

## Evaluation of Energetic and Exergetic Efficiency of a Solar Collector Equipped with Porous Plate, with Recycling System and with Reflectors

MILAD RASHIDI<sup>1</sup>, AKBAR ARABHOSSEINI<sup>1</sup>, HADI SAMIMI AKHIJAHANI<sup>2\*</sup>

1. Biosystem Engineering, Department of Agro-technology, University of Tehran, Aboreyhan Campus, Pakdasht, Iran

2. Department of Biosystem Engineering, University of Kurdistan. Sanandj, Iran

(Received: Apr. 28, 2019- Revised: Jan. 9, 2020- Accepted: Jan. 15, 2020)

### ABSTRACT

In this study, the amount of produced thermal energy, exergetic and energetic efficiency of a collector at three conditions with porous plate (PS), with recycling system (PRS) and with reflectors (PRE) in a solar dryer was investigated. For all the experiments the fluid flow rate was 0.018 kg/s. Tomato slices with 7 mm thickness were considered for drying process evaluation. All the experiments were carried out during three consecutive days of June of 2018 from 8:00 to 18:00. The value of total energy enters to the dryer for PS, PRS and PRE changed to 21.94, 24.93 and 28.77 MJ, respectively. Moreover, the energy efficiency obtained 21.03-52.30% for PS, 23.12-58.23% for PRS and 30.01-69.75% for PRE. The maximum exergy efficiency for mentioned conditions was calculated about 19.40%, 21.20% and 23.12%, respectively. The specific energy used for drying of the slices for PS, PRS and PRE was obtained 9.68, 9.28 and 8.82 MJ/kg, respectively and this shows that using the reflectors is proper method to increase thermal efficiency of the flat plate collectors.

**Keywords:** Thermal Energy, Specific energy consumption, Solar radiation, Quality, Tomato slices.

## ارزیابی بازده انرژی و اکسرژی جمع‌کننده خورشیدی مجهز به صفحه متخلخل، جریان بازگشتی و منعکس‌کننده‌ها

میلاذ رشیدی<sup>۱</sup>، اکبر عرب حسینی<sup>۱</sup>، هادی صمیمی اخیمانی<sup>۲\*</sup>

۱. گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

۲. گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه کردستان، دانشکده کشاورزی، سنندج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵)

### چکیده

در این تحقیق میزان انرژی حرارتی تولید شده، بازده انرژی و اکسرژی توسط جمع‌کننده در سه حالت با صفحه متخلخل (PS)، با جریان بازگشتی (PRS) و با منعکس‌کننده‌ها (PRE) در یک خشک‌کن خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفت. دبی جریان سیال در تمام حالت‌ها ۰/۰۱۸ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شد. برای مطالعه روند خشک شدن از ورقه‌های گوجه‌فرنگی به ضخامت هفت میلی‌متر استفاده شد. داده‌برداری‌ها در سه روز متوالی از ساعت ۸:۰۰ تا ۱۸:۰۰ در خرداد ماه سال ۹۷ انجام گرفت. مقدار انرژی کل وارد شده به خشک‌کن برای PS، PRS و PRE به ترتیب به اندازه ۲۱/۹۴، ۲۴/۹۳ و ۲۸/۷۷ مگاژول تغییر نمود. علاوه بر آن مقدار بازده انرژی از ۲۱/۰۳ تا ۵۲/۳۰ درصد برای PS، از ۲۳/۱۲ تا ۵۸/۲۳ درصد برای PRS و از ۳۰/۰۱ تا ۶۹/۷۵ درصد برای PRE به دست آمد. حداکثر میزان بازده اکسرژی برای سه حالت اشاره شده ۱۹/۴۰ درصد، ۲۱/۲ درصد و ۲۳/۱۲ درصد محاسبه شد. انرژی ویژه مصرفی برای خشک نمودن ورقه‌ها برای PS، PRS و PRE به ترتیب ۹/۶۸، ۹/۲۸ و ۸/۸۲ مگاژول بر کیلوگرم به دست آمد و این نشان می‌دهد که استفاده از منعکس‌کننده‌ها گزینه مناسبی برای افزایش بازده حرارتی جمع‌کننده‌های خورشیدی صفحه تخت می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی حرارتی، انرژی مصرفی ویژه، تشعشع خورشیدی، کیفیت، ورقه‌های گوجه فرنگی

### مقدمه

انرژی حاصل از تابش خورشیدی تا سال ۲۰۴۰ به طور متوسط سالانه به میزان ۸/۹ درصد رشد خواهد داشت که سریع‌ترین رشد را نسبت به منابع دیگر انرژی در چند دهه پیش رو خواهد بود (Khosravi et al., 2019). در سامانه‌های مختلف صنعتی و کشاورزی، از جمع‌کننده‌های خورشیدی به عنوان مبدل‌هایی استفاده می‌شود که تابش خورشیدی را به انرژی حرارتی قابل مصرف تبدیل می‌کنند. جمع‌کننده‌های صفحه‌تخت به دلیل طراحی آسان، در دسترس بودن، قابلیت کنترل آسان، هزینه ساخت و نگهداری اندک، بیشتر از دیگر جمع‌کننده‌ها مورد توجه بوده و استفاده از فناوری‌های جدید برای بکار بردن هر چه بیشتر این جمع‌کننده‌ها در سامانه‌های حرارتی رو به افزایش است (Bhowmik and Amin, 2017). این جمع‌کننده‌ها به عنوان منبع تولید انرژی برای خشک‌کن‌ها استفاده می‌شود. کیفیت محصول خشک شده در این نوع خشک‌کن‌ها که به صورت غیر مستقیم محصول را در داخل کابینت خشک می‌کنند، نسبت به حالتی که در مقابل تابش مستقیم خورشید خشک می‌شوند، بالاتر است (Abubakar et al., 2018). اما به دلیل بازده حرارتی اندک جمع‌کننده‌های خورشیدی، بازده خشک کردن خشک‌کن‌های

تقاضا برای انرژی در جهان به تدریج رو به افزایش بوده و در چند دهه اخیر رشد فزاینده جمعیت و به تبع آن افزایش تولیدات صنعتی و کشاورزی، به عنوان یک چالش مهم در جهان تبدیل شده است. این امر باعث بیشتر شدن مصرف سوخت‌های فسیلی به عنوان یک منبع اصلی برای تولید انرژی گردیده است. از طرف دیگر محققان به دلیل محدود بودن، به وجود آوردن مشکلات زیست محیطی و به خطر انداختن سلامت بشر در اثر مصرف سوخت‌های فسیلی به دنبال استفاده از منابع انرژی جایگزین برای این نوع سوخت‌ها هستند (Salami, 2016). یکی از بهترین منابع انرژی، خورشید می‌باشد که به صورت فراوان در اقصی نقاط جهان از جمله ایران یافت می‌شود. ایران با قرار گرفتن در موقعیت جغرافیایی بین ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی، ۴۳ تا ۵۵ درجه شرقی و متوسط ۳۰۰ روز آفتابی یکی از مستعدترین مناطق جهت استفاده از تابش خورشیدی در زمینه‌های مختلف به خصوص خشک کردن است (Edalati et al., 2016). از انرژی خورشیدی برای خشک کردن، تولید آب گرم و تولید جریان الکتریکی، استفاده می‌شود. با توجه به آمارهای سازمان انرژی جهانی، میزان تولید

2012; Gupta and Saha, 1990; Mahanta and Kumar, 2002; Kara *et al.*, 2008; Hepbasli, 2007; Gunjo *et al.*, 2017; Jafarkazemi *et al.*, 2013; Al-Sulaiman, 2014; Kalogirou *et al.*, 2016).

یکی دیگر از روش های افزایش بازده حرارتی جمع-کننده های صفحه تخت، تغییر در ساختار صفحه مانند استفاده از صفحات متخلخل است. بخش عمده ای از انرژی حرارتی تولید شده توسط این نوع جمع کننده ها در قسمت انتهایی جذب کننده تلف می شود. علاوه بر آن بخش دیگر از انرژی حرارتی خارج شده از خشک کن بدون آن که مشارکتی در خشک کردن محصول داشته باشد، از سامانه خارج می گردد ( Motahayyer *et al.*, 2008; Ingle *et al.*, 2013; Selmi *et al.*, 2018). استفاده از مکانیسمی که بتواند انباشت انرژی را در انتهای صفحه کاهش داده و بخشی از انرژی خروجی را وارد سامانه کند، تا حد زیادی می تواند در افزایش بازده حرارتی جمع کننده مفید باشد. استفاده از صفحه متخلخل در یک جمع کننده خورشیدی نشان داد که بازده حرارتی جمع کننده حداقل تا ۷/۴ درصد نسبت به جمع-کننده بدون صفحه متخلخل افزایش می یابد ( Motehayyer *et al.*, 2018). به این منظور در تحقیق حاضر علاوه بر استفاده از صفحه متخلخل در جمع کننده خورشیدی از سامانه جریان بازگشتی و سامانه مجهز به منعکس کننده های تابش خورشیدی نیز استفاده شده است. وجود منعکس کننده ها در سامانه باعث می شود میزان تابش خورشیدی رسیده به سطح جمع کننده بیشتر از متوسط تابش باشد. پاکدشت یکی از شهرهای استان تهران است که به دلیل دارا بودن متوسط تابش خورشیدی ۵/۷۹ کیلو وات ساعت بر متر مربع، منطقه مناسبی برای ایجاد تجهیزات حرارتی مانند خشک کن های خورشیدی است. علاوه بر آن استفاده از فناوری هایی که بتواند بازده این تجهیزات را افزایش دهد، برای ترغیب کشاورزان و تولید کنندگان به استفاده از این نوع تجهیزات بسیار موثر خواهد بود. تاکنون تحقیقی مبنی بر بهبود بازده جمع کننده های خورشیدی با استفاده از ترکیب سامانه صفحه متخلخل همراه با جریان بازگشتی و منعکس کننده ها انجام نشده است. علاوه بر آن مطالعه ای در مورد تغییرات بازده جمع-کننده با تغییر دمای ورودی به سامانه صورت نگرفته است. بنابراین در این تحقیق تغییرات انرژی و اکسرژی یک جمع کننده خورشیدی در طول روزهای خشک کردن در سه حالت بررسی شده و تاثیر استفاده از جریان بازگشتی و منعکس کننده تابش خورشیدی بر افزایش بازده و عملکرد سامانه محاسبه شده است. نتایج به دست آمده با نتایج مربوط به سامانه بدون موارد اشاره شده، مورد مقایسه قرار گرفت.

