

## ارزیابی عملکرد یک سامانه حرارتی هیبرید خورشیدی

داریوش زارع<sup>۱\*</sup>، حسین عبادی<sup>۲</sup>، عبدالعباس جعفری

۱- عضو هیئت علمی بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

۲- دانشجوی اسبق کارشناسی ارشد، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

۳- عضو هیئت علمی بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

\* ایمیل نویسنده مسئول: [dzare@shirazu.ac.ir](mailto:dzare@shirazu.ac.ir)

### چکیده

در این پژوهش یک سیستم ترکیبی از یک کلکتور سهموی مرکب و یک واحد گرمایی برقی ارائه شده است. اجزاء مذکور در کنار یک مبدل حرارتی در قالب مدار بسته قرار گرفتند. از روغن انتقال حرارت به عنوان سیال کاری سیستم استفاده شد. به منظور بررسی عملکرد سامانه، آزمایش‌های تجربی در سه سطح دبی کم، متوسط و زیاد که براساس پیش‌آزمایش‌های صورت گرفته مقادیر  $0.036 \text{ kg/s}$  و  $0.13$  و  $0.05$  انتخاب گردیدند، صورت پذیرفت. از سوی دیگر به منظور شبیه‌سازی یک سامانه تولید بخار (مبدل حرارتی) سه سطح دمای خروجی کل سیستم  $100^\circ\text{C}$  و  $110^\circ\text{C}$  و  $120^\circ\text{C}$  و طی ۴۰ تکرار (نمونه برداری در هر ۵ دقیقه طی ۳ ساعت) مورد سنجش قرار گرفت. نتایج نشان داد برای تمام سطوح دبی، دمای روغن خروجی از کلکتور در بازه  $80-110^\circ\text{C}$  خواهد بود. علاوه بر این بررسی اثر فاکتور بر دمای خروجی کلکتور، بر اساس آزمون دانکن و در سطح احتمال ۹۵٪ بیان‌گر معنی‌داری اثر دبی روغن، دمای خروجی کل سیستم و اثر متقابل آن‌ها بود. در ارزیابی کارکرد سیستم هیبریدی، پارامتر درصد مشارکت گرم‌کن اندازه‌گیری و مشاهده شد، بیشترین میزان مشارکت گرم‌کن برقی مربوط به دبی  $0.05 \text{ kg/s}$  و دمای خروجی  $120^\circ\text{C}$  با اندازه‌ی ۴۳٪ و کمترین آن مربوط به دبی  $0.036 \text{ kg/s}$  و دمای خروجی  $100^\circ\text{C}$  نزدیک به صفر بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** عملکرد حرارتی، فاکتور دبی سیال، کلکتور سهموی مرکب، مشارکت برقی، واحد گرمایی برقی

### مقدمه

امروزه زندگی بشر تحت تأثیر شرایط محیط‌زیست پیرامون او می‌باشد. پدیده‌ی تغییر اقلیم با اثر گذاری بر زندگی ۳۱۰ میلیون از مردم دنیا، موجب شده ۲۰ میلیون نفر را در محدوده‌ی فقر قرار دهد و ۷۵ میلیون نفر را وادار به مهاجرت کند (Mawle, 2010)، بنابراین نیاز است تا نگرش جدیدی در استفاده از منابع انرژی بکار گرفته شود.

سیاست‌های توسعه پایدار با در بر گرفتن استفاده از منابع انرژی جایگزین سوخت‌های فسیلی همواره به دنبال کاهش خطرات محیط زیستی بوده است. بر اساس آخرین پیشرفت‌ها، تکنولوژی‌های گرمایی خورشیدی در بعد اقتصادی کاملاً با سیستم‌های



متداول و مرسوم قابل رقابت است (Neville, 1995). اگرچه همچنان تکامل، پیشرفت و بهینه‌سازی‌های بیشتری در حیطه‌ی سیستم‌های تبدیل انرژی و خورشیدی نیاز خواهد بود (Sen, 2008). کلکتورهای متمرکز کننده‌ی خورشیدی با توجه به قابلیت تولید دمای زیاد پیوسته مورد توجه بخش‌های صنعتی بوده است. کلکتورهای سهموی مرکب به عنوان نوعی از کلکتورهای متمرکز کننده، به دلیل عدم نیاز به ردیابی خورشید توانسته جایگاه ویژه‌ای میان محققین داشته باشد (Kalogirou, 1999). تحقیقات فراوانی پیرامون طراحی و توسعه این سیستم‌ها شکل گرفته است که در منابع به خوبی ذکر گردیده است (Ratismith *et al.*, 2013; Rabl, 1976; Kessentini and Bouden, 2014). یکی از مشکلاتی که همچنان پیرامون کلکتورهای سهموی مرکب جهت استفاده در بخش صنعت باقی‌مانده است، وابستگی شدید آن‌ها به خورشید و متعاقباً عدم تولید گرمای پایدار و ثابت در طول روزهای ابری است. تاکنون تحقیقات فراوانی پیرامون حل این معضل صورت گرفته است (Lemos *et al.*, 2014).

