



## بررسی تجربی عملکرد یک خشک کن هیبریدی (خورشیدی-الکتریکی) همرفت اجباری

حامد کریمی<sup>۱</sup>، علی نجات لورستانی<sup>۲\*</sup> و رضا تحویلین<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه  
۲- دانشیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، Lorestani@razi.ac.ir  
۳- دانشیار، فارماسیوتیکس، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه.  
\* کرمانشاه، ۶۷۱۵۶۸۵۴۳۸، Lorestani@razi.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق تجزیه و تحلیل تجربی یک خشک کن هیبریدی نوآورانه برای گیاهان دارویی انجام شد. طراحی خشک کن با توجه به نوع محصول، ظرفیت خشک کن و شرایط آب و هوایی منطقه مانند میزان تابش در واحد سطح، دما و رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی روز، نوع مواد مصرفی در ساختمان جمع‌کننده انرژی خورشیدی و محفظه خشک‌کن صورت گرفت و سپس خشک کن مد نظر ساخته شد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که میانگین افزایش دمای هوای داخل محفظه جمع‌کننده در طول روز برای شرایط جوی کاملاً ابری، نیمه ابری و آفتابی به ترتیب برابر ۱۵، ۱۶ و ۲۰ درجه سلسیوس بود. اتلاف حرارت از صفحه پوشش ۹۰٪ اتلاف حرارتی کل می‌باشد. بازده انرژی خشک‌کن در آزمایش‌های که از انرژی حرارتی خورشید استفاده شد حدود ۳۶٪ می‌باشد و برای آزمایش‌های که از انرژی حرارتی هیتر استفاده شد حدود ۲۸٪ محاسبه شد.

کلید واژگان: اتلاف حرارتی، انرژی ویژه، خشک کن، هیبریدی

## Experimental study of performance of a Forced convection Hybrid Dryer (Solar-electric)

Hamed Karami<sup>1</sup>, Ali Nejat Lorestani<sup>2\*</sup> and Reza Tahvilian<sup>3</sup>

- 1- M.Sc Graduate Student, Department of Mechanical Engineering of Biosystem, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran
- 2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystem, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.
- 3- Associate Professor, Department of Pharmaceutics, Novel Drug Delivery Research Center, Students Research Committee School of Pharmacy, Kermanshah University of Medical Sciences (KUMS) Kermanshah, Iran.  
\*P.O.B. 6715685438, Kermanshah, Iran, Lorestani@razi.ac.ir

### Abstract

In this research, an experimental analysis of an innovative hybrid dryer was carried out for medicinal plants. Dryer design was carried out according to product type, drying capacity and weather conditions of the area such as the amount of radiation per unit area, temperature and relative humidity of the air, Sunshine hours a day, The type of materials used in building solar energy collector and dryer chamber. According to the results, It was observed that the average increase in air temperature inside the collector chamber during the day for perfectly cloudy, semi-cloudy, and sunny atmospheric conditions was 15, 16 and 20 °C, respectively. The heat dissipation from the coating plate is 90% total thermal dissipation. The drying energy efficiency in experiments using solar thermal energy is about 36% and is estimated at 28% for experiments using thermal heater energy.

**Keywords:** Heat Dissipation, Specific Energy, Dryer, Hybrid



## ۱- مقدمه

خشک کردن به روش سنتی برای نگهداری غذا و محصولات کشاورزی از زمانهای قدیم رایج بوده است. عمل خشک کردن به شیوه سنتی به دلیل مشکلاتی چون تغییرات نامطلوب در کیفیت محصول، به علت طولانی بودن زمان خشک کردن، نیاز به نیروی کارگری فراوان، عدم کنترل کافی در مراحل مختلف خشک کردن به علت تغییر شرایط جوی و عدم تنظیم صحیح مقدار گرمای مورد نیاز برای خشک کردن که منجر به از بین رفتن محصول می شود، ضایعات ناشی از حمله حشرات و پرندگان، عدم امکان خشک شدن کافی بعضی از محصولات توسط خورشید و ... کاربرد خشک کن های جدید و پیشرفته را ضروری ساخته است [۱].

نیاز روز افزون به محصولات غذایی در طول سال و عدم دسترسی دائم به آنها با توجه به فصل کشت و یا قیمت زیاد محصولات و همچنین نیاز به وارد نمودن آنها به داخل کشور، خشک کردن و انبار کردن محصولات را توجیه می کند. از آنجا که آب موجود در مواد غذایی به صورت مولکولهای آزاد می باشند، می توانند به صورت مستقیم در فعل و انفعالات شیمیایی و میکروبی شرکت کنند یا به صورت واسطه ای باعث فساد سریع سیستم غذایی گردد. به همین دلیل خارج کردن آب از محصولات غذایی در افزایش عمر انبار داری موثر است. از طرف دیگر از لحاظ مصرف انرژی، عملیات خشک کردن محصول یکی از پر هزینه ترین فرایندهای پس از برداشت در کشاورزی است. با توجه به کاهش و رو به اتمام بودن سوخت های فسیلی، استفاده از انرژی های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی جایگزین مناسبی برای سوخت های فسیلی می تواند باشد [۲].

خشک کردن صنعتی، اخیراً با پیشرفت انرژی رواج یافته است ولی نهایتاً باعث افزایش قیمت تمام شده می شود. سبزیجات و میوه ها را می توان در شرایط کاملاً بهداشتی و متناسب با استانداردهای بین المللی با فناوری خشک کن هیبریدی خشک کرد. این سیستم ها می توانند انرژی را ذخیره، زمان و سطح مورد نیاز را کاهش، کیفیت محصول را افزایش، فرآیند را کارآمدتر و حفاظت های زیست محیطی را نیز افزایش دهند.

همچنین در بسیاری از مناطق روستایی کشورهای در حال توسعه، خرید خشک کن های صنعتی برای کشاورزان مقرون به صرفه نبوده و کشاورزان خرده پا به ندرت از این خشک کن ها استفاده می کنند [۳]. با توجه به موقعیت جغرافیایی، کشور ایران به دلیل واقع شدن در منطقه نیمه گرمسیری و خشک، از تابش نور کافی برخوردار می باشد و می توان از این پتانسل بهره گرفت [۴].

شاید یکی از رقبای خشک کن خورشیدی خشک کن های الکتریکی باشند. اما باید دانست که برای استفاده از خشک کن های الکتریکی (که از سوخت های فسیلی استفاده می کنند) باید هزینه های بسیار گزافی (هم برای خرید و هم برای استفاده) متحمل شد.

لذا طراحی و ساخت خشک کن هیبریدی که بتواند با کاهش هزینه ها، کیفیت محصول را بالا برده و امنیت بهداشتی آن را تضمین نماید، ضروری به نظر می رسد. از اهداف ساخت خشک کن هیبریدی می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

-سالم سازی شرایط خشک کردن محصولات به کمک انرژی حرارتی خورشید.

-امکان استفاده در نقاط دور دست و محروم از انرژی برق.

-نداشتن آلودگی های زیست محیطی.