خورشیدی نیز پایین است. به عبارت دیگر، به دلیل طراحی نامناسب جمع کننده های خورشیدی، انرژی حرارتی وارد شده به خشک کن کم بوده و این امر باعث طولانی شدن روند خشک شدن محصول، عدم پیوستگی خشک شدن، رشد میکروارگانیسم های داخل محصول و در نهایت کاهش کیفیت محصول می شود (Samimi *et al.*, 2016). این ضعف به خصوص در فصل برداشت بسیار مشهود است. بنابراین کشاورز یا تولید کننده تمایلی به استفاده از این نوع خشک کن ها برای خشک کردن محصول در مقایسه با خشک کن های هوای داغ که از سوخت فسیلی استفاده می کنند، ندارند. یکی از راه های افزایش میزان بازده این نوع خشک کن ها، بهبود عملکرد و طراحی مناسب جمع کننده های خورشیدی است. تاکنون تحقیقات زیادی برای افزایش میزان کارایی جمع کننده های خورشیدی صفحه تخت انجام گرفته است: تغییر ساختار صفحه و افزایش بازده حرارتی از ۲۳ تا ۲۹ درصد (Abene *et al.*, 2004)، تغییر سرعت جریان سیال در داخل جمع کننده و افزایش بازده اکسرژی به میزان از ۰ تا ۵/۴ درصد (Farahat *et al.*, 2009)، استفاده از موانع بر روی صفحه جاذب و افزایش بازده جمع کننده از ۴۰ تا ۵۰ درصد (Kvak-Akpinar and Kocyigit, 2010)، استفاده از سامانه PVT و افزایش بازده کلی از ۴/۵ تا ۵ درصد (Salami, 2013)، استفاده از سامانه تعقیب کننده تشعشعات خورشیدی و کاهش مدت زمان خشک شدن از ۱۶/۶ تا ۳۶/۶ درصد (Samimi and Arabhosseini, 2018) و استفاده از سامانه جریان بازگشتی و افزایش بازده انرژی و اکسرژی ۱۹/۱ و ۱۹/۵ درصد (Arabhosseini *et al.*, 2019). اما هنوز تحقیقات بیشتر برای افزایش کارایی سامانه های حرارتی مبتنی بر استفاده از انرژی خورشیدی در حال انجام است. یکی از پارمترهای تاثیرگذار در افزایش بازده سامانه های حرارتی استفاده از بازده اکسرژی است. اکسرژی یکی از معیارهای مهم برای تعیین کارایی سامانه های حرارتی است که طبق قانون دوم ترمودینامیک عبارت است از حداکثر کار مفیدی که از جریان ماده یا انرژی می توان به دست آورد. با استفاده از تحلیل انرژی و اکسرژی سامانه های حرارتی مانند جمع کننده های خورشیدی، بهینه سازی برای کاهش اتلاف حرارتی امکان پذیر است (Khorasanizadeh *et al.*, 2008). تغییرات انرژی و اکسرژی در جمع کننده های خورشیدی به شرایط اقلیمی منطقه، نوع ساختار جمع کننده و نحوه ترکیب با سامانه های دیگر بستگی دارد (Pons, 2012). علاوه بر آن تاثیر هر کدام از متغیرهای اشاره شده با استفاده از مفهوم بازده انرژی به صورت واضح مشخص می گردد. محققین زیادی از تحلیل انرژی و اکسرژی برای بهینه سازی و طراحی مناسب جمع کننده های خورشیدی استفاده نموده اند: (Pons,

## مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها و تحلیل عملکرد جمع‌کننده، از یک خشک‌کن کابینتی مجهز به یک جمع‌کننده صفحه تخت، مبدل حرارتی، صفحه جاذب متخلخل، فن الکتریکی دمنده هوا و کابینت خشک‌کن استفاده شد. جمع‌کننده صفحه تخت شامل یک صفحه مستطیلی به طول ۲۰۰۰ میلی‌متر و به عرض ۹۵۰ میلی‌متر بود. صفحه جاذب استفاده شده در این تحقیق از جنس ورق گالوانیزه به ضخامت یک میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای جذب حداکثری تابش خورشیدی، روی صفحه جمع‌کننده با استفاده از پمپ پیسوله به صورت همگن به رنگ سیاه مات درآمد (با بازده اپتیکی ۰/۷۱). از شیشه چهار میلی‌متری تک‌لایه (با ضریب صدور ۰/۸۷) به عنوان پوشش بر روی جمع‌کننده استفاده شد. فاصله بین شیشه و صفحه جاذب به طور تقریبی ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که به دلیل تخلخل صفحه جاذب در انتهای جمع‌کننده، افت فشار محسوسی در کانال انتقال به وجود می‌آمد که برای جبران این افت فشار در انتهای صفحه، این فاصله به ۱۳۰ میلی‌متر کاهش پیدا کرد. سوراخ‌های ایجاد شده بر روی صفحه به قطر شش میلی‌متر بود که با فاصله ۲۵ میلی‌متری از یکدیگر در ردیف‌های موازی قرار گرفتند. هدایت جریان گرمای جذب شده از جمع‌کننده به داخل کابینت خشک‌کن با استفاده از یک کانال گالوانیزه صورت می‌گرفت. ضخامت ورق کانال یک میلی‌متر بوده و تمام سطوح اطراف جمع‌کننده، کانال و خشک‌کن با استفاده از پشم شیشه به ضخامت ۴۰ میلی‌متر با ضریب هدایت حرارتی ۰/۰۳۸ وات بر متر کلون عایق‌بندی شدند. جریان هوا

در داخل سامانه با استفاده از یک فن دمنده الکتریکی (پره‌ای) DC ۱۲ ولت، ۲۵ وات (Sunnon, Sk25) که در خروجی کابینت خشک‌کن نصب شده بود، صورت می‌گرفت. با استفاده از یک مبدل الکتریکی با تغییر جریان توان، سرعت‌های مختلف برای هوای جریان‌یافته در سامانه امکان‌پذیر بود. میزان دبی هوای جریان یافته در تمام آزمایش‌ها ۰/۱۸ کیلوگرم بر ثانیه در لحاظ شد. در این تحقیق از یک مبدل حرارتی از جنس آلومینیوم (به مدل SM-157107) ساخت ایران برای انتقال جریان بازگشتی حرارت، استفاده شد. این مبدل در ابتدای ورودی جمع‌کننده قرار می‌گرفت. با جریان یافتن هوای خارج شده از خشک‌کن در مبدل حرارتی، دمای هوای ورودی با برخورد به پره‌های مبدل به طور محسوسی افزایش یافته و در نهایت درجه حرارت هوای ورودی به خشک‌کن نسبت به حالتی که مبدل نیست، بهبود می‌یابد. داده‌گیری از خشک‌کن و جمع‌کننده خورشیدی در محیطی که رطوبت آن از ۱۴/۳ درصد تا ۲۱/۵ درصد و دمای محیط از ۱۹ درجه تا ۳۲ درجه سلسیوس تغییر می‌نمود، صورت پذیرفت. آزمایش‌ها در سه روز متوالی از ۱۶ خرداد تا ۱۸ خرداد ۹۷ همه روزه از ساعت ۸:۰۰ تا ساعت ۱۸:۰۰ انجام گرفت. یک ساعت قبل از داده‌برداری، دستگاه به صورت آزاد در مقابل تابش خورشیدی قرار داده شد تا دمای خشک‌کن با محیط سازگار شده و به شرایط پایدار برسد. برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی محیط، درجه حرارت محیط و نقاط مختلف خشک‌کن، شدت تابش خورشید و سرعت هوای جریان یافته در سامانه خشک‌کن، از ابزارهای اندازه‌گیری استفاده گردید که شرح آن‌ها همراه با جزئیات و دقت آن‌ها در جدول ۱ درج شده است.