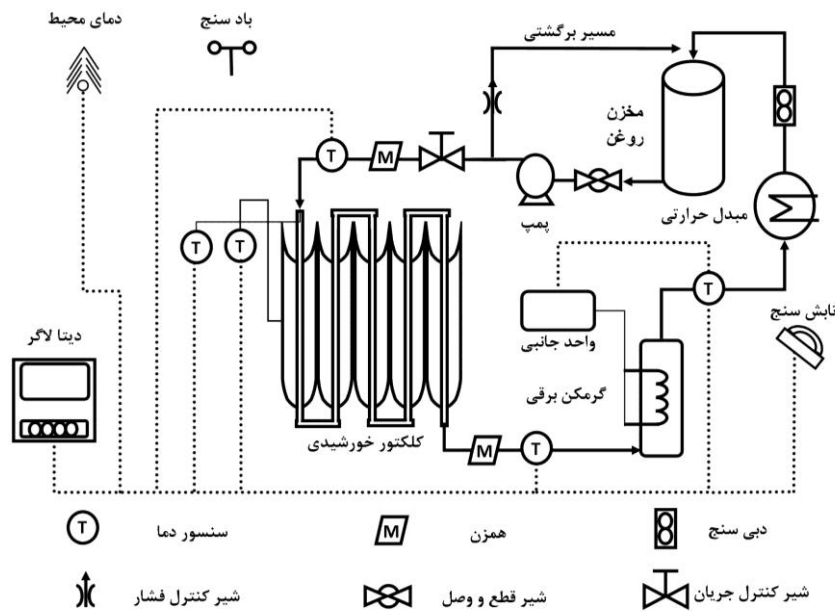
به‌کارگیری سیستم‌های کنترل برقی یکی از راه‌های پیشنهادی بوده است که خود روش‌های فراوانی در برمی‌گیرد. گروهی از محققان با معرفی روش یک‌طرفه، تلاش کردن در یک سیستم خورشیدی میزان دما و فشار بخار آب تولیدی در سیستم را ثابت نگه دارند. نتایج نشان داد با وجود تولید فشار و دمای یکسان، میزان بخار تولیدی با تابش خورشید متغیر خواهد بود (Valenzuela *et al.*, 2006). مطالعات زیادی به شرح جزئیات روش‌های منطقی کنترل این سیستم‌ها پرداخته‌اند که در منابع به خوبی ارائه شده است (Lemos, 2006; Camacho and Berenguel, 1997; Camacho, 2012).

لازم به ذکر است هدف از به‌کارگیری سیستم‌های کنترل، تولید پیوسته دمای مطلوب و بدون تأثیر از تغییرات تابشی خورشید بوده است؛ اما تاکنون این هدف با اعمال تغییرات بر میزان دبی سیال کلکتور صورت گرفته است. به بیان دیگر؛ چنانچه تابش خورشید افت کند، سیستم کنترل با شناسایی میزان افت، به شیر کنترل دبی فرمان کاهش دبی را صادر می‌کند. بدین شکل میزان دمای خروجی را ثابت نگه می‌دارد (Barao, 2002)؛ اما نکته‌ای که قابل توجه آن است که با این کار میزان توان تولیدی نیز کاهش یافته و چنین سیستمی نمی‌تواند توان خروجی پایداری را فراهم سازد.

هدف اصلی این پژوهش ترکیب یک سیستم برقی جانبی با یک کلکتور خورشیدی و بررسی میزان عملکرد آن است. در این سیستم، یک واحد گرم‌کن برقی به عنوان بخش ثانویه در کنار یک کلکتور سهموی مرکب به شکل سری قرار گرفته است. تا در صورت عدم توانایی سیستم خورشیدی به فراهم سازی توان مورد نیاز، میزان کمبود از بخش برقی تهیه گردد. از سوی دیگر جهت تنظیم دقیق همکاری بین این دو بخش یک واحد کنترلر هوشمند نیز به کار گرفته شده است. آنچه در این مقاله بیان می‌شود، نخست ارزیابی واحد خورشیدی تحت شرایط تنظیم‌های مختلف سیستم و سپس نحوه‌ی عملکرد کلی سامانه است.

## مواد و روش‌ها

بر اساس آنچه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، یک سامانه ترکیبی شامل یک کلکتور خورشیدی و یک بخش گرمایی برقی طراحی، ساخت و ارزیابی گردید.



شکل ۱- نمای شماتیک سایت سامانه هیبریدی

سیال فعال در این سامانه، روغن انتقال حرارت S2 ساخت شرکت آلمانی Shell با نقطه‌ی جوش بالای  $340^{\circ}\text{C}$  بوده است. با توجه به شکل ۱ در ابتدا شخص کاربر دمای خروجی مطلوب را بر روی کنترلر دمای بخش گرمایی برقی انتخاب کرده و سپس سیستم را روشن می‌نماید. در گام نخست روغن توسط یک پمپ روغن از نوع چرخ‌دنده‌ی خارجی، از مخزن به سمت کلکتور خورشیدی ارسال می‌گردد. در همین راستا یک شیر کنترل جریان قبل از کلکتور قرار گرفته است تا بتوان سیستم مورد نظر را با دبی مد نظر تنظیم کرد. بعد از عبور روغن از کلکتور خورشیدی و دریافت میزانی گرما به بخش گرمایی برقی می‌رسد. در این قسمت، نخست گرم‌کن برقی خاموش بوده و با عبور روغن از سنسور دمای واقع در خروجی گرم‌کن دمای واقعی روغن با میزان مطلوب کاربر توسط کنترلر دما مقایسه می‌گردد. حال چنانچه اختلافی میان این دو مقدار باشد، کنترلر دما با محاسبه میزان اختلاف، فرمانی به کنترلر توان ارسال می‌کند که موجب می‌شود کنترلر توان تنها به اندازه مورد نیاز، گرم‌کن برقی را وارد سیستم نماید (بدین گونه همیشه سیستم با مصرف بهینه انرژی پیش خواهد رفت). در قدم بعد روغنی که به دمای مطلوب رسیده به مبدل حرارتی رسیده و در این بخش تحت یک‌بار ثابت خنک می‌شود و دوباره به مخزن باز می‌گردد. در ادامه به شرح سه بخش مهم سیستم؛ کلکتور، بخش گرمایی برقی و مبدل حرارتی پرداخته می‌شود.

