



بررسی توان حرارتی تولید شده در یک خشک کن خورشیدی

هادی صمیمی اخيجهانی^{۱*}، اکبر عرب حسینی^۲، محمد حسين کيانمهر^۳

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

ایمیل مکاتبه کننده: hsamimia@gmail.com

چکیده

روشهای مختلفی برای خشک کردن وجود دارد که یکی از مهمترین روشها از نظر هزینه سرمایه گذاری و عملیات، روش خشک کردن با استفاده از نور خورشید است. در این تحقیق روند انتقال گرما و ضریب انتقال حرارت صفحه جاذب برای دو حالت بدون چرخش و با چرخش در یک خشک کن خورشیدی مقایسه شد. برای این منظور سطح صفحه جاذب به چهار ناحیه مساوی تقسیم گردید. ضخامت برش محصول مورد آزمایش (گوجه فرنگی) ۷ میلی‌متر و دبی سیال جاری در خشک کن ۰/۰۱۸۵ متر مکعب بر ثانیه بود و محصول بصورت یک لایه بر روی سینی خشک کن قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش و تحلیل داده ها نشان داد که انتقال گرما در هر دو حالت از اوایل صبح روندی افزایشی داشته و در ساعات ۱۲-۱۴ به مقدار حداکثر خود رسید. این روند در نوع بدون چرخش بدلیل کاهش انباشت گرمایی همگن تر از نوع با چرخش بود. مقدار گرمای انتقال یافته در نوع با چرخش ۳۶/۱ درصد بیشتر از نوع بدون چرخش بود.

واژه‌های کلیدی: جریان گرما، خشک کن خورشیدی، صفحه جاذب، ضریب انتقال گرما

مقدمه

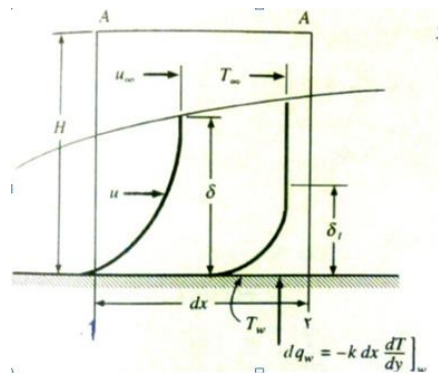
خشک کردن یکی از روشهای مهم برای محافظت و افزایش عمر ماندگاری محصولات کشاورزی است. استفاده از انرژی خورشید در خشک کردن محصولات کشاورزی، بعنوان یک جایگزین مناسب برای سوختهای فسیلی می باشد، بویژه در مناطقی که تابش خوبی از این منبع انرژی تجدید پذیر در فصل برداشت دارند. ایران با قرار گرفتن در عرض جغرافیایی از ۲۵ تا ۴۳ درجه یکی از کشورهای است که ۹۵ درصد نواحی آن مستعد استفاده از خشک کن‌های خورشیدی است (Aghanajafi and Dehghan, 2007). تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه روند انتقال حرارت خشک کنها انجام شده است. محققان، تحقیقی در زمینه انتخاب روش مناسب برای خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از روش های کمکی مانند پمپ گرمایی انجام دادند (Mujumdar et al., 2000). در تحقیق دیگر، محققان برای خشک کردن موز سیستمی را طراحی کرده و ساختند که با استفاده از آن روند خشک کردن محصول در طول شبانه روز بطور پیوسته ادامه پیدا می کرد (Amer et al., 2010). در تحقیقی که بر روی بهینه سازی خشک کن خورشیدی میوه ها و سبزیها صورت گرفت، محققان با تغییرات در زاویه قرارگیری صفحه جاذب و



