

## تحلیل انرژی - اکسرژی و طراحی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم برای نعنای تحت تأثیر دبی‌های جرمی مختلف هوا

رحیم ابراهیمی<sup>۱\*</sup> و اعظم نوروزی<sup>۲</sup>

### چکیده

در این مقاله پس از طراحی و ساخت یک دستگاه خشک‌کن خورشیدی فعال غیرمستقیم، تأثیر دبی جرمی هوا در شرایط فعال و غیرفعال خشک‌کن بر عملکرد دستگاه از نظر میزان جذب انرژی و ایجاد گرما در خشک‌کن بررسی شد. ابتدا، بر اساس قوانین بقای جرم و انرژی ابعاد خشک‌کن، طراحی و سپس در دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد ساخته شد، و بر اساس قانون اول و دوم ترمودینامیک به تحلیل انرژی و اکسرژی و مؤلفه‌های مؤثر بر آن‌ها پرداخته شد. آزمایش‌ها بر روی نعنای در روزهای ۴، ۵ و ۶ تیرماه ۱۳۹۴ در دو حالت فعال (فن مکند روشن) و غیرفعال (فن خاموش) انجام شد. آزمایش‌ها از ساعت ۹ صبح شروع و تا ۷ بعدازظهر ادامه داشت و اثر سه سطح سرعت هوا (۵/۰، ۱ و ۲ متر بر ثانیه) بر روی خشک‌کن ساخته‌شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از این بود که مصرف انرژی در هر دو حالت خشک‌کن (فعال و غیرفعال) مستقل از دبی جریان بوده و بیشتر تحت تأثیر محتوای رطوبتی محصول می‌باشد؛ در حالی که بیشترین بهره‌وری اکسرژی در جریان همرفت طبیعی مشاهده شد.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل انرژی و اکسرژی، خشک‌کن خورشیدی، قانون اول و دوم ترمودینامیک، مصرف انرژی.

ارجاع: ابراهیمی ر. و نوروزی ا. ۱۳۹۷ تحلیل انرژی- اکسرژی و طراحی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم برای نعنای تحت تأثیر دبی‌های جرمی مختلف هوا. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۷(۲): ۷-۱.

۱- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

\* نویسنده مسئول: [Rahim.Ebrahimi@gmail.com](mailto:Rahim.Ebrahimi@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۸

## مقدمه

عملیات خشک کردن، یکی از پرکاربردترین عملیات مهندسی در اغلب صنایع نظیر صنایع کشاورزی، داروسازی و ... می باشد که هدف آن جذب آب از ماده و کاهش رطوبت آن است. در طی این عملیات، پدیده های انتقال جرم و گرما به صورت همزمان درون جامد و سیال حامل انرژی انجام می پذیرد. مکانیسم یا مکانیسم های خشک شدن مواد بر اساس شدت و روند خشک شدن آن ماده طبقه بندی می شود. به دلیل هزینه های اولیه و عملیاتی اندک و سازگاری با محیط زیست، امروزه انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع پایان ناپذیر، مورد توجه بسیاری از محققان و صنعتگران قرار گرفته است. به دلیل بالابودن پتانسیل استفاده از این انرژی در کشورمان، لازم است تلاش بیشتری در استفاده بهینه از آن در کلیه علوم از جمله کشاورزی صورت پذیرد. به طور کلی، خشک کن های خورشیدی به دو گروه عمده خشک کن های فعال و خشک کن های غیرفعال تقسیم می شوند. خشک کن های خورشیدی غیرفعال، خشک کن هایی هستند که در آنها تنها از انرژی خورشید برای خشک کردن محصول استفاده می گردد؛ ولی در خشک کن های خورشیدی فعال علاوه بر انرژی خورشید معمولاً از یک مکنده یا دمنده برای ایجاد جریان هوا در سرتاسر بستر محصول استفاده می شود. از آنجا که هدف اصلی در صنعت خشک کردن رسیدن به بیشترین مقدار رطوبت زدایی با صرف کمترین مقدار انرژی است، می توان با شناسایی شرایط عملیاتی و تجزیه و تحلیل بازده انرژی، مصرف بهینه انرژی را بررسی کرد. اما تحلیل انرژی به تنهایی باعث بی دقتی در رسیدن به وضع دلخواه می شود؛ زیرا که مقدار انرژی طبق قانون اول ثابت است و فقط قابل تبدیل می باشد؛ بنابراین، نیاز به مؤلفه

