درجه سلسیوس می باشند. برچسب های W و W/O نیز به ترتیب بیانگر بازگردش و عدم بازگردش هوای خروجی می باشند. بیشترین و کمترین زمان خشک شدن در Q_1T_1 و Q_3T_3 و بیشترین و کمترین انرژی مصرفی در Q_1T_3 و Q_2T_3 مشاهده شد.

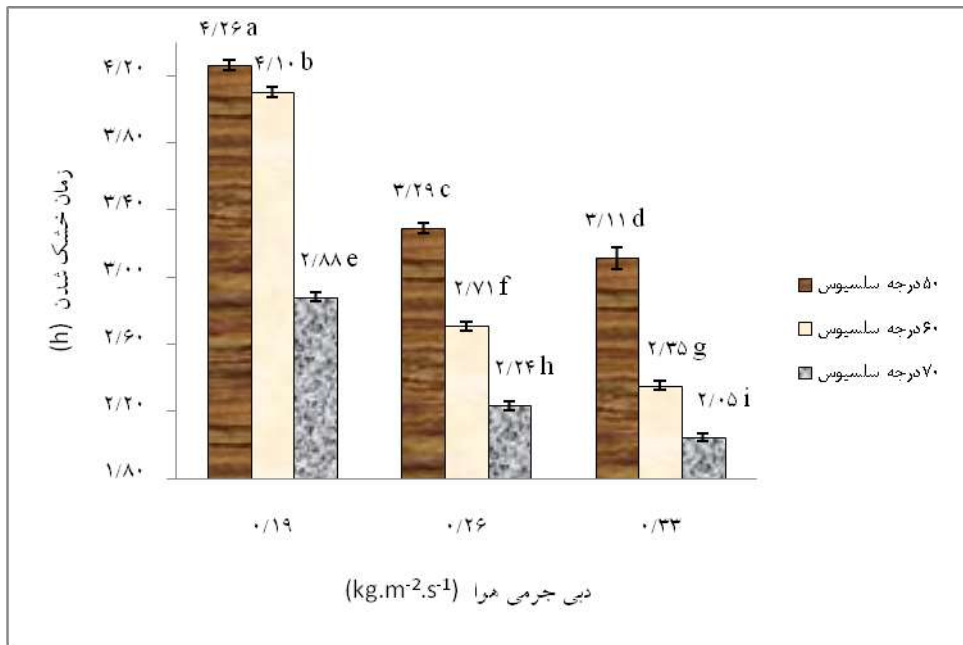
زمان خشک شدن

نتایج تجزیه آماری مربوط به اثر فاکتورهای دبی (Q)، دما (T) و بازیافت/عدم بازیافت هوای خروجی (C) بر زمان خشک شدن نشان داد که فاکتورهای Q و T اثر معنی داری بر آن دارند (در سطح 1%) در حالی که اثر فاکتور C معنی دار نشد. علیرغم کاهش زمان خشک شدن به میزان $1/2$ در حالت بازگردش هوای خروجی، علت احتمالی معنی دار نشدن اثر فاکتور C بر زمان خشک شدن، ناشی از کم بودن میزان بازگردش هوای خروجی می باشد. به دلیل بالا بودن رطوبت نسبی هوای خروجی در طول فرآیند خشک شدن، بازگردش هوای خروجی در بعضی تیمارها از نیمه و در اکثر تیمارها در مراحل پایانی خشک شدن آغاز شد.

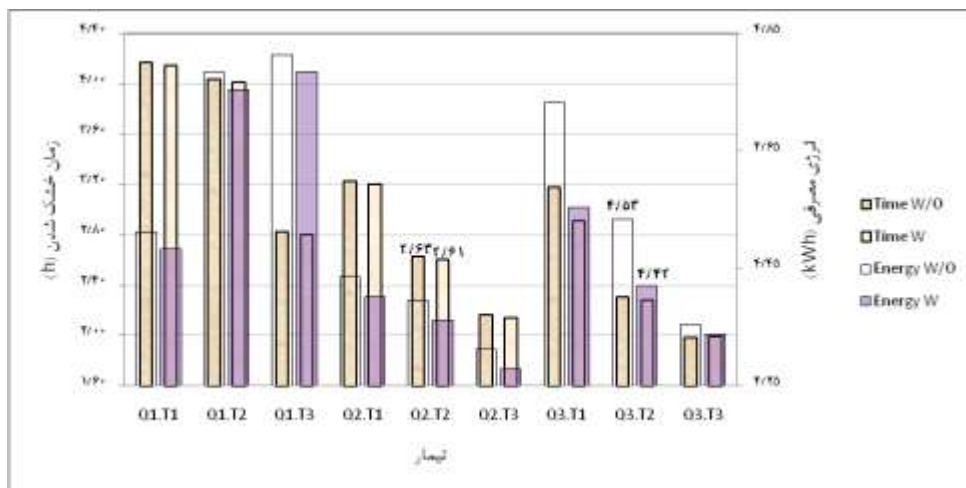
اثر متقابل $Q \times T$ بر زمان خشک شدن نیز معنی دار گردید (در سطح 1%) اما سایر اثرات متقابل معنی دار نشد (جدول 1). مقایسه میانگین اثرات متقابل $Q \times T$ نشان داد که دبی $0/19 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ در دمای خشک کردن 50°C با میانگین زمانی $4/26 \text{ h}$ بیشترین زمان خشک شدن را موجب شده و در کلاس a و دبی $0/33 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ در دمای 70°C با میانگین زمانی $2/05 \text{ h}$ کمترین زمان خشک شدن را داشته و در کلاس i قرار می گیرد (شکل 4).