تغییرات در فاصله بین شیشه و صفحه جاذب، توانستند بازده خشک کن را تا ۴۷ درصد افزایش دهند (Delgado et al., 2012). در تحقیقی که در زمینه یک خشک کن خورشیدی توده ای برای محصولات کشاورزی انجام گرفت، در هنگام نبود آفتاب از هیتر استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که روند خشک شدن تابعی از سطح صفحه جاذب، درجه حرارت هوای ورودی به صفحه و خصوصیات محصول می باشد (Bennamoun and Belhamri, 2003). در یک بررسی عملکرد یک خشک کن خورشیدی کابینتی (شش طبقه) را ارزیابی گردید. نتایج حاصل نشان داد که درجه حرارت صفحه خشک کن بدون جریان هوا و به صورت طبیعی ۹۷/۲ درجه سلسیوس و با روشن شدن دمنده آن ۷۸/۱ درجه سلسیوس می باشد (Sreekumar et al., 2008). محققان در مطالعه ای به بررسی تاثیر دبی جرمی هوای ورودی و زمان تخلیه محصول بر روند کاهش رطوبت شلتوک در یک خشک کن نیمه پیوسته خورشیدی پرداختند. نتایج نشان داد که دبی جرمی هوای خشک کننده و فاصله زمانی تخلیه محصول اثر معنی داری بر کاهش رطوبت شلتوک خروجی دارد (Zare et al., 2005). اما تاکنون تحقیقات بسیار اندکی در مورد چگونگی روند انتقال گرما در صفحه جاذب یک خشک کن خورشیدی و ضرایب انتقال گرما وجود دارد. هدف از این تحقیق مقایسه عملکرد صفحه جاذب یک خشک کن خورشیدی در دو حالت با چرخش و بدون چرخش، از نظر ضریب انتقال و مقدار گرمای انتقال یافته با استفاده از داده های تجربی است.

مبانی تئوری

نمای جانبی از انتقال حرارت از روی سطح یک صفحه تخت با دمای T_w بصورت لایه مرزی گرمایی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- انتقال حرارت از روی یک صفحه تخت

دمای سیال بیرون از لایه مرزی گرمایی با T_∞ و ضخامت لایه مرزی با δ_t مشخص شده است. سرعت سیال جریان یافته در دیواره صفر است و انتقال گرما به داخل سیال به روش هدایت صورت می گیرد. بنابراین شار گرمایی در واحد سطح q برابر است با:

$$\frac{q}{A} = \dot{q} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{صفحه تخت}} \quad (1)$$

از قانون نیوتن در ترمودینامیک و سرمایش داریم:



$$q' = h(T_w - T_\infty) \quad (2)$$

که h ضریب انتقال گرمای جابجایی است. با ترکیب دو رابطه ۱ و ۲ داریم:

$$h = \frac{-k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{صفحه تخت}}}{T_w - T_\infty} \quad (3)$$

که در آن y فاصله بین صفحه جاذب گرما و لایه مرزی گرمایی است. با توجه به رابطه ۳ مشخص است که برای ارزیابی ضریب انتقال گرما، گرادیان دما در صفحه تخت مورد نیاز است و باید رابطه ای برای پخش دما بدست آید. با توجه به شرایط مرزی موجود در پروفیل گرمایی شکل ۱، رابطه ۴ نتیجه می‌شود [۱].

$$y=0 \text{ در } T=T_w, \quad y=\delta_t \text{ در } \frac{\partial T}{\partial y}=0, \quad T=T_\infty$$

$$h = \frac{-k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{صفحه تخت}}}{T_w - T_\infty} = \frac{3k}{2\delta_t} \quad (4)$$

سرعت سیال در دیواره ها صفر در نظر گرفته شده است و δ_t ضخامت لایه مرزی گرمایی می باشد.

بدلیل آنکه سرعت جریان هوای دمیده شده به روی صفحه بین ۰/۱ تا ۲ متر بر ثانیه است، بنابراین از اتلاف لزجی گرما صرفنظر می شود. با توجه به معادلات موجود و اعمال شرایط مرزی و همچنین ارتباط بین ضریب انتقال گرما و گرادیان دما رابطه ۵ نتیجه می‌شود (Holman, 2002).

$$Nu_x = 0.332 Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{x_0}{x} \right)^{\frac{3}{4}} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (5)$$

که در آن Nu_x عدد نوسلت و برابر با نسبت $h_x \cdot x$ به k صفحه است، Pr ، عدد پرانتل و برابر با $k^{-1} \cdot c_p \cdot \mu$ است و Re ، عدد رینولدز سیال است. همچنین ρ مشخصه چگالی سیال ($kg \cdot m^{-3}$)، C_p گرمای ویژه سیال ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$).