-افزایش عملکرد دستگاه

استفاده از خشک کن های هیبریدی یکی از بهترین روش های خشک کردن مواد غذایی است که مقرون به صرفه است. بدین معنی که به جای استفاده از سوخت های فسیلی از انرژی خورشیدی استفاده می شود که علاوه بر کم هزینه بودن در هر جایی در دسترس بوده و همچنین می توان از آن برای راه اندازی قسمت های مختلف دستگاه از قبیل هیتر، فن و... به جای سوخت های فسیلی استفاده کرد. با ساخت این خشک کن، انرژی لازم برای به کار اندازی آن فقط از خورشید گرفته شده و هیچ هزینه ای برای تأمین انرژی پرداخت نمی شود. در این خشک کن از انرژی خورشیدی به سه شیوه کلی بهره گرفته شد و این سه شیوه کاملاً جدید می باشد.

-استفاده از انرژی تابشی خورشید

-استفاده از سلول های فتوولتایی برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی برای مصارف مورد نظر

-استفاده از هیترهای الکتریکی به وسیله انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری.

در این خشک کن از انرژی خورشید در طول روز و برق ذخیره شده در طول شب برای استفاده مداوم در شبانه روز برای خشک کردن مورد استفاده قرار می گیرد. در نتیجه این خشک کن بدون استفاده از انرژی های دیگر به صورت فعال در طول ۲۴ ساعت می تواند محصول را در محیط کاملاً بهداشتی، با کیفیت بالا و صرفه جویی در وقت خشک کند [۵]. با توجه به این که گیاهان دارویی حاوی اسانس نسبت به اعمال حرارت در فرآیند خشک کردن به لحاظ حفظ رنگ و ترکیبات معطر و خواص مفید گیاه حساس بوده و اگر بلافاصله خشک نشوند و یا اسانس آن ها استخراج نشوند، رایحه خود را از دست می دهند، بنابراین ساخت خشک کنی که بتواند بیشترین مقدار اسانس و خواص آنها را حفظ کرده یکی از ضروری ترین حوزه های پژوهش در فراوری گیاهان داوربی می باشد.

## ۲- مواد و روش ها

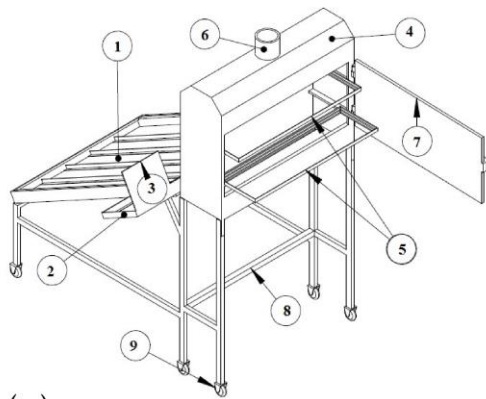
### ۲-۱- طراحی

طراحی یک خشک کن هیبریدی با توجه به نوع محصول، ظرفیت خشک کن و شرایط آب و هوایی منطقه مانند میزان تابش در واحد سطح، دما و رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی روز، نوع مواد مصرفی در ساختمان جمع کننده انرژی خورشیدی و محفظه خشک کن و... صورت می گیرد. در طول روز شرایط اقلیمی از قبیل دما و رطوبت هوای محیط و همچنین میزان و جهت تابش انرژی خورشیدی برای ساعات مختلف، متفاوت بوده و مدام در حال تغییر است. بنابراین در محاسبات خشک کن ها از مقادیر متوسط استفاده می شود و از این رو هر قدر این ارقام با دقت بیشتری انتخاب شوند، خشک کن از کارایی بالاتری برخوردار خواهد بود. روش کلی طراحی به این صورت است که با توجه به نوع و مقدار محصول و همچنین با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه حجم هوای مورد نیاز برای خشک کردن محصول محاسبه می شود و با توجه به مقدار انرژی برای خشک کردن و میزان تابش منطقه، سطح جمع کننده حرارتی به دست می آید. با توجه به

روز از سال در یک منطقه قابل محاسبه است ولی از آنجا که امکان تغییر زاویه جمع کننده به طور روزانه وجود ندارد، لذا از متوسط ماهانه و یا حتی از متوسط سالانه که برابر عرض جغرافیایی منطقه است استفاده می شود. عرض جغرافیایی کرمانشاه  $34/21^{\circ}$  است [۴].



(الف)



(ب)

شکل ۱ (الف) نمای خشک کن خورشیدی (ب) شماتیک خشک کن خورشیدی:  
 ۱- جمع کننده خورشیدی ۲- سلول خورشیدی ۳- جعبه کنترلر ۴- محفظه خشک کن ۵- سینی ها ۶- دمپر ۷- درب محفظه ۸- شاسی ۹- چرخ ها [۵].

یکی از اجزاء خشک کن طراحی شده بخش کنترلر آن می باشد. برای نمایش حسگرها بر روی نمایشگر آنها را نامگذاری می کنیم:

- حسگر رطوبت ورودی محفظه خشک کن با RH1 و خروجی محفظه را با RH2 نمایش داده می شود.

- حسگرهای دمای داخل جمع کننده را با T3 و T4 و میانگین آنها را با T1 نمایش می دهیم.

- حسگر دمای داخل محفظه خشک کن را با T2 نمایش می دهیم.

- دور فن بر حسب دور در دقیقه و با RPM مشخص می شود.

- با توجه به دمای T2 زمان خاموش و روشن شدن هیتر را تعریف می کنیم.

مدار خشک کن شامل حسگرهای دمای داخل جمع کننده (T4 و T3)، حسگر دمای ورودی محفظه خشک کن (T2)، حسگر رطوبت ورودی و خروجی محفظه خشک کن (RH1 و RH2)، یک میکروکنترلر ATMEGA8 و یک LCD می باشد.

مقدار هوای مورد نیاز برای خشک کردن و زمان لازم برای تأمین این مقدار هوا اندازه و توان فن مشخص می شود. سپس با نرم افزار کتیا خشک کن مورد نظر طراحی شد [۵].

## ۲-۲- ساخت

در طراحی و انتخاب اجزای خشک کن مورد نظر سه اصل سادگی، کارآمدی و اقتصادی بودن مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس جمع کننده انرژی خورشیدی از نوع صفحه تخت پره دار (فن دار) انتخاب شده است. جمع کننده پره دار با وجود سادگی ساختمان به دلیل داشتن پره ها باعث تبادل حرارتی بهتر میان صفحه جاذب و هوا شده و بازده جمع کننده افزایش می یابد.

محفظه خشک کن دارای دو عدد سینی با کف توری است که به صورت کشویی داخل محفظه قرار می گیرند. از ویژگی های محفظه می توان به سبک بودن و همچنین استفاده از مواد زنگ نزن نظیر آلومینیوم و ورق گالوانیزه اشاره کرد. اتصال محفظه خشک کن به جمع کننده از طریق یک کانال از جنس پارچه برزنتی می باشد که به طور ثابت روی محفظه نصب شده است و به سادگی به جمع کننده متصل و از آن جدا می شود.

