

بررسی خشک کردن پسته در یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه‌ی بازیافت حرارتی هوا به هوا

محسن پورقاسمی رنجبر^۱، حمید مرتضی پور^{۲*}، حسین مقصودی^۳، سیدناصر علوی نائینی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲. استادیار، بخش مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳. استادیار، بخش مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴. دانشیار، بخش مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۹/۱۶)

چکیده

پژوهش حاضر به معرفی و بررسی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه‌ی بازیافت حرارت از هوای گرم خروجی، برای خشک کردن پسته پرداخته است. آزمایش‌های مربوط به ارزیابی خشک‌کن در سه سطح دما و سه سطح دبی هوای خشک‌کننده انجام شدند. نتایج پژوهش نشان داد که با افزایش دما از ۵۵ به ۷۵ درجه‌ی سلسیوس، زمان خشک کردن ۵۷/۶۱ درصد، سهم انرژی خورشیدی ۲۴/۳۲ درصد، سهم انرژی بازیافتی ۶/۸۰ درصد و بازده جمع‌کننده ۲/۵۶ درصد کاهش یافتند. درحالی‌که، انرژی مصرفی گرم‌کن الکتریکی ۱/۹ برابر بیشتر شد. با افزایش دبی از ۰/۴۵ به ۰/۸۵ کیلوگرم بر ثانیه، سهم انرژی خورشیدی ۲۰/۵۴ درصد کاهش، سهم انرژی بازیافتی ۱۸/۳۰ درصد و بازده جمع‌کننده ۵/۱۹ درصد افزایش داشتند. سامانه‌ی بازیافت انرژی به طور متوسط ۲۸/۵۸ درصد از انرژی لازم در طی فرایند خشک کردن را تأمین کرد. همچنین افزایش دما موجب افزایش مقدار خندان شدن پسته و استحکام مکانیکی مغز آن گردید.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن خورشیدی، سامانه بازیافت انرژی، سهم انرژی

مقدمه

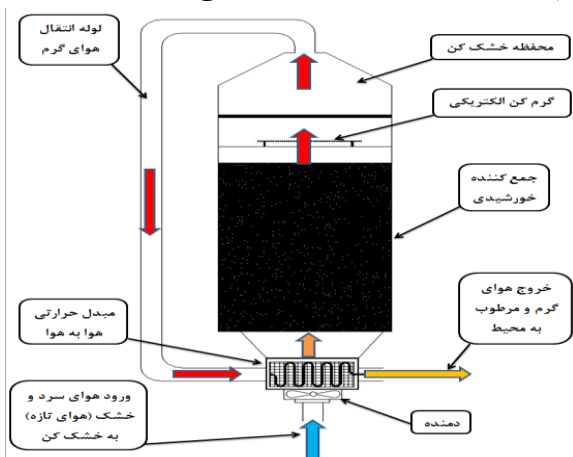
فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی آن‌ها، توجه زیادی به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر به عنوان جایگزین یا مکمل برای سوخت‌های فسیلی شده است. در این راستا، انرژی خورشیدی به عنوان مهم‌ترین منبع انرژی مورد نظر قرار گرفته و استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی به صورت فزاینده‌ای در حال رشد است. چنانچه این خشک‌کن‌ها به خوبی و متناسب با نوع محصول مورد نظر طراحی شوند می‌توانند جایگزین مناسبی برای خشک‌کن‌های صنعتی هوای گرم باشند (Pangavhane et al., 2002). استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی در کشورهای در حال توسعه که بیش از ۸۰ درصد از مواد غذایی آن‌ها را، کشاورزی‌های کوچک تأمین می‌کند، به خوبی می‌تواند مفید واقع شود (Murthy, 2009).

در خشک‌کن‌های هوای گرم، بخش زیادی از انرژی داده شده به هوای خشک‌کننده، از طریق جریان هوای مرطوب خروجی به بیرون از خشک‌کن منتقل شده و به هدر می‌رود. بازیافت انرژی تلف شده، می‌تواند موجب افزایش بازدهی این خشک‌کن‌ها و صرفه‌جویی در مصرف انرژی گردد. از طرفی، گردش دوباره هوای گرم خروجی در داخل خشک‌کن به دلیل آن‌که پس از مدتی رطوبت هوای خشک‌کننده افزایش و در نتیجه توانایی جذب رطوبت آن از سطح محصول کاهش می‌یابد،

پسته یکی از محصولات عمده صادراتی ایران است به طوری که، ۳۴ درصد از صادرات کشاورزی و ۴/۵ درصد از صادرات غیر نفتی ایران را شامل می‌شود. ایران با تولید ۴۷۸۶۰۰ تن پسته در سال، بزرگترین تولیدکننده و صادرکننده آن در جهان می‌باشد (FAO, 2013). عملیات فرآوری پسته شامل پوست گیری، پوک گیری، شست‌وشو، نم‌گیری، خشک کردن، درجه بندی، بسته بندی و انبار کردن می‌باشد. خشک کردن پسته به عنوان مهم‌ترین عملیات پس از برداشت آن به روش سنتی یا با استفاده از خشک‌کن‌های هوای گرم انجام می‌شود. در فرایند خشک کردن، رطوبت پسته از ۶۷-۵۹ درصد به ۶-۵ درصد بر پایه وزن خشک کاهش یافته و قابلیت انبارداری آن افزایش می‌یابد (Kouchakzadeh & Tavakoli, 2011). خشک کردن، یک فرایند پیچیده با مصرف انرژی فراوان می‌باشد. انتخاب روش خشک کردن مناسب می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی باعث بهبود کیفیت محصول تولیدی گردد (Doymaz, 2004). انرژی مورد نیاز خشک کردن به طور معمول از سوخت‌های فسیلی، تأمین می‌گردد. به دلیل افزایش قیمت سوخت‌های