رابطه ۵ برای زمانی استفاده می شود که فقط قسمتی از صفحه تحت انتقال حرارتی قرار گیرد. اما هنگامی که صفحه در تمام طول خود حرارت را منتقل می کند در آن صورت $x_0=0$ در نظر گرفته می شود و ضریب انتقال حرارت بصورت رابطه ۶ مشخص می شود:

$$\text{if } x = 0 \text{ then } Nu_x = 0.332 Pr^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

با توجه به رابطه بین عدد نوسلت و ضریب انتقال حرارت و با در نظر گرفتن رابطه ۶، ضریب انتقال حرارت برای صفحه تخت خشک کن خورشیدی بدست می آید (رابطه ۷):

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} \text{ بنابراین } h_x = Nu_x \left(\frac{k}{x} \right) \quad (7)$$

مواد و روشها



دستگاه خشک‌کن مورد استفاده در محوطه باز در شهرستان آذرشهر، زیر نور مستقیم آفتاب قرار داده شد. دو حالت برای روند انجام آزمایش در نظر گرفته شد. در حالت اول صفحه جمع‌کننده بدون چرخش روند خشک کردن را انجام می‌دهد و در حالت دوم صفحه جمع‌کننده با قابلیت چرخش نسبت به خورشید می‌باشد. بنابراین آزمایش در دو روز برای هر دو حالت (بدون چرخش و با چرخش) در روزهای ۱۴ و ۱۶ شهریور ماه سال ۱۳۹۳ انجام شد. محصول تازه و نمونه‌های خشک شده درون آن در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و رطوبت آنها اندازه‌گیری شد (Khodaei and Samimi, 2013). درجه حرارت‌های مورد نظر بر روی صفحه جاذب خشک‌کن در پنج قسمت اندازه‌گیری شد، که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. در هر قسمت نیز اندازه‌گیری در سه نقطه شامل روی ورق، بین ورق و شیشه محافظ و روی شیشه محافظ انجام شد. برای اندازه‌گیری درجه حرارت در نقاط مشخص شده، از ترموکوپل‌های نوع T استفاده شد که با استفاده از دیتالاگر DL-9601A, Lutron ثبت گردید. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوای در خشک‌کن از یک سرعت‌سنج دیجیتالی YK-2005AM با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه استفاده شد که در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه با قراردادن آن در خروجی کابینت خشک‌کن، سرعت‌هوای جاری در خشک‌کن اندازه‌گیری شد. خشک‌کن شامل یک صفحه جمع‌کننده، تخته نئوپان و پشم شیشه برای عایق‌بندی، پایه، یک موتور DC، ۱۲ ولت به مدل Daiichi kasei020350 برای چرخش صفحه، مدار کنترلی برای چرخش صفحه، پنل خورشیدی برای تامین توان دمنده و موتور الکتریکی، لوله انتقال دهنده جریان هوا برای اتصال خروجی صفحه به ورودی کابینت خشک‌کن، کابینت خشک‌کن، توری‌های نمونه، دمنده الکتریکی DC، ۱۲ ولت به مدل Sunon، می‌باشد.



شکل ۲- نماهایی از خشک‌کن خورشیدی شامل صفحه جمع‌کننده، کابینت، پنل خورشیدی و سطوح مشخص شده برای آزمایش

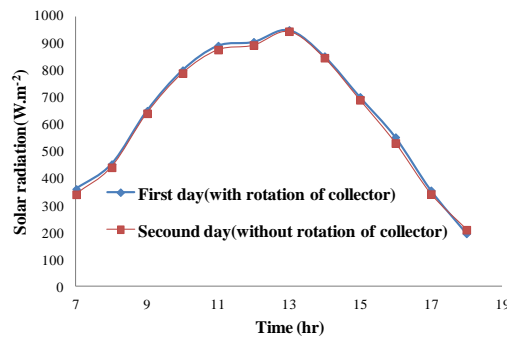
برای این نوع خشک‌کن مکانیزم و مداری طراحی شده که قادر است همزمان با حرکت خورشید، صفحه جمع‌کننده را دوران داده تا همیشه تابش نور خورشید عمود بر صفحه جذب‌کننده باشد. برای اندازه‌گیری مقدار تابش دریافتی از خورشید به صفحه جمع‌کننده از دستگاه پیرانومتر با دقت یک وات بر متر مربع (Sk,2900,Taiwan) استفاده گردید. برای تعیین ضریب انتقال حرارت در خشک‌کن خورشیدی، صفحه جمع‌کننده به چهار قسمت مساوی تقسیم شد و در هر قسمت سه ترموکوپل (از نوع



(T) نصب گردید. برای حالت دوم علاوه بر چهار ترموکوپل روی صفحه، چهار ترموکوپل دیگر در قسمت زیرین صفحه جمع کننده جایگذاری شدند. برای اندازه گیری رطوبت هوای محیط از یک دستگاه رطوبت سنچ HT.3006, Taiwan با دقت سه درصد استفاده شد. پس از جمع آوری داده‌ها و قرار دادن آنها در رابطه‌های ۸ و ۲ به ترتیب مقادیر جریان گرما و ضریب انتقال حرارت برای خشک کن خورشیدی مورد نظر بدست آمد.