جدول ۱. ابزارهای سنجش استفاده شده و جزئیات آن‌ها

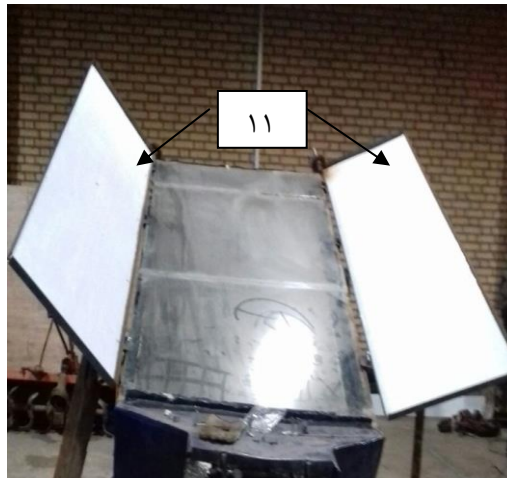
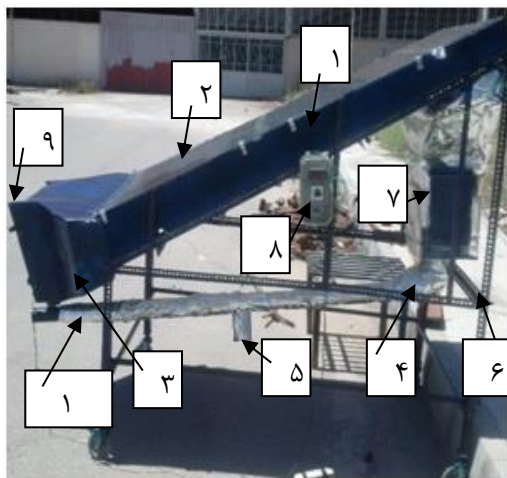
نوع ابزار	مدل	محدوده اندازه‌گیری	کمترین واحد اندازه‌گیری	عدم قطعیت
سرعت‌سنج	AM-4206, Lutron	۰/۴ - ۲۵ m/s	۰/۱ m/s	۲ درصد
ثبت‌کننده دما	TM-914C, Lutron	-۱۰۰ - ۱۰۰°C	۰/۰۱ °C	۱ درصد
رطوبت‌سنج	HT.3006, Lutron	۰ - ۱۰۰ درصد	۰/۱ درصد	۰/۰۱ درصد
سولاریمتر	TES-1333R, Lutron	۱ - ۲۰۰۰ W/m <sup>2</sup>	۱ W/m <sup>2</sup>	۵ درصد

و در نهایت تحلیل‌های انرژی و اکسرژی سامانه انجام می‌گرفت. در حالت اول خشک‌کن خورشیدی شامل صفحه جاذب متخلخل مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت دوم سامانه خشک‌کن با جمع‌کننده خورشیدی همراه با صفحه جاذب متخلخل و سامانه جریان بازگشتی بدون در نظر گرفتن منعکس‌کننده‌ها بررسی شد. در حالت سوم خشک‌کن فقط شامل منعکس‌کننده بود و ارزیابی‌ها بدون لحاظ نمودن سامانه جریان بازگشتی انجام شد. در نهایت

برای اندازه‌گیری دمای نقاط مشخص شده از خشک‌کن (ورودی جمع‌کننده، روی شیشه، روی صفحه، بین صفحه و شیشه، خروجی جمع‌کننده، ورودی خشک‌کن، داخل کابینت و خروجی کابینت) از ترموکوپل‌های نوع T استفاده شد که در هر نقطه، ترموکوپل نصب شده و به وسیله ثبت‌کننده دما داده‌برداری انجام شد. داده‌های به دست آمده در نرم‌افزار Excel جمع‌آوری شده و با استفاده از روابط مربوطه، آنالیزها و محاسبات، انجام شده

اکسرژی با هم مقایسه شدند. جزئیات خشک کن مورد استفاده برای انجام آزمایشها در شکل ۱ نشان داده شده است.

پس از تحلیل‌های انجام شده بر روی داده‌ها، تغییرات انرژی و اکسرژی در هر سامانه به دست آمده و سامانه‌ها از لحاظ انرژی و



شکل ۱. خشک کن خورشیدی آزمایشگاهی شامل: (۱) صفحه جمع کننده، (۲) شیشه، (۳) دیواره عایق بندی شده، (۴) کانال، (۵) دریچه کنترل خروجی هوا، (۶) شاسی، (۷) کابینت، (۸) کنترلر فن الکتریکی و دما، (۹) مبدل حرارتی، (۱۰) مسیر جریان بازگشتی، (۱۱) منعکس کننده‌ها

مکانیزم پولی‌ها نیز تحریک نموده و باعث دوران صفحه می‌شود. در این حالت صفحه سمت دیگر نیز تغییر زاویه داده و تابش را به صفحه جاذب انعکاس می‌دهد. این روند تا واپسین ساعات روز یعنی تا ساعت ۱۸:۰۰ ادامه پیدا می‌کند. در منابع Salami, 2016 و Motevali, 2013 به طور مفصل در مورد نحوه عملکرد سامانه منعکس کننده و مکانیزم عمل آن توضیح داده شده است که در آن‌ها از روشی مشابه برای حرکت صفحات منعکس کننده و جمع کننده سهموی استفاده شده است. در شکل ۲، مکانیزم عمل و مدار کنترل کننده موتور الکتریکی نشان داده شده است.

سامانه منعکس کننده شامل دو ورق استیلی بود که روی قاب‌هایی به شاسی اصلی لولا شده بودند. برای تغییر زاویه صفحه بازتابنده از یک مکانیزم که شامل موتور الکتریکی با توان ۱۰۰ وات و با سرعت یک دور بر دقیقه، پولی‌های متصل به قاب صفحه، حس گر فوتوسل، مدار فرمان و کابل‌های اتصال بود، استفاده شد. با شروع آزمایش در اوقات صبح، تابش خورشیدی با برخورد به صفحه استیلی در یک سمت، تشعشعات خورشیدی به صفحه جمع کننده انعکاس داده می‌شود. با گذشت زمان و با بالا آمدن خورشید حس گر تابش را حس نموده، مقاومت الکتریکی در مدار کاهش یافته و موتور شروع به دوران می‌کند. با دوران موتور،



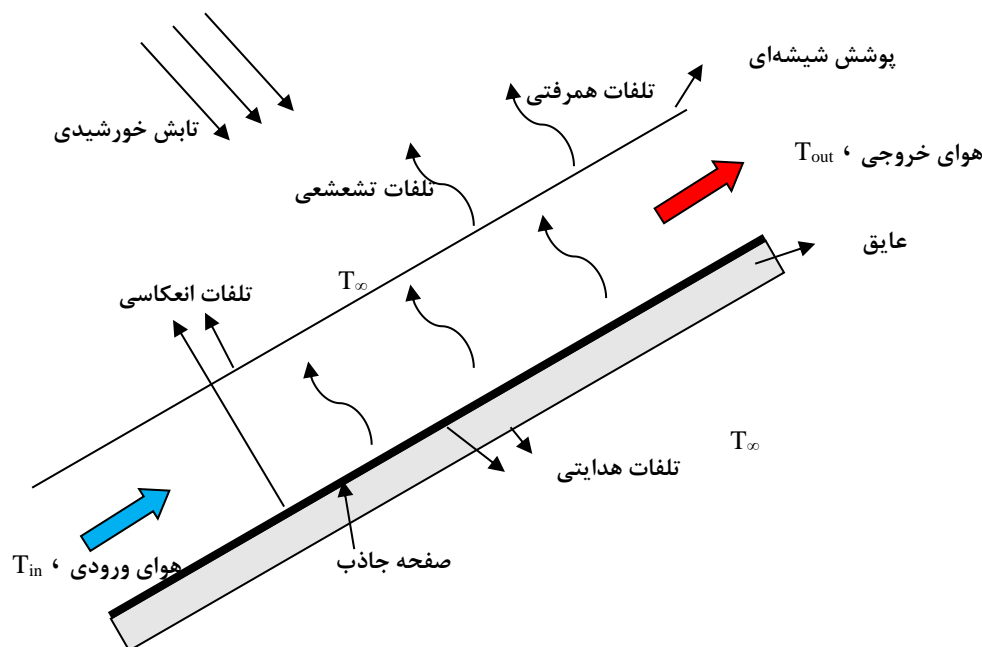
شکل ۲. حسگر، مدار فرمان و موتور الکتریکی استفاده شده در سامانه برای منعکس کننده‌های خورشیدی

دست آمد. برای هر آزمایش به میزان ۱۲۰۰ گرم از ورقه‌های گوجه‌فرنگی بر روی سینی‌ها پهن گردیده و داخل خشک کن قرار داده شد. تغییرات وزن محصول در حین خشک شدن با استفاده از ترازوی دیجیتال (SJX1502N, Ohaus) به ظرفیت ۱۵۰۰ گرم و با دقت ۰/۰۱ گرم گزارش می‌شد. نسبت رطوبت ورقه‌ها برای توصیف روند خشک شدن با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

برای انجام آزمایش خشک شدن محصول و مقایسه نتایج با موارد مشابه، از ورقه‌های گوجه‌فرنگی به ضخامت ۷ میلی‌متر استفاده شد. برای به دست آوردن رطوبت اولیه ورقه‌ها، به میزان ۵۰ گرم از نمونه‌ها در چهار تکرار در آون با دمای  $105 \pm 2$  درجه سلسیوس به مدت پنج ساعت قرار داده شد (Arabhosseini et al., 2019). میانگین رطوبت اولیه نمونه‌ها  $92/9 \pm 1$  درصد به

لحظه، محتوای رطوبتی در حالت تعادل و محتوای رطوبتی اولیه محصول (kg water/kg dry solid) می‌باشند.

(رابطه ۱)  $MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$  که در آن  $M_t$ ،  $M_e$  و  $M_0$  به ترتیب محتوای رطوبتی در هر



شکل ۳. روند انتقال حرارت برای سیال، از داخل جمع‌کننده

شار خورشیدی رسیده به صفحه جمع‌کننده و  $S$  تابش خورشیدی جذب شده که از حاصل ضرب ضریب عبور در ضریب جذب صفحه به دست می‌آید. شار خورشیدی از مجموع تابش مستقیم خورشیدی ( $I_{dir}$ ) و تابش منعکس شده از صفحات منعکس‌کننده ۱ ( $I_{ref1}$ ) و ۲ ( $I_{ref2}$ ) قابل محاسبه است.

