

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2021.263634.1081



DOR: 20.1001.1.17355400.1400.20.117.1.8

The Thermal Performance Evaluation of a Typical Solar Collector Based on the Iranian National Standardization Organization Standard 7129

M. Mazidi Sharfabadi^{1*}, A. Seraj², M. Ayazi³

1- Assistant Professor of Mechanical Engineering, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

2- M. Sc. Student of Mechanical Engineering, University of Tehran

3- Instructor of Industrial Engineering, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

Email: mazidim@ripi.ir

Abstract

In this paper, the performance of a typical glass flat plate solar collector is evaluated experimentally by the test bench designed and constructed at Research Institute of Petroleum Industry (RIPI) in the city of Tehran. The results of five experimental tests including thermal performance evaluation, effective heat capacity, time constant, radiation angle correction factor and pressure drop are presented according to the Iranian National Standardization Organization (INSO) standard 7129. The results show that the highest thermal efficiency of the tested collector based on the gross surface area is 42.5% in ideal temperature conditions. In addition, its effective heat capacity is 42618 J/K and its time constant is obtained equal to 106 seconds. Furthermore, its radiation angle correction factor is 0.85 for incident angle of 45° and the pressure drop of the tested collector is about 500 Pa for its working mass flow rate.

Received: 25 December 2020

Accepted: 12 March 2021

Page Number: 7-22

Keywords:

Solar Collector,
Thermal Efficiency,
Time Constant,
Radiation Angle Correction
Factor,
Pressure Drop, Performance
Evaluation,
National Standard 7129

Please Cite this Article Using:

Mazidi Sharfabadi, M., Seraj, A., Ayazi, M., "The Thermal Performance Evaluation of a Typical Solar Collector Based on the Iranian National Standardization Organization Standard 7129", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 20, No. 117, pp. 7-22, In Persian, (2021).

ارزیابی عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی نمونه بر اساس استاندارد ۷۱۲۹ سازمان ملی استاندارد ایران

محمد مزیدی شرف‌آبادی^{۱*}، علی سراج^۲، محمد ایازی^۳

۱- استادیار مهندسی مکانیک، پژوهشگاه صنعت نفت

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

۳- مربی مهندسی صنایع، پژوهشگاه صنعت نفت

پیام نگار: mazidim@ripi.ir

چکیده

در این مقاله عملکرد یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت شیشه‌دار نمونه، در بستر آزمون طراحی و ساخته شده در پژوهشگاه صنعت نفت در شهر تهران به‌طور تجربی ارزیابی و نتایج پنج آزمون تجربی شامل ارزیابی عملکرد حرارتی، ظرفیت حرارتی مؤثر، ثابت زمانی، ضریب تصحیح زاویه تابش و افت فشار که بر اساس استاندارد ۷۱۲۹ سازمان ملی استاندارد ایران انجام شده‌اند، ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین بازده حرارتی این کلکتور بر مبنای سطح ناخالص و در شرایط ایده‌آل دمایی برابر با ۴۲/۵ درصد است. همچنین، ظرفیت حرارتی مؤثر برابر با ۴۲۶۱۸ ژول بر کلومین و ثابت زمانی آن ۱۰۶ ثانیه است. به علاوه، برای زاویه تابش ۴۵ درجه، ضریب تصحیح زاویه تابش ۰/۸۵ و افت فشار کلکتور مورد آزمایش حدود ۵۰۰ پاسکال در نرخ جریان جرمی کاری آن است.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۲

شماره صفحات: ۷ تا ۲۲

کلیدواژه‌ها:

کلکتور خورشیدی،

ارزیابی عملکرد، بازده حرارتی،

ثابت زمانی،

ضریب تصحیح زاویه تابش،

استاندارد ملی ۷۱۲۹

* تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های انرژی، گروه پژوهش بهینه‌سازی انرژی

استناد به مقاله:

مزیدی شرف‌آبادی، م.، سراج، ع.، ایازی، م.، "ارزیابی عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی نمونه بر اساس استاندارد ۷۱۲۹ سازمان ملی استاندارد ایران"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیستم، شماره ۱۱۷، صص. ۷-۲۲، (۱۴۰۰).