در ساخت جمع کننده از پروفیل آلومینیومی به عنوان قاب جمع کننده استفاده شده است. چهار قطعه قاب با استفاده از نبشی های آلومینیومی به هم متصل شده اند. برای زیر جمع کننده از ورق گالوانیزه ۰/۵ میلی متر استفاده شده است. برای عایق کاری زیر جمع کننده بین صفحه جاذب و صفحه زیری از عایق پشم شیشه با ضخامت ۶ سانتی متر که در فشرده شدن برابر ۱/۵ سانتی متر شد، استفاده شده است. صفحه جاذب انرژی بوسیله رنگ تیره مخصوص پوشیده می شود. این رنگ از مخلوط کردن اکسید تیتانیوم، با رنگ روغنی تیره آماده استفاده شده و پس از استفاده پوشش زیر تیره های در سطح قطعه به وجود می آید. سطح صفحه جاذب دو مرتبه با این رنگ پوشش داده شد. از شیشه ساختمانی با ضخامت ۴ میلی متر به عنوان صفحه شفاف پوشش جمع کننده استفاده شد. فاصله بین صفحه جاذب و صفحه پوشش شیشه ای ۴۵ میلی متر است و بر این اساس مجرای ورود و خروج هوا در جمع کننده تقریباً با این عرض برابر گرفته شده است تا مسیر عبور هوا در جمع کننده یکنواخت تر باشد (شکل ۱) [۶] و [۷].

برای این که حداکثر انرژی خورشیدی جذب جمع کننده شود باید سطح جمع کننده کاملاً عمود بر جهت تابش خورشید باشد. در این صورت بازتابش از سطح جمع کننده کمترین و انرژی بیشتری توسط صفحه جاذب به دست می آید. بر این اساس زاویه شیب جمع کننده از رابطه زیر محاسبه می شود [۸]:

$$\beta = \phi - \delta \quad (1)$$

که در این رابطه  $\beta$  زاویه شیب جمع کننده نسبت به افق،  $\phi$  عرض جغرافیایی منطقه و  $\delta$  زاویه میل خورشید است و عبارت از زاویه ای است که اشعه خورشید در ظهر خورشیدی با صفحه استوا می سازد و توسط رابطه زیر به دست می آید [۸]:

$$\delta = 23/45 \sin \left( 360 \cdot \frac{284+n}{365} \right) \quad (2)$$

در این رابطه n شماره روز سال نسبت به اول ماه ژانویه است. با استفاده از روابط ۱ و ۲ زاویه بهینه جمع کننده خورشیدی برای هر

بعد از شناخت و نامگذاری قطعات اصلی مدار، مجموعه را بر روی یک برد پیاده و با توجه به منبع تغذیه از رگلاتور مخصوص و قطعات جانبی مورد نیاز استفاده شد. بعد از ساخت مدار برنامه نویسی میکروکنترلر با توجه به نیازهای مدار توسط برنامه CODEVISION انجام گرفت. برای هر میکروکنترلر یک برنامه نوشته شد که در این برنامه‌ها علاوه بر قسمت‌های اصلی برنامه یک ساعت و تاریخ برای هر میکروکنترلر تعریف شد.

یکی دیگر از قابلیت‌های این مدار کنترل دور فن می‌باشد، که می‌توان سرعت هوای ورودی به محفظه را تعریف نمود. توان مورد نیاز الکتروموتور برای راه اندازی فن ۳/۳ W می‌باشد. فن و قسمت کنترلر خشک کن با انرژی الکتریکی تولیدی توسط پنل خورشیدی که در باطری ذخیره می‌شود راه اندازی می‌گردد.

از قابلیت‌های دیگر این مدار می‌توان به تنظیم زمان استفاده از هیتر اشاره کرد به طوری که زمان خاموش و روشن شدن هیتر وابسته به دمای داخل محفظه T2 می‌باشد بطوری که یک دما برای T2 تعریف می‌شود و هیتر در دماهای بالاتر و پایین تر از آن دما به ترتیب خاموش و روشن می‌شود. جهت آوردن help، تنظیم تاریخ، زمان و... از یک صفحه کلید ۴×۳ و برای مانیتور کردن داده‌ها از یک صفحه نمایش ۱۶×۲ استفاده شد.

### ۳-۲- محاسبه میزان تابش انرژی خورشیدی در سطح جمع‌کننده

برای محاسبه بازده جمع‌کننده، باید انرژی تابش خورشیدی رسیده به سطح شیب دار جمع‌کننده را از مقادیر انرژی تابشی رسیده به سطح افقی که توسط شیدسنج اندازه‌گیری شده، محاسبه کنیم. در محاسبات انرژی تابشی و بازده جمع‌کننده‌ها معمولاً میزان انرژی و بازده را در بازه‌های زمانی یک ساعته محاسبه می‌کنند [۹]. به این دلیل در محاسبات انرژی تابشی در این بخش و بازده (ها) در بخش‌های بعد انرژی و بازده را به طور ساعتی محاسبه شدند. برای محاسبه انرژی تابشی در سطح شیب دار ابتدا تابش I<sub>0</sub> را از رابطه ۳ حساب شد [۹]:

$$I_0 = \frac{12 \times 2600}{\pi} G_{SC} \left[ 1 + 0.23 \cos \frac{360n}{365} \right] \left[ \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (3)$$

I<sub>0</sub>: انرژی تابشی روی سطح افقی در غیاب اتمسفر (در بازه یک ساعته)، J/m<sup>2</sup>  
 G<sub>SC</sub>: ثابت خورشیدی (انرژی خورشیدی بر واحد سطح در خارج از اتمسفر زمین در فاصله میانگین زمین و خورشید)، W/m<sup>2</sup>  
 n: شماره روز سال نسبت به اول ماه ژانویه  
 φ: عرض جغرافیایی منطقه  
 δ: زاویه میل خورشیدی

ω<sub>1</sub> و ω<sub>2</sub>: به ترتیب زاویه ساعت برای شروع و خاتمه بازه یک ساعته (زاویه ساعت برای ساعت ۱۲ ظهر صفر، به ازای هر یک ساعت بیشتر از ۱۲، +۱۵° و هر یک ساعت کمتر از ۱۲، -۱۵° است).  
 k<sub>T</sub>: ضریب صافی آسمان در طول یک ساعت می‌باشد و از رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۹]:

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (4)$$

$$\frac{I_b}{I} = 1 - \frac{I_d}{I} \quad (5)$$

برای سهم تابش پراکنده از تابش کل معادلات زیر پیشنهاد شده اند [۹]:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0.249k_T \rightarrow k_T < 0.35 \\ 1.557 - 1.84k_T \rightarrow 0.35 < k_T < 0.75 \\ 0.177 \rightarrow k_T > 0.75 \end{cases} \quad (6)$$

R<sub>b</sub>: نسبت تابش مستقیم کل به تابش مستقیم دریافت شده کل از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (7)$$

ω زاویه ساعت برای ساعت متوسط ابتدا و انتهای بازه یک ساعته و β زاویه شیب سطح جمع‌کننده است. و در نهایت I<sub>T</sub> (تابش کل روی سطح با زاویه β در طول یک ساعت) از رابطه زیر به دست می‌آید [۹]:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) p \quad (8)$$

در این رابطه ρ ضریب بازتابش پراکنده سطح زمین است که برای زمین بدون برف مقدار ۰/۲ و برای سطح زمین پوشیده با برف تازه مقدار ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود [۹].

### ۴-۲- محاسبه تلفات حرارتی در جمع‌کننده

در اثر گرم شدن صفحه جاذب جمع‌کننده و بالا رفتن دمای آن اتلاف گرما به وقوع می‌پیوندد. اتلاف گرمایی از سه ناحیه بالای جمع‌کننده (صفحه پوشش)، زیر جمع‌کننده و دیواره‌های جانبی صورت می‌گیرد. با عایق کاری بهتر دیواره‌های جانبی و زیر جمع‌کننده و همچنین دو جداره کردن صفحه پوشش از تلفات حرارتی جمع‌کننده کاسته شده و بازده گرمایی آن افزایش می‌یابد [۵].