با افزایش دمای هوای ورودی در یک دبی ثابت، زمان خشک شدن کاهش می یابد (شکل 4). این پدیده مورد انتظار بوده و دلیلش آن است که با افزایش دمای هوا، رطوبت نسبی هوای خشک کننده کاهش می یابد و این امر پتانسیل انتقال جرم از دانه مرطوب به هوای خشک کننده را با افزایش اختلاف فشار جزئی بخار آب بین هوای خشک کننده و محصول افزایش می دهد، ضمن آنکه کاهش رطوبت نسبی هوا باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت آن نیز می شود [Shei and Chen, 2002; Zare et al., 2006]. در دبی $0/19 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و در افزایش دما از 60°C به 70°C زمان خشک شدن با شیب بیشتری کاهش می یابد. با افزایش دبی هوای ورودی در یک دمای ثابت نیز زمان خشک شدن کاهش می یابد (شکل 4). علت آن است که اولاً با افزایش دبی، ضریب انتقال حرارت افزایش یافته و سبب می گردد دمای دانه سریع تر به دمای هوای خشک کننده نزدیک شود و در نتیجه سرعت خشک شدن افزایش می یابد. دوم آنکه با افزایش دبی، اختلاف فشار جزئی بخار آب بین محصول و هوای خشک کننده افزایش می یابد که این امر موجب تسریع در انتقال جرم از محصول به هوای خشک کننده می شود. سوم آنکه با افزایش دبی، ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی کاهش یافته و باعث می گردد مقاومت در مقابل

انتقال جرم کاهش و سرعت خشک شدن افزایش یابد [Pabis *et al.*, 1998]. زارع و همکارانش طی تحقیقی در خشک کردن محصول شلتوک به نتایج مشابهی در مورد تاثیر دبی هوای ورودی بر میزان خشک شدن محصول دست یافتند [زارع و همکاران، 1384].



شکل 4- اثر متقابل دبی و دمای هوای ورودی بر زمان خشک شدن دانه



شکل 5- مقایسه زمان خشک شدن و انرژی مصرفی تحت تیمارهای مختلف

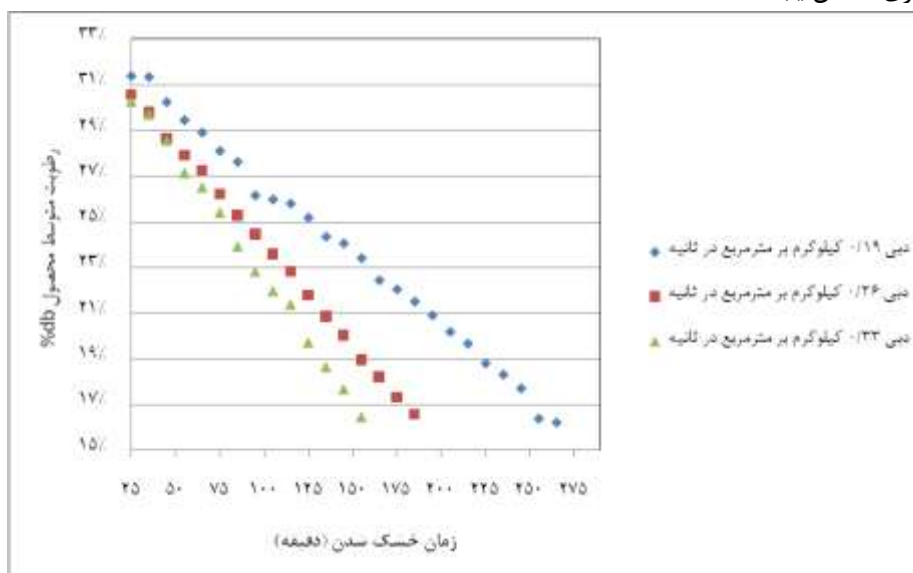
برای یک دبی ثابت، بیشترین میزان کاهش در زمان خشک شدن (30٪) در دبی $0.19 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و در افزایش دما از 60 به 70 درجه سلسیوس و کمترین آن (4٪) نیز در همین دبی و در افزایش دما از 50 به 60 درجه سلسیوس مشاهده شد (شکل 4). در دبی $0.26 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ میزان کاهش در زمان خشک شدن در افزایش دما از 50 به 60 درجه سلسیوس و از 60 به 70 درجه سلسیوس تقریباً مساوی و معادل 17٪ بود. میزان کاهش