در این پژوهش، یک کلکتور سهموی مرکب با زاویه پذیرش  $45^{\circ}$  و با ضریب تمرکز  $2/5$  در بخش مهندسی بیوسیستم دانشگاه شیراز ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۲). جزئیات مربوط به بهینه‌سازی و طراحی این کلکتور در منبع (Zare and Ebadi, 2016) قابل مشاهده است. بعد از مشخص شدن طول بهینه کلکتور به اندازه ۸ متر (خطی)، به منظور کاربرد راحت‌تر سیستم پنج واحد  $1/6$  متری که به صورت سری به هم متصل بودند طراحی و ساخته شد. لذا با توجه به نیاز هر واحد به دو صفحه منعکس کننده، ۱۰ عدد صفحه‌ی استیل با ضخامت  $0/4$  و ابعاد  $30$  در  $60$  سانتی‌متر بکار گرفته شد.



شکل ۲- کلکتور سهموی مرکب ساخته شده و مورد آزمایش

در این پژوهش از سنسور دما نوع K جهت اندازه‌گیری دماهای مختلف بهره گرفته شد. دمای ورودی روغن به کلکتور، دمای خروجی روغن از کلکتور، دمای هوای محیط، دمای خروجی از گرم‌کن برقی مواردی بودند که مورد سنجش قرار گرفتند. محل دقیق قرارگیری ترموکوپل‌های مورد استفاده در شکل ۱ قابل مشاهده است. یک فلومتر توربینی نوع Vision 1000 ساخت کشور چین جهت اندازه‌گیری شدت جریان روغن در داخل سیستم به کار گرفته شده است. به منظور اندازه‌گیری سرعت باد محیط، یک دستگاه فلومتر جریان هوا نوع T460 ساخت شرکت TESTO مورد استفاده قرار گرفت. در همین راستا با قرار دادن پروب مخصوص دستگاه در مسیر باد و اندازه‌گیری سرعت میانگین هوا (Mean Mode) به مدت ۱۰ ثانیه مقدار متوسط سرعت ثبت گردید. لازم به ذکر است جهت بالا بردن دقت در اندازه‌گیری دبی روغن، از استوانه‌های مدرج و یک ترازوی دیجیتال و یک کرنومتر استفاده شد. جهت سنجش میزان تابش خورشید، یک پایرانومتر<sup>۱</sup> ساخت شرکت Casellcel مورد استفاده قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری دقیق این سنسور یک سازه نگه‌دارنده و متصل به کلکتور فراهم گردید که بعد از قرارگیری این تابش‌سنج، میزان تابش رسیده تحت شیب کلکتور اندازه‌گیری شد و به دستگاه دیتالاگر ارسال گردید. دیتالاگر بکار رفته در این پژوهش از نوع CMC-99 و ساخت شرکت SIMEX بوده که با قابلیت نصب ترموکوپل، ترمینال‌های ورودی ولتاژ، ترمینال‌های ورودی جریان، کنتاکتورهای فرمان‌دهی و یک سنسور درونی دماسنج طیف وسیعی از اندازه‌گیری را فراهم می‌سازد. در این سامانه یک گرم‌کن برقی با توان ۳kW جهت جبران کمبودهای سیستم خورشیدی بکار گرفته شد. این گرم‌کن، توان تغذیه خود را مستقیماً از یک واحد کنترل توان گرفته تا برحسب نیاز توان‌های متغیر را به سیستم اعمال می‌نماید. کنترلر دما که در حقیقت مدار فرمان واحد جانبی است، با اندازه‌گیری پیوسته و آنلاین دمای خروجی و مقایسه آن با میزان مطلوب (که قابل تنظیم شده است)، جریانی در بازه ۲۰-۴ میلی‌آمپر به کنترلر توان ارسال می‌نماید و بدین‌سان موجب تحریک این واحد برای توان دهی به گرم‌کن می‌گردد.

<sup>۱</sup> Pyranometer



کنترلر دمای بکار رفته از سری TK ساخته شرکت Autonics می‌باشد که با بهره‌گیری از سیستم PID<sup>۲</sup> امکان تنظیمات گسترده و متنوعی در زمینه‌ی کنترل سامانه‌های حرارتی به وجود می‌آورد. قابلیت‌های بالای این دستگاه موجب می‌شود که بتوان روش‌های کنترلی متفاوتی را اعمال نمود. روش بکار گرفته شده در این تحقیق از نوع Transmission Output<sup>۳</sup> می‌باشد. از سوی دیگر کنترلر توان ولتاژ متغیری به دو سر المنت فرستاده و توان را به میزان مورد نظر می‌رساند. لازم به ذکر است نوع مدل دستگاه SPC1-5 ساخت شرکت Autonics می‌باشد.