* نویسنده مسئول: h.mortezapour@uk.ac.ir

فعال مجهز به سامانه بازیافت انرژی هوا به هوا در بخش مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهید باهنر کرمان ساخته شد. طرحواره‌ی خشک‌کن خورشیدی ساخته شده در این پژوهش در شکل ۱، نشان داده شده است. اجزای اصلی این خشک‌کن شامل محفظه خشک‌کن، دمنده، جمع‌کننده، گرم‌کن الکتریکی و سامانه‌ی بازیافت انرژی می‌باشد. در این خشک‌کن، دمای هوای تازه ورودی پس از عبور از داخل جمع‌کننده خورشیدی افزایش می‌یابد، پس از آن، چنانچه دمای هوای خشک‌کننده به حد مطلوب نرسید، گرم‌کن کمکی روشن می‌گردد. در ادامه، هوای خشک‌کننده با دمای مناسب از بین محصول پهن شده روی سینی‌های مخصوص عبور کرده و هنگام جذب رطوبت محصول، تا حدودی دمای آن کاهش می‌یابد. هوای به نسبت گرم و مرطوب پس از آن، وارد کانال انتقال شده و قبل از خروج از خشک‌کن، از داخل یک مبدل حرارتی نوع هوا به هوا عبور می‌کند. در مبدل حرارتی، هوای گرم و مرطوب خروجی از محفظه، نقش جریان گرم و هوای خنک و خشک ورودی به خشک‌کن، نقش جریان سرد را ایفا می‌کنند. بنابراین، بخشی از انرژی هوای گرم و مرطوب خروجی، در مبدل حرارتی، به جریان هوای ورودی به خشک‌کن منتقل شده و مبدل مانند یک پیش‌گرم‌کن برای هوای خشک‌کننده عمل می‌کند.



شکل ۱. طرح واره خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه بازیافت انرژی جمع‌کننده‌ی خورشیدی بکار رفته در خشک‌کن در شکل ۲ نشان داده شده است. این جمع‌کننده، از یک صفحه‌ی جذب آلومینیومی به مساحت ۱/۱ مترمربع، که به منظور جذب حداکثر توان تابشی خورشید سطح آن سیاه شده بود، ساخته شد. روی سطح صفحه جذب تعدادی پره به صورت عمود بر جهت جریان هوا و تعداد ۳۰۰ سوراخ با قطر ۱۲ میلی‌متر ایجاد گردید و در نهایت صفحه جذب به صورت مورب در داخل محفظه جمع‌کننده نصب شد تا جریان هوا از داخل سوراخ‌ها انجام پذیرد. دیواره‌های جمع‌کننده از جنس چوب بود که با پوشش

نمی‌تواند چندان موثر باشد. برای رفع این مشکل، راه‌حل‌های متنوعی ارائه گردیده است. گردش بخشی از هوای خروجی و ترکیب آن با هوای خشک و سرد تازه (Roustapour *et al.*, 2015) و استفاده از بستر مواد جاذب رطوبت (Aghkhani *et al.*, 2007; Punlek *et al.*, 2009; Shanmugam & Natarajan, 2013) از جمله روش‌های مورد استفاده در این راستا می‌باشند. مواد جاذب رطوبت ظرفیت محدودی دارند و پس از اشباع شدن، دوباره باید احیا گردند که این امر نیازمند صرف زمان و انرژی می‌باشد. برای رفع این محدودیت، به‌کارگیری پمپ حرارتی در خشک‌کن‌های هوای گرم، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Chapchaimoh Aktaş *et al.*, 2016; Şevik *et al.*, 2013; Erbay & Icier, 2009; *et al.*, 2016). در خشک‌کن‌های پمپ حرارتی، هوای گرم و مرطوب خروجی از محفظه محصول پس از عبور از داخل تبخیرکننده، حرارت خود را به مبرد داخل آن می‌دهد و در نتیجه این فرایند بخشی از رطوبت موجود در هوا به دلیل کاهش دمای آن به صورت مایع از جریان هوا جدا می‌گردد. گرمای گرفته شده از هوا، در ادامه از طریق چگالنده به هوای خشک‌کننده برگردانده می‌شود. بررسی تحقیقات انجام شده در این راستا حاکی از آن است که خشک‌کن‌های پمپ حرارتی دارای بازده انرژی بالا هستند و برای تولید محصولات حساس به حرارت و با کیفیت بالا مناسب می‌باشند.

خشک‌کن‌های پمپ حرارتی به دلیل داشتن یک سامانه تبرید تراکمی علاوه بر خشک‌کن هوای گرم، نسبت به انواع مرسوم پیچیده‌ترند و از طرفی، پمپ بکار رفته در این نوع از خشک‌کن‌ها، نیاز به استفاده از توان الکتریکی دارد که یکی از محدودیت‌های خشک‌کن‌های پمپ حرارتی به شمار می‌رود. در پژوهش حاضر به منظور بازیافت انرژی از هوای گرم خروجی از خشک‌کن خورشیدی، یک سامانه‌ی جدید بازیافت حرارتی از نوع هوا به هوا، ارائه و تأثیر آن بر روی عملکرد خشک‌کن خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفت. از این رو، هدف اصلی تحقیق، مطالعه‌ی اثر برخی از ویژگی‌های کاری خشک‌کن (شامل دما و دبی هوای عبوری) بر انرژی مصرفی، سهم انرژی خورشیدی، بازدهی جمع‌کننده‌ی خورشیدی، زمان خشک شدن و برخی خواص فیزیکی و مکانیکی پسته خشک شده در خشک‌کن بود. بررسی‌های انجام شده نشان داد که استفاده از سامانه مذکور تاکنون در منابع پیشین گزارش نشده است.

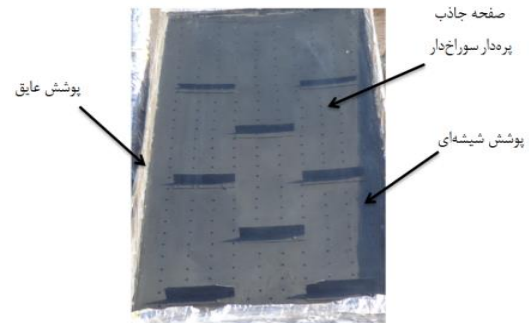
مواد و روش‌ها

برای خشک کردن محصول، یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی

ارزیابی آن در مهر و آبان سال ۱۳۹۴ در دانشگاه شهید باهنر کرمان، از ساعت ۹ تا ۱۵ انجام گرفت و تأثیر دو عامل دما در سه سطح (۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه‌ی سلسیوس) و دبی هوای خشک‌کننده در سه سطح (۰/۰۴۵، ۰/۰۶۵ و ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه) بر ویژگی‌های عملکردی خشک‌کن خورشیدی (شامل مدت زمان خشک کردن، بازدهی جمع‌کننده، انرژی الکتریکی مصرفی و سهم انرژی خورشیدی و بازیافتی) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین این ویژگی‌های، صفات اندازه‌گیری شده در هر آزمایش شامل دمای هوای ورودی و خروجی از مبدل حرارتی هوا به هوا (به کار رفته در سامانه بازیافت حرارتی)، دمای هوای ورودی و خروجی جمع‌کننده خورشیدی و همچنین شدت تابش خورشید روی سطح جمع‌کننده، وزن لحظه‌ای محصول و توان مصرفی گرم‌کن الکتریکی بودند. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شدند.