در زمان خشک شدن در دبی $0/33\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ در افزایش دما از 50 به 60 درجه سلسیوس و از 60 به 70 درجه سلسیوس به ترتیب معادل 24٪ و 13٪ بود.

برای یک دمای ثابت، بیشترین میزان کاهش در زمان خشک شدن (34٪) در دمای 60 درجه سلسیوس و در افزایش دبی از 0/19 به $0/26\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و کمترین میزان کاهش در زمان خشک شدن (5٪) در دمای 50 درجه سلسیوس و در افزایش دبی از 0/26 به $0/33\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ مشاهده شد.

تغییرات رطوبت متوسط محصول در بستر خشک کن

با توجه به آزمایش های اولیه و نتایج بدست آمده برای به تعادل رسیدن دما و دبی هوا در تیمارهای مختلف، داده های مربوط به 25 دقیقه ابتدایی تمامی تیمارها حذف گردید. با افزایش دبی هوای ورودی تحت همه سطوح دما و بازگردش/عدم بازگردش هوای خروجی، شدت خشک شدن محصول افزایش می یابد. به عبارت دیگر با افزایش دبی هوا، شیب کاهش رطوبت محصول افزایش یافته و زمان خشک شدن کاهش می یابد که در شکل 6 مشاهده می شود (تحت تیمارهای مختلف روندهای مشابهی مشاهده شد). علت افزایش شیب کاهش رطوبت محصول با افزایش دبی آن است که اختلاف فشار جزئی بخار آب بین محصول و هوای خشک کننده افزایش می یابد که این امر موجب تسریع در انتقال جرم از محصول به هوای خشک کننده شده و رطوبت محصول را با شیب بیشتری کاهش می دهد. با افزایش دمای هوای گرم نیز شیب کاهش رطوبت محصول افزایش یافته و زمان خشک شدن کاهش می یابد. علت افزایش شیب کاهش رطوبت محصول با افزایش دما آن است که با افزایش دمای هوا، رطوبت نسبی هوای خشک کننده کاهش می یابد و این امر پتانسیل انتقال جرم از دانه مرطوب به هوای خشک کننده را با افزایش اختلاف فشار جزئی بخار آب بین هوای خشک کننده و محصول افزایش داده و سبب می شود رطوبت محصول با شیب بیشتری کاهش یابد.



شکل 6- تغییرات زمانی رطوبت متوسط محصول متاثر از دبی هوای ورودی (دمای 60°C ، بدون بازگردش هوای خروجی)

نتیجه گیری

در این پژوهش بازیابی دمای هوای خروجی و بهره گیری از یک سیستم کنترل خودکار حلقه بسته در خشک کردن بستر عمیق ذرت مورد مطالعه قرار گرفت. تاثیر سطوح مختلف دبی و دمای هوای ورودی در دو حالت

استفاده و عدم استفاده از انرژی گرمایی هوای خروجی بر انرژی مصرفی ویژه، زمان و نرخ خشک شدن ذرت بررسی گردید.

دبی $0/19 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و دمای 50°C بیشترین زمان خشک شدن، دبی $0/33 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و دمای 70°C کمترین زمان خشک شدن، دبی $0/19 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و دمای 70°C بیشترین مصرف انرژی و دبی $0/26^1 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و دمای 70°C کمترین مصرف انرژی را به خود اختصاص دادند.