ضریب انتقال حرارت جمع‌کننده را می‌توان از رابطه ۴ که نسبت انرژی مفید حاصل شده به انرژی مفید رسیده به سطح جمع‌کننده است، به دست آورد (Ekechukwu and Norton, 1998).

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{A_c[S - U_L(T_{in} - T_{\infty})]} \quad (\text{رابطه ۴})$$

ضریب افت کلی حرارت شامل سه بخش ضریب افت از جلو  $U_f$ ، پایین  $U_b$  و جوانب  $U_s$  جمع‌کننده است (Koyuncu, 2006).

$$U_L = U_f + U_s + U_b \quad (\text{رابطه ۵})$$

روابط مربوط به افت‌های اشاره شده پیچیده و طولانی بوده و در منبع Pangavhane et al, 2002 به طور مفصل به آن‌ها اشاره شده است.

به دلیل تاثیر شرایط اقلیمی و محیطی بر عملکرد سامانه جمع‌کننده خورشیدی و وجود تاخیر بین عمل و عکس العمل حس‌گرهای مدار کنترلی و فرمان، به طور معمول دو نوع بازده انرژی (تئوری و تجربی) برای جمع‌کننده‌های خورشیدی محاسبه

انرژی حاصل از جمع‌کننده خورشیدی و بازده انرژی: طرح‌واره انتقال حرارت و تلفات حرارتی در شکل ۳ نشان می‌دهد که بخشی از انرژی حرارتی تولید شده از تابش خورشیدی به صورت انعکاسی، همرفتی و هدایتی از جمع‌کننده تلف می‌شود، هر چند برای کاهش این تلفات از عایق نیز استفاده شده است.

انرژی حرارتی جذب‌شده توسط سیال با استفاده از رابطه ۲ مشخص می‌گردد:

$$Q_f = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $T_{in}$  و  $T_{out}$  درجه حرارت سیال در نقطه ورودی و خروجی،  $\dot{m}$  جریان جرمی سیال و  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه سیال در فشار ثابت می‌باشد.

انرژی که به وسیله جمع‌کننده از تابش خورشیدی به دست می‌آید، با در نظر گرفتن تشعشعات خورشیدی ورودی و تلفات حرارتی از بدنه با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Duffie and Beckman, 2013):

$$Q_f = A_c F_R [S - U_L(T_{in} - T_{\infty})], \quad S = (\tau\alpha)I_T, \quad I_T = I_{dir} + I_{ref1} + I_{ref2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن  $A_c$  مساحت سطح جاذب،  $F_R$  ضریب انتقال حرارت جمع‌کننده،  $U_L$  ضریب افت کلی حرارت از جمع‌کننده،  $I_T$

اکسرژی مفید را کاهش می دهد. در حین عملیات حرارتی دمای سطح خورشید به هیچ وجه با دمای صفحه یکسان نیست و این اختلاف باعث تخریب اکسرژی صادر شده از خورشید می گردد.

$$Ex_{dest,ATp,s} = \eta_0 I_T A_c T_{\infty} \left[ \frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s} \right] \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

یکی دیگر از منابع تخریب کننده اکسرژی، اختلاف به وجود آمده بین دمای سطح صفحه جاذب و هوای جاری در جمع کننده است که وظیفه انتقال حرارت به محفظه کابینت خشک کن را دارد.

(رابطه ۱۴)

$$Ex_{dest,ATp,s} = \dot{m} C_p T_{\infty} \left[ \ln \frac{T_{out}}{T_{\infty}} \right] - \dot{m} C_p T_a \frac{T_{out} - T_{in}}{T_p}$$

افت اکسرژی در اثر لزجت سیال به دلیل تغییر نامحسوس در حین عملیات انتقال حرارت، ناچیز در نظر گرفته می شود.

در نهایت بازده اکسرژی جمع کننده با استفاده از قانون دوم

ترمودینامیک از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\eta_{exergy} = \frac{Ex_{out,f} - Ex_{in,f}}{I_T A_c (1 - \frac{T_s}{T_{\infty}})} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

بازده خشک کن خورشیدی:

برای توصیف چگونگی تاثیر استفاده از صفحه متخلخل، جریان بازگشتی و منعکس کننده ها در روند خشک شدن محصول از بازده خشک کن استفاده گردید. برای این منظور از نسبت انرژی حرارتی و مکانیکی لازم برای افزایش دمای محصول و استخراج رطوبت از آن ( $Q_m$ ) به انرژی کل مصرف شده در طول فرآیند خشک کردن استفاده شد. انرژی کل مصرف شده شامل انرژی حرارتی هوای وارد شده به خشک کن ( $Q_f$ ) و انرژی مکانیکی ( $E_{mec}$ ) (شامل فن و سامانه تعقیب کننده تشعشعات خورشیدی) می باشد (Vieira et al., 2007):

$$\eta_{ef} = \frac{Q_m}{Q_f + E_{mec}} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

انرژی لازم برای استخراج رطوبت از نمونه با در نظر گرفتن محتوای رطوبتی و گرمای ویژه محصول محاسبه می شود:

$$Q_m = W_d C_m (T_{m2} - T_{m1}) \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

گرمای ویژه نمونه ( $C_m$ ) را می توان از رابطه ۱۸ به دست

آورد:

(رابطه ۱۸)

$$c_m = 1465 + 3560 \left( \frac{M_p}{1 + M_p} \right) \quad \text{و} \quad M_p = \left( \frac{W_w - W_d}{W_d} \right)$$

که در رابطه فوق  $W_d$  و  $W_w$  به ترتیب وزن رطوبت تبخیر

شده از ماده و وزن ماده خشک شده به کیلوگرم می باشد.

برای به دست آوردن انرژی مورد نیاز برای خشک کردن

یک کیلوگرم از محصول (گوجه فرنگی) از رابطه ۱۹ استفاده شد:

$$E_{kg} = \frac{Q_m}{W_o} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

می شود. بجز ساعاتی که شدت تابش خورشیدی در حد بیشینه خود قرار دارد، بازده انرژی پیش بینی شده (تئوری) بالاتر از بازده انرژی تجربی گزارش می شود (Duffie and Beckman, 2013) البته با این فرض که حالت سامانه در دمای محیط پایدار بوده و دمای میانگین سطح صفحه به اندازه  $T_p$  باشد. این دو بازده با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه اند:

$$\eta_{e,t} = \frac{\tau \alpha I_T - U_l (T_p - T_{\infty})}{I_T} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\eta_{e,exp} = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{I_T \times A_c} \quad (\text{رابطه ۷})$$

محاسبه بازده اکسرژی جمع کننده:

با ناچیز فرض کردن تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل جمع کننده، می توان رابطه ۷ را به صورت رابطه ۸ برای انرژی ورودی  $E_{in}$  و خروجی  $E_{out}$  در نظر گرفت:

$$Ex_{in} - Ex_{out} - Ex_{dest} - Ex_{loss} = 0 \quad (\text{رابطه ۸})$$

اکسرژی وارد شده به جمع کننده، شامل اکسرژی سیال

$Ex_{in,sun}$  و اکسرژی تشعشع خورشیدی است (Mathur et al., 2006).

(رابطه ۹)

$$Ex_{in,f} = \dot{m} C_p \left[ (T_{in} - T_{\infty}) - T_{\infty} \left( \ln \frac{T_{in}}{T_a} \right) \right] + \frac{\dot{m} \Delta P_{in}}{\rho}$$

$$Ex_{in,opt} = \eta_0 I_T A_c \left( 1 - \frac{T_{\infty}}{T_s} \right)$$

که در آن  $T_s$  مشخصه دمای خورشید (به عنوان جسم سیاه)

بوده و مقدار آن ۴۳۵۰ کلوین در نظر گرفته شد.

اکسرژی خارج شده از جمع کننده بدون در نظر گرفتن افت

فشار در جمع کننده و مسیر خارج شده از سامانه عبارت است از:

(رابطه ۱۰)

$$Ex_{out,f} = \dot{m} C_p \left[ (T_{out} - T_{\infty}) - T_{\infty} \left( \ln \frac{T_{out}}{T_{\infty}} \right) \right] + \frac{\dot{m} \Delta P_{out}}{\rho}$$

اختلاف فشار بین قسمت ورودی و محیط  $\Delta P_{in}$  به دلیل

بزرگ بودن سطح دریچه ورودی و کم بودن سرعت هوای ورودی

ناچیز در نظر گرفته می شود. اما اختلاف فشار بین قسمت خروجی

و محیط  $\Delta P_{out}$  با استفاده از توان مصرفی توسط فن قابل محاسبه

است (Bahrehmand et al., 2015):

$$W_{fan} = \frac{\dot{m} \times \Delta P}{(\rho \times \eta_{fan})} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$W_{fan}$  معرف کار انجام شده توسط فن و  $\eta_{fan}$  بازده اسمی

فن است.