### ۴-۲-۱- اتلاف حرارت از صفحه پوشش جمع‌کننده

با گرم شدن صفحه جاذب، گرما از طریق همرفت و تابش از صفحه جاذب به صفحه پوشش و از صفحه پوشش به محیط منتقل شده و از دسترس خارج می‌شود. بر این اساس ضریب اتلاف حرارتی برای سطح بالایی جمع‌کننده از رابطه زیر قابل محاسبه است [۵ و ۹]:

$$U_t = \left( \frac{1}{h_{p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} \right) \quad (9)$$

در این رابطه:

U<sub>t</sub>: ضریب اتلاف حرارتی از سطح پوشش جمع‌کننده، W/m<sup>2</sup>°C  
 h<sub>r,p-c</sub>: ضریب انتقال حرارت همرفتی بین صفحه جاذب و صفحه پوشش، W/m<sup>2</sup>°C  
 h<sub>r,c-a</sub>: ضریب انتقال حرارت تابشی بین صفحه جاذب و صفحه پوشش، W/m<sup>2</sup>°C  
 h<sub>w</sub>: ضریب انتقال حرارت همرفتی بین صفحه پوشش و هوای محیط، W/m<sup>2</sup>°C



$h_{r,c-a}$ : ضریب انتقال حرارت تابشی بین صفحه پوشش و هوای محیط،  $W/m^2 \cdot C$   
 هر یک از ضرایب انتقال حرارت در معادله ۹ از روابط زیر محاسبه می شوند [۹]:

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (10)$$

$\sigma$ : ثابت استفان- بولتزمن

$T_p$ : دمای مطلق صفحه جاذب، K

$T_c$ : دمای مطلق صفحه پوشش، K

$\epsilon_c$  و  $\epsilon_p$ : به ترتیب ضریب نشر صفحات جاذب و پوشش، بدون بعد

$$h_w = 2.8 + 3V_w \quad (11)$$

$V_w$ : سرعت باد محیط، m/s

$$h_{r,c-a} = \epsilon_c \sigma (T_c^2 + T_s^2) (T_c + T_s) \quad (12)$$

$T_s$  دمای آسمان (K) است که تقریباً برابر دمای محیط در نظر گرفته می شود.

برای محاسبه، ابتدا باید عدد رینولدز را محاسبه کنیم. عدد رینولدز برای جریان سیال بین دو صفحه موازی به شکل زیر نوشته می-شود [۹]:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (13)$$

$Re$ : عدد بدون بعد رینولدز

$\rho$ : چگالی هوا در دمای میانگین صفحه جاذب و صفحه پوشش،  $kg/m^3$   
 $V$ : سرعت متوسط هوا، m/s

$D_h$ : قطر معادل (که در جریان بین دو صفحه موازی، دو برابر فاصله صفحات در نظر گرفته می شود)، m

$\mu$ : گرانیوی دینامیکی هوا، Pa.s

اگر  $Re < 2100$  باشد، جریان آرام و در غیر این صورت جریان متلاطم است. بسته به این که عدد رینولدز در چه ناحیه ای باشد، روابط مختلفی برای عدد ناسلت ( $Nu$ ) پیشنهاد شده است. برای حالت همرفت اجباری هوا بین دو صفحه موازی که یک سمت یکی از صفحه ها عایق کاری شده باشد (کانال جمع کننده) و در حالت جریان مغشوش (شرایط مسئله ما) برای عدد ناسلت رابطه زیر پیشنهاد شده است [۱۰]:

$$Nu = 0.0158 Re^{0.8} \quad (14)$$

با محاسبه عدد ناسلت می توان ضریب انتقال حرارت همرفتی بین صفحه جاذب و صفحه پوشش را محاسبه کرد. عدد ناسلت با متغیرهای جدید چنین نوشته می شود [۱۰]:

$$h_{p-c} = Nu \frac{k}{D_h} \quad (15)$$

در این رابطه  $k$  ضریب هدایت حرارتی هوا ( $W/m \cdot C$ ) در دمای متوسط صفحه جاذب و صفحه پوشش است. برای محاسبه  $U_L$  دمای صفحه پوشش،  $T_c$  مجهول است. برای حل مسئله از روش سعی و خطا استفاده شد.  $T_c$  به دست آمده را در معادله ۱۶ قرار می دهیم [۹]:

$$T_c = T_p - \frac{U_L (T_p - T_a)}{h_{p-c} + h_{r,p-c}} \quad (16)$$

۲-۴-۲- اتلاف حرارت از سطح زیرین (پشت) جمع کننده

ضریب اتلاف حرارتی از سطح زیرین جمع کننده از رابطه زیر محاسبه شد [۹]:

$$U_b = \frac{k}{L} \quad (17)$$

$U_b$ : ضریب اتلاف حرارت از سطح زیرین جمع کننده،  $W/m^2 \cdot C$

$k$ : ضریب هدایت حرارتی عایق در زیر صفحه جمع کننده،  $W/m^2 \cdot C$   
 $L$ : ضخامت عایق، m

در زیر صفحه جاذب از عایق پشم شیشه ( $k = 20 \times 10^{-3} W/m \cdot C$ ) با ضخامت ۲۰ mm و کاناپلاست ( $k = 1/73 W/m \cdot C$ ) با ضخامت ۰/۵mm استفاده شده است. مقاومت حرارتی را برای هر ماده محاسبه شد [۱۰]:

$$R = \frac{\Delta x}{k} \quad (18)$$

$R$ : مقاومت حرارتی،  $m^2 \cdot C/W$

$\Delta x$ : ضخامت عایق: m

$k$ : ضریب انتقال حرارت رسانش،  $W/m^2 \cdot C$

۲-۴-۳- اتلاف حرارت از سطوح جانبی جمع کننده

برای محاسبه اتلاف گرما از سطوح جانبی جمع کننده ضریب اتلاف حرارتی از سطوح جانبی جمع کننده از رابطه زیر محاسبه می شود [۹]:

$$U_e = \frac{k A_e}{L A_c} \quad (19)$$

$U_e$ : ضریب اتلاف حرارتی از سطوح جانبی جمع کننده،  $W/m^2 \cdot C$

$k$ : ضریب هدایت حرارتی عایق از سطوح جانبی جمع کننده،  $W/m^2 \cdot C$

$L$ : ضخامت عایق سطوح جانبی جمع کننده، m

$A_e$ : مساحت سطوح جانبی جمع کننده،  $m^2$

$A_c$ : مساحت صفحه جاذب،  $m^2$

در سطوح جانبی جمع کننده لایه ای از هوا (به ضخامت ۲۱ میلی متر) در بین دیواره های پروفیل (ضخامت هر دیواره ۱/۵ میلی متر) نقش عایق را دارد. با استفاده از رابطه ۱۹ مقاومت حرارتی را برای هوا و دیواره آلومینیومی محاسبه شد. مقاومت حرارتی آلومینیوم در مقایسه با مقاومت حرارتی لایه هوا ناچیز بوده و می توان از آن صرف نظر کرد. پس، فرض می شود که دیواره های جانبی فقط هوا باشد. از جدول خواص هوا،  $k$  برای هوا با در نظر گرفتن دمای میانگین ۳۰ درجه سلسیوس، برابر  $0.0265 W/m^2 \cdot C$  به دست آمد.