نتایج حاکی از آن بود که بازگردش هوای خروجی تحت شرایط کنترل خودکار، زمان خشک شدن و انرژی مصرفی را به ترتیب به میزان $2/1\%$ و $5/8\%$ کاهش می دهد، اگرچه از لحاظ آماری معنی دار نشد. دلیل آن این است که در بعضی از تیمارها به دلیل رطوبت نسبی بالای هوای خروجی، بازگردش جزئی هوای خروجی صورت می پذیرد، لذا پیشنهاد می شود از مواد جاذب رطوبت یا سازوکار مشابه دیگری در مسیر هوای بازگشتی برای کاهش رطوبت آن استفاده گردد تا میزان بازگردش هوای خروجی افزایش یابد.

منابع

- خوشحال، م و مینایی، س 1380. تعیین روابط بین پارامترهای موثر در فرآیند خشکاندن شلتوک به روش مداوم. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، (3): 123-133.
- زارع، د، زمردیان، ع و قاسم خانی، ح 1384. تاثیر دبی جرمی هوای ورودی و زمان تخلیه محصول بر روند کاهش رطوبت شلتوک در یک خشک کن خورشیدی. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، (1): 9-162-251.
- سپیدنام، ق 1385. مهندسی کنترل. (تالیف اوگاتا، ک) انتشارات باغانی، مشهد، 485 ص.
- کیانمهر، م، ح 1380. بررسی عوامل موثر فیزیکی در ترک خوردگی شلتوک در خشک کن با جریان معکوس شونده. رساله دکتری مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C. W. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. A VI Book. Westport, CN, 405 p.
- Iguaz, A., Lopez, A., and Virseda, P. 2002. Influence of air recycling on the performance of a continuous rotary dryer for vegetable wholesale by-products. Journal of Food Engineering. 54(4), 289-297.
- Khoshtaghaza, M. H., Sadeghi, M., and Amiri Chayjan, R. 2007. Study of rough rice drying process in fixed and fluidized bed conditions. J Agric Sci Natural Res. 14(2):127-137.
- Liu, X. 1995. Energy conservation by recirculation of drying air. Ph.D. Thesis. University of Tennessee, Knoxville, TN.
- McDoom, I, A., Ramsaroop, R., Saunders, R., and Tangkal, A. 1999. Optimization of solar drying. Renewable Energy. 16(1-4), 749-752.
- De Monte, M., Paduano, E. and Pozzetto, D. 2003. Waste heat recovery in a coffee roasting plant. Applied Thermal Engineering. 23(8): 1033-1044.

- Moraitis, C. S. and Akritidis, C. B. 1996. Energy saving in industrial drying plants by partial recovery of the latent heat of the exhaust air. Proc. Int. Drying Symp. 10: 489-496.
- Ogulata, R. T. 2004. Utilization of waste-heat recovery in textile drying. Applied Energy. 79(1): 41-49.
- Pabis, S., Jayas, D. S., and Cenkowski, S. 1998. Grain Drying: Theory and Practice. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Ruiz-Lopez, I. I., Martinez-Sanchez, C. E., Cobos-Vivaldo, R. and Herman-Lara, E. 2008. Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods in fixed beds with airflow reversal. Journal of Food Engineering. 89(3): 310-318.
- Schoenau, G. J., Arinze, E. A., Sokhansanj, S., and Trauttmansdorf, F. 1996. Evaluation of energy conservation potential by exhaust air recirculation for a commercial-type heated-air batch hay dryer. Renewable Energy, 9(1-4): 676-681.
- Shawik, D., Tapash, D., Srinivasa Rao, P., and Jain R. K. 2001. Development of an air recirculating tray dryer for high moisture biological materials. Journal of Food Engineering, 50(4): 223-227.
- Shei, H. J., and Chen, Y. L. 2002. Computer simulation on intermittent drying of rough rice. Drying Technology. 20(3): 615-636.
- Spieser, H. 2008. Reclaiming Corn Drying Energy. Ministry of Agriculture, Food & Rural Affairs, Ontario. Available online at <http://www.omafra.gov.on.ca/>.
- Tippayawong, N., Tantakitti, C., and Thavornun, S. 2008. Energy efficiency improvements in longan drying practice. Energy. 33(7): 1137-1143.
- Srzednicki, G. S., Hou, R., and Driscoll, R. H. 2006. Development of a control system for in-store drying of paddy in Northeast China. Journal of Food Engineering. 77(2): 368-377.
- Washington, N. J. 2010. Energy-efficient fluid bed drying system recycles exhaust air to cut heating costs and improve process efficiency. Witte Co., Inc., 07882, USA.
- Zare, D., Minaei, S., Mohammad Zadeh, M., khoshtaghaza, M. H. 2006. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. Energy Conservation and Management. 47(18-19): 3241-3254.