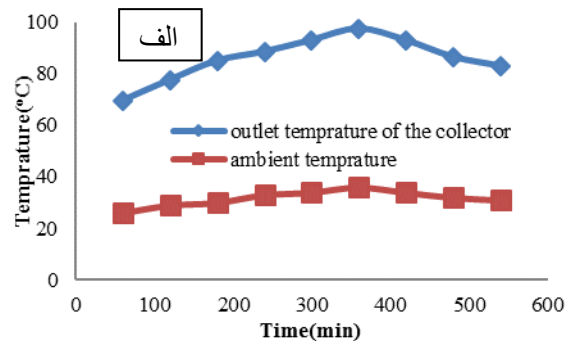
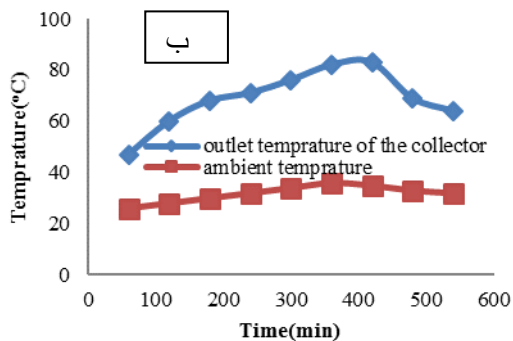
نتایج و بحث

روز ۱۴ شهریور مربوط به آزمایش خشک کن با کلکتور چرخشی و روز ۱۶ شهریور مربوط به کلکتور بدون قابلیت به چرخش می باشد. شکل ۳ نشان می دهد میزان تابش با گذشت زمان از اوایل صبح افزایش یافته و در حدود ساعات ۱۲ تا ۱۴ به حداکثر مقدار خود رسید و بعد از آن افت پیدا کرد. این امر به دلیل تغییرات زاویه تابش خورشید است، که در اوایل و اواخر روز بطور مایل و در مواقع ظهر بصورت عمودی به سمت صفحه تابیده می شود.



شکل ۳- میزان تابش خورشید به صفحه جمع کننده در روزهای آزمایش

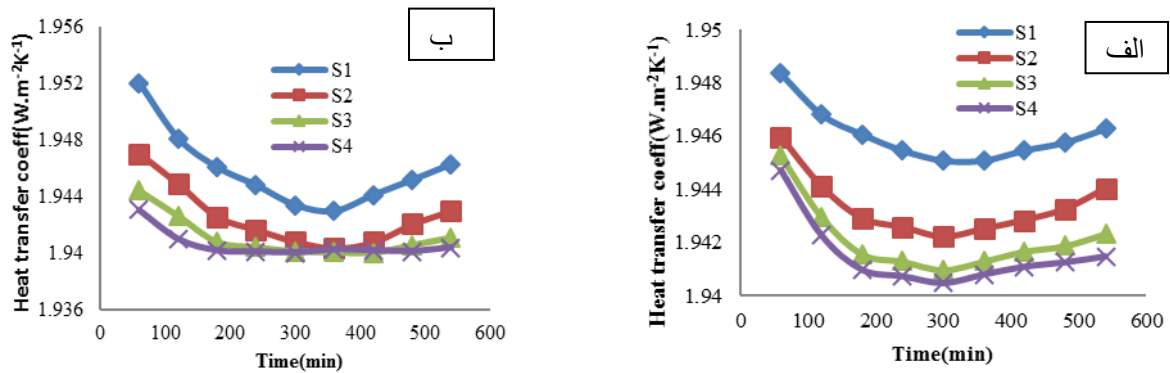
در شکل ۴ میزان تغییرات درجه حرارت های محیط و خروجی از جمع کننده خشک کن برای هر دو حالت بدون چرخش و با چرخش نشان داده می شود با به چرخش درآوردن صفحه جاذب خشک کن میانگین افزایش درجه حرارت در خروجی صفحه جاذب به میزان ۲۷ درجه سلسیوس می باشد.