دیگری است که بتواند کیفیت انرژی را مشخص کند. قانون دوم ترمودینامیک بیان می کند که انرژی هم کمیت و هم کیفیت دارد و فرایندهای خودبه خودی در برای کاهش کیفیت انرژی اتفاق می افتند (Bejan, 1988)؛ اما با موارد گفته شده تحلیل اکسرژی که خود یک تحلیل ترمودینامیکی می باشد، به تنهایی قادر به توضیح در مورد بهینه سازی سامانه نیست؛ بلکه تنها نشان می دهد که چه میزان از فرایند فعلی به اتلاف انرژی منتهی شده و امکان بهبود آن وجود دارد (Akpınar et al., 2006)؛ بنابراین، برای تحلیل این سامانه ها باید تحلیل انرژی و اکسرژی را به صورت همزمان انجام داد. بر اساس موارد گفته شده، طراحی یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم برای محصول نعنای با توجه به اقلیم شهرکرد واقع در استان چهارمحال و بختیاری انجام شد. همچنین در ادامه، انرژی و اکسرژی خشک کن خورشیدی طراحی شده با توجه به دبی های جرمی مختلف هوای ورودی به خشک کن محاسبه گردید.

## مواد و روش ها

در این تحقیق، یک خشک کن خورشیدی فعال غیرمستقیم در گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد، به منظور تحلیل انرژی و اکسرژی برای سامانه مورد نظر، تحت تأثیر سرعت های مختلف هوا طراحی و ساخته شد (شکل ۱). برای طراحی قسمت های مختلف خشک کن باید به نوع محصول، ظرفیت خشک کن، شرایط جغرافیایی و آب و هوای منطقه توجه کرد. تمامی محاسبات برای منطقه شهرکرد با عرض جغرافیایی ۳۲/۱۷ و طول جغرافیایی ۵۰/۵۱ و بر اساس شرایط اقلیمی و ویژگی های تابش خورشید در این منطقه انجام شده است.



شکل ۱- نمای کلی از دستگاه طراحی و ساخته شده و مورد استفاده در کلیه آزمایش ها

## محاسبات نظری خشک‌کن

برای طراحی قسمت‌های مختلف یک خشک‌کن، ابتدا باید میزان جرم و حجم هوای لازم را برای خشک‌کردن محصول به دست آوریم. برای محاسبه جرم حداقل هوای لازم برای خشک‌کردن از موازنه انرژی (معادله (۱)) و برای محاسبه حجم هوای لازم برای خشک‌کردن از قانون گازهای کامل یا رابطه چگالی هوا استفاده می‌شود (Ayensu, 1997):

$$M_w h_{fg} = m_a C_{p,a} (T_{e, coll} - T_{i, coll}) \quad (1)$$

$$C_{p,a} = 1.0057 + 0.000066 (T_{drain} - 27) \quad (2)$$

که در آن  $h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر آب (بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم)؛  $C_{p,a}$  گرمای ویژه هوای خشک (بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس) است که از معادله (۲)، به دست می‌آید و  $T_{drain}$  میانگین دمای هوای خشک‌کن است که برای این تحقیق مقدار آن ۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد؛  $T_e$  و  $T_i$  به ترتیب دمای مطلق هوای ورودی و خروجی محفظه (بر حسب سانتی‌گراد)؛  $M_w$  جرم رطوبت تبخیرشده از محصول (کیلوگرم) که بر اساس معادله (۳)، قابل محاسبه است؛ و  $m_a$  جرم هوا بر حسب کیلوگرم می‌باشد.

$$M_w = M_c \left( \frac{W_i - W_f}{100 - W_f} \right) \quad (3)$$

که در آن  $M_c$  جرم اولیه نعنای است. برای تعیین رطوبت محصول از دستگاه آون در دمای ۱۰۴ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌نماییم و با استفاده از معادله (۴)، میزان رطوبت بر پایه تر محاسبه گردید (AOAC, 1990):

$$M_{wb} = \frac{M_c - M_d}{M_c} \times 100 \quad (4)$$

که در آن  $M_{wb}$  درصد رطوبت بر پایه تر و  $M_d$  جرم ماده خشک است. رطوبت اولیه نعنای ۸۲ درصد بر پایه تر تعیین شد و محصول تا رطوبت ۱۲ درصد بر پایه تر خشک می‌باشد.