شکل ۳- تصویر مبدل حرارتی، قبل و بعد از آزمایش

به منظور خنک نمودن روغن خروجی سامانه، یک مبدل حرارتی در مسیر روغن و قبل از بازگشت به مخزن اولیه قرار گرفت. این مبدل با استفاده از یک مخزن آب خنک، موجب شد که با عبور آب از روی لوله‌های حاوی روغن داغ، سیال بازگشتی به میزان ۲/۵ kW گرما از دست داده و در دمای پایینی وارد سامانه گردد. لازم به ذکر است که مبدل حرارتی مورد استفاده از نوع جریان مخالف بوده است. در شکل ۳ مبدل حرارتی مذکور، قبل و بعد از آزمایش ملاحظه می‌گردد.

در این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد سیستم ترکیبی، اثر تغییرات دبی سیال و انواع دمای مطلوب سیستم مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در قالب یک طرح کاملاً تصادفی و با ۳ سطح دبی و ۳ سطح دمای مطلوب (۹ تیمار) طراحی شد. در آزمون‌های تجربی صورت گرفته تلاش بر این بوده تا تمام شرایط محیطی یکسان باشد؛ بنابراین زمان انجام آزمون‌های دستگاه در ۱۱ روز نزدیک به هم صورت پذیرفت. از سوی دیگر با توجه به شرایط آزمون یعنی وجود ۹ تیمار، تعداد ۹ روز و هر روز به مدت ۳ ساعت

<sup>۲</sup> Proportional Integral Derivative

<sup>۳</sup> نوع تنظیمی از کنترلر دما که یک جریان خطی ۴ تا ۲۰ میلی آمپری را به کنترلر توان ارسال می‌کند.

رفتار سیستم مورد سنجش قرار گرفت. علاوه به راین به منظور تعیین کارایی سیستم در روزهای ابری ۲ روز دیگر نیز تحت شرایط هوای ابری سیستم تست شد. در جدول زیر مشخصات مربوط به روز و شرایط آزمون‌ها مشاهده می‌گردد.

-۱

جدول

شماره آزمون	تاریخ	دبی (kg/s)	دمای تنظیم شده (°C)	میانگین تابش (W/m <sup>2</sup> )
۱	۹۴/۴/۲۳	۰/۰۳۷	۱۰۰	۸۹۰/۰۲۱
۲	۹۴/۴/۲۴	۰/۰۳۶	۱۱۰	۹۰۷/۴۷۷
۳	۹۴/۴/۲۵	۰/۰۳۴	۱۲۰	۹۰۰/۰۰۰
۴	۹۴/۴/۲۸	۰/۰۱۵	۱۰۰	۸۹۰/۹۸۷
۵	۹۴/۴/۲۹	۰/۰۱۴	۱۱۰	۸۷۷/۵۷۲

مشخصات روزهای آزمون

۸۹۶/۴۰۴	۱۲۰	۰/۰۱۲	۹۴/۴/۲۶	۶
۸۲۶/۶۷۵	۱۰۰	۰/۰۰۵	۹۴/۴/۳۱	۷
۹۳۰/۶۵۴	۱۱۰	۰/۰۰۵	۹۴/۵/۳	۸
۹۴۹/۵۷۰	۱۲۰	۰/۰۰۵	۹۴/۵/۴	۹
۵۶۶/۵۰	۱۱۰	۰/۰۱۲	۹۴/۴/۲۷	۱ ابری
۵۱۸/۳۴	۱۰۰	۰/۰۰۵	۹۴/۴/۳۰	۲ ابری

جهت محاسبه میزان گرمای تولید شده در کلکتور و بخش گرم‌کن برقی از رابطه (۱) استفاده گردید (Zare and Ebadi, 2016).

$$Q = (\dot{m}C_{oil} \Delta T) \tag{1}$$

که در رابطه فوق  $m$  میزان دبی جریان سال،  $C_{oil}$  میزان ظرفیت گرمایی روغن و  $\Delta T$  مقدار اختلاف دمای ورودی و خروجی است. لازم به ذکر است، به دلیل وابستگی میزان ظرفیت گرمایی و چگالی روغن به دما؛ مقادیر  $C$  و  $\rho$  مستخرج از داده‌های تجربی گزارش شده توسط شرکت سازنده بر اساس دما فرموله گشته و به صورت روابطه (۲ و ۳) مورد استفاده قرار گرفت.