برای ثبت و کنترل دما از ۶ عدد حسگر دما (مدل LM35) استفاده گردید که در محیط، محل ورودی هوا به جمع‌کننده، خروجی هوا از جمع‌کننده، بعد از گرم‌کن الکتریکی، خروجی محفظه‌ی خشک‌کن و ورودی هوا به مبدل حرارتی نصب گردیدند. دمای خوانده شده توسط این حسگرها در فاصله‌های زمانی ۱۵ دقیقه ثبت و ذخیره می‌شد. از دو عدد لودسل (مدل L6D، شرکت ZEMIC) برای نمایش تغییرات جرم محصول در طول زمان خشک کردن استفاده گردید. این حسگرها در داخل محفظه و زیر سینی محصول نصب شدند. لودسل‌ها به وسیله‌ی یک ترانسسمیتر لودسل (مدل TM1020، ساخت شرکت مهندسی تیکا در ایران) به رایانه متصل شده و جرم محصول را نمایش می‌دادند. در نهایت، داده‌های مربوط به تغییرات جرم محصول، در فاصله‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای ثبت می‌گردید. به منظور اندازه‌گیری دبی هوای عبوری از خشک‌کن، از یک سرعت سنج هوایی پره‌ای (مدل BE816A، شرکت BESTONE) استفاده گردید. شدت تابش خورشید با استفاده از یک دستگاه سولاری متر (مدل TES 1333 R، شرکت TES، ساخت تایوان) اندازه‌گیری شد. این دستگاه به گونه‌ای در کنار جمع‌کننده نصب گردید که حسگر آن موازی با سطح جمع‌کننده بود. از یک سامانه‌ی کنترل دما، مجهز به یک کنترل کننده‌ی AVR (Advanced Virtual RISC) برای ثابت نگه داشتن دمای هوای داخل خشک‌کن، استفاده شد. این سامانه دارای یک کنترل‌گر دو وضعیتی برای کنترل گرم‌کن الکتریکی بود. توان مصرفی دمنده و گرم‌کن الکتریکی به وسیله ترانسسمیتر وات‌متر (مدل TM1510 ساخت شرکت تیکا، ایران) در

پشم شیشه به ضخامت ۴ سانتی‌متر عایق گردید و روی یک شاسی فلزی قابل حمل تحت زاویه‌ی ۳۰ درجه، برابر عرض جغرافیایی شهر کرمان نصب شد.



شکل ۲. تصویر جمع‌کننده‌ی خورشیدی استفاده شده در خشک‌کن مورد ارزیابی

دو عدد گرم‌کن الکتریکی ۷۰۰ وات به عنوان گرم‌کن کمکی در محفظه‌ی خشک‌کن نصب گردیدند. محفظه‌ی محصول از جنس چوب بود که بدنه‌ی آن با پشم شیشه عایق شده بود. در قسمت پشت محفظه، دربی به منظور قرار دادن سینی محصول در داخل محفظه تعبیه گردید. برای به جریان درآوردن هوای خشک‌کننده در قسمت‌های مختلف خشک‌کن از یک دمنده استفاده گردید. ولتاژ تغذیه دمنده ۱۲ ولت DC بود که توسط باتری تأمین شد و برای تنظیم سرعت آن از مقاومت متغیر در مدار دمنده استفاده گردید. مبدل حرارتی بکار رفته در سامانه‌ی بازیافت، از نوع آلومینیومی پره‌ای دارای ۲۸ پره با ابعاد ۱۵ در ۳۵ سانتی‌متر و قطر لوله میانی ۲/۵ سانتی‌متر بود. مبدل حرارتی در داخل یک محفظه‌ی چوبی با پوشش سطح بیرونی پشم شیشه، نصب گردید. جهت جریان هوا در داخل مبدل حرارتی به گونه‌ای بود که جریان هوای گرم و مرطوب خروجی از داخل لوله میانی مبدل و جریان سرد ورودی از فضای اطراف پره‌ها عبور می‌کرد. تصویر کاملی از خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه‌ی بازیافت حرارتی، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. تصویر خشک‌کن خورشیدی مورد استفاده در پژوهش

روش انجام آزمایش

پس از اتمام مراحل ساخت خشک‌کن، آزمایش‌های مربوط به

$$\dot{Q}_r = \dot{m} c_p (T_{ic} - T_{ix}) \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن T_{ix} دمای هوای سرد و تازه ورودی به مبدل حرارتی ($^{\circ}\text{C}$) است. سهم خورشیدی (S_F)، بیانگر بخشی از انرژی مصرفی است که توسط جمع‌کننده خورشیدی تأمین گردیده و از رابطه ۸ محاسبه می‌گردد.

$$SF = \frac{E_s}{E_T} \times 100 \quad (\text{رابطه ۸})$$

سهم انرژی بازیافت شده (RF)، نشان دهنده سهمی از انرژی مصرفی است که توسط گرمای بازیافت شده تأمین می‌شود، از رابطه ۹ بدست می‌آید.

$$RF = \frac{E_r}{E_T} \times 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

از دیگر پارامترهای بررسی شده در تحقیق حاضر، تاثیر شرایط مختلف هوای خشک‌کننده بر نیروی لازم برای شکست مغز پسته و مقدار بازده‌گی دهان آن (مقدار خندان شدن پسته) بود. برای این منظور پس از هر بار خشک‌کردن، تعداد ۵۰ عدد از پسته‌های خشک‌شده به صورت تصادفی انتخاب و سپس آزمایش‌های مورد نظر بر روی آن‌ها انجام شد. در این راستا، اندازه دهانه باز پسته‌ها، با استفاده از یک کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر (مدل DIAL CALIPER ساخت شرکت Mitutoyo، ژاپن) مطابق شکل ۴ اندازه‌گیری شد و به منظور انجام مقایسه‌های آماری از صفت عدد خندانی که بیانگر متوسط اندازه‌ی دهانه‌ی باز پسته‌های خشک شده است، استفاده گردید (Razavi et al., 2007).