تأمین انرژی همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های بشر به شمار می‌رفته است؛ تجدیدپذیری و میزان آلاینده‌گی انرژی دو عامل بسیار مهم در انتخاب منبع تأمین انرژی هستند. از انرژی خورشیدی، به‌عنوان یک انرژی دائمی، ارزان و پاک، می‌توان هم برای مصارف گرمایشی و هم تولید توان الکتریکی استفاده کرد. یکی از مهم‌ترین موارد کاربرد انرژی خورشیدی برای مصارف گرمایشی، آبگرمکن‌های خورشیدی هستند. در این آبگرمکن‌ها، انرژی به‌وسیله کلکتورهای خورشیدی دریافت می‌شود و سپس به آب انتقال می‌یابد و صرف گرم کردن آن می‌شود. این آبگرمکن‌ها را می‌توان بسته به نوع کلکتور، نحوه ایجاد جریان در سیال و نوع تماس، در دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی کرد. کلکتورهای خورشیدی در حالت کلی شامل کلکتورهای صفحه‌تخت و کلکتورهای لوله‌خا هستند. کلکتورهای صفحه‌تخت همان کلکتورهای مرسوم هستند و کلکتورهای لوله‌خا شامل دو لوله شیشه‌ای هستند که یکی داخل دیگری قرار گرفته، بین آن‌ها خلأ ایجاد می‌شود و لوله داخلی دارای پوشش خاصی است که امواج تابشی خورشید را جذب می‌کند. آبگرمکن‌های خورشیدی را از نظر روش ایجاد جریان بین کلکتور و مخزن می‌توان به سامانه‌های ترموسیفون و پمپ‌دار (جریان اجباری) تقسیم‌بندی کرد. در سامانه پمپ‌دار مخزن سیال و کلکتور از هم جدا هستند و جریان بین این دو به‌وسیله یک پمپ منتقل می‌شود. هم‌چنین آبگرمکن‌های خورشیدی می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم عمل کنند. در نوع مستقیم، آبی که در کلکتور به جریان درمی‌آید و گرم می‌شود همان آبی است که به مصرف می‌رسد؛ درحالی‌که در نوع غیرمستقیم، این دو از هم مستقل هستند و تبادل حرارت بین آن‌ها از راه یک مبدل حرارتی انجام می‌شود. با توجه به رشد روزافزون استفاده از این آبگرمکن‌ها و انواع متفاوت آن‌ها، بررسی و آزمون عملکرد آن‌ها، موضوع مهمی در توسعه و بهینه‌سازی این تجهیزات به شمار می‌رود. در حقیقت ارزیابی و آزمون عملکرد، نخستین گام در این مسیر است. در این زمینه نیز استانداردهای ملی و بین‌المللی زیادی تدوین شده است که ارزیابی عملکرد بر اساس هر کدام از این استانداردها می‌تواند موضوع یک پژوهش کاربردی باشد.