سطح جمع‌کننده مورد نیاز از موازنه انرژی برای تبخیر رطوبت محصول و انرژی جذب‌شده در سطح جمع‌کننده از معادله (۵) محاسبه می‌شود:

$$h_{fg} M_w = A_{coll} N t a I F_R \quad (5)$$

که در آن  $A_{coll}$  مساحت جمع‌کننده انرژی خورشیدی (بر حسب مترمربع)؛  $N$  تعداد روزهای مورد نیاز برای خشک‌کردن محصول؛  $t$  و  $a$ ، به ترتیب ضریب عبور و

ضریب جذب مواد استفاده‌شده در صفحه پوشش و صفحه جذب جمع‌کننده (بدون واحد) که در جدول ۲ آورده شده است؛  $F_R$  ضریب تصحیح کن در جمع‌کننده (بدون واحد) که برای این تحقیق ۰/۵ در نظر گرفته شد (Duffi & Beckman, 2013)؛ و  $I_t$  انرژی تابشی منطقه در واحد سطح طی یک روز (بر حسب کیلوژول بر مترمربع در روز) است. متوسط میزان انرژی تابشی خورشید در واحد سطح برای شهرکرد ۴۵۰ وات بر مترمربع تخمین زده‌شده است (Duffi & Beckman, 2013) و با در نظر گرفتن متوسط ۷ ساعت برای خشک‌کردن محصول در یک روز میزان انرژی تابشی در شهرکرد ۱۱/۳ مگا ژول بر مترمربع محاسبه شد. نصب بهینه کلکتورها در نیمکره شمالی سمت جنوب است و بهترین زاویه قرارگیری یک جذب‌کننده تخت خورشیدی جهت دریافت بیشترین انرژی تشعشع خورشید، حدود عرض جغرافیایی در هر منطقه می‌باشد.

لازم به ذکر است که برای بالا بردن راندمان جذب در تابستان و زمستان بهتر است به ترتیب زاویه جذب‌کننده ۱۰ تا ۱۵ درجه کمتر و بیشتر از عرض جغرافیایی منطقه باشد (Garg, 1982). زاویه قرارگیری جمع‌کننده در این پژوهش ۴۲ درجه در نظر گرفته شد. با استفاده از چگالی و ارتفاع محصول پهن‌شده، مساحت سینی محصول به دست می‌آید؛ با توجه به اینکه چگالی ظاهری نعنای ۰/۱۸۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب به دست آمد (روش محسنین) و مقدار اولیه محصول نیز ۴/۵ کیلوگرم در نظر گرفته‌شده بود، با در نظر گرفتن سه سینی برای سامانه حجم محصول برای هر سینی ۸۰۰۰ سانتی‌مترمکعب به دست آمد و با توجه به ارتفاع محصول پهن‌شده روی هر سینی (۵ سانتی‌متر) مساحت هر سینی برابر با ۱۶۰۰ سانتی‌مترمربع تعیین شد و بدین ترتیب، ابعاد محفظه خشک‌کن برابر با ۴۰×۴۰ سانتی‌متر به دست آمد. با استفاده از دبی جریان هوا و افت فشار استاتیکی و دینامیکی موجود در مسیر عبور هوا، قدرت مکنده مورد نیاز تعیین می‌شود (Mosavi et al., 2010).