شکل ۴. نحوه‌ی اندازه‌گیری خندانی پسته

نیروی شکست مغز پسته با استفاده از یک دستگاه تست کشش-فشار (مدل اینسترون SMT-5، ساخت شرکت سنتام، ایران) تعیین گردید. دستگاه تست کشش-فشار مورد استفاده دارای فک‌های نوع صفحه‌ای صاف و صیقلی بود و بیشترین نیروی لازم برای ظاهر شدن اولین ترک‌ها روی مغز پسته مطابق روش (Nazari Galedar et al., 2009)، به عنوان نیروی شکست در هر آزمایش ثبت می‌شد.

فاصله‌های زمانی نیم ثانیه‌ای اندازه‌گیری و ثبت شد.

به منظور انجام آزمایش‌ها، در این پژوهش، پسته رقم کله قوچی از شهرستان سیرجان واقع در استان کرمان تهیه گردید. قبل از انجام هر آزمایش یک کیلوگرم از محصول به روش دستی، پوست‌گیری، شستشو و آب‌گیری می‌گردید. رطوبت اولیه محصول، قبل از هر آزمایش با روش آون، در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس و مدت زمان ۲۴ ساعت محاسبه می‌شد (Kashaninejad et al., 2006).

برای تعیین رطوبت اولیه محصول بر پایه وزن خشک از رابطه ۱ استفاده شد.

$$MC = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن MC محتوای رطوبت محصول ($\%$)، M_w وزن اولیه (kg) و M_d وزن خشک محصول (kg) می‌باشد. بازده جمع‌کننده خورشیدی از رابطه ۲ محاسبه گردید.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_c}{A \cdot I_t} \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن η_{th} بازده جمع‌کننده ($\%$)، A مساحت جمع‌کننده خورشیدی (m^2)، I_t شدت تابش خورشیدی (W/m^2) و \dot{Q}_c نرخ گرمای مفید جمع‌کننده (W) می‌باشد که از رابطه ۳ محاسبه گردید.

$$\dot{Q}_c = \dot{m} c_p (T_{oc} - T_{ic}) \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه بالا \dot{m} دبی جرمی هوای عبوری (kg/m^2)، c_p متوسط گرمای ویژه هوا در فشار ثابت ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$) در محدوده دمایی مورد آزمایش، T_{ic} دمای هوای ورودی به جمع‌کننده ($^{\circ}\text{C}$)، T_{oc} دمای خروجی از جمع‌کننده ($^{\circ}\text{C}$) می‌باشند. مجموع انرژی مصرفی فرایند خشک‌شدن از رابطه ۴ بدست آمد.

$$E_T = E_S + E_{el} + E_r \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن E_T : انرژی کل مصرفی (kJ)، E_S : انرژی خورشیدی تولید شده در جمع‌کننده (kJ)، که از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد، E_{el} : شامل انرژی مصرفی دمنده و گرمکن الکتریکی (kJ)، که به وسیله ترانس‌میترووات‌متر بدست می‌آید و E_r : انرژی بازیافتی (kJ) است که از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$E_s = \int \dot{Q}_c \cdot dt \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$E_r = \int \dot{Q}_r \cdot dt \quad (\text{رابطه ۶})$$

که t نشان دهنده زمان (s) و \dot{Q}_r نرخ انرژی حرارتی بازیافت شده (W) می‌باشد که از رابطه ۷ بدست آمد.

نتایج و بحث

در آزمایش‌های مربوط به ارزیابی خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه بازیافت حرارتی طرح حاضر، پسته به صورت لایه نازک خشک گردید و تاثیر عامل دما در سه سطح (۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سلسیوس) و دبی هوای خشک‌کننده در سه سطح (۰/۰۴۵، ۰/۰۶۵ و ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه) مورد بررسی قرار گرفت. عمل خشک کردن تا رسیدن به رطوبت مطلوب نگه‌داری پسته که حدود ۶ درصد بر پایه وزن خشک می‌باشد، ادامه داشت. از آنجا که در خشک‌کن خورشیدی ساخته شده، هوای تازه ابتدا از مبدل حرارتی می‌گذشت، دمای آن در لحظه ورود به جمع‌کننده تحت تاثیر دما و دبی هوای مرطوب خروجی بود. بنابراین تاثیر افزایش دمای ورودی به جمع‌کننده بر بازده جمع‌کننده خورشیدی نیز می‌بایست در نظر گرفته می‌شد. نتایج تجزیه واریانس بازده جمع‌کننده در جدول ۱ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، مشاهده می‌گردد که اثر دما و دبی در سطح ۱ درصد و اثر متقابل آنها در سطح ۵ درصد معنی دار گردید. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دما و دبی هوای خشک‌کنی بر بازدهی جمع‌کننده به روش چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، در شکل ۵ نشان داده شده

است.

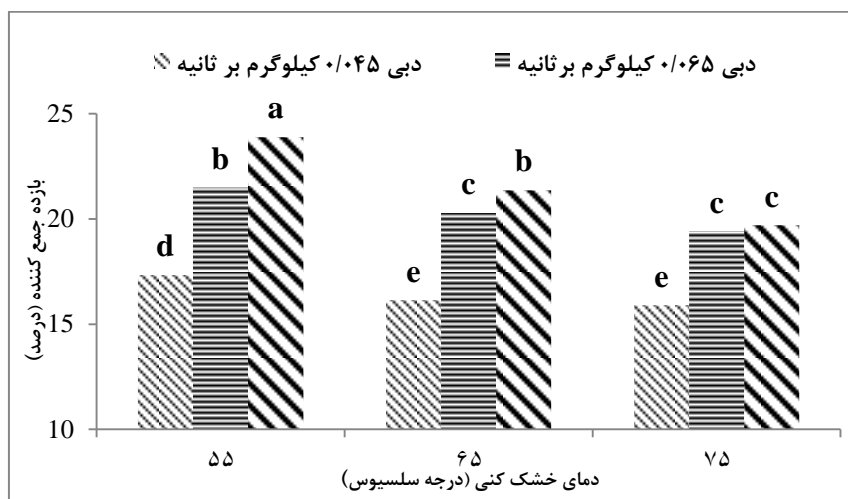
جدول ۱. تجزیه واریانس تاثیر دما و دبی هوای خشک‌کننده بر بازده جمع