در سال ۲۰۰۱ میلادی، هوانگ^۱ و همکاران [۱] عملکرد یک سامانه خورشیدی یک‌پارچه فتوولتائیک - گرمایی^۲ را در مقایسه با آبگرمکن‌های خورشیدی سنتی و متداول ارزیابی کردند. آن‌ها ضمن تعریف بازدهی با عنوان بازده صرفه‌جویی در انرژی اولیه^۳، نشان دادند که این بازدهی برای سامانه‌های یک‌پارچه فتوولتائیک - گرمایی حدود ۶۰ درصد و بالاتر از هم آبگرمکن‌های خورشیدی جداگانه و هم فتوولتائیک جداگانه است. در سال ۲۰۰۴ میلادی، فیشر^۴ و همکاران [۲] روشی را برای آزمون کلکتورها در شرایط شبه‌دینامیک بر اساس استاندارد اروپایی EN 12975-2 ارائه کردند و این استاندارد را قدری توسعه دادند. در سال ۲۰۰۸ میلادی، کیم^۵ و همکاران [۳] عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی متمرکزکننده سهموی مرکب^۶ با جاذب استوانه‌ای را ارزیابی کردند؛ آن‌ها برای مدل‌سازی تابش خورشید، یک مدل عددی را ارائه کردند و از نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی، نتیجه گرفتند که مدل عددی می‌تواند دقت مناسبی داشته باشد. هم‌چنین مدل دارای ردیاب خورشیدی^۷ دارای بازدهی ۱۴ درصد بالاتر از مدل فاقد ردیاب بود. آن‌ها با ارائه چند ضریب تصحیح، توانستند استاندارد فوق را از حالت پایا برای حالت شبه‌دینامیک نیز توسعه دهند. در سال ۲۰۱۴ میلادی، پاناراس^۸ و همکاران [۴] روشی را برای ارزیابی عملکرد یک سامانه ترکیبی پمپ حرارتی خورشیدی آب گرم ارائه کردند. روش آن‌ها مبتنی بر آزمون دینامیک سامانه‌های خورشیدی است و با عدم قطعیت کمتر از ۱۰ درصد، می‌تواند هزینه‌های جاری این سامانه را در حین عملکرد پیش‌بینی کند. در سال ۲۰۱۶ میلادی، صباحی و همکاران [۵] یک شبیه‌ساز کلکتورهای خورشیدی بزرگ را طراحی، اجرا و آزمایش کردند. این شبیه‌ساز می‌تواند شدت تابشی از 100 W/m^2 تا 1000 W/m^2 را ایجاد کند. هم‌چنین به‌عنوان معیاری از آزمون عملکرد شبیه‌ساز، در سطح تابش 790 W/m^2 ، غیریکنواختی و ناپایداری به‌ترتیب $12/34$ و $0/8$ درصد به دست آمد. در سال ۲۰۱۷ میلادی، ساعدالدین و همکاران [۶] عملکرد یک کلکتور خورشیدی

1. Huang
2. Integrated Photovoltaic and Thermal Solar System (IPVTS)
3. Primary-Energy Saving Efficiency
4. Fischer
5. Kim
6. Compound Parabolic Concentrator (CPC) Solar Collector
7. Sun Tracker
8. Panaras

مقاله حاضر به ارزیابی عملکرد یک کلکتور خورشیدی نمونه از نوع صفحه تخت می‌پردازد. این ارزیابی بر اساس استاندارد ۷۱۲۹ سازمان ملی استاندارد ایران انجام می‌شود. در این مقاله پس از معرفی و تشریح بستر آزمون و کلکتور مورد مطالعه، بر طبق استاندارد پیش‌گفته، پنج آزمون شامل آزمون‌های بازده حرارتی، ظرفیت حرارتی مؤثر، ثابت زمانی، ضریب تصحیح زاویه تابش و افت فشار، انجام و بر همین اساس عملکرد کلکتور نمونه ارزیابی می‌شود.

۲. معرفی بستر و روش‌های آزمون [۱۲]

در این بخش ابتدا بستر آزمون که برای ارزیابی عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی طراحی و ساخته شده است معرفی می‌شود و ضمن معرفی آن، شرایط انجام آزمون به همراه فرضیات مربوط به آن‌ها و کمیت‌هایی که باید اندازه‌گیری شوند، تشریح می‌شود. سپس روش انجام آزمون و در پایان روابط مربوط به مدل‌سازی مؤلفه‌های عملکردی ارائه می‌شوند.