۲-۴-۴- ضریب اتلاف حرارتی کل

ضریب اتلاف حرارت کل  $U_L$  مجموع ضرایب اتلاف سطوح بالا، پایین و جانبی جمع کننده است [۱۰]:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (20)$$

ضریب اتلاف حرارت کل بیانگر مقدار اتلاف انرژی در واحد سطح جمع کننده به ازای هر درجه افزایش دمای صفحه جاذب است.

۲-۵- انرژی مفید و بازده جمع کننده



الکتریکی مصرف شده توسط فن می باشد. بنابراین می توان نوشت [۱۱]:

$$\eta_S = \frac{m_w L}{I_T \cdot A_c + E_f} \quad (27)$$

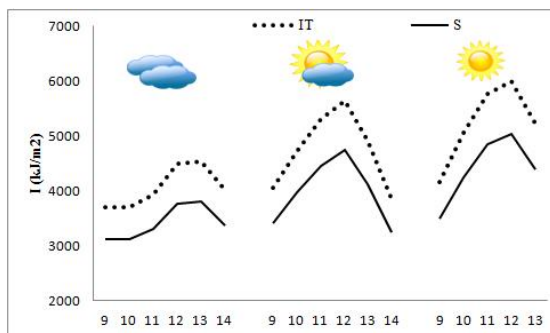
$\eta_s$ : بازده کلی سیستم خشک کن  
 $m_w$ : جرم آب تبخیر شده از محصول، kg  
 $L$ : گرمای نهان تبخیر آب محصول، kJ/kg  
 $I_T$ : انرژی تابشی رسیده به سطح جمع کننده، kJ/m<sup>2</sup>  
 $A_c$ : سطح جمع کننده، متر مربع  
 $E_f$ : انرژی الکتریکی مصرف شده در فن، kJ  
 بازده سیستم می تواند به صورت ساعتی و روزانه محاسبه شود.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج داده های خورشیدی

مقادیر میزان انرژی خورشیدی (تابش) در سطح افقی از اداره هواشناسی شهر کرمانشاه دریافت شد. مقادیر میزان انرژی خورشیدی برای سه روز با شرایط جوی مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. همان طور که از شکل پیداست، میزان تابش در یک روز کاملاً صاف بیشتر از یک روز نیمه ابری و ابری است. بر اساس نتایج بیشینه مقدار تابش در یک روز کاملاً صاف ۵۲۴۱ کیلوژول بر متر مربع بود. این مقدار برای روزهای نیمه ابری و کاملاً ابری به ترتیب برابر ۴۰۶۲ و ۴۷۴۹ کیلوژول بر متر مربع ثبت شد. همچنین از این شکل کاملاً مشخص است که در ساعات ابتدایی میزان تابش کم بوده که در حوالی ظهر به حداکثر مقدار خود می رسد. و دوباره در ساعات پایانی روز روند نزولی داشته است. نتایج مشابهی توسط میرزایی قلعه در مورد روند تغییرات میزان تابش خورشیدی در طول روز و شرایط جوی مختلف در شهر کرج گزارش شده است [۱۲].

هر قدر زاویه صفحه دریافت انرژی (صفحات پوشش و جاذب) نزدیک به صفحه عمود بر پرتوهای تابش قرار گیرد، بازتابش از سطح کم تر می شود. حداکثر مقدار انرژی دریافتی هنگامی است که صفحه دریافت کننده انرژی کاملاً عمود بر پرتوهای تابش خورشید باشد. بنابراین تابش دریافت شده در سطح افقی و در سطح زاویه دار برابر نیستند. مقادیر دمای هوای ورودی به جمع کننده، دمای صفحه جاذب و دمای هوای خروجی از جمع کننده توسط حسگرهای مربوط به دما در طول آزمایش اندازه گیری و ثبت شد. منحنی تغییرات این دماها برای سه شرایط جوی مطرح شده در بالا در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۲ انرژی تابشی رسیده به صفحه پوشش ( $I_T$ ) و مقدار انرژی جذب شده توسط صفحه جاذب ( $S$ ) در شرایط مختلف آب و هوایی

انرژی مفید به دست آمده از جمع کننده از رابطه زیر محاسبه شد [۹] و [۹]:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (21)$$

$Q_u$ : انرژی مفید به دست آمده از جمع کننده، kJ  
 $A_c$ : مساحت صفحه جاذب، m<sup>2</sup>  
 $F_R$ : ضریب انتقال حرارت جمع کننده (بدون بعد)  
 $S$ : انرژی تابشی جذب شده در صفحه جاذب، kJ/m<sup>2</sup>  
 $U_L$ : ضریب اتلاف حرارتی در جمع کننده، W/m<sup>2</sup>°C  
 $T_i$ : دمای هوای ورودی به جمع کننده، (درجه سانتیگراد)  
 $T_a$ : دمای هوای محیط، (درجه سانتیگراد)  
 $F_R$  به صورت نسبت انرژی مفید به دست آمده از جمع کننده به انرژی مفید در حالتی که سطح صفحه جاذب در دمای سیال ورودی ( $T_i$ ) باشد، تعریف می شود و از رابطه زیر محاسبه شد [۹]:

$$F_R = \frac{m C_p (T_o - T_i)}{A_c [S - U_L (T_i - T_a)]} \quad (22)$$

نکته: این رابطه در مواقعی استفاده می گردد که هوای محیط قبل از ورود به جمع کننده توسط یک گرمکن گرم شود، بنابراین چون هوای ورودی به جمع کننده همان هوای محیط می باشد پس  $T_i$  و  $T_a$  برابرند بنابراین در مخرج رابطه  $A_c$  و  $S$  باقی می ماند.

$m$ : دبی جرمی جریان هوا در جمع کننده، kg/s  
 $C_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه هوا، J/kg °C  
 $T_o$ : دمای هوای خروجی از جمع کننده، (درجه سانتیگراد)  
 $S$ : انرژی تابشی جذب شده در صفحه جاذب از رابطه ۲۳ محاسبه شد [۹]:

$$S = I_T (\tau\alpha)_{ave} \quad (23)$$

$I_T$ : انرژی رسیده به سطح جمع کننده، kJ/m<sup>2</sup>  
 $(\tau\alpha)_{ave}$ : ضریب جذب عبور متوسط برای مجموعه صفحات پوشش و جاذب که از رابطه (۲۴) به دست می آید [۹]:

$$(\tau\alpha)_{ave} = 1.0 (\tau\alpha) \quad (24)$$

بازده کلی یک جمع کننده ( $\eta$ ) متأثر از بازده اپتیکی (تأثیر ضریب  $(\tau\alpha)_{ave}$ ) و بازده حرارتی (تأثیر ضریب  $F_R$ ) بوده و از تقسیم انرژی مفید به دست آمده از جمع کننده به انرژی تابشی رسیده به سطح جمع کننده به دست می آید [۹]:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I_T} = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (25)$$