بدین ترتیب، سامانه طراحی‌شده، شامل یک جمع‌کننده خورشیدی تخت به ابعاد ۱×۲ متر و یک محفظه خشک‌کن به ابعاد ۴۰×۴۰×۱۰۰ سانتی‌متر و سه عدد سینی برای نگهداری محصول (ابعاد سینی‌ها ۴۰×۴۰×۵ سانتی‌متر) است و در خروجی محفظه یک فن گریز از مرکز با توان ۱۰۰ وات استفاده شد. هوا از درون

### تحلیل انرژی و اکسرژی

حداکثر کار مفید خروجی که در طول یک فرایند در یک سیستم می‌توان به دست آورد، به شرطی که حالت نهایی حالت مرده باشد، اکسرژی نامیده می‌شود. حالت مرده، حالتی است که در آن دما و فشار سیستم با محیط یکی می‌شود. مبنای تحلیل انرژی و اکسرژی قانون ۱ و ۲ ترمودینامیک است. قانون اول، بیانگر قانون بقای انرژی و قانون دوم، کیفیت انرژی و ماده را بیان می‌کند. هدف اصلی تحلیل‌های ترمودینامیکی، محاسبه راندمان انرژی و اکسرژی در سیستم است (Akpınar, 2006).

### تحلیل انرژی

آنچه در تحلیل انرژی مورد مطالعه قرار می‌گیرد، انرژی‌های ورودی و مصرف‌شده در سیستم است. منظور از راندمان انرژی در یک سامانه، بخشی از انرژی ورودی به سامانه است که به منظور تأمین هدف سامانه استفاده می‌شود. در یک خشک‌کن، هدف سامانه خشک کردن محصول است و راندمان انرژی، یعنی بخشی از انرژی ورودی که محصول باید دریافت کند تا رطوبت خود را از دست بدهد. در یک خشک‌کن خورشیدی، انرژی خورشیدی توسط صفحات جاذب، جذب می‌شود. مقدار این انرژی از معادله (۸) محاسبه می‌شود (Celma & Kadrous, 2009). در این معادله:  $t_g$ ، ضریب گذر شیشه؛  $a_p$ ، ضریب جذب صفحه جاذب است. مقادیر ضریب گذر شیشه، ضریب جذب صفحه و سطح مقطع کلکتور در جدول ۱ گزارش شده است.

$$\dot{Q}_{\text{Rad}} = I_t \tau_g a_p A \quad (8)$$

جدول ۱- ضرایب صفحات جاذب و پوشش و سطح مقطع

کلکتور		
$t_g$	$a_p$	A (m <sup>2</sup> )
۰/۸۸	۰/۹۵	۲

انرژی خورشیدی که توسط صفحات جاذب دریافت شده است، به هوای عبوری از کانال کلکتور منتقل می‌شود و باعث افزایش دمای هوا در حین عبور از کانال می‌شود. مقدار انرژی دریافتی هوا در عبور از کانال کلکتور از معادله (۹) محاسبه می‌شود (Celma & Kadrous, 2009):

$$\dot{Q}_{a,\text{coll}} = \dot{m}_a C_{p,a} (T_{e,\text{coll}} - T_{i,\text{coll}}) \quad (9)$$

جمع‌کننده خورشیدی که روی آن توسط یک شیشه شفاف ساختمانی با ضخامت ۴ میلی‌متر پوشیده شده است، مکیده شده (در حالت فعال) و پس از ورود به محفظه خشک‌کن از زیر سینی حاوی محصول عبور کرده و موجب خشک شدن نعنای می‌شود. صفحه جاذب به کاررفته در این پژوهش آلومینیوم با روکش پرایمر است. آزمایش‌ها در روزهای ۴، ۵ و ۶ تیرماه ۱۳۹۴ در دو حالت فعال (فن مکنده روشن) و غیرفعال (فن خاموش) انجام شد. آزمایش‌ها از ساعت ۹ صبح شروع و تا ۱۹ بعدازظهر ادامه داشت. برای اندازه‌گیری دما در قسمت‌های مختلف جمع‌کننده (کلکتور) از ترمومتر استفاده شد. ترمومترها در نقاط مختلف، شامل ورودی کلکتور، خروجی کلکتور، ورودی محفظه، روی سینی دوم و خروجی از محفظه قرار گرفتند و از سنسورهای اندازه‌گیری دما مدل TESTO (ساخت آلمان) با دقت ۰/۵ درجه سلسیوس برای اندازه‌گیری دمای محیط استفاده شد. شدت تابش نور خورشید توسط شید سنج مدل casella با دقت ۱ وات بر مترمربع هر ۳۰ دقیقه یک‌بار در راستای عمود بر صفحه کلکتور اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری رطوبت هوا از سنسورهای اندازه‌گیری رطوبت مدل TESTO استفاده شد و برای اندازه‌گیری دبی جرمی هوای خشک‌کننده ابتدا سرعت هوا در سه نقطه طولی کلکتور با استفاده از یک بادسنج سیم داغ TESTO (ساخت آلمان) با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه اندازه‌گیری و بعد از تعیین میانگین سرعت‌ها دبی جرمی هوا از معادله (۱۱) محاسبه گردید:

$$\dot{m}_g = \bar{V} A r \quad (6)$$

$$r = 1.1774 - 0.00359 (T_{\text{drain}} - 27) \quad (7)$$

که در آن A، سطح مقطع ورودی کلکتور (m<sup>2</sup>) است که در این پژوهش برابر با ۱×۰/۱۵ مترمربع می‌باشد؛  $\rho$ ، چگالی هوای خشک‌کن؛  $\bar{V}$ ، متوسط سرعت هوای ورودی به خشک‌کن است. دمای محیط ۳۶ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی محیط ۱۷ درصد محاسبه شد. برگ‌های نعنای در دو حالت فعال و غیرفعال با خشک‌کن خورشیدی خشک شدند و زمان خشک کردن برای همه حالت‌ها ثابت نگه‌داشته شد (۱۰ ساعت)؛ بنابراین، رطوبت نهایی محصول به نرخ هوای عبوری بستگی داشت.

اگر اکسرژی تابشی و اکسرژی جریان هوای ورودی به سیستم، اکسرژی ورودی به سیستم باشند و اکسرژی جریان هوای خروجی، اکسرژی خروجی سیستم در نظر گرفته شود، راندمان اکسرژی به صورت معادله بیان می‌شود (Corzo et al., 2008):

$$Eff_{energy} = \frac{X_{out}}{X_{in}} \quad (14)$$

### نتایج و بحث

میانگین تغییرات شدت تابش خورشید در طول روزهای ۳، ۴ و ۵ در تیرماه ۱۳۹۴ در محل انجام آزمایش‌ها (دانشگاه شهرکرد) در شکل ۲ آورده شده است (شدت تابش با شیدسنج اندازه‌گیری شده است). همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، شدت تابش خورشید در طول آزمایش‌ها بین ۱۲۰۰-۴۲۰ وات بر مترمربع تغییر کرده است و بیشترین مقدار آن در ساعت ۱۳:۳۰ بعدازظهر اتفاق افتاده است. شکل ۳، مقدار انرژی تابشی دریافت‌شده توسط صفحات جذب را نشان می‌دهد (مقدار این انرژی از معادله (۱۰) به دست آمده است). همان‌طور که انتظار داشتیم، نمودار یک‌روند صعودی- نزولی داشت که علت آن مربوط به موقعیت مکانی خورشید است. بیشترین مقدار انرژی تابشی ۲۰۰۶ ژول بر ثانیه و کمترین مقدار آن ۷۰۲ ژول بر ثانیه به دست آمد. بیشینه این انرژی ساعت ۱۳:۳۰ بعدازظهر اتفاق افتاده است. شکل ۴، مقدار انرژی دریافتی هوا در عبور از کانال کلکتور را برای دبی‌های جرمی مختلف نشان می‌دهد (که از معادله (۱۱) محاسبه شده است)؛ همان‌طور که از شکل پیداست، تنها بخشی از انرژی دریافتی توسط صفحات جذب به کلکتور منتقل شده است که بیشترین مقدار برای انرژی دریافتی هوا ۱۶۶۴ ژول بر ثانیه برای دبی جرمی ۰/۰۸۷ کیلوگرم بر ثانیه و کمترین مقدار آن برای دبی جرمی ۰/۳۵۱ کیلوگرم بر ثانیه برابر با ۱۰۶ ژول بر ثانیه به دست آمد. بر اساس میانگین به دست آمده از انرژی هوای عبوری از کلکتور برای هر سه دبی، برای دبی جرمی ۰/۰۸۷ کیلوگرم بر ثانیه برابر با ۸۶۰ ژول بر ثانیه، برای دبی جرمی ۰/۱۷۵ کیلوگرم بر ثانیه برابر با ۸۵۵ ژول بر ثانیه و برای دبی جرمی ۰/۳۵۱ کیلوگرم بر ثانیه برابر با ۶۵۰ ژول بر ثانیه به دست آمد. نتایج به دست آمده به این صورت بود که افزایش دبی جرمی از ۰/۰۸۷ کیلوگرم بر ثانیه به