کننده		
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
دما	۲	۱۵/۲۳۹**
دبی	۲	۶۶/۱۱۶**
دما×دبی	۴	۱/۵۷۷*
خطا	۱۸	۰/۲۶۷

***، ** و ns به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد،

۵ درصد و عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

با بررسی آن مشاهده می‌گردد که افزایش دبی از ۰/۰۴۵ به ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه، ۵/۱۹ درصد بازده جمع‌کننده را افزایش می‌دهد. دلیل اصلی آن، افزایش ضریب انتقال حرارت هوای عبوری با زیاد شدن سرعت هوا است. همچنین، با افزایش دمای خشک‌کنی به ۷۵ درجه‌ی سلسیوس، بازده جمع‌کننده ۲/۵۶ درصد کاهش یافت. دلیل این امر افزایش دمای شاره سرد خروجی از سامانه بازیافت و به دنبال آن افزایش دمای ورودی به جمع‌کننده می‌باشد که این عامل سبب کاهش انتقال حرارت از صفحه جاذب جمع‌کننده‌ی خورشیدی به آن و کاهش بازدهی جمع‌کننده می‌شود (Duffie & Beckman, 2006).



شکل ۵. اثر متقابل دما و دبی بر بازده جمع‌کننده

نتایج تجزیه واریانس مدت زمان خشک کردن نشان داد که اثر دما بر سرعت خشک شدن در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد. همچنین، تاثیر دبی هوای خشک‌کنی در سطح ۵ درصد معنی‌دار و اثر متقابل دما و دبی هوای خشک‌کنی بر زمان خشک شدن ناچیز و معنی‌دار نمی‌باشد. با توجه به جدول ۱ اثر دما و دبی هوای عبوری بر سهم خورشیدی، سهم انرژی بازیافتی و برق مصرفی در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است. همچنین اثر متقابل دما و دبی در سطح ۱ درصد بر روی سهم انرژی

انرژی مورد نیاز برای خشک کردن محصول، شامل انرژی الکتریکی مصرفی، انرژی فراهم شده توسط جمع‌کننده خورشیدی و انرژی بازیافتی می‌شود. بنابراین سهم انرژی هر یک از آنها در هر یک از تیمارهای آزمایش، به تفکیک اندازه‌گیری و انرژی مصرفی کل محاسبه شده است. نتایج آنالیز واریانس، تاثیر دما و دبی هوای خشک‌کننده بر سهم انرژی خورشیدی، سهم انرژی بازیافتی، برق مصرفی و همچنین زمان خشک شدن محصول در جدول ۲ آورده شده است.

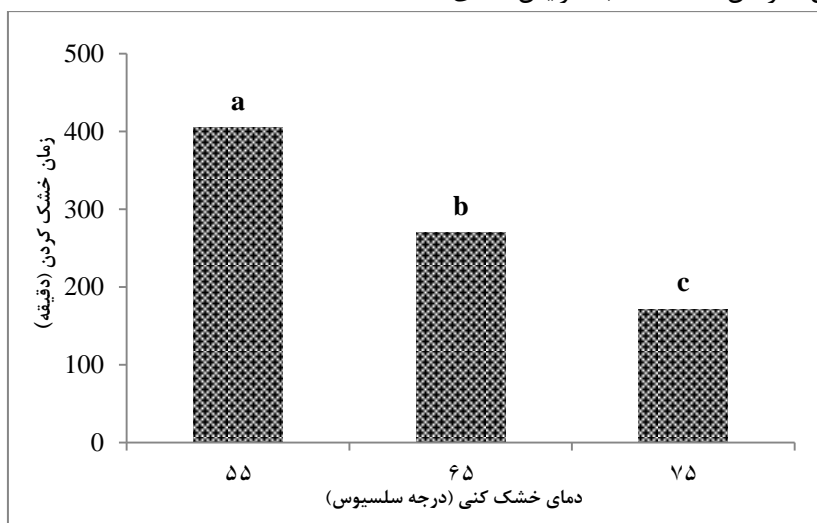
بازیافتی و برق مصرفی معنی دار گردید در حالی که اثر متقابل آن بر روی سهم خورشیدی در سطح ۵ درصد معنی دار گردید. جدول ۲. تجزیه واریانس تاثیر دما و دبی هوای خشک کننده بر زمان خشک شدن محصول، سهم انرژی خورشیدی، سهم انرژی بازیافتی و برق مصرفی

منبع تغییرات		درجه آزادی		میانگین مربعات	
دما	دبی	دما×دبی	خطا	سهم انرژی خورشیدی	سهم بازیافتی
۲	۲	۴	۱۸	۹۵۹/۷۳۷**	۱۱۸/۲۸**
۱۲۳۵/۸*	۱۴۰۸*	۵۸ ^{ns}	۱۸۳	۶/۹۴۸*	۳۴/۱۵**
۰/۰۶۲**	۰/۰۰۸**	۰/۰۰۱**	۷/۳۲۶E-۵	۱/۶۴۱	۰/۷۱

***، ** و ns به ترتیب اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و عدم اختلاف معنی دار می باشد.

خشک کنی، اختلاف فشار بخار آب بین محصول و هوا افزایش می یابد بنابراین سرعت تبخیر زیادتر می گردد، و این امر سبب افزایش سرعت خشک کردن می شود. این یافته با نتایج تحقیقات پیشین در خصوص محصولات دیگر نیز همخوانی دارد (Fatouh et al., 2006; Tello-Arslan & Musa Özcan, 2010; Ireland et al., 2011).