همان گونه که ذکر شد، در محاسبات، مقدار انرژی و بازده جمع کننده را به صورت ساعتی محاسبه شد. ولی برای جمع کننده ها معمولاً بازده روزانه ( $\eta_{day}$ ) نیز محاسبه می شود که از تقسیم مجموع انرژی مفید به دست آمده از جمع کننده به مجموع انرژی تابشی در صفحه جاذب در طول یک روز (ساعات کارکرد جمع کننده) به دست می آید [۹]:

$$\eta_{day} = \frac{\sum Q_u}{\sum I_T \cdot A_c} \quad (26)$$

۲-۶- بازده انرژی در خشک کن (بازده سیستم)  
 بازده کلی سیستم خشک کن بیانگر کسری از مقدار انرژی کل است که صرف تبخیر آب محصول می شود. انرژی کل در خشک کن های همرفت اجباری مجموع انرژی تابشی رسیده به جمع کننده و انرژی



حرارتی ( $U_1$  و  $U_6$  و  $U_e$ ) و مجموع آن‌ها ( $U_L$ ) طبق روابطه (۲۰) محاسبه شد. دماهای مربوط به صفحه جاذب ( $T_p$ )، هوای محیط ( $T_a$ ) و هوای خروجی از جمع‌کننده ( $T_o$ )، داده‌های اندازه‌گیری شده به صورت ساعتی می‌باشند.

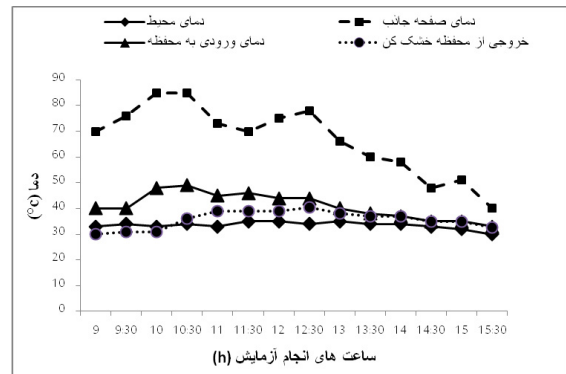
برای محاسبه ضریب انتقال حرارت همرفتی بین صفحه جاذب و صفحه پوشش ( $h_{p-c}$ ) از روش سعی و خطا استفاده شده است. در این محاسبات مقادیر مربوط به  $\rho$  (چگالی هوا)،  $\mu$  (گرانروی دینامیکی هوا) و  $k$  (ضریب هدایت حرارتی هوا) به طریق میانمایی به دست آمده‌اند. تمام محاسبات توسط نرم افزار MATLAB انجام شد، با توجه به مقادیر ضرایب اتلاف حرارتی، اتلاف حرارت از صفحه پوشش ۹۰٪، اتلاف حرارت از پشت جمع‌کننده ۶/۵٪ و اتلاف حرارت از سطوح جانبی جمع‌کننده ۳/۵٪ اتلاف حرارتی کل را شامل می‌شوند. در نتیجه قسمت اعظم اتلاف حرارت جمع‌کننده از صفحه پوشش می‌باشد. زیرا دمای این صفحه نسبت به سطوح جانبی و پشت جمع‌کننده بیشتر بوده و گرما از طریق همرفت و تابش به هوای محیطی منتقل شده و به هدر می‌رود.

برای کاستن از اتلاف حرارت در صفحه پوشش، صفحه پوشش چند جداره توصیه شده است [۱۳]. استفاده از پوشش چند جداره تلفات حرارتی را کاهش داده و دمای هوای خروجی از جمع‌کننده را افزایش می‌دهد ولی در عوض هزینه ساخت جمع‌کننده را افزایش می‌دهد. در عمل معمولاً هنگامی از صفحه پوشش چند جداره استفاده می‌شود که نیاز به هوای خروجی با دمای بالاتر باشد [۹].

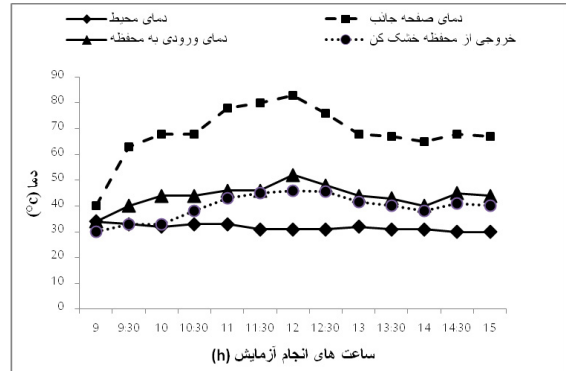
### ۳-۳- بازده جمع‌کننده

انرژی مفید به دست آمده از جمع‌کننده، بازده ساعتی و بازده روزانه (در طول آزمایش) آن با استفاده از روابط ۲۱ تا ۲۶ محاسبه شد. دبی حجمی هوا در خشک‌کن در طول هر دو آزمایش تقریباً ثابت بوده و مقدار آن ۱۲۰ متر مکعب بر ساعت است. با ضرب کردن دبی حجمی در چگالی هوا مقادیر دبی جرمی تعیین می‌شود. بازده روزانه جمع‌کننده برای شرایط ابری ۳۵/۵٪، نیمه ابری ۳۵/۲٪ و صاف ۳۹/۸٪ به دست آمد. با مقایسه بازده این جمع‌کننده با جمع‌کننده ساخته شده توسط سهیلی مهدی‌زاده [۳] و موسوی [۱۴] که میانگین بازده بدست آمده آنها در طول آزمایشها برابر ۴۰٪ بود می‌توان گفت بازده این جمع‌کننده بسیار نزدیک به بازده جمع‌کننده ساخته شده توسط آنها می‌باشد.

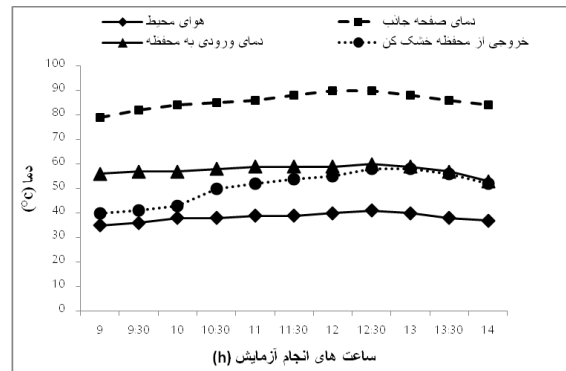
در شکل (۴) نمودار تغییرات بازده ساعتی جمع‌کننده در طی ساعت‌های مختلف آزمایش آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بازده جمع‌کننده در ساعت دوم آزمایش‌ها نسبت به ساعت اول کاهش یافته، در ساعت سوم به اوج خود رسیده و سپس به تدریج کم می‌شود. در ساعت اول آزمایش انتظار بازده کمتری نسبت به ساعت دوم آزمایش داریم زیرا در ساعت اول زاویه سمت خورشید با صفحه جمع‌کننده نسبت به ساعت دوم بیشتر است در نتیجه بازتابش بیشتر خواهد بود. بنابراین بازده ساعت اول باید کمتر از ساعت دوم باشد در حالی که طبق نمودار نتیجه کاملاً عکس تصور ماست. علت این امر را می‌توان انباشت انرژی گرمایی در جمع‌کننده قبل از شروع آزمایش دانست زیرا از هنگام طلوع خورشید تا شروع آزمایش‌ها (ساعت ۹) فن خاموش بوده پس هیچ‌گونه عبور هوا از جمع‌کننده