هوا پس از گرم شدن در کانال کلکتور وارد محفظه خشک‌کن می‌شود و رطوبت محصول را دریافت کرده و از آن خارج می‌شود. مقدار انرژی که صرف خشک شدن محصول می‌شود، از معادله (۱۰) قابل محاسبه است. در این معادله  $h_{fg}$ ، گرمای نهان تبخیر آب و برابر با اختلاف آنتالپی مایع و بخار آب در حالت اشباع است که مقدار آن در جداول فشار بخار ترمودینامیکی در دماهای مختلف وجود دارد.

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{evap} h_{fg} \quad (10)$$

راندمان انرژی در این سیستم برابر است با نسبت مقدار انرژی که در تبخیر رطوبت محصول به کار می‌رود به مقدار انرژی که هوا در عبور از کلکتور دریافت می‌کند و از معادله (۱۱) محاسبه می‌شود. البته هنگامی که فن روشن است باید انرژی فن نیز جز انرژی‌های ورودی به سیستم محاسبه شود (Boulemtafes & Benzaouiza, 2011).

$$Eff_{energy} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{a,coll}} \quad (11)$$

### تحلیل اکسرژی

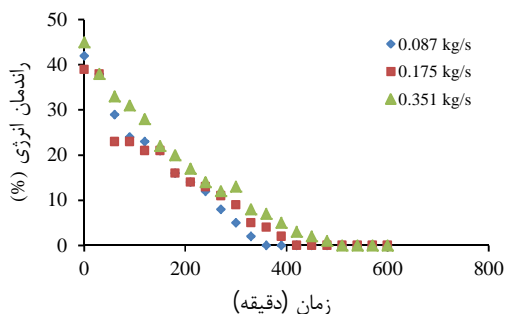
هدف اصلی از تحلیل اکسرژی، محاسبه راندمان اکسرژی و برگشت‌ناپذیری‌های سیستم است. تعاریف متعددی در محاسبه راندمان اکسرژی در خشک‌کن‌ها استفاده شده است. یکی از تعاریف متداول موجود بر مبنای اکسرژی جریان هوا است و راندمان به صورت اکسرژی جریان خروجی از محفظه به اکسرژی جریان ورودی از آن تعریف می‌شود. این تعریف از اکسرژی توسط کورنلیسن (Cornelissen, 1997) به عنوان راندمان اکسرژی در خشک‌کن‌ها کاربرد دارد. انرژی خورشید به هوا انتقال یافته و باعث افزایش اکسرژی جریان هوا می‌گردد. جریان با توانمندی بالا وارد محفظه خشک‌کن می‌شود. اکسرژی حرارتی تابشی و اکسرژی جریان هوا (Corzo et al., 2008) به ترتیب توسط معادلات (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شوند:

$$X_{rad} = I_t \tau_g \alpha_p A \left( 1 - \frac{T_0}{T_s} \right) \quad (12)$$

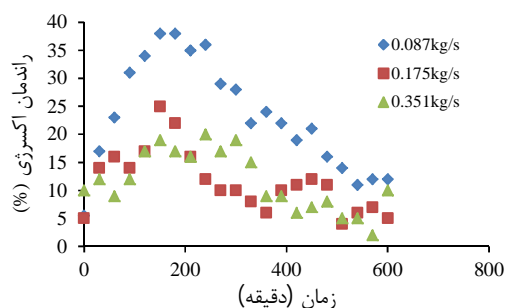
$$X_a = m_a C_{p,a} \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (13)$$

که در آن  $T_s$ ، دمای خورشید برابر با ۴۳۵۰ درجه کلونین در نظر گرفته شده است (Bejan, 1982).