۲-۱ معرفی بستر آزمون [۱۳]

پژوهشگاه صنعت نفت با توجه به وجود نداشتن آزمایشگاه‌های بررسی عملکرد و بهره‌وری تجهیزات خورشیدی - حرارتی در کشور و هزینه‌های ثانویه ایجاد شده به دلیل انتخاب تجهیزات غیراستاندارد، این آزمایشگاه مرجع را برای نخستین بار در کشور احداث و راه‌اندازی کرد. آزمایشگاه حاضر باهدف آزمون عملکرد حرارتی کلکتورها و آبرگمکن‌های خورشیدی به کار می‌رود. این دستگاه برای آزمون عملکرد حرارتی کلکتورهای خورشیدی شیشه‌دار، مطابق با استاندارد ملی ۷۱۲۹ به کار می‌رود و برای آزمون‌های کیفی قابل استفاده نیست. کلکتورهای خورشیدی قابل آزمون در این آزمایشگاه از نوع گرم‌کننده مایع و غیرمتمرکز کننده هستند. کلکتورهای خورشیدی گرم‌کننده هوا و متمرکزکننده در این آزمایشگاه قابل آزمون نیستند.

ابعاد کلکتورهای قابل آزمون بر مبنای ابعاد بستر نصب کلکتور حداکثر ۵ مترمربع است. هم‌چنین آزمون عملکرد حرارتی آبرگمکن‌های خورشیدی ترموسیفون و هم‌چنین آبرگمکن‌های خورشیدی با سامانه‌های کمکی تا حجم مخزن حداکثر ۵۰۰ لیتر در این دستگاه انجام‌پذیر است. این آزمایشگاه آزمون ارزیابی عملکرد

صفحه تخت پر شده با یک فوم فلز متخلخل را هم به‌طور عددی و هم تجربی ارزیابی کردند؛ نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در اثر فضای متخلخل، بازدهی حرارتی بیشینه و عدد ناسلت به ترتیب تا عدد ۱۸/۵ و ۸۲ درصد بالا رفتند. در سال ۲۰۱۸ میلادی، گارسیا^۱ و همکاران [۷] مدار آزمون را برای کلکتورهای خورشیدی سهموی کوچک توسعه دادند و شرایط آزمون را ارزیابی کردند. در روش آزمون آن‌ها در مورد مقدار متغیرهایی مثل سرعت باد به شدت سخت‌گیری شده است ولی شدت تابش و دمای محیط، متغیرهای منعطف‌تری هستند. بهترین مدت برای آزمون نیز برابر با ده دقیقه است. در سال ۲۰۲۰ میلادی، ایران‌منش و همکاران [۸] یک رطوبت‌زدای خورشیدی مجهز به کلکتورهای لوله خلاء و سامانه ذخیره‌سازی حرارت به کمک مواد تغییر فاز دهنده^۲ را به کمک روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی و عملکرد آن را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند فرایند خشک کردن را حدود ۱۰ درصد تسریع کند. هم‌چنین آن‌ها نشان دادند که بیشترین بازدهی کلی فرایند، می‌تواند به حدود ۴۰ درصد برسد. در سال ۱۳۹۵، شفیعیان و دقیق [۹] عملکرد یک کلکتور تحت خلاء دارای لوله‌های حرارتی را به صورت تئوری و تجربی بررسی کردند. از نتایج به دست آمده مشخص شد که تعداد بهینه لوله تحت خلاء در شرایط آب و هوایی شهر سهندج برابر ۱۵ عدد است. در ساعات پایانی روز، بازدهی اگزرژی مقادیر بالاتری در این محدوده زمانی به خود اختصاص داده است. تأثیر نرخ حجمی سیال بر دمای خروجی آن در ابتدای روز کم است و به تدریج این تأثیر بیشتر می‌شود. در سال ۱۳۹۶، جوزی و همکاران [۱۰] بررسی تجربی عملکرد حرارتی یک نمونه اصلاح‌شده کلکتور لوله خلاء خورشیدی را انجام دادند. نتایج نشان داد که این اصلاح ساختار تأثیر مطلوبی بر کارایی کلکتور دارد. این تغییر ساختار، توزیع دما در لوله و مخزن را یکنواخت‌تر کرد و موجب افزایش بازدهی کلکتور تا ۱۱ درصد شد. هم‌چنین جذب انرژی حرارتی در مدل اصلاح‌شده در مدت زمان یک ساعت حدود ۲۵ درصد بیشتر از نمونه معمولی بود. در سال ۱۳۹۵، خراسانی‌زاده و همکاران [۱۱] مشخصه‌های حرارتی و هیدرولیکی کلکتورهای خورشیدی کنگره‌دار هوا گرم را به صورت عددی بررسی کردند.