الف. شرایط جوی ابری - ۱۸ خرداد ۱۳۹۳



ب. شرایط جوی نیمه ابری - ۱۹ خرداد ۱۳۹۳



ج. شرایط جوی صاف - ۱ تیر ۱۳۹۳

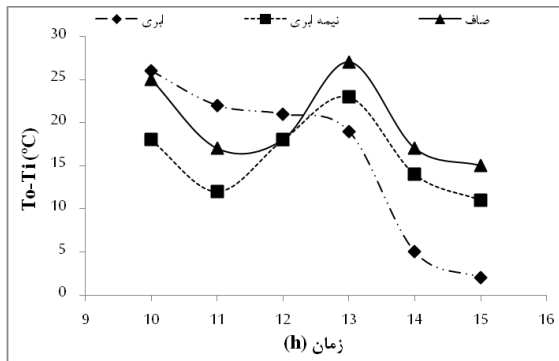
شکل ۳ منحنی تغییرات دمای هوای ورودی به جمع‌کننده، دمای صفحه جاذب و دمای هوای خروجی از جمع‌کننده در شرایط جوی مختلف

بر اساس نتایج، بیشینه دمای صفحه جاذب در یک روز کاملاً صاف (۱ تیر ۱۳۹۳) برابر ۹۰ درجه سلسیوس بود (شکل ۳، ج) در حالی که این پارامتر در روزهای نیمه ابری (۱۹ خرداد ۱۳۹۳) و کاملاً ابری (۱۸ خرداد ۱۳۹۳) به ترتیب برابر ۸۳ و ۷۸ درجه بود (شکل‌های ۶ ب و الف) که در ساعات ظهر اتفاق افتاد. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر بیشینه دمای خروجی از جمع‌کننده در سه شرایط جوی صاف، نیمه ابری و کاملاً ابری به ترتیب برابر ۶۰، ۵۲ و ۴۹ درجه سلسیوس بود که در حوالی ظهر اتفاق افتاد. نتایج مشابه مربوط به روند تغییرات دما در طول روز توسط کرمی و همکاران گزارش شده است [۴].

### ۳-۲- تلفات حرارتی جمع‌کننده

همانگونه که ذکر شد، انرژی گرمایی جمع‌کننده از سه قسمت صفحه پوشش، صفحه زیرین و سطوح جانبی تلف می‌شود. ضرایب اتلاف





شکل ۵ منحنی تغییرات افزایش دمای هوا در جمع‌کننده در طول روز و در سه شرایط جوی مختلف

#### ۴-۳- بازده انرژی خشک‌کن (بازده سیستم)

برای محاسبه بازده انرژی سیستم ( $\eta_s$ ) با استفاده از رابطه (۲۷) ابتدا باید جرم آب تبخیر شده از محصول در مدت آزمایش محاسبه شود. برای محاسبه  $M_i$  و  $M_f$  از مقادیر به دست آمده از آزمایش استفاده شده است. متوسط رطوبت محصول در ابتدا و انتهای آزمایش (یک متوسط برای هر دو سینی بالا و پایین) را حساب کرده و آن‌ها را به عنوان  $\bar{M}_i$  و  $\bar{M}_f$  خشک‌کن در یک آزمایش در نظر گرفته شد. پس از محاسبه  $m_w$  باید با استفاده از دمای متوسط محفظه در هر آزمایش مقدار  $L$  (گرمای نهان تبخیر آب محصول) محاسبه شود. برای به دست آوردن دمای متوسط محفظه ( $\bar{T}$ ) متوسط کل دماهای ورودی و خروجی محفظه در طول آزمایش حساب شد. به کمک جدول ترمودینامیکی بخار  $L$  در دمای  $\bar{T}$  محاسبه می‌شود. برای محاسبه  $E_f$ ، با استفاده از توان فن (۵ وات) و توان هیتر (۷۵۰ وات)، انرژی الکتریکی مصرف شده در طول آزمایش به دست می‌آید. نتایج محاسبات در جدول ۲ مشاهده می‌شوند.

یکی از راه‌های بالا بردن بازده انرژی، چرخش مجدد هوا در خشک‌کن است یعنی هوای گرم شده توسط جمع‌کننده بیش از یکبار (معمولاً دوبار) از داخل محصول عبور کرده و رطوبت بیشتری را با خود حمل می‌کند و بازده انرژی افزایش می‌یابد. ولی در عوض هزینه ساخت خشک‌کن افزایش می‌یابد زیرا به کانال اضافی برای چرخش مجدد هوا نیاز بوده و همچنین باید فن قوی‌تری انتخاب شود. پس استفاده از سیستم با چرخش مجدد هوا باید از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته و در صورت مقرون به صرفه بودن اقدام به استفاده از این روش کرد.

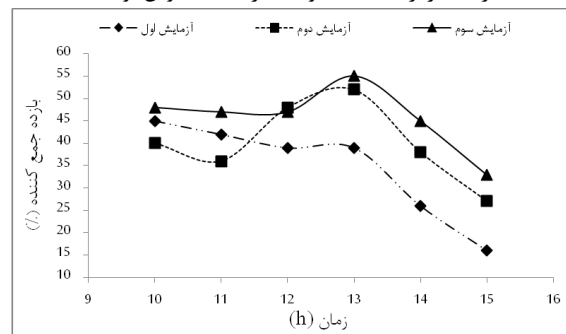
همانطور که مشاهده می‌شود بازده سیستم در حالت استفاده مداوم از هیتر در مقایسه با حالت خورشیدی در حد قابل قبولی می‌باشد. اگر در هر روز بطور متوسط ۵ ساعت از هیتر استفاده کنیم با توجه به هزینه برق مصرفی در یک ماه اگر قیمت هر کیلو وات ۱۰۰۰ ریال باشد به‌طور متوسط هزینه برق مصرفی برابر ۱۱۲۵۰۰ ریال می‌باشد. یکی دیگر از راه‌های بالا بردن بازده انرژی، استفاده از برق تولید شده توسط سلول‌های خورشیدی برای کاربرد هیتر برقی است. که این راه نیز هزینه‌های ساخت خشک‌کن را افزایش می‌دهد. ولی می‌توان بازده انرژی را تا حد مطلوبی بالا برد.

وجود نداشته در نتیجه انرژی گرمایی در جمع‌کننده تا حد امکان انباشته شده است. پس، از نقاط اول نمودار شکل (۴) می‌توان به عنوان نقاط استثناء نمودارها یاد کرد.

بالا بودن بازده در ساعت چهارم نسبت به سایر ساعت‌ها طبیعی است. زیرا ساعت چهارم آزمایش (۱۲ تا ۱۳) دارای بیشترین تابش در طول روز بوده و از طرفی زاویه سمت خورشید با صفحه جمع‌کننده بسیار کم است (در ظهر خورشیدی زاویه سمت برابر صفر است). همچنین مشاهده می‌شود بازده از ساعت دوم آزمایش تا ظهر روند صعودی را طی می‌کند و از ظهر تا انتهای آزمایش روند نزولی دارد. پایین آمدن بازده در آزمایش اول ناشی از ابری شدن هوا و شرایط نامساعد جوی است.