اکسرژی هدر رفته شامل اکسرژی تلف شده توسط صفحه

جاذب به محیط (از جلو، پشت و جوانب)  $Ex_{l,\infty}$  و اکسرژی تلف

شده در اثر جذب نشدن توسط صفحه جاذب  $Ex_{l,opt}$  است:

$$Ex_{l,opt} = (1 - \eta_0) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

اکسرژی تخریب شده یکی از موارد دیگری است که

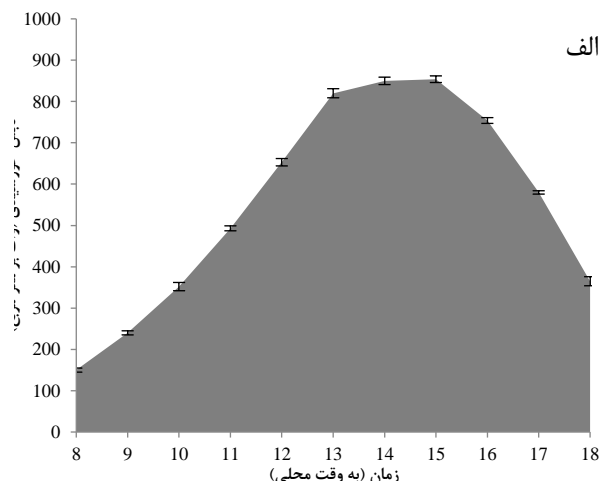
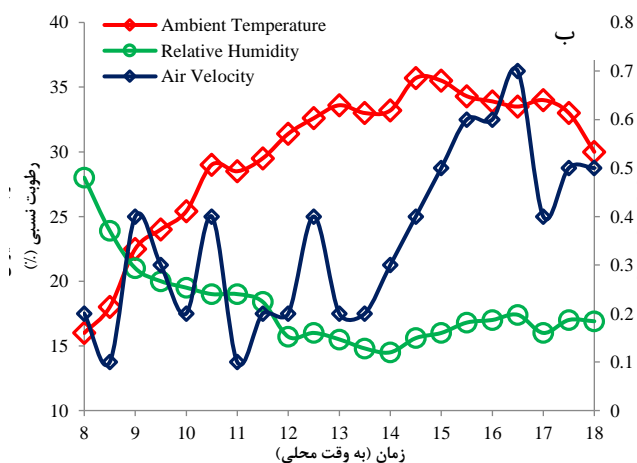


که در آن  $W_0$  وزن نمونه قرار داده شده به کیلوگرم در خشک‌کن در نظر گرفته می‌شود.

## نتایج و بحث

یکی از عوامل تاثیرگذار در روند خشک شدن محصول، شدت تابش خورشیدی است که در شکل ۴ متوسط تغییرات آن برای روزهای آزمایش نشان داده شده است. در روزهای داده‌گیری آسمان صاف بوده و شدت تابش خورشیدی هر نیم ساعت گزارش می‌شد. با شروع داده‌گیری از ساعت ۸:۰۰ صبح شدت تابش خورشیدی از  $154 \pm 5$  وات بر متر مربع افزایش یافته و در ساعات ۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰ به بیشینه مقدار خود  $854 \pm 7$  وات بر متر مربع می‌رسد. به دلیل ناچیز بودن میزان این تغییرات در طول روزهای آزمایش تاثیر معنی‌داری بر روند خشک کردن محصول و میزان حرارت به وجود آمده مشاهده نشد (Motehayer et al., 2017). مساحت زیر سطح نمودار شکل ۴، به عنوان میزان انرژی حرارتی رسیده به سطح صفحه محسوب می‌شود که مقدار آن برای آزمایش به  $0.12 \pm 5/43$  کیلو وات ساعت بر متر مربع به دست آمد. یکی دیگر از عوامل کلیدی در خشک کردن مناسب محصول، دمای بالا، رطوبت نسبی پایین و سرعت کم هوای محیط آزمایش (تاثیر گذار در دفع حرارت از روی شیشه) است. میزان تغییرات

عوامل اشاره شده به طور متوسط در طول ساعات خشک کردن محصول در شکل ۴-ب نشان داده شده است. رطوبت نسبی محیط در ساعات آغازین آزمایش بیشترین مقدار خود را داشته و با افزایش شدت تابش خورشیدی مقدار آن کاهش یافت. با توجه به نمودار، کمترین درجه حرارت محیط مربوط به ساعات آغازین فرآیند خشک کردن به میزان ۱۶ درجه سلسیوس می‌باشد و بیشترین آن به میزان  $35/7$  درجه سلسیوس در ساعت ۱۴:۳۰ اتفاق می‌افتد. میزان رطوبت محیط نیز در ساعات آغازین روز، بیشترین مقدار یعنی ۲۸ درصد و با گذشت زمان مقدار آن کاهش می‌یابد (تا  $14/5$  درصد). به عبارت دیگر با افزایش شدت تابش خورشیدی میزان دمای محیط افزایش و رطوبت محیط کاهش پیدا می‌کند. هر چند به دلیل تاخیر بین تابش خورشیدی و جذب این تشعشعات توسط هوای محیط، دمای محیط با تاخیر نسبت به تابش خورشیدی افزایش می‌یابد (Eltawil et al., 2018). علاوه بر آن تغییرات سرعت هوای محیط نیز که بر میزان ضریب انتقال حرارت همرفت از روی پوشش جمع‌کننده تاثیرگذار است در شکل ۴-ب ترسیم شده است. مقدار آن به صورت نوسانی بوده و بین  $0.1$  تا  $0.7$  متر بر ثانیه در طول ساعات خشک کردن تغییر می‌کند.



شکل ۴. تغییرات (الف) شدت تابش خورشیدی و سطح زیر نمودار آن، (ب) میانگین درجه حرارت، رطوبت نسبی و سرعت هوای محیط

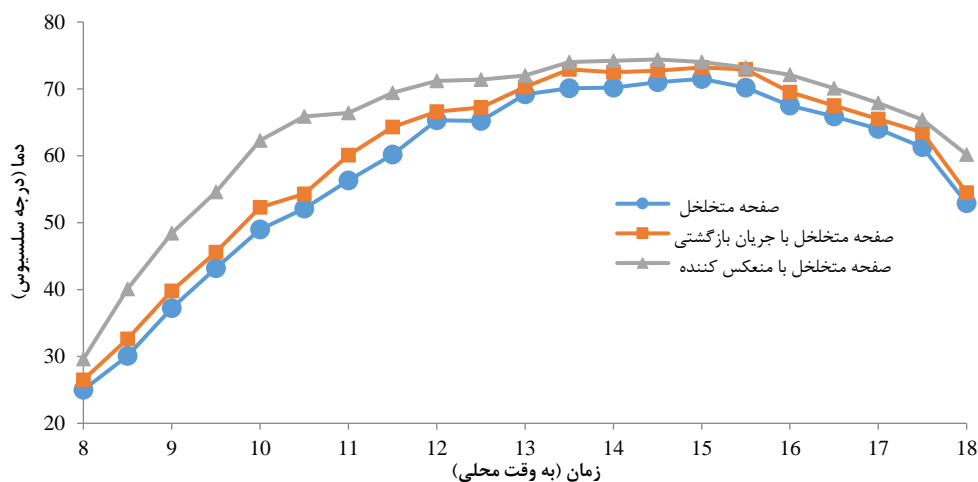
صورت مداوم صورت گرفت. با توجه به نمودار در تمامی حالت‌ها، با گذشت زمان و نزدیک شدن به ساعات ظهر، شدت تابش خورشیدی افزایش یافته و دمای هوای وارد شده به خشک‌کن نیز افزایش می‌یابد. پس از آن با کاهش شدت تابش خورشیدی از دمای هوای وارد شده به خشک‌کن کاسته می‌شود. کم‌ترین دمای هوای ورودی به خشک‌کن مربوط به جمع‌کننده با صفحه متخلخل (PS) است که مقدار آن از ۲۵ تا  $73/2$  درجه سلسیوس

میزان تغییرات دمای خروجی از جمع‌کننده در شرایط مختلف با صفحه متخلخل (PS)، با صفحه متخلخل همراه با سامانه جریان بازگشتی (PRS) و با صفحه متخلخل همراه با صفحات منعکس‌کننده (PRE) در طول ساعات خشک کردن محصول در شکل ۵ نشان داده شده است. برای پایدار شدن دمای تمام مجموعه خشک‌کن با محیط، یک ساعت زمان در نظر گرفته شد و داده‌گیری از فرآیند خشک شدن از ساعت ۸:۰۰ صبح به



دمای هوای وارد شده به خشک کن بین ساعات ۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰ اتفاق می افتد. همچنین در طول ساعات ۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰ دمای سیال کمترین شیب را داشته و به صورت تقریبی می توان گفت که خط ثابتی را به وجود می آورد. در این حالت به دلیل افزایش شدت تابش خورشیدی و عدم انعکاس تمام تابش خورشیدی، منعکس کننده ها کمترین نقش را در انعکاس تابش خورشیدی نسبت به ساعات قبل از ظهر و بعد از ظهر ایفا می کنند. بنابراین دمای سیال در ساعات ۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰ بسیار به یکدیگر نزدیک هستند.