1. Garcia
2. Phase Change Materials (PCM)

اختلاف نداشته باشد. برای کلکتورهای صفحه تخت تک‌شیشه‌ای این وضعیت معمولاً وقتی محقق می‌شود که زاویه تابش مستقیم خورشیدی روی سطح کلکتور کمتر از ۲۰ درجه باشد.

۲-۲-۱-۲ راستای کلکتور

راستای کلکتور در فضای باز می‌تواند در وضعیتی ثابت رو به استوا قرار گیرد؛ اما این کار موجب محدود شدن زمان آزمون به گستره قابل قبول زوایای تابش می‌شود از همین روی بهتر است که کلکتور، خورشید را در زاویه سمت خود دنبال کند. در بررسی حاضر، بستر آزمون به گونه‌ای طراحی شده است که کلکتور مورد نظر دارای ردیاب خورشیدی باشد تا بتوان آزمون عملکردی را در بازه زمانی طولانی‌تری اجرا کرد.

۲-۲-۱-۳ شدت تابش انعکاسی و پراکنده خورشیدی

برای تجزیه و تحلیل نتایج آزمون‌ها در فضای باز، فرض می‌شود که شدت تابش خورشیدی که مستقیماً ناشی از قرص خورشید نیست، به گونه‌ای است که به‌طور همگن از میدان نیم‌کره‌ای دید کلکتور می‌آید. برای به حد اقل رساندن خطاهای ناشی از این تقریب، کلکتور در جایی نصب می‌شود که در مدت آزمون‌ها، تابش خورشیدی قابل توجهی از ساختمان‌ها یا سطوح اطراف

کلکتورهای خورشیدی را بر مبنای استاندارد ملی ۷۱۲۹، آزمون آبرگ‌مکن‌های خورشیدی خانگی با سامانه‌های صرفاً خورشیدی را بر مبنای استاندارد ۲-۷۳۸۵ و آزمون آبرگ‌مکن خورشیدی خانگی با سامانه کمکی را بر مبنای استاندارد ۵-۷۳۸۵ سازمان ملی استاندارد ایران انجام می‌دهد. در شکل (۱) نمایی از این بستر آزمون آورده شده است.

۲-۲ معرفی فرضیات، متغیرهای اندازه‌گیری و روش‌های آزمون [۱۲]

در این بخش ابتدا فرضیات مربوط به موقعیت مکانی و هندسه کلکتور ارائه می‌شوند. سپس مؤلفه‌هایی که باید به صورت تجربی اندازه‌گیری شوند به همراه دقت مورد نیاز و ابزار لازم برای اندازه‌گیری، بر طبق استاندارد ملی ۷۱۲۹ تعیین می‌شوند. در پایان با توجه به این توضیحات، مدار آزمون ترسیم می‌شود که نمایانگر روش انجام آزمون است.

۲-۲-۱-۲ فرضیات مربوط به موقعیت کلکتور و محل انجام آزمون

۲-۲-۱-۱ زاویه شیب کلکتور

کلکتور باید در زاویه شیبی آزمون شود که ضریب تصحیح زاویه تابش برای کلکتور، با مقدار آن در تابش عمودی، بیشتر از ۲ درصد



شکل ۱. نمایی از بستر آزمون تجهیزات خورشیدی حرارتی پژوهشگاه صنعت نفت.

Figure 1. A view of the test rig at Research Institute of Petroleum Industry (RIPI).

به همین منظور از مولدهای باد مصنوعی برای مواقعی که سرعت از محدوده مشخص شده خارج می‌شود، استفاده می‌شود.