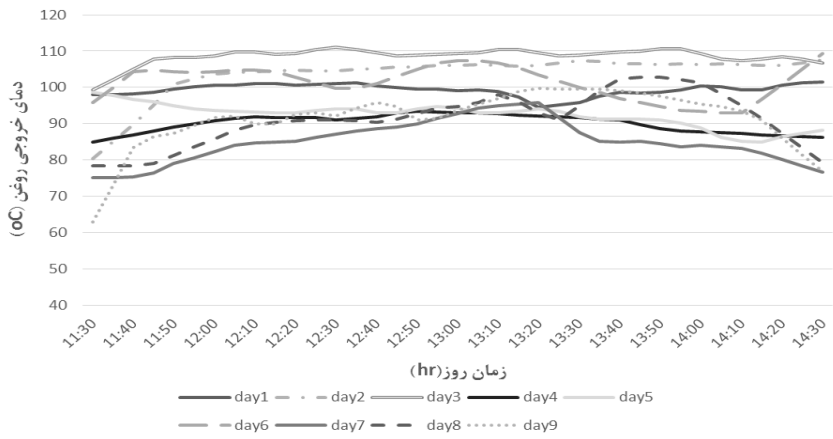
$$\rho = -0.00651(T) + 875.94 \tag{2}$$

$$C_{oil} = 0.0036(T) + 1.8087 \tag{3}$$

### نتایج و بحث

اثر فاکتورها بر دمای خروجی

دمای خروجی روغن از کلکتور برای هر یک از روزهای آزمون و تحت شرایط گوناگون اندازه‌گیری شد. بر اساس شکل ۴ دمای خروجی با کاهش دبی، کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که در آزمون‌های ۷، ۸ و ۹ پایین‌ترین میزان آن اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است، در ساعات شروع به کار سیستم بیشترین رشد دمایی برای روغن ملاحظه شد و بیشترین میزان دمای تولیدی در آزمون سوم یعنی سطح دبی بالا و دمای مطلوب  $120^{\circ}C$  تا میزان  $110^{\circ}C$  اندازه‌گیری شد.

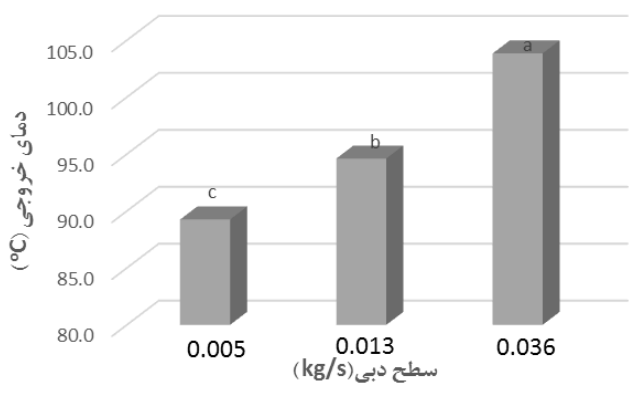


با توجه به جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت، تغییرات اعمال شده در سه سطح دبی و سه سطح دما بر دمای خروجی از کلکتور تا سطح ۹۵٪ اطمینان معنی‌دار بوده است. همچنین اثر متقابل هر دو عامل بر خروجی نیز به همان میزان معنی‌دار است. بدین منظور برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح خطای ۵٪ استفاده شد. در زیر سطوحی که دارای اختلاف معنی‌داری هستند مشخص گشته‌اند.

جدول ۲- جدول تجزیه واریانس دمای خروجی کلکتور

F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع خطا
۲۳۴/۸۰۳*	۶۰۴۲/۵۹۷	۲	۱۲۰۸۵/۱۹۳	دبی
۸۸/۰۲۶*	۲۲۶۵/۳۲۴	۲	۴۵۳۰/۶۴۸	دما
۷/۰۶۴*	۱۸۱/۷۸۲	۴	۷۲۷/۱۲۷	دبی*دما
	۲۵/۷۳۵	۳۲۴	۸۳۳۸/۰۵۱	خطا
		۳۳۳	۳۰۸۸۲۶۹/۲۰۳	مجموع

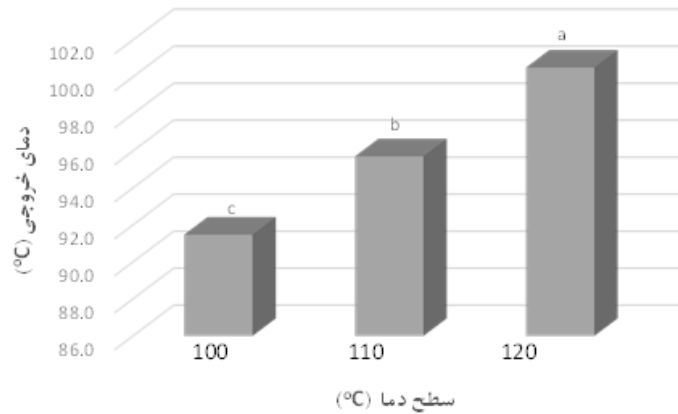
\* معنی‌داری با سطح احتمال ۹۵ درصد





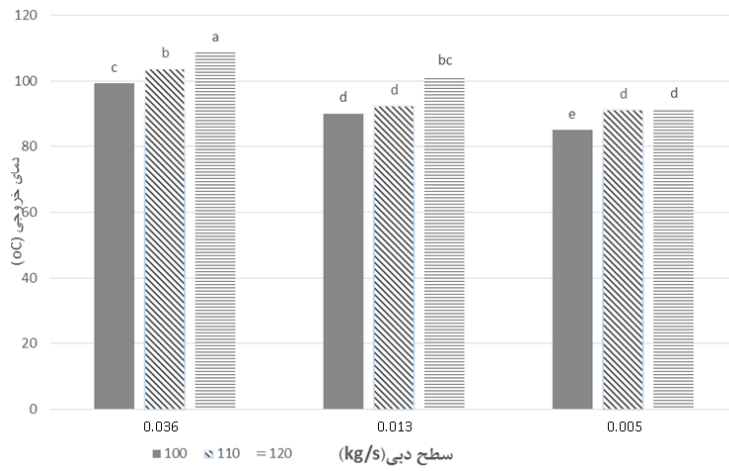
شکل ۵- مقایسه میانگین دمای خروجی کلکتور برای سطوح مختلف دبی

بر اساس شکل ۵ در سطح احتمال ۹۵٪ برای آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری برای دمای خروجی روغن برای هر سه سطح دبی وجود دارد.