برابر با  $19/7$  به دست آمد که نتایج حاکی از نزدیکی بازده‌های انرژی در هر سه دبی جرمی می‌باشد. همان‌طور که از شکل ۴ هم پیداست، مقادیر راندمان انرژی در هر سه دبی جرمی به هم نزدیک هستند و بیشتر به محتوای رطوبتی نعناع وابسته‌اند. این نکته را می‌توان به سینتیک خشک‌شدن نعناع ارتباط داد. به این دلیل که در رطوبت‌های پایین نرخ تبخیر محصول کاهش می‌یابد؛ مقدار انرژی لازم برای تبخیر هم با افت رطوبت کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه، مقدار کمتری از انرژی دریافتی در کلکتور صرف هدف فرایند می‌شود و در نتیجه راندمان کاهش پیدا می‌کند. حداکثر راندمان برای هر سه دبی در ساعات اولیه اتفاق افتاده و بعد از گذشت ۳۳۰ دقیقه برای دبی جرمی  $0/087$  مقدار راندمان به صفر می‌رسد؛ برای دبی  $0/175$  کیلوگرم بر ثانیه راندمان انرژی بعد از ۴۰۰ دقیقه به صفر رسیده و برای دبی جرمی  $0/351$  کیلوگرم بر ثانیه بعد از گذشت ۴۵۰ دقیقه مقدار راندمان انرژی به صفر می‌رسد؛ علت این امر را می‌توان این‌گونه توصیف کرد که در دبی‌های جرمی پایین (هوا با سرعت کم) دمای خشک‌کن بالاتر بوده و همین امر موجب تسریع در خشک‌شدن نعناع می‌شود و هرچه سرعت خشک‌شدن بیشتر باشد، راندمان انرژی (طبق معادله (۱۳)) سریع‌تر به صفر می‌رسد.

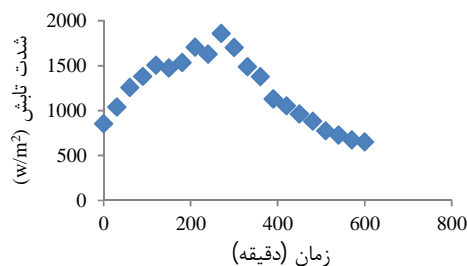


شکل ۵- راندمان انرژی خشک‌شدن محصول برحسب زمان

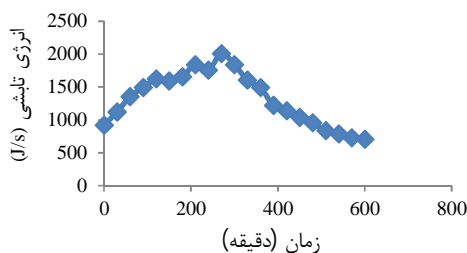


شکل ۶- راندمان اکسرژی خشک‌شدن محصول برحسب زمان

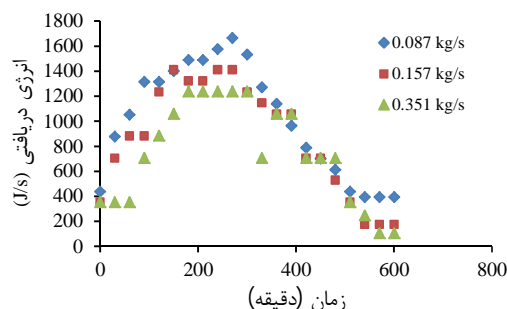
$0/175$  تأثیر زیادی بر انرژی دریافتی توسط هوا در عبور از کانال کلکتور ندارد؛ اما با افزایش دبی جرمی به  $0/351$  کیلوگرم بر ثانیه افزایش انرژی دریافتی توسط هوا کاهش پیدا می‌کند؛ علت این امر، افزایش سرعت هوا در دبی جرمی  $0/351$  کیلوگرم بر ثانیه است که در این حالت هوا فرصت کافی را برای دریافت انرژی تابشی ندارد.