۲-۲-۲ مؤلفه‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری

۲-۲-۲-۱ اندازه‌گیری تابش خورشیدی

تابش خورشید بر روی سطح افق به دو بخش تابش مستقیم و تابش پراکنده تقسیم می‌شود؛ تابش مستقیم آن بخش از نور خورشید است که به طور مستقیم به صفحه می‌تابد و تابش پراکنده بخشی است که پس از برخورد با ابر و ذرات معلق دیگر در هوا به سطح مورد نظر می‌رسد. مجموع تابش پراکنده و تابش مستقیم را تابش کل می‌نامند و دستگاهی که به منظور سنجش آن به کار می‌رود پیرانومتر^۱ نامیده می‌شود. شدت تابش پراکنده با سایه‌اندازی روی حسگر تابش به وسیله یک حلقه سایه‌انداز به دست می‌آید. حسگر مورد استفاده در شکل (۲) قابل مشاهده است. در این شکل هم نحوه نصب حسگر اندازه‌گیری شدت تابش کل و هم حسگر اندازه‌گیری شدت تابش پراکنده، مشاهده می‌شوند. حلقه نشان داده شده در شکل (۳) مانع برخورد پرتو مستقیم خورشید به حسگر پیرانومتر می‌شود و در نتیجه سیگنال خروجی این حسگر تنها تابع شدت تابش پراکنده خواهد بود. لازم به ذکر است که موقعیت نصب پیرانومترها به گونه‌ای است که حسگر آن در گستره رواداری 1° با صفحه کلکتور در یک صفحه قرار می‌گیرد.

بر روی آن منعکس نشود و همچنین مانعی در میدان دید وجود نداشته باشد. ضریب انعکاس سطوح زبر مانند چمن، بتن فرسوده یا سنگ‌فرش نیز معمولاً قابل صرف نظر است و ایجاد مشکل نمی‌کند. لازم به ذکر است که حد اکثر درصد مجاز برای تابش پراکنده برابر با ۳۰ درصد از کل تابش است. در غیر این صورت آزمون قابل انجام نیست. همچنین شدت تابش کل در طول آزمون باید همواره بالای $700 W/m^2$ باشد.

۲-۲-۲-۴ شدت تابش حرارتی

از آنجایی که عملکرد بعضی کلکتورها نسبت به سطح‌های مختلف شدت تابش حرارتی بسیار حساس است، برای به حداقل رساندن این اثر، دمای سطوح مجاور باید بسیار نزدیک به دمای محیط باشد و میدان دید کلکتور در فضای باز نباید نزدیک دودکش‌ها، برج‌های خنک‌کننده و غیره باشد.

۲-۲-۲-۵ سرعت هوای محیط

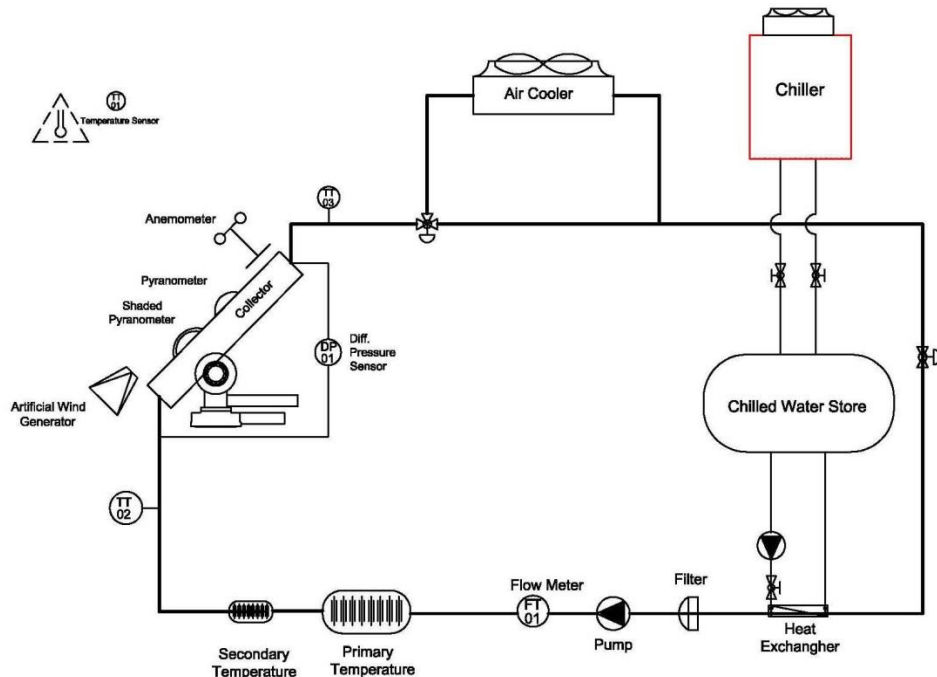
عملکرد کلکتورها به سرعت هوای محیط حساس است. برای بیشینه کردن تکرارپذیری نتایج، کلکتورها طوری نصب می‌شوند که هوا بتواند آزادانه از رو، پشت و کناره‌های کلکتور عبور کند. همچنین میانگین سرعت هوا به موازات سطح روی کلکتور باید در محدوده مشخصی باشد که در ادامه شرح داده خواهد شد.