شکل ۶- مقایسه میانگین دمای خروجی کلکتور برای سطوح مختلف دمای مطلوب

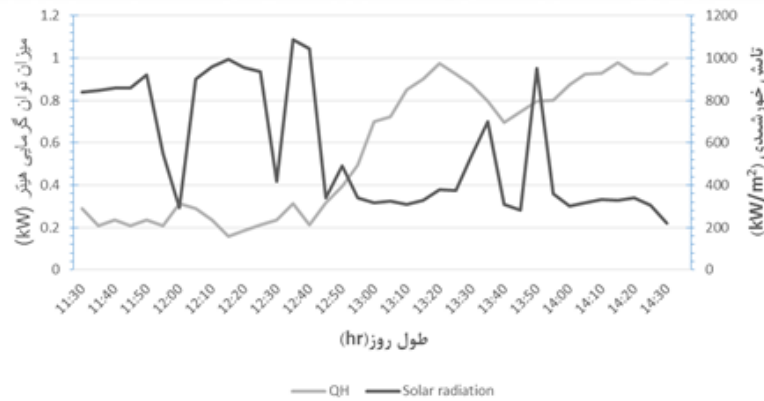
تصویر ۶ نشان می‌دهد اختلاف بین میانگین دمای خروجی روغن از کلکتور، بعد از اعمال سطوح ۱۰۰، ۱۱۰، و ۱۲۰°C دمای خروجی مطلوب با اطمینان ۹۵٪ و طبق آزمون دانکن با یکدیگر اختلاف معنی‌داری داشته‌اند.



شکل ۷- مقایسه میانگین دمای خروجی کلکتور برای اثر برهم‌کنش سطوح دما و دبی

در شکل ۷ اثر برهم‌کنش فاکتورها که با انجام آزمون دانکن در سطح خطای ۵٪ مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس شکل فوق آزمون سطح دبی اول و دمای مطلوب ۱۲۰°C با اختلاف معنی‌دار نسبت به سایر آزمون‌ها داشته و دارای بیشترین دمای خروجی برای سیال روغن است.

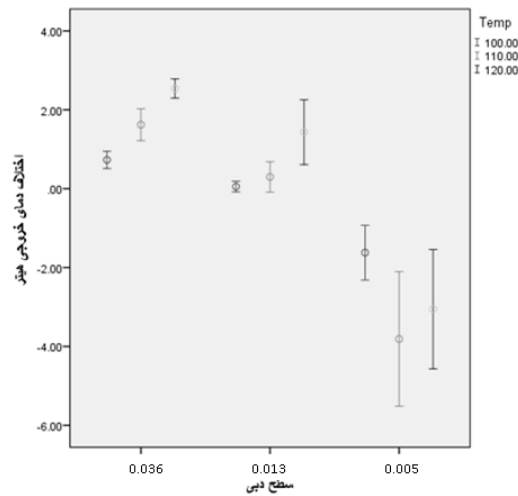
ارزیابی نحوه کارکرد سیستم جانبی



شکل ۸- میزان کارکرد گرم کن برقی و رابطه آن با تابش خورشیدی در طول یک روز ابری (ابری ۱)

بر اساس شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افت تابش خورشیدی در حدود ساعت ۱۲:۵۰ توان مصرفی گرم کن برقی (که در نمودار فوق با QH نمایش داده شده است) افزایش یافته و تا مقدار ۱ kW رسید؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سیستم جانبی به صورت اتوماتیک و آنی توسط سنسور دمای خروجی گرم کن و به وسیله کنترلر دما افت دمای خروجی کلکتور را تشخیص داده و با فرمان به مدار کنترلر توان و ارسال ولتاژ متغیر و مورد نیاز افت دما را جبران می‌نماید.

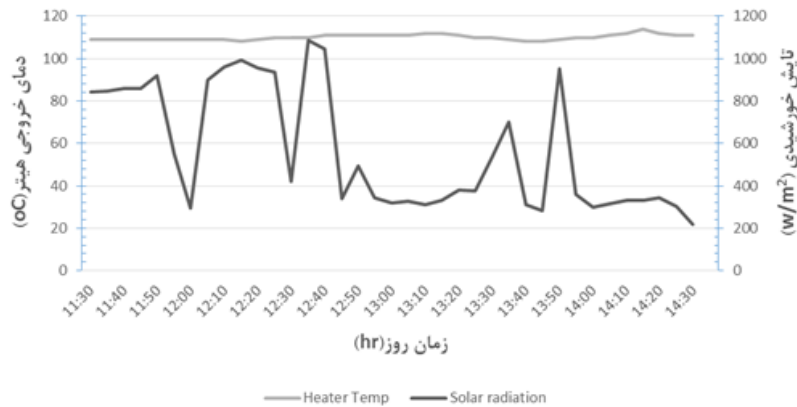
در نمودار زیر تغییرات خروجی واحد گرمایی برقی نسبت به مقادیر تنظیم شده (۱۰۰، ۱۱۰، و ۱۲۰°C) مشاهده می‌شود.