افزایش بازده جمع‌کننده در روز چهارم نسبت به روز سوم و روز سوم نسبت به روز اول و دوم را می‌توان ناشی از افزایش ضریب  $F_R$  (ضریب انتقال حرارت جمع‌کننده) دانست. در رابطه (۲۲) چون  $T_o$  و  $T_i$  برابرند پس، در صورت رابطه  $C_p \cdot \dot{m}$  و  $(T_o - T_i)$  و در مخرج رابطه  $A_c$  و  $S$  باقی می‌ماند.  $C_p$  و  $\dot{m}$  ثابت می‌باشند (البته  $C_p$  طبق جدول تغییرات بسیار کمی در طول آزمایش‌ها دارند) بنابراین  $F_R$  تحت تأثیر عامل  $(T_o - T_i)/S$  خواهد بود. بنابراین انرژی مفید به دست آمده از جمع‌کننده ( $Q_u$ ) نیز در روز صاف یا آفتابی افزایش یافته و این افزایش انرژی مفید باعث افزایش بازده جمع‌کننده می‌شود.

در شکل (۵) افزایش دمای جمع‌کننده  $(T_o - T_i)$  در مقابل زمان آزمایش آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روند کاهش و افزایش در این نمودارها شباهت زیادی به شکل (۴) دارد. در واقع بازده جمع‌کننده در دبی جرمی ثابت بستگی مستقیم به افزایش دما در جمع‌کننده دارد. میانگین افزایش دمای هوای داخل محفظه جمع‌کننده در طول روز برای شرایط جوی کاملاً ابری، نیمه ابری و کاملاً صاف به ترتیب برابر ۱۵/۵، ۱۶ و ۲۰ درجه سلسیوس بود.



شکل ۶ تغییرات بازده جمع‌کننده (۱) در طول آزمایش بر حسب زمان





جدول ۱ بازده انرژی خشک کن (ηs) در روزهای آزمایش

شرایط آزمایش	$\bar{M}_i$ (%)	$\bar{M}_f$ (%)	$m_{wp}$ (kg)	$\bar{T}$ (°C)	$L$ (kJ/Kg)	$I_{F.A_c}$ (kJ)	$E_f$ (kJ)	$(\eta_s)$ (%)
ابری	۷۸	۱۳	۱/۴۹	۴۱	۲۴۰۴	۹۸۱۲	۹۰	۳۶
نیمه ابری	۸۰	۱۳	۱/۵۴	۴۳/۸	۲۳۹۸	۱۱۱۹۶	۹۰	۳۳
آفتابی	۸۱	۱۲	۱/۵۷	۵۷/۶	۲۳۶۵	۱۰۴۲۷	۹۰	۳۶
مهتابی	۸۳	۱۵	۱/۶	۴۰	۲۴۰۷	-	۱۳۵۹۰	۲۸

#### ۴- نتیجه گیری

- بیشینه مقدار تابش در یک روز کاملاً صاف ۵۲۴۱ کیلوژول بر متر مربع بود. این مقدار برای روزهای نیمه ابری و کاملاً ابری به ترتیب برابر ۴۷۴۹ و ۴۰۶۲ کیلوژول بر متر مربع ثبت شد.
- میانگین افزایش دمای هوای داخل محفظه جمع کننده در طول روز برای شرایط جوی کاملاً ابری (۱۸ خرداد ۱۳۹۳)، نیمه ابری (۱۹ خرداد ۱۳۹۳) و کاملاً صاف (۱۱ تیر ۱۳۹۳) به ترتیب برابر ۱۵، ۱۶ و ۲۰ درجه سلسیوس بود.
- اتلاف حرارت از صفحه پوشش ۹۰٪، اتلاف حرارت از پشت جمع کننده ۶/۱۵٪ و اتلاف حرارت از سطوح جانبی جمع کننده ۳/۵٪ اتلاف حرارتی کل می باشد.
- بازده روزانه جمع کننده برای شرایط ابری ۳۵/۵٪، نیمه ابری ۳۴/۷٪ و آفتابی ۳۶/۴٪ به دست آمد.
- بازده انرژی خشک کن در آزمایش های که از انرژی حرارتی خورشید استفاده شد حدود ۳۶٪ می باشد و برای آزمایش های که از انرژی حرارتی هیتر استفاده شد حدود ۲۸٪ بود.

#### ۵- منابع

- داداش زاده، م.، ع. زمردیان، غ. ر. مصباحی، ۱۳۸۷، تاثیر دبی هوای خشک کننده و نحوه خشک کردن بر روند کاهش رطوبت انگور در یک خشک کن خورشیدی کابینتی، مجله علوم و صنایع کشاورزی، ویژه علوم باغبانی، ۲۳-۲۴: (۱)۲۲.
- سهیلی مهدیزاده، ا.، ع. کیهانی، ک. عباسپور ثانی و ا. اکرم، ۱۳۸۵، طراحی خشک کن خورشیدی با همرفت اجباری برای سبزیهای برگی و ارزیابی عملکرد جمع کننده انرژی خورشیدی، مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۷(۲۷): ۱۶۴-۱۴۷.
- سهیلی مهدی زاده، ا. ۱۳۸۳، طراحی، ساخت و ارزیابی یک خشک کن خورشیدی همرفت اجباری برای سبزیجات. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران. ۱۳۰ صفحه.

[۴] کرمی، ح. میرزایی قلعه، ا. لرستانی، ع. ن. بررسی اثر سه نوع صفحه جاذب در عملکرد جمع کننده هوای صفحه تخت، نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی (مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، اردیبهشت ماه ۱۳۹۴.

[۵] کرمی، ح. طراحی، ساخت و ارزیابی خشک کن هیبریدی برای گیاهان دارویی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی کرمانشاه، ۱۵۴ صفحه، مهر ۱۳۹۳.

[۶] کرمی، ح. راسخ، م.، درویشی، ی. ۱۳۹۶. بررسی اثر دما و سرعت جابجایی هوا بر سینتیک خشک کردن و راندمان استخراج اسانس پونه، فناوری های نوین غذایی. (۱)، ۷۵-۹۵.

[7] Karami, H., Rasekh, M., Darvishi, Y., and Khaledi, R. (2017). Effect of Drying Temperature and Air Velocity on the Essential Oil Content of *Mentha aquatica* L. *J. Essen Oil Bear Plant.*, 20(4), 1131-1136.

[8] Ekechukwu O.V. and B. Norton. 1999. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion & Management*, 40:615-655.

[9] Duffie J.A. and W.A. Beckman. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New York.

[10] Holman J.P. 1997. *Heat Transfer*. 8th edition. Mc Graw-Hill. New York.

[11] Augustus leon M., S. Kumar and S.C. Bhattacharya. 2002. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 6:367-393.

[۱۲] ا. میرزایی قلعه، توسعه یک سامانه هوشمند خورشیدی مبتنی بر کنترل کننده منطق فازی جهت گرمایش آشیانه پرورش طیور مدل، مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران، رساله دکتری تخصصی، ۱۳۹۲.

[13] Bleier F. P. 1998. *FAN Handbook: Selection, Application and design*. Mc Graw-Hill. New York.

[۱۴] موسوی، ف. ۱۳۸۸. طراحی، ساخت و ارزیابی خشک کن خورشیدی همرفت اجباری هوشمند برای توت. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید. ۱۵۳ صفحه.