شکل ۲- میانگین شدت تابش در طول روز در زمان انجام آزمایش‌ها



شکل ۳- انرژی تابشی دریافتی توسط کلکتور برحسب زمان



شکل ۴- انرژی دریافتی توسط هوا در عبور از کلکتور از کانال کلکتور برحسب زمان

شکل ۵، تغییرات بازده انرژی را تحت تأثیر دبی‌های جرمی مختلف برحسب زمان نشان می‌دهد. بر اساس میانگین به‌دست‌آمده از بازده انرژی برای هر سه دبی، میانگین بازده برای دبی جرمی  $0/087$  کیلوگرم بر ثانیه برابر با  $19/5$ ، برای دبی جرمی  $0/175$  کیلوگرم بر ثانیه برابر با  $19/3$  و برای دبی جرمی  $0/351$  کیلوگرم بر ثانیه

- thermodynamic of pumpkin drying process. Journal of Food Engineering, 72: 320-331.
4. Bejan, A. 1982. Entropy generation through heat and fluid flow. New York: Wiley. 248 P
  5. Boulemtafes, A. and Benzaouiza, A. 2011. Energy and exergy analysis of solar drying process of Mint. Energy Procedia, 6: 583-591.
  6. Celma, A. R. and Kadrous, S. 2009. Energy and exergy analyses of OMW solar drying process, Renewable Energy, 34: 660-666.
  7. Corzo, O. Bracho, N. Vasquez, A. and Pereira, A. 2008. Energy and exergy analysis of thin layer drying of coroba slices. Journal of Food Engineering, 86: 151-161.
  8. Cornelissen, R. I. 1997. Thermodynamics and sustainable development: the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility, Universitei Twente. 150 P..
  9. Duffi, J. A. and Beckman, W. A. 2013. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley. New York. 944 p.
  10. Garg, H. P. 1982. Treatise on solar Energy: Volume 1: Fundamentals of solar Energy. New York, Wiley. 608 p.
  11. Mosavi, F. Sanaei, A. Ebrahimi, E. and Mehdizadeh, A. S. 2010. Design and construction of a compulsory convection solar dryer for Blackberry, 6<sup>th</sup> National Conference on Mechanics of Agricultural Machines and Mechanization, Tehran Karaj, Iran, 15 september 2010 (In Farsi).

در زمینه تحلیل اکسرژی، مقدار اکسرژی هوای ورودی و خروجی و تابشی برای هر سه دبی جرمی محاسبه و سپس راندمان اکسرژی محاسبه شده است. شکل ۶، منحنی راندمان اکسرژی محصول را در حین خشک‌شدن برحسب زمان در دبی‌های جرمی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، در هر سه دبی جرمی راندمان اکسرژی با زمان خشک‌شدن ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و ملاحظه می‌شود که پیک منحنی راندمان اکسرژی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ دقیقه اتفاق افتاده است که می‌توان علت آن را برحسب میزان رطوبت نعنای در این زمان دانست. به‌طور کلی، هرچه میزان رطوبت کمتر باشد و محصول به سمت خشک‌شدن نزدیک شود، میزان راندمان اکسرژی نیز کاهش می‌یابد. با توجه به راندمان اکسرژی، ملاحظه می‌گردد با زیاد شدن دبی جرمی هوا، راندمان اکسرژی کاهش پیدا می‌کند که دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که افزایش سرعت هوا باعث کاهش دما و همین امر باعث کاهش بازده اکسرژی می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از دستگاه خشک‌کن خورشیدی در حالت تابش غیرمستقیم با سه دبی متفاوت هوای خشک‌کننده برای تعیین شرایط خشک‌شدن نعنای استفاده گردید. در نهایت، کمترین دبی هوای خشک‌کننده (جابه‌جایی آزاد) به‌عنوان بهترین حالت خشک‌شدن نعنای از لحاظ مدت‌زمان خشک‌شدن انتخاب گردید. همچنین، مشاهده شد که افزایش سرعت هوا باعث کاهش دما و در نتیجه کاهش بازده اکسرژی می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد راندمان انرژی مستقل از دبی جرمی بوده و به محتوای رطوبتی محصول بستگی دارد؛ درحالی‌که بیشترین راندمان اکسرژی مربوط به جریان همرفت طبیعی می‌باشد.

### منابع

1. AOAC. 1990. Official method of analysis. Washington, DC: Association of Official Analytical Chem- ists (No. 934.06).
2. Ayensu, A. 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. Solar Energy, 59: 121-126.
3. Akpinar, E. K. A. Midilli, A. and Bicer, Y. 2006. The first and second law analyses of