شکل ۴- مقایسه دمای محیط و دمای خروجی از جمع کننده، (الف) با چرخش، (ب) بدون چرخش



به دلیل دوران صفحه جمع کننده و دنبال کردن خورشید در حین آزمایش، تغییرات تابش خورشیدی در حالت با چرخش نسبت به حالتی که بصورت ثابت (بدون چرخش) است، کمتر بود. تغییرات تابش به دلیل تغییرات لحظه ای زاویه سمت پرتوهای خورشید در نوع صلب نسبت به سیستم حاضر که با تغییر زاویه پرتوهای خورشید تغییر می‌یابد، بیشتر بود. این نتیجه را می‌توان در تحقیق‌های مشابهی که محققان بر روی خشک کن های خورشیدی انجام داده اند، مشاهده نمود (Bagheri, 2008; Karim et al., 2004). میزان ضریب انتقال حرارت صفحه جمع کننده در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانطوریکه در نمودار مشاهده می‌شود، با گذشت زمان، ضریب انتقال حرارت کاهش یافت. انباشت گرمایی در سطح چهار به دلیل وجود گوشه در چارچوب صفحه تخت قابل توجه است. با توجه به روابط حاکم بر انتقال حرارت از روی صفحه تخت، یکی از روشها، ایجاد انحنا در نقاط انتهایی صفحه تخت یعنی سطح چهار است، جایی که گرما به لوله انتقال وارد می‌شود، چونکه وجود انحنا مانع ایجاد آشفته‌گی در روند جریان گرما و باعث متعادل شدن این جریان می‌گردد. محققان دیگر نیز نتایج مشابهی در مورد انباشت گرمایی بوجود آمده در خشک کن خورشیدی بدست آوردند (Soheili mehdizadeh et al., 2006). تغییرات ضریب انتقال حرارت در نوع با چرخش (شکل ۵-الف) نسبت به نوع بدون چرخش (شکل ۵-ب) در سطوح مختلف بیشتر است.

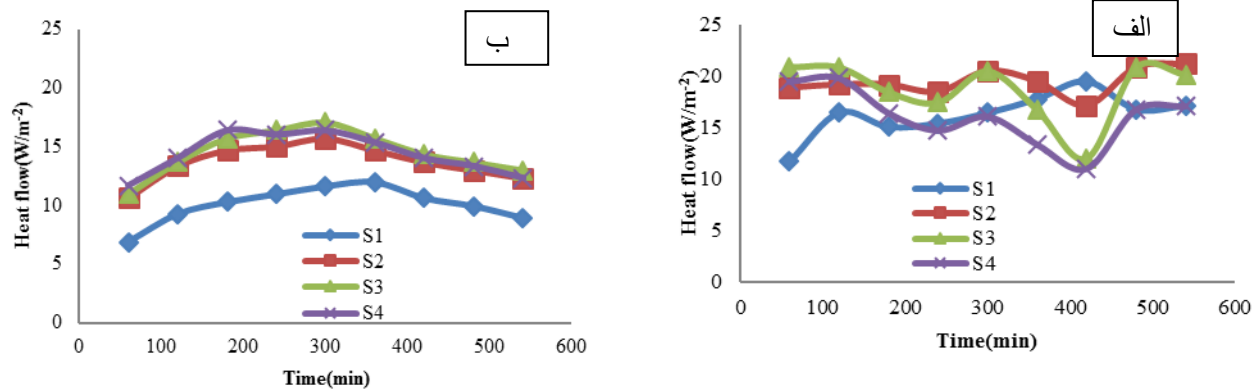


شکل ۵- تغییرات ضریب انتقال حرارت در سطوح مختلف از صفحه جمع کننده بر حسب زمان، الف) با چرخش، ب) بدون چرخش