شکل ۹- نحوه پراکندگی داده‌های اختلاف دمای خروجی گرم کن برقی

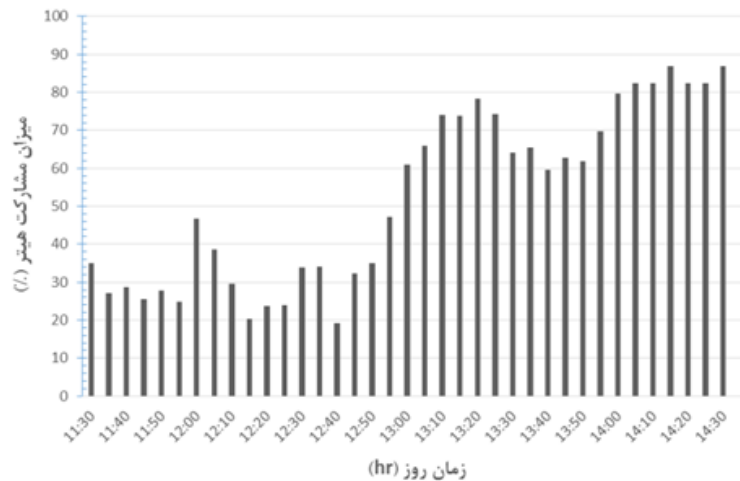
بر اساس شکل ۹ خطای استاندارد فوق (که در سطح ۹۵٪ اطمینان ترسیم گشته است) میزان پراکندگی تغییرات دمایی بیان شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد تغییرات دمایی در سطح دبی ۰/۰۰۵ kg/s؛ یعنی کمترین سطح آن بیشترین دامنه را به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر با بررسی روند تغییرات در سطوح دمایی مختلف می‌توان نتیجه گرفت در دماهای مطلوب بالا این تغییرات بیشتر خود را نشان خواهد داد. لازم به ذکر است مقادیر منفی جدول فوق نشان‌دهنده دمای خروجی دستگاه کمتر از حد مطلوب (۱۰۰، ۱۱۰، و ۱۲۰°C) می‌باشد.

ارزیابی کارکرد سیستم هیبریدی



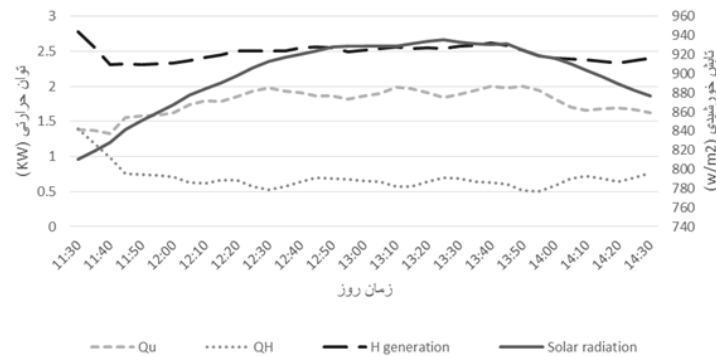
شکل ۱۰- تغییرات دمای خروجی گرم‌کن برقی برای یک روز نیمه ابری (ابری ۱)

با توجه به شکل ۱۰ بر خلاف وجود نوسانات فراوان در تابش رسیده به سطح کلکتور، میزان دمای خروجی سیستم هیبریدی تقریباً ثابت بوده است. دلیل این چنین رفتاری را می‌توان عملکرد خوب کنترلر دما دانست که در لحظه‌ی افت تابش رسیده و کاهش دمای خروجی کلکتور، موجب فرمان دهی به گرم‌کن برقی برای جبران این افت می‌شود.



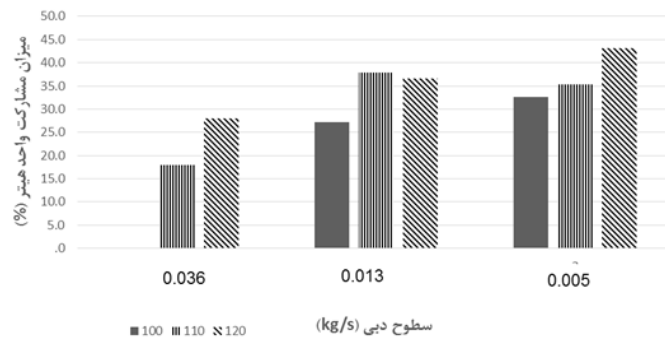
شکل ۱۱- میزان مشارکت واحد گرمایی برقی در تولید گرمای سیستم (ابری ۱)

نمودار ۱۱ بیان‌کننده میزان مشارکت واحد گرم‌کن برقی برای یک روز ابری است. بر اساس این نمودار درست در همان لحظه‌ی افت تابش یعنی ۱۲:۴۰ میزان مشارکت گرم‌کن برقی از حدود ۲۰٪ تا نزدیک ۸۰٪ در زمان ۱۳:۲۰ می‌رسد.