شکل ۲. حسگرهای اندازه‌گیری شدت تابش (کل و پراکنده)، دمای محیط و سرعت باد.

Figure 2. Global and diffuse pranomentor, ambient temperature sensor and wind speed anemometer.

1. Pyranometer



شکل ۳. مدار آزمون ارزیابی عملکرد کلکتور خورشیدی.

Figure 3. The solar collector performance evaluation test circuit.

۲-۲-۲-۳ اندازه‌گیری دمای هوای محیط (θ_a)

دمای هوای محیط با عدم قطعیت استاندارد کمتر از $0.5 K$ تعیین می‌شود. هم‌چنین مطابق شکل (۲)، از حسگر به‌وسیله یک حفاظ سفید رنگ و با تهویه اجباری، از تابش مستقیم و انعکاسی خورشیدی محافظت می‌شود و در فاصله‌ای در حدود یک متر از سطح زمین قرار می‌گیرد تا گرمایش زمین روی آن تأثیری نگذارد. در شکل (۲) این حسگر قابل مشاهده است.

۲-۲-۲-۴ اندازه‌گیری نرخ جریان سیال کلکتور

نرخ جریان جرمی به‌صورت مستقیم و با عدم قطعیت استاندارد $\pm 1\%$ مقدار اندازه‌گیری شده، تعیین می‌شود.

۲-۲-۲-۵ اندازه‌گیری سرعت هوای محیط

تلفات گرمایی کلکتور، با افزایش سرعت هوا بر روی آن، افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که ارتباط بین سرعت باد در محیط و سرعت هوای روی کلکتور به‌درستی مشخص نیست؛ از این رو با استفاده از یک بادسنج پره‌ای، سرعت جریان هوا روی کلکتور اندازه‌گیری می‌شود. در آزمون فضای باز، اگر سرعت باد کمتر از

برای آزمون کلکتور خورشیدی، سه اندازه‌گیری دما شامل اندازه‌گیری دماهای سیال در ورودی و خروجی کلکتور و اندازه‌گیری دمای هوای محیط مورد نیاز است. درستی مورد نیاز و مکان این اندازه‌گیری‌ها متفاوت است.

۲-۲-۲-۶ اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی سیال (θ_{in} و θ_e)

دمای سیال انتقال گرما در ورودی و خروجی کلکتور با عدم قطعیت استاندارد $0.1 K$ اندازه‌گیری می‌شود؛ اما برای اطمینان از این که دما نسبت به زمان تغییر نمی‌کند، سیگنال دمایی با تفکیک‌پذیری $0.2 K$ مورد نیاز است. هم‌چنین حسگرهای اندازه‌گیری دما در فاصله کمتر از $200 mm$ از ورودی و خروجی کلکتور نصب می‌شوند. اختلاف بین دمای ورودی و خروجی نیز با عدم قطعیت استاندارد کمتر از $0.5 K$ تعیین می‌شود. از آنجایی که تغییرات کوچک در دمای لحظه‌ای سیال ورودی در طول مدت آزمون می‌تواند باعث ایجاد خطاهایی در محاسبه نرخ انرژی دریافتی شود، از دو مرحله تنظیم‌کننده دما استفاده می‌شود تا سیال، با دمای یکنواختی وارد کلکتور شود.