متغیر است. در حالی بود که این کمیت برای نوع دو (PRS) از ۲۶/۵ تا ۷۴ درجه سلسیوس و برای نوع سه (PRE) از ۲۹/۶ تا ۷۴/۴ درجه سلسیوس متغیر است. میزان اختلاف درجه حرارت بین حالت های مختلف در ساعات قبل از ظهر بیشتر از ساعات بعد از ظهر است. این اختلاف برای نوع دوم به دلیل برگشت جریان هوا و گرم شدن دمای هوای ورودی به خشک کن به اندازه ۴/۱ درجه سلسیوس می باشد. در حالی که برای نوع سوم با منعکس کننده ها به دلیل افزایش میزان تشعشع خورشیدی در یک سطح مشخص دمای خروجی به اندازه ۱۱/۶ درجه سلسیوس نسبت به نوع یک بیشتر است. در هر سه حالت اشاره شده حداکثر



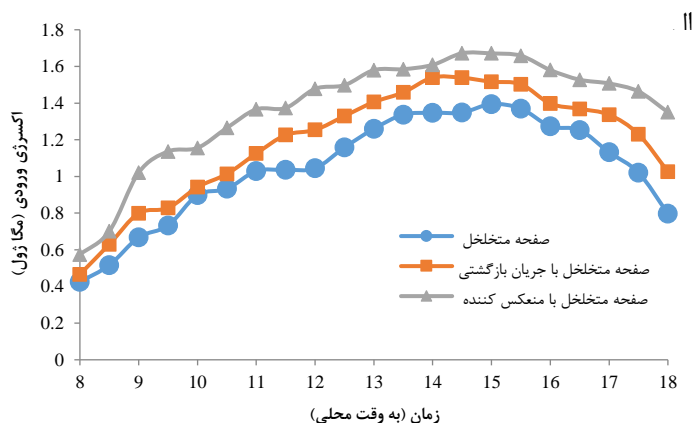
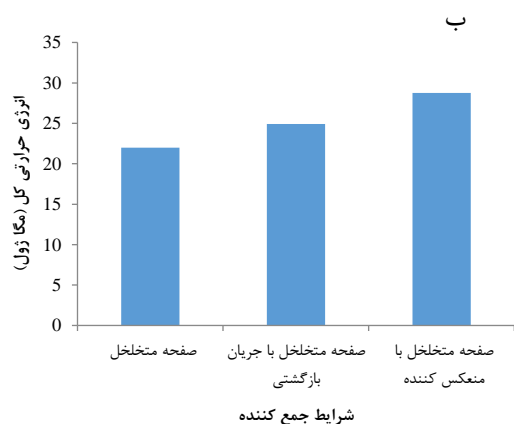
شکل ۵. تغییرات دمای خروجی از جمع کننده در طول ساعات آزمایش در شرایط مختلف با جمع کننده با صفحه متخلخل (PS)، صفحه متخلخل با جریان بازگشتی (PRS) و صفحه متخلخل با منعکس کننده (PRE)

در شکل ۷ - الف تغییرات بازده انرژی در طول ساعات آزمایش برای جمع کننده در سه حالت PS، PRS و PRE ارائه داده شده است. با توجه به شکل، میزان بازده انرژی جمع کننده در هر سه حالت با افزایش شدت تابش خورشیدی افزایش و سپس کاهش می یابد. شیب کاهش بازده در ساعات بعد از ظهر به دلیل افت حرارتی در اثر افزایش دمای هوای ورودی و افزایش دمای صفحه (در اثر همرفت و هدایت) از جمع کننده، بیشتر از ساعات قبل از ظهر می باشد. مقدار بازده انرژی از ۲۱/۰۳ تا ۵۲/۳۰ درصد برای PS، از ۲۳/۱۲ تا ۵۸/۲۳ درصد برای PRS و از ۳۰/۰۱ تا ۶۹/۷۵ درصد برای PRE تغییر می کند. بیشترین بازده انرژی مربوط به جمع کننده با صفحات منعکس کننده می باشد که این امر در اثر بازتاب تشعشعات خورشیدی به سمت صفحه جاذب می باشد. نتایج مشابهی در مورد بازده سامانه های خورشیدی با استفاده از منعکس کننده ها در تحقیقات پیشین به دست آمده است (Ameri, 2015; Pucar and Despici, 2002; Baker et al., 1978).

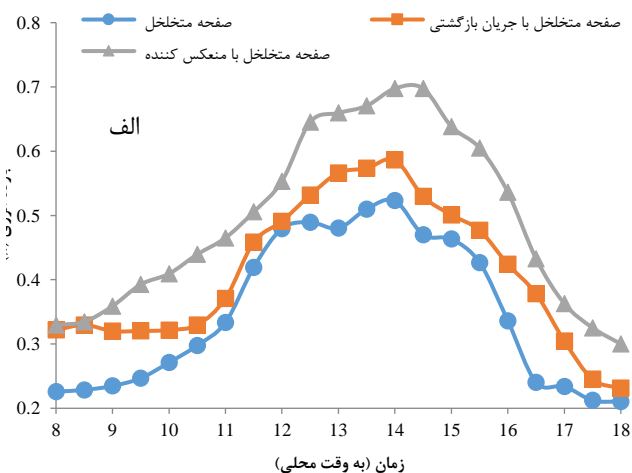
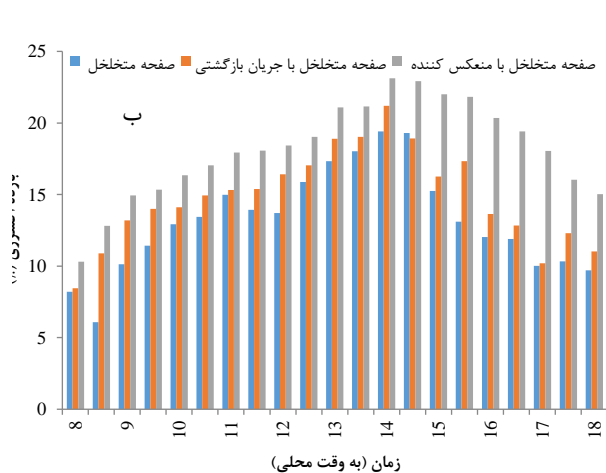
در شکل ۶ الف تغییرات انرژی حرارتی وارد شده به خشک کن نسبت به زمان در شرایط مختلف از جمع کننده نشان داده شده است. انرژی حرارتی وارد شده به کابینت خشک کن با افزایش و کاهش شدت تابش خورشیدی افزایش و کاهش می یابد. میزان شدت افزایش انرژی حرارتی وارد شده در ساعات قبل از ظهر بیشتر از ساعات بعد از ظهر است که این امر به دلیل بیشتر بودن شدت تابش در ساعات بعد از ظهر (ساعت ۱۳:۰۰ به بعد) نسبت به ساعات قبل ظهر است. بیشترین مقدار آن برای PS، PRS و PRE به ترتیب ۱/۳۴، ۱/۵۸ و ۱/۸۶ مگاژول به دست آمد. هم چنین در شکل ۶-ب مجموع انرژی حرارتی وارد شده به جمع کننده در حالت های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل مقدار آن برای PS، ۲۱/۹۴ مگاژول، برای PRS، ۲۴/۹۳ مگاژول و برای PRE، ۲۸/۷۷ مگاژول به دست آمد. استفاده از سامانه جریان بازگشتی و منعکس کننده ها به ترتیب باعث افزایش انرژی حرارتی مجموع به اندازه ۱۳/۴۱ درصد و ۲۸/۹۵ درصد نسبت به حالت جمع کننده با صفحه متخلخل گردید.

قرار دارد. علاوه بر آن در ساعات قبل ظهر، زاویه تابش خورشیدی به سطح جمع‌کننده با حالت عمودی فاصله داشته و این امر باعث جذب کمتر انرژی حرارتی و کاهش بازده اکسرژی می‌گردد. کمترین بازده اکسرژی در این ساعات ۸/۲۱ درصد، ۸/۴۵ درصد و ۱۰/۳۰ درصد به ترتیب برای جمع‌کننده با صفحه متخلخل، با جریان بازگشتی و با منعکس‌کننده‌ها به دست آمد. برای تمامی حالت‌ها، بیشترین بازده اکسرژی همانند بازده انرژی در ساعات بین ۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰ اتفاق می‌افتد که مقدار آن برای PS، PRE و PRS به ترتیب ۱۹/۴۰ درصد، ۲۱/۲۰ درصد و ۲۳/۱۲ درصد به دست آمد. راندمان کل خشک‌کن به عنوان یک عامل مهم در کارایی سامانه با توجه به رابطه ۱۶ به ترتیب ۱۹/۹۱ درصد، ۲۲/۳۴ درصد و ۲۵/۹۷ درصد برای PS، PRE و PRS به دست آمد که با توجه به خشک‌کن‌های مشابه (Amer *et al.*, 2010; Motahayyer *et al.*, 2017)، بازده خشک‌کن در دو حالت PRE و PRS بهبود پیدا نموده است.

بازده سامانه جمع‌کننده خورشیدی PRS نیز نسبت به حالت PS بهبود پیدا نموده است. این امر به دلیل بازگشت هوای گرم به مبدل حرارتی و در نتیجه وارد شدن انرژی حرارتی بیشتری به سامانه خشک‌کن و در نهایت این انرژی صرف خشک کردن محصول می‌شود. نتایج این تحقیق با یافته‌های محققان دیگر در مورد تاثیر استفاده از سامانه جریان هوای بازگشتی مطابقت دارد (Zamanian and Zomoradiyan, 2013; Peng *et al.*, 2018). یکی از عوامل مهم در طراحی و بهینه‌سازی یک سامانه حرارتی بازده اکسرژی آن سامانه است. بازده اکسرژی جمع‌کننده خورشیدی در سه حالت مختلف در شکل ۷-ب نمایش داده شده است. بازده اکسرژی وابسته به شدت تابش خورشیدی بوده و با افزایش و کاهش آن تغییر می‌یابد (Velmurugan and Kalaivanan, 2015; Bahrehmand *et al.*, 2015; Khorasanizadeh *et al.*, 2013). کمترین بازده مربوط به ساعات آغازین روز بود که شدت تابش خورشیدی در کمترین حد خود



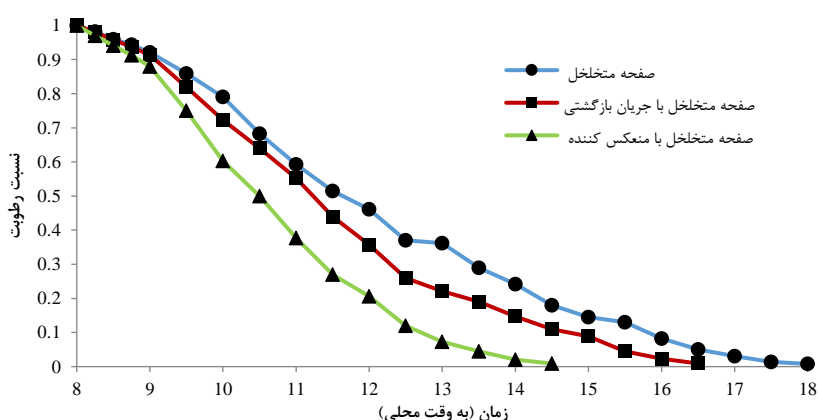
شکل ۶. الف) تغییرات انرژی حرارتی وارد شده به کابینت خشک‌کن و ب) میزان انرژی حرارتی کل در شرایط مختلف از جمع‌کننده