نمودار شکل ۶-الف مربوط به جریان گرما در صفحه جاذب بدون چرخش می‌باشد. در این حالت، جریان گرما از اوائل روز رو به افزایش داشته و با شدت یکسان تا اواسط روز حدود ساعت ۱۲-۱۴ به مقدار بیشینه خود می‌رسد. با گذشت زمان و نزدیک شدن به غروب آفتاب مقدار جریان گرما با شدت ملایم کاهش می‌یابد، چونکه در ساعات اولیه روز شدت تابش خورشید سیر صعودی داشته و به دلیل جذب تدریجی گرما توسط صفحه و بازتابش آن انتقال گرما به صورت سریع صورت می‌پذیرد (Aghanajafi and Deghani, 2007). در سطوح پایین تر جریان کمتر از سطوح بالاتر صفحه می‌باشد. نمودار شکل ۵-ب مربوط به جریان گرما در صفحه جاذب با چرخش می‌باشد. با توجه به نمودار، نوسانات جریان گرما در حالت با چرخش نسبت به حالت بدون چرخش بیشتر است. این امر بدین دلیل است که از اوائل روز به دلیل قرار گرفتن صفحه جاذب به سمت خورشید، حرارت ایجاد شده در صفحه با شدت بالایی بوده و دمنده توانایی تخلیه به هنگام حرارت ایجاد شده را ندارد و باعث بوجود آمدن انباشت گرمایی در داخل صفحه جاذب می‌گردد (Holman, 2002). حرارت ایجاد شده در صفحه باعث بوجود

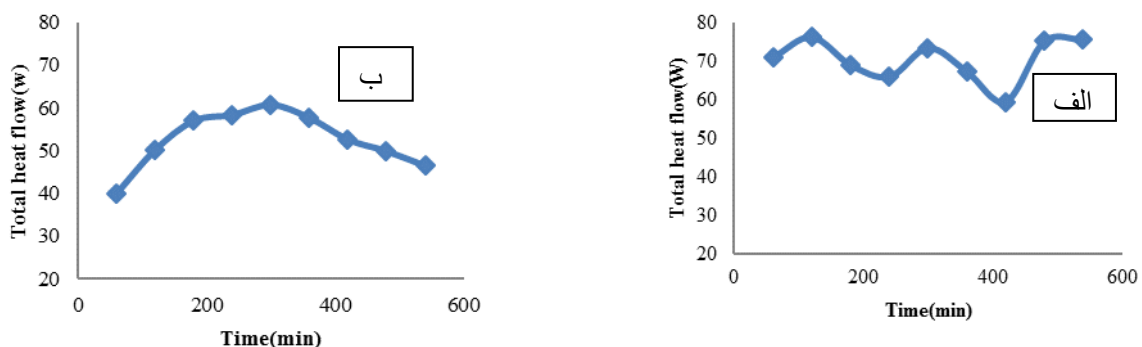


آمدن انباشت حرارتی در نقاط انتهایی صفحه و عدم انتقال متناسب به خارج از صفحه شده و چه بسا حرارت به سمت نقاط پایین تر صفحه برگشت پیدا می کند. همین امر باعث شده است که یک افت نسبی از ساعت ۱۴ بعد از ظهر تا ساعت ۱۶ اتفاق بیفتد و گرما در صفحه جاذب خشک کن بصورت کند، جریان پیدا کند (شکل ۶-ب).



شکل ۶- تغییرات جریان گرما در سطوح مختلف از صفحه جمع کننده بر حسب زمان، الف) با چرخش، ب) بدون چرخش

مقدار جریان گرمای ایجاد شده در حالت بدون چرخش کمتر از حالت با چرخش است (شکل ۷). میزان جریان گرما در حالت بدون چرخش از ۲۷/۳۳ وات تا ۴۲/۰۱ وات و در حالت با چرخش از ۴۳/۰۴ وات تا ۵۴/۹۴ وات متغیر بود. همچنین میزان کل آن در طول روز برای حالت بدون چرخش ۴۶۵/۶۱ وات و برای حالت با چرخش ۶۳۳/۳۵ وات بدست آمد. به عبارت دیگر با به چرخش درآوردن صفحه جمع کننده در خشک کن خورشیدی، مقدار گرمای انتقالی از صفحه تا حدود ۳۶/۱ درصد افزایش می یابد و متعاقب آن می توان گفت که با استفاده از حالت چرخشی مدت زمان خشک نمودن محصول کاهش می یابد.



شکل ۷- تغییرات جریان گرمای کل در سطوح مختلف از صفحه جمع کننده بر حسب زمان، الف) با چرخش، ب) بدون چرخش

یکی از راههایی که می توان نوسانات بوجود آمده در روند انتقال گرما در صفحات جاذب با چرخش را کاهش داد، استفاده از سیستمی است که همزمان با تغییر درجه حرارت داخل صفحه جاذب، سرعت جریان هوا در خشک کن را کنترل نموده و گرمای ایجاد شده در صفحه را به صورت مناسب و بهینه انتقال داد.