2 m/s شود یک مولد جریان هوای مصنوعی، سرعت هوا را از نو بالا می‌برد. عدم قطعیت استاندارد اندازه‌گیری سرعت جریان هوا کمتر از 0.5 m/s است.

۲-۲-۶ اندازه‌گیری فشار

اندازه‌گیری فشار برای تعیین اطلاعات مختلفی نظیر افت فشار و نرخ نشستی ناشی از اختلاف فشار انجام می‌شود. ابزار اندازه‌گیری مربوطه دارای خطایی کمتر از ۵ درصد مقدار اندازه‌گیری شده است. با توجه به تمامی ملاحظات بالا و کمیت‌های مورد نیاز، مدار آزمون برای ارزیابی عملکرد کلکتور خورشیدی صفحه‌تخت شیشه‌دار در فضای باز، به صورت شکل (۳) طراحی و ساخته شده است.

لازم به ذکر است که شکل (۳) یک مدار آزمون طرحواره است و الزاماً مقیاس‌ها در آن رعایت نشده است. چنان که پیداست جریان برگشتی از مصرف‌کننده‌ها، پس از فیلتر شدن، پمپاژ می‌شود و اول از همه نرخ جریان جرمی آن اندازه‌گیری می‌شود. سپس با عبور از دو مرحله تنظیم‌کننده دما، دمای آن در ورودی کلکتور اندازه‌گیری می‌شود. در محل کلکتور، پیرانومترهای اندازه‌گیری شدت تابش کل و پراکنده، مولد باد مصنوعی، بادسنج، دماسنج هوای محیط، ردیاب خورشیدی دوجبهته و فشارسنج تفاضلی قرار دارند. پس از عبور سیال از کلکتور، دمای خروجی سیال نیز اندازه‌گیری می‌شود و سیال به مصرف‌کنندگان تحویل داده می‌شود. با اندازه‌گیری این کمیت‌ها، هر آنچه برای ارزیابی عملکرد حرارتی کلکتور مورد نیاز است، به دست می‌آید.

۲-۳ روش اجرای آزمون ظرفیت حرارتی مؤثر

برای تعیین ظرفیت حرارتی مؤثر کلکتور، $C(J/K)$ ، می‌توان هم از روش‌های تجربی و هم از روش‌های محاسباتی استفاده کرد. در مقاله حاضر از روش تجربی استفاده شده است. در این آزمون ابتدا سطح کلکتور به وسیله یک پوشش منعکس‌کننده، از تابش خورشید محافظت می‌شود و سیال با دمای ثابت و نرخ جریانی برابر با آزمون بازده کلکتور، گردش می‌کند تا شرایط پایا برقرار شود. سپس پوشش برداشته می‌شود و اندازه‌گیری‌ها به طور پیوسته انجام می‌شوند تا زمانی که مجدداً شرایط پایا برقرار شود. این اندازه‌گیری‌ها شامل اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی سیال انتقال گرما، دمای سیال انتقال گرما در ورودی و خروجی کلکتور، دمای محیط و شدت تابش

خورشیدی هستند. سپس با استفاده از این داده‌ها و روابطی که در بخش ۲-۶ ارائه می‌شود، می‌توان ظرفیت حرارتی مؤثر را به دست آورد.

۲-۴ روش اجرای آزمون ثابت زمانی

این آزمون نیز مانند آزمون پیشین در فضای باز انجام می‌شود؛ در این آزمون سیال انتقال گرما با کم‌ترین نرخ جریان مورد استفاده