شکل ۷. تغییرات بازده الف) انرژی و ب) اکسرژی برای جمع‌کننده در سه حالت مختلف در ساعات داده‌گیری

انرژی بیشتری همراه خواهد بود و شیب نمودار کاهش پیدا می-کند (Bagheri *et al.*, 2013; Samimi and Arabhosseini, 2018). بیشترین زمان خشک شدن ورقه‌های گوجه‌فرنگی مربوط به PS به مدت ۶۰۰ دقیقه و کمترین آن مربوط به PRE به مدت ۳۹۰ دقیقه به دست آمد. به عبارت دیگر استفاده از سامانه جریان بازگشتی و منعکس کننده‌ها باعث شد، روند خشک شدن محصول به ترتیب به اندازه ۱/۱۵ و ۱/۳۵ برابر سریع‌تر از جمع کننده با صفحه متخلخل (بدون جریان بازگشتی و منعکس کننده) انجام شود.

در شکل ۸ منحنی روند خشک شدن ورقه‌های گوجه‌فرنگی در شرایط مختلف بر حسب نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک شدن نشان داده شده است. با توجه به نمودار با افزایش شدت تابش خورشیدی و به تبع آن افزایش دمای هوای وارد شده به کابینت خشک‌کن، نرخ رطوبت‌گیری از محصول بیشتر می‌گردد. به عبارت دیگر شیب نمودار رطوبت نسبی (MR) محصول افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر آن در مراحل اولیه خشک کردن، به دلیل وجود آب آزاد در محصول، انرژی کمتری برای خارج نمودن آن نیاز است. پس از آن با کاهش آب آزاد و از بین رفتن لوله‌های مویین در ساختار درونی محصول، خارج نمودن رطوبت با صرف

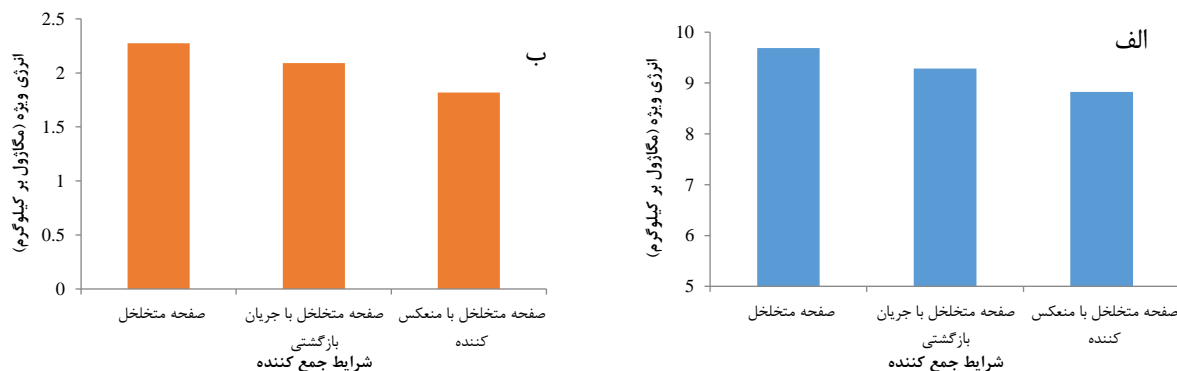


شکل ۸. منحنی خشک شدن ورقه‌های گوجه‌فرنگی با ضخامت ۷ میلی‌متر با دبی ۰/۰۱۸ کیلوگرم بر ثانیه در حالت‌های مختلف

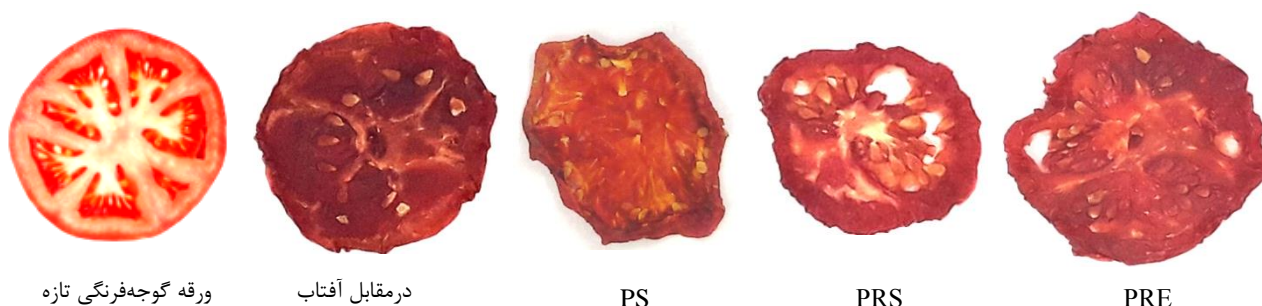
کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی برای PS، PRS و PRE به ترتیب ۲/۲۷، ۲/۰۹ و ۱/۸۱ مگاژول بر کیلوگرم به دست آمد. با توجه به شرایط ذکر شده و فراوانی انرژی خورشیدی در منطقه، می‌توان اظهار نمود که سامانه خشک‌کن با جمع کننده خورشیدی مجهز به منعکس کننده‌ها حالت مناسبی برای خشک کردن محصولات کشاورزی مانند ورقه‌های گوجه‌فرنگی است. نتیجه به دست آمده با نتیجه گزارش شده از خشک‌کن خورشیدی توسط Motevali, 2013, Umayal Sundari *et al.*, 2013, Eltawil *et al.*, 2018 مطابقت داشت.

در شکل ۱۰ ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک شده با استفاده از خشک‌کن خورشیدی کابینتی با جمع کننده مجهز به صفحه متخلخل، جریان بازگشتی و منعکس کننده‌ها و در مقابل آفتاب نشان داده شده است. کیفیت ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک شده با استفاده از خشک‌کن خورشیدی بهتر از نمونه‌های خشک شده در مقابل نور مستقیم خورشید است. به عبارت دیگر استفاده از سامانه‌های اشاره شده علاوه بر کاهش مدت زمان خشک شدن ورقه‌ها، اثر نامطلوبی بر روی کیفیت محصول نمی‌گذارد.

در شکل ۹ تغییرات انرژی مصرف شده توسط خشک‌کن به ازای انرژی کل وارد شده به سامانه شامل انرژی حرارتی و انرژی مکانیکی نشان داده شده است. با توجه به شکل، بیشترین میزان انرژی مصرفی کل برای یک کیلوگرم محصول مربوط به خشک‌کن خورشیدی با جمع کننده با صفحه متخلخل است که این امر می‌تواند به دلیل مصرف زیاد انرژی خورشیدی و انرژی مکانیکی در حین خشک کردن محصول به دلیل مدت زمان بیشتر برای خشک کردن باشد. انرژی مصرفی کل برای PS، PRS و PRE به ترتیب ۹/۶۸، ۹/۲۸ و ۸/۸۲ مگاژول بر کیلوگرم به دست آمد. سامانه جریان بازگشتی و منعکس کننده‌ها به میزان زیادی باعث کاهش انرژی ویژه برای خشک نمودن محصول گردید. با افزایش مدت زمان خشک کردن به دلیل استفاده بیشتر از انرژی مکانیکی برای به حرکت درآوردن سیال در سامانه، انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. روند تغییرات انرژی ویژه برای خشک کردن محصول با فرض اینکه انرژی خورشیدی به صورت رایگان و فراروان در دسترس می‌باشد (Samimi *et al.*, 2017) و فقط با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی مصرفی توسط سامانه در شکل ۹ -ب نمایش داده شده است. میزان تغییرات انرژی الکتریکی مصرفی برای خشک



شکل ۹. انرژی ویژه خشک کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی (۷ میلی‌متر) در شرایط مختلف خشک کردن (الف) به ازای انرژی کل، (ب) به ازای انرژی مکانیکی وارد شده به خشک‌کن



شکل ۱۰. ورقه‌های گوجه‌فرنگی خشک شده در شرایط مختلف

### نتیجه‌گیری

حالت‌های فوق استفاده نمی‌شود، با ضخامت ۵ میلی‌متر و در شرایط محیطی تقریباً یکسان، ۱۰ ساعت به طول انجامید. انرژی ویژه مصرفی برای خشک نمودن ورقه‌ها برای PS، PRS و PRE به ترتیب ۹/۶۸، ۹/۲۸ و ۸/۸۲ مگاژول بر کیلوگرم به دست آمد. این میزان برای سامانه‌های هوای داغ بیشینه بوده و از ۱۰/۱۴ تا ۴۹/۲۳ مگاژول بر کیلوگرم برای ورقه‌های گوجه‌فرنگی با ضخامت‌های مختلف تغییر می‌نمود. همچنین برای سامانه‌هایی که از جریان بازگشتی استفاده نموده بودند این میزان تا ۶۳ درصد نیز کاهش داشته است. به دلیل کاهش مدت زمان صرف شده برای خشک نمودن محصول، انرژی مصرفی ویژه با حالت PRS و PRE کمتر از حالت PS بود. با توجه به کیفیت محصول و در دسترس بودن انرژی خورشیدی بدون صرف هزینه، استفاده از سامانه جریان بازگشتی و منعکس‌کننده‌ها می‌تواند سامانه مناسبی برای خشک نمودن محصولات کشاورزی باشد. پیشنهاد می‌شود برای بهبود کارایی بیشتر خشک‌کن از سامانه جریان بازگشتی با استفاده از چرخ جاذب رطوبت در مسیر بازگشتی استفاده گردد. در این حالت انرژی حرارتی بدون خروج از سامانه در دسترس خشک‌کن بوده و به نظر می‌رسد می‌تواند تا حدودی بازده حرارتی را افزایش دهد. هر چند بایستی از لحاظ انرژی ویژه مصرفی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