نتیجه گیری



در این تحقیق عملکرد صفحه جاذب یک خشک کن خورشیدی در دو حالت بدون چرخش و با چرخش مقایسه شد. نتایج حاصل از این مقایسه نشان داد که با به چرخش درآوردن صفحه جاذب نسبت به حرکت خورشید، مقدار افزایش درجه حرارت به میزان ۲۷ درجه سلسیوس و مقدار گرمای خروجی از خشک کن تا حدود ۳۶/۱ درصد بود. میزان کل گرمای انتقال یافته از صفحه جاذب در طول روز برای حالت بدون چرخش ۶۶۵/۶۱ وات و برای حالت با چرخش ۶۳۳/۳۵ وات بدست آمد. همچنین در حالت با چرخش نوسان جریان گرما در سطوح مختلف بیشتر از حالت بدون چرخش است. این امر به دلیل وجود انباشت گرما در داخل صفحه جاذب می باشد.

منابع و مآخذ

1. Aghanajafi, S. & Dehghani, A. 2007. Advanced solar radiation and industrial applications. Khaje Nasir Toosi University press, Tehran.
2. Amer, B.M.A. Hossain, M.A. & Gottschalk, K. 2010. Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. Energy Conversion and Management. 51, 813-820.
3. Bagheri, H. 2008. Design, construction and evaluation of a experimental vegetable solar dryer. Msc thesis of mechanics of agricultural machinery, Aboureyhan campus, university of Tehran.
4. Bennamoun, L. & Belhamri, A. 2003. Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. Journal of Food Engineering. 59, 259-266.
5. Delgado, E.A. Martinez Flores, H.E. Garnica Romo, M.G. Arand Sanchez, J.I., Aguirre, C.S., Penagos, C.C. & Fernandez-Munoz, J.L. 2012. Optimization of solar dryer for the dehydration of fruits and vegetables. Journal of Food Processing and Preservation. 11(2), 2546-2558.
6. Holman, J.P. 2002. Heat transfer. Published by Mc-Grow Hill, Southern Methodist University, New York. Tenth edition.
7. Karim, M.A. & Hawlader, M.N.A. 2005. Drying characteristics of banana: theoretical modeling and experimental validation. Journal of Food Engineering. 70, 35-45.
8. Khodaei, J. & Samimi, H. 2013. Investigation of specific heat and thermal conductivity of Rasa grape (*Vitis vinifera L.*). Journal of agricultural machinery. 3(2), 123-132.
9. Mujumdar, A.S. 2000. Drying technology in agriculture and food sciences. Enfield NH, USA: Science Publishers, Inc.
10. Soheilimehdizadeh, A. keyhani, A., Abaspour sani, K. & Akram, A. 2006. Design of a solar forced convection dryer for leaf vegetables and evaluation of its performance. Journal of Agricultural Engineering Research. 27, 164-167.
11. Sreekumar, A. Manikantan, P.E. & Vijayakumar, K.P. 2008. Performance of indirect solar cabinet dryer. Energy Conversion and Management. 49, 1388-1395.
12. Zare, D. Zomorodian, A. & Ghasemkhani, H. 2005. Effect of mass flow rate of air and moisture to reduce the drain on the rice crop in a semi-continuous solar dryer. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 9(4), 251-264



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



Investigation of thermal power generated in a solar dryer

Abstract

There are several methods for drying of agricultural products; one of the most important methods of investment is drying by using sunlight. In this study, the process of heat transfer and heat transfer coefficient for the absorber plate without rotation and with rotation was compared to a solar dryer. The thickness of the tested product (tomato) was 7 mm and the fluid flow rate was $0.0185\text{m}^3/\text{s}$. The results of the experiments showed that the heat transfer process is increased in both cases from the early morning and reaches its maximum value from 12am to 14pm. The trend was more homogeneous in the dryer by absorber plate without rotation due to the decline of the accumulation of heat. The amount of heat transfer in absorber plate with rotation was 36.1% higher than the absorber plate without rotation.

Keywords: Absorber plate, Heat flow, Heat transfer coefficient, Solar dryer.