شکل ۱۲- میزان تولید گرما توسط کلکتور و واحد گرمایی برقی و رابطه آن با تابش خورشید (آزمون شماره ۴)

شکل ۱۲ میزان توان تولید شده توسط گرم‌کن برقی را برای یک روز آفتابی به نمایش می‌گذارد. بر اساس نتایج حاصل شده مشاهده می‌گردد، در ابتدای کارکرد سیستم که هنوز کلکتور گرم نشده است، توان تولیدی از گرم‌کن برقی بیشترین مقدار خود می‌باشد و به تدریج که تابش خورشید افزایش می‌یابد توان گرم‌کن برقی (QH) کاهش و توان کلکتور (Qu) بیشتر می‌شود. این روند در ادامه حفظ شده و در نهایت منجر به تولید توان مجموع (Heat generated) ثابت در طول روز می‌کند.



شکل ۱۳- نرخ مشارکت واحد گرمایی برقی برای تمام حالات آزمون

به منظور بررسی دقیق‌تر کارکرد سیستم هیبریدی، در هر نه آزمایش طراحی شده میزان مشارکت واحد گرم‌کن برقی به صورت نسبی محاسبه گشت. بر اساس شکل ۱۳ با کاهش دبی، به علت افت در گرمای تولید شده توسط کلکتور میزان مشارکت واحد گرم‌کن برقی افزایش یافته، به نحوی که حداکثر آن در دبی  $0.005 \text{ kg/s}$  و دمای خروجی گرم‌کن برقی  $120^\circ\text{C}$  به میزان  $43\%$  رسید. این در حالی است که در دبی  $0.036 \text{ kg/s}$  و دمای  $100^\circ\text{C}$  این میزان مشارکت حدود ناچیز است.

### نتیجه‌گیری کلی

بر اساس آنچه در بخش نتایج مشاهده شد، دو فاکتور دمای مطلوب دستگاه و دبی سیال روغن در سطح احتمال  $95\%$  بر میزان دمای خروجی کلکتور اثر معنی‌دار خواهند داشت؛ بنابراین جهت به‌کارگیری سیستم مذکور برای یک واحد صنعتی، نیاز است در قدم اول نیاز صنعت به خوبی مشخص شده و سپس دبی و دمای مطلوب را تنظیم نمود. از سوی دیگر با آنالیز نحوه‌ی عملکرد مکانیزم

جبرانی سیستم، توانایی بالای آن در فراهم آوردن دمای مطلوب دیده شد. در این پژوهش همچنین مشاهده شد که در سطوح دبی پایین‌تر میزان نوسانات دمایی خروجی گرم‌کن برقی افزایش یافته و دلیل آن افزایش و کاهش ناگهانی دمای روغن در دبی‌های پایین است. در مجموع می‌توان با استناد به نتایج فوق نتیجه گرفت، سیستم حاضر با بهره‌گیری از یک واحد جبران‌کننده حرارت تحت شرایط عملکرد مختلف و با مصرف بهینه برق قادر خواهد بود به راحتی نیاز حرارتی بخش‌های بزرگی از صنعت را فراهم نماید.

#### منابع

- Barao, M., Lemos, JM., RN. Silva. 2002. Reduced complexity adaptive non-linear control of distributed collector solar field. *Journal of Processing Control* 12: 131- 141.
- Camacho, EF., Berenguel, M., Rubio, FR., D. Martinez. 2012. Control of solar energy systems. Springer. London.
- Camacho, EF., M. Berenguel. 1997. Robust adaptive model predictive control of a solar plant with bounded uncertainties. *International Journal of Adaptive Control Signal Processing* 11(4): 311-325.
- Kalogirou, SA. 1999. Performance enhancement of an integrated collector storage hot water system. *Renewable Energy* 16: 652- 655.
- Kessentini, H., C. Bouden. 2013. Numerical and experimental study of an integrated solar collector with CPC reflectors. *Renewable Energy* 57: 577- 586.
- Lemos, JM. 2006. Adaptive control of distributed collector solar fields. *International Journal of System Science* 37(8): 523-533.
- Lemos, JM., Silva, RN., JM. Lgreja. 2014. Adaptive control of solar energy collector systems. Springer. Switzerland.
- Mawle, A. 2010. Climate change, human health, and unsustainable development. *Journal of public health policy* 3: 272-277.
- Neville, RC. 1995. Solar energy conversion: The solar cell. Elsevier. Amsterdam.
- Rabl, A. 1976. Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators. *Solar Energy* 18: 497-511.
- Ratismith, W., Inthogkhum, A, J. Briggs. 2014. Two non-tracking solar collectors: design criteria and performance analysis. *Applied Energy* 131: 201- 210.
- Sen, Z. 2008. Solar energy fundamental and modeling techniques. Springer. London.



Valenzuela, L., Zarza, E., Berenguel, M., EF. Camacho. 2006. Control scheme for direct steam generation in parabolic troughs under recirculation operation mode. Solar Energy 80: 1-17.

Zare D, Ebadi H. Design optimization of a None-evacuated CPC collector. 2016. International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR). Aarhus, Demark.