نتایج مقایسه میانگین اثر دمای خشک کنی بر زمان خشک شدن به روش چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، در شکل ۶ نشان داده شده است. با بررسی آن مشاهده می شود که با افزایش دمای خشک کنی، زمان خشک کردن به طور قابل توجهی کاهش می یابد، به طوری که با افزایش دما از ۵۵ به ۷۵ درجه سلسیوس، ۵۷/۶۱ درصد زمان خشک شدن کوتاه تر گردید. دلیل این امر آن است که با افزایش دمای



شکل ۶. تاثیر دمای خشک کنی بر زمان خشک کردن

افزایش دبی از ۰/۰۴۵ به ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه، زمان خشک کردن ۸/۴۷ درصد کوتاه تر گردید. این امر نشان می دهد افزایش دبی سبب کاهش زمان خشک کردن می شود که با نتایج تحقیقات پیشین در مورد محصولات دیگر نیز مطابقت دارد (Razmipour et al., ; Aghkhani et al., 2013). (2015)

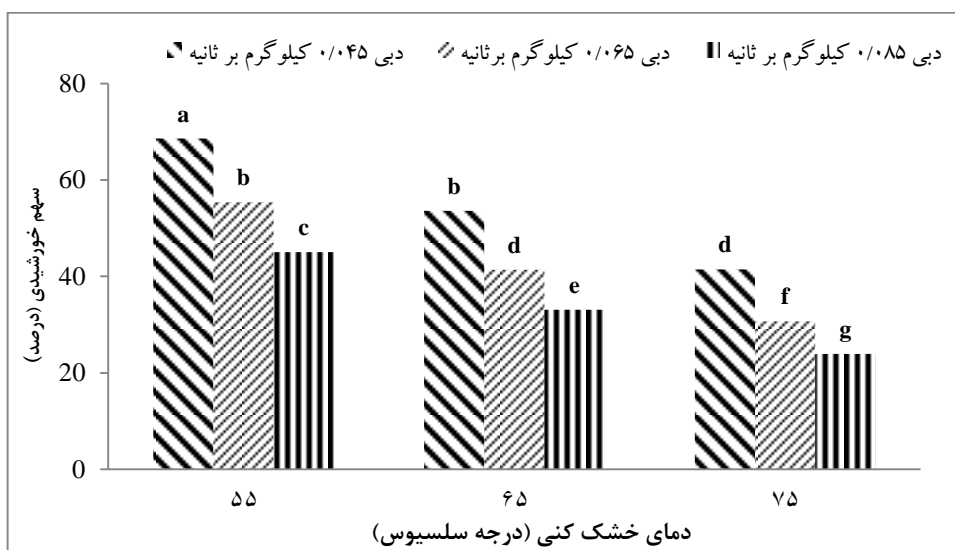
نتایج مقایسه میانگین تاثیر دبی خشک کنی بر زمان خشک کردن به روش چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، در شکل ۷ نشان داده شده است. با بررسی شکل ۵ مشاهده می شود که با افزایش دبی از ۰/۰۴۵ به ۰/۰۶۵ کیلوگرم بر ثانیه و همچنین با افزایش دبی از ۰/۰۶۵ به ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه زمان خشک شدن اندکی کاهش داشت، اما با



شکل ۷. اثر دبی هوای خشک کنی بر زمان خشک کردن

از جمع کننده با دمای خشک کنی می‌باشد که باعث افزایش مدت زمان روشن شدن گرم‌کن الکتریکی می‌گردد و این عامل کاهش سهم خورشیدی را در پی دارد. بعلاوه، با افزایش دمای هوای خشک‌کننده، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد که این دو عامل در مجموع کاهش سهم خورشیدی را بدنبال دارند. در این خصوص نتایج مشابهی در تحقیقات پیشین گزارش شده است (Mortezapour *et al.*, 2012). در مجموع بالاترین سهم خورشیدی مشاهده شده ۶۸ درصد بود که در دبی ۰/۰۴۵ کیلوگرم بر تانیه و دمای هوای خشک‌کننده ۵۵ درجه سلسیوس بدست آمد و می‌توان گفت متوسط سهم انرژی خورشیدی در شرایط مختلف خشک‌کردن پسته در خشک‌کن ساخته شده ۴۳/۶۷ بود.

اثر دما و دبی هوای خشک‌کننده بر سهم انرژی خورشیدی در شکل ۶ نشان داده شده است، با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش دبی هوا، سهم انرژی خورشیدی کاهش می‌یابد به طوری که با افزایش دبی به ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر تانیه سهم انرژی خورشیدی ۲۰/۵۴ درصد کم‌تر شد. بالا بردن سرعت عبور هوا از داخل خشک‌کن از یک سو بازده جمع‌کننده را افزایش داده که افزایش سهم خورشیدی را بدنبال داشته است. اما از طرف مقابل، با کاهش زمان خشک‌شدن و افزایش مدت استفاده از گرم‌کن کمکی، موجب کاهش بیشتر سهم خورشیدی گردیده است. با توجه به شکل ۸، با افزایش دما از ۵۵ به ۷۵ درجه سلسیوس، سهم خورشیدی ۲۴/۳۲ درصد کاهش یافت. دلیل این امر افزایش اختلاف دمای هوای خروجی



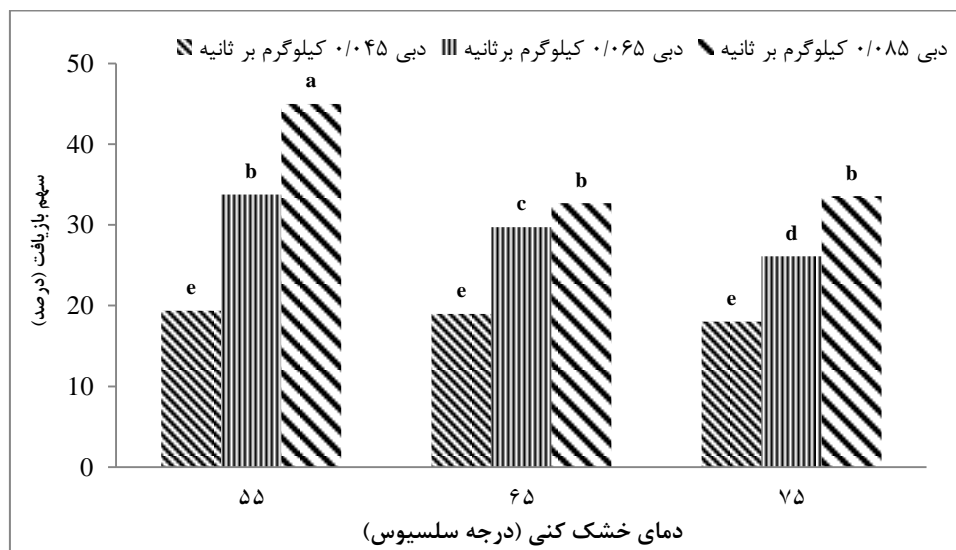
شکل ۸. اثر متقابل دما و دبی بر سهم خورشیدی