استفاده از صفحه جاذب متخلخل، جریان بازگشتی و منعکس‌کننده‌ها از مواردی هستند که می‌توانند باعث افزایش عملکرد جمع‌کننده‌های خورشیدی شوند. در این تحقیق بازده انرژی و اکسرژی و میزان انرژی حرارتی تولید شده توسط جمع‌کننده در سه حالت با صفحه متخلخل، با جریان بازگشتی و با منعکس‌کننده‌ها در یک خشک‌کن خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد عملکرد سامانه خشک‌کن خورشیدی با تلفیق جریان بازگشتی و منعکس‌کننده‌ها بهبود پیدا می‌کند. مقدار انرژی کل وارد شده به خشک‌کن برای PS، PRS و PRE به ترتیب به اندازه ۲۱/۹۴، ۲۴/۹۳ و ۲۸/۷۷ مگاژول تغییر می‌کند. علاوه بر آن بازده انرژی از ۲۱/۰۳ تا ۵۲/۳ درصد برای PS، از ۲۳/۱۲ تا ۵۸/۲۳ درصد برای PRS و از ۳۰/۰۱ تا ۶۹/۷۵ درصد برای PRE متغیر بود. حداکثر میزان بازده اکسرژی برای سه حالت اشاره شده ۱۹/۴۰ درصد، ۲۱/۲ درصد و ۲۳/۱۲ درصد به دست آمد. این در حالی بود که در شرایط مشابه میزان بازده انرژی برای سامانه بدون صفحه متخلخل کمتر از ۱۷/۸۳ درصد بود. استفاده از سامانه جریان بازگشتی و منعکس‌کننده‌ها به ترتیب باعث کاهش مدت زمان خشک شدن به اندازه ۱/۱۵ برابر و ۱/۳۵ برابر گردید. مدت زمان خشک شدن برای خشک‌کنی که در آن از هیچ‌کدام از

## REFERENCES

- Abene, A., Dubois, D., Le Ray, M. & Ouagued, A. (2004). Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape. *Journal of Food Engineering*, 65(1), 15-22.
- Abubakar, S., Umaru, S., Kaisan, M.U., Ashok, B. & Nanthagopal, K. (2018). Development and performance comparison of mixed-mode solar crop dryer with and without thermal storage. *Renewable energy*, 128, 285-298.
- Al-sulaiman, F. (2014). Exergy analysis of parabolic trough solar collectors integrated with combined steam and organic Rankine cycles. *Energy Conversion Management*, 77, 441-449.
- 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(4), 813-820.
- Arabhosseini, A., Samimi-Akhijahani, H. & Motahayyer, M. (2019). Increasing the energy and exergy efficiencies of a collector using porous and recycling system. *Renewable Energy*, 132, 308-325.
- Bagheri, H., Arabhosseini, A., Kianmehr, M. H. & Chegini, G.R. (2013). Mathematical modeling of thin layer solar drying of tomato slices. *Agricultural Engineering International (CIGR Journal)*, 15, 146-153.
- Bahrehand, D., Ameri, M. & Gholampour, M. (2015). Energy and exergy analysis of different solar air collector systems with forced convection. *Renewable Energy*, 89, 1119-1130.
- Baker, S., MDaniels, D. K., Kaehn, H. D. & Lowndes, D. H. (1978). Time Integrated Calculation of the Insolation Collected by a Reflector-collector System. *Solar energy*, 20(5), 415-417.
- Bhowmik, H. & Amin, R. (2017). Efficiency improvement of flat plate solar collector using reflector. *Energy Report*, 3, 119-123.
- Duffie, J.A. & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*, New York, John Wiley & Son, 2013.
- Edalati, S., Ameri, M., Iranmanesh, M. & Tarmahi, H. (2016). Modelling and drawing energy and exergy of solar radiation. *International Journal of Exergy*, 19(4), 544-568
- Ekechukwu, O.V. & Norton, B. (1998). Effects of seasonal weather variations on the measure performance of a natural circulation solar energy tropical crop dryer. *Energy Conversion and Management*, 39(12), 1265-1276.
- Eltawil, M. A., Azma, M. M. & Alghannam, A. O. (2018). Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. *Renewable Energy*, 116, 594-605.
- Farahat, S., Sarhaddi, F. & Ajam, H. (2009). Exergetic optimization of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, 34(4), 1169-1174.
- Gunjo, D.G., Mahanta, P. & Sreedharan Robi, P. (2017). Exergy and energy analysis of a novel type solar collector under steady state condition: Experimental and CFD analysis. *Renewable Energy*, 114(Part B), 655-669.
- Gupta, M. K. & Kaushik, S. C. (2008). Exergetic performance evaluation and parametric studies of solar air heater. *Energy*, 33, 1691-1702.
- Hepbasli A. (2007). Exergetic modeling and assessment of solar assisted domestic hot water tank integrated ground-source heat pump systems for residences. *Energy Buildings*, 39, 1211-7.
- Ingle, P. W., Pawar, A. A., Deshmukh, B. D. & Bhosale, K.C. (2013). CFD Analysis of Solar Flat Plate Collector. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(4), 337-342.
- Jafarkazemi, F. & Ahmadifard, E. (2013). Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, 56, 55-63.
- Kalogirou, S. A., Karellas, S., Braimakis, K., Stanciu, C. & Badescu, V. (2016). Exergy analysis of solar thermal collectors and processes. *Progress Energy Combustion Science*, 56, 106-137.
- Kara, O., Ulgen, K. & Hepbasli, A. (2008). Exergetic assessment of direct-expansion solar-assisted heat pump systems: review and modeling. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 12, 1383-401.
- Kavak Akpinar, E. & Kocigyigit, F. (2010). Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates. *Applied Energy*, 87, 3438-3450.
- Khorasanizadeh, H., Aghaei, A., Ehteram, H. & Azimi, A. (2013). Exergetic optimization of a solar thermal flat plate collector equipped with lenses and reflectors in a closed system using experimental data. *Journal of Engineering and Energy Management*, 3(1), 40-51.
- Khosravi, A., Malekan, M. & Assad, M. E. H. (2019). Numerical analysis of magnetic field effects on the heat transfer enhancement in ferrofluids for a parabolic trough solar collector. *Renewable Energy*, 134, 54-63.
- Mahanta, D. K. & Kumar, S. S. (2002). Internal Irreversibility in a Water Heating Solar Flat Plate Collector. *Energy Conversion and Management*, 43(17), 2425-2435.
- Motahayyer, M., Arabhosseini, A., Samimi-Akhijahani, H., & Khashechi, M. (2018). Application of computational fluid dynamics in optimization design of absorber plate of solar dryer. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 49(2), 285-294. (In Persian)
- Motevali, A. (2013). Design and Evaluation of a Parabolic Sun Tracking Collector for Drying of Mint [Ph.D. Thesis.], TarbiatModares University, Tehran, Iran.
- 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.
- Peng, D., Luo, D. & Cheng, X. (2018). Modeling and performance comparisons of the grading and

- single solar collector/ regenerator systems with heat recovery. *Energy*, 144, 736-749
- Pons, M. 2012. Exergy analysis of solar collectors, from incident radiation to dissipation. *Renewable Energy*, 47, 194-202.
- Pucar, M. D. J. & Despic, A. R. (2002). The Enhancement of Energy Gain of Solar Collectors and Photovoltaic Panels by the Reflection of Solar Beams. *Energy*, 27 (3), 205-223.
- Salami, P. (2016). Design and construction of PV/T system equipped with solar reflectors to increase energy efficiency. [Ph.D. Thesis.], University of Tabriz, Tabriz, Iran.
- Samimi-Akhijahani, H., Arabhosseini, A. & Kianmehr, M. H. (2016). Effective moisture diffusivity during hot air solar drying of tomato slices. *Research in Agricultural Engineering*, 62, 15-23.
- Samimi-Akhijahani, H. & Arabhosseini, A. (2018). Accelerating drying process of tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system. *Renewable Energy*, 123, 428-438.
- Selmi, M., Al-Khawaja, M. J. & Marafia, A. (2008). Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector. *Renewable Energy*, 33(3), 383-387.
- Tabaei, H. & Ameri, M. (2015). Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by using booster reflector and cooling array surface by a film of water. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*, 39(M1), 51-60.
- Umayal Sundari, A. R., Neelamegam, P. & Subramanian, C. V. (2013). Performance evaluation of a forced convection solar drier with evacuated tube collector for drying amla. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(3), 2853-2858.
- Velmurugan, P. & Kalaivanan, R. (2015). Energy and Exergy Analysis of Solar Air Heaters with Varied Geometries, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(4), 1173-1186.
- Vieira, M. G. A., Estrella, L. & Rocha, S. C. S. (2007). Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper pulp, *Drying Technology*, 25, 1639-1648.
- Zamanian, M. & Zomoradiyan, A. (2013). Effect of lattice absorbent porosity on the efficiency of solar air heater with staircase cover of glass. *Two Iranian Journal of Biomedical Engineering*, 2, 113-118. (In Farsi)