افزایش دبی از ۰/۰۴۵ به ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر تانیه سهم انرژی بازیافتی به طور متوسط ۱۸/۳۰ درصد افزایش یافت. دلیل این

در شکل ۹ نحوه تغییر سهم انرژی بازیافتی در شرایط مختلف خشک‌کردن، آورده شده است. با توجه به شکل با

عامل کاهش سهم انرژی بازیافتی را در پی خواهد داشت. بعلاوه، در دماهای بالای هوای عبوری، تلفات حرارت در کانال انتقال به دلیل بالا بودن اختلاف دما با محیط اطراف بیشتر می‌شود که این نیز می‌تواند دلیلی بر کاهش کارایی سامانه بازیافت حرارت باشد. در مجموع می‌توان گفت به طور متوسط سهم انرژی بازیافتی در شرایط مختلف خشک کردن با خشک‌کن مورد نظر، ۲۸/۵۸ درصد است.

امر افزایش دمای هوای ورودی به مبدل حرارتی و کاهش هدر رفت انرژی در مسیر انتقال می‌باشد. با افزایش دمای خشک کنی به ۷۵ درجه سلسیوس سهم بازیافت انرژی در مجموع ۶/۸۰ درصد افت داشت. با افزایش دمای خشک‌کنی اختلاف دمای خروجی از جمع کننده با دمای خشک‌کنی افزایش می‌یابد و این عامل سبب افزایش مدت زمان روشن ماندن گرم‌کن الکتریکی می‌شود بنابراین سهم انرژی الکتریکی افزایش می‌یابد که این



شکل ۹. اثر متقابل دما و دبی بر سهم انرژی بازیافتی

درجه سلسیوس، انرژی الکتریکی مصرفی به ترتیب ۲۵/۵۶، ۳۸/۴۷ و ۲۸/۲۶ درصد افزایش می‌یابد. این یافته با نتایج تحقیقات پیشین مطابقت دارد (Fatouh *et al.*, 2006; Mortezapour *et al.*, 2012). نتایج تجزیه واریانس اثر شرایط مختلف هوای خشک‌کننده بر عدد خندانی و نیروی شکست مغز پسته در جدول ۳ آورده شده است. به طور مشخص، دمای خشک‌کنی بر مقدار خندان شدن و نیروی شکست مغز پسته اثر معنی داری داشته در حالی که دبی و اثر متقابل دبی و دما نتوانسته‌اند اثر چندانی بر این دو پارامتر بگذارند.

تغییرات مجموع انرژی الکتریکی مصرفی فرایند خشک شدن محصول در شرایط مختلف هوای خشک‌کننده، در شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به این شکل، با افزایش دما از ۵۵ به ۷۵ درجه سلسیوس، انرژی الکتریکی مصرفی در دبی‌های ۰/۰۴۵، ۰/۰۶۵ و ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه، به ترتیب ۱/۷۷، ۲/۰۶ و ۱/۸۷ برابر افزایش می‌یابد. از آنجا که مصرف انرژی در خشک‌کن رابطه‌ی مستقیم با دمای خشک کنی دارد، با افزایش دمای خشک کنی مدت زمان روشن ماندن گرم‌کن الکتریکی طولانی‌تر می‌شود که این عامل سبب افزایش انرژی الکتریکی مصرفی گردیده است. همچنین با افزایش دبی خشک کنی به ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه در دماهای خشک کنی ۵۵، ۶۵ و ۷۵

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر دبی و دمای هوای خشک‌کننده بر عدد خندانی و نیروی شکست

میانگین مربعات		درجه آزادی	منبع تغییرات
نیروی شکست	عدد خندانی		
* ۵۴/۵۱	** ۱۷۳/۳۵۳	۲	دما
ns ۰/۰۱۱	ns ۰/۵۶۳	۲	دبی
ns ۰/۳۱۲	ns ۰/۰۰۶	۴	دما*دبی
۱۲/۸۳	۰/۷۶۴	۱۸	خطا

***، ** و ns به ترتیب اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد.

۵ درصد و عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.



شکل ۱۰. اثر متقابل دما و دبی بر انرژی الکتریکی مصرفی

شد. نتایج بدست آمده از تحقیق به طور خلاصه نشان داد که:

افزایش دمای هوای خشک‌کننده از ۵۵ به ۷۵ درجه سلسیوس و افزایش دبی به ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه، زمان خشک کردن را به ترتیب ۵۷/۶۱ و ۸/۴۷ درصد کاهش دادند. افزایش دبی از ۰/۰۴۵ به ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه، ۵/۱۹ درصد بازده جمع‌کننده را افزایش داد. همچنین، با افزایش دمای خشک‌کنی به ۷۵ درجه سلسیوس، بازده جمع‌کننده ۲/۵۶ درصد کاهش یافت.

بررسی اثر افزایش دبی و دمای خشک‌کنی بر روی سهم انرژی خورشیدی نشان داد که هر دو عامل سبب کاهش سهم خورشیدی می‌شوند. در مجموع متوسط سهم انرژی خورشیدی بدست آمده در شرایط مختلف خشک‌کردن پسته در خشک‌کن ساخته شده ۴۳/۶۷ بود.

با افزایش دمای خشک‌کنی به ۷۵ درجه سلسیوس مقدار برق مصرفی به طور متوسط ۱/۹ برابر افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش دبی به ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه به طور متوسط انرژی الکتریکی مصرفی ۳۰/۷۶ درصد زیاد شد.

به طور متوسط سهم انرژی بازیافتی در شرایط مختلف خشک‌کردن با خشک‌کن مورد نظر، ۲۸/۵۸ درصد بود.

افزایش دمای هوای خشک‌کننده موجب افزایش باز شدن دهان پسته به مقدار ۳/۲ میلی‌متر و افزایش استحکام مغز آن گردید.

در مجموع به منظور خشک‌کردن پسته در زمان به نسبت کوتاه با انرژی مصرفی قابل قبول، اعمال شرایط دمای ۶۵

نتایج مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف دمای هوا بر عدد خندانی و نیروی شکست به طور جداگانه در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به جدول، افزایش دما موجب بیشتر باز شدن دهان پسته گردیده است به طوری که با بالا بردن دمای خشک‌کنی از ۵۵ به ۷۵ درجه سلسیوس، مقدار باز شدن دهان پسته‌ها به طور میانگین حدود ۳/۲ میلی‌متر افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان، تفاوت ضریب انبساط حرارتی پوست و مغز پسته و در نتیجه تغییر حجم‌های متفاوت آن‌ها با افزایش دما دانست. افزایش دما همچنین، افزایش استحکام مغز پسته را بدنبال داشته است که دلیل آن شاید تشدید نرخ تبخیر آب از پسته در دماهای بالا باشد که موجب ایجاد لایه سخت سطحی و در نتیجه تا حدودی تردی و برشته‌گی آن می‌گردد.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر دمای هوای خشک‌کننده بر عدد خندانی و

نیروی شکست

نیروی شکست (نیوتن)	عدد خندانی (میلی متر)	دما (درجه‌ی سلسیوس)
^b ۱۹/۵	^c ۷/۱۵۲	۵۵
^{ab} ۲۱/۶۶۶	^b ۹/۰۷۲	۶۵
^a ۲۳/۳	^a ۱۰/۳۷۴	۷۵

* میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری ندارند.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سامانه‌ای جدید برای بازیافت انرژی گرمایی تلف شده در خشک‌کن‌های خورشیدی ارائه گردید و تاثیر دو عامل دما و دبی هوای خشک‌کنی بر عملکرد خشک‌کن مطالعه

مناسی خندان بوده و نیروی لازم برای شکست آن نیز خیلی زیاد نمی‌باشد.

درجه‌ی سلسیوس و دبی هوای عبوری ۰/۰۶۵ کیلوگرم بر ثانیه توصیه می‌گردد. در این شرایط، پسته‌ی خشک‌شده در حد

REFERENCES

- Aghkhani, M. H., Abbaspour fard, M. H., Bayati, M. R., Morteza pour, H., Saedi, S. I., & Moghimi, A. (2013). Performance analysis of a solar dryer equipped with a recycling air system and desiccant chamber. *Journal of Agricultural Machinery*, 3(2), 92-103. (In Farsi)
- Aktaş, M., Şevik, S., & Aktekel, B. (2016). Development of heat pump and infrared-convective dryer and performance analysis for stale bread drying. *Energy Conversion and Management*, 113, 82-94.
- Arslan, D., & Musa Özcan, M. (2010). Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *LWT - Food Science and Technology*, 43(7), 1121-1127.
- Chapchaimoh, K., Poomsa-ad, N., Wiset, L., & Morris, J. (2016). Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying. *Applied Thermal Engineering*, 95, 491-498.
- Doymaz, İ. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 359-364.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2006). *Solar engineering of thermal processes* (Vol. 53). New York: Wiley-Interscience.
- Erbay, Z., & Icier, F. (2009). Optimization of drying of olive leaves in a pilot-scale heat pump dryer. *Drying Technology*, 27(3), 416-427.
- FAO. (2013). FAOSTAT database. Available online at: <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway>
- Fatouh, M., Metwally, M., Helali, A., & Shedid, M. (2006). Herbs drying using a heat pump dryer. *Energy conversion and management*, 47(15-16), 2629-2643.
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., & Tabil, L. G. (2006). Some physical properties of Pistachio (*Pistacia vera* L.) nut and its kernel. *Journal of Food Engineering*, 72(1), 30-38.
- Kouchakzadeh, A., & Tavakoli, T. (2011). New practical method for evaluation of a conventional flat plate continuous pistachio dryer. *Energy Conversion and Management*, 52(7), 2735-2740.
- Morteza pour, H., Ghobadian, B., Minaei, S., & Khoshtaghaza, M. H. (2012). Saffron Drying with a Heat Pump-Assisted Hybrid Photovoltaic-Thermal Solar Dryer. *Drying Technology*, 30(6), 560-566.
- Murthy, M. V. R. (2009). A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), 835-844.
- Nazari Galedar, M., Mohtasebi, S. S., Tabatabaeefar, A., Jafari, A., & Fadaei, H. (2009). Mechanical behavior of pistachio nut and its kernel under compression loading. *Journal of Food Engineering*, 95(3), 499-504.
- Pangavhane, D. R., Sawhney, R. L., & Sarsavadia, P. N. (2002). Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*, 27(6), 579-590.
- Punlek, C., Pairintra, R., Chindaraksa, S., & Maneewan, S. (2009). Simulation design and evaluation of hybrid PV/T assisted desiccant integrated HA-IR drying system(HPIRD). *Food and Bioproducts Processing*, 87(2), 77-86.
- Razavi, S. M. A., Emadzadeh, B., Rafe, A., & Mohammad Amini, A. (2007). The physical properties of pistachio nut and its kernel as a function of moisture content and variety: Part I. Geometrical properties. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 209-217.
- Razmipour, M., Alavi naeini, S. N., Morteza pour, H., & Ghazanfari moghadam, A. (2015). Performance evaluation of a solar dryer with finny, perforated absorber plate collector equipped with an air temperature control system for dill drying. *Journal Of Agricultural Machinery Engineering*, 5, 1. (In Farsi)
- Roustapour, O., Afsari, A., & Jahangir, Y. (2015). Influence of air flow recirculation on energy consumption and efficiency in a solar dryer. *Iranian Journal Of Biosystems Engineering*, 46(1), 31-38. (In Farsi)
- Şevik, S., Aktaş, M., Doğan, H., & Koçak, S. (2013). Mushroom drying with solar assisted heat pump system. *Energy Conversion and Management*, 72, 171-178.
- Shanmugam, V., & Natarajan, E. (2007). Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), 1543-1551.
- Tello-Ireland, C., Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez, A., López, J., & Di Scala, K. (2011). Influence of hot-air temperature on drying kinetics, functional properties, colour, phycobiliproteins, antioxidant capacity, texture and agar yield of alga *Gracilaria chilensis*. *LWT - Food Science and Technology*, 44(10), 2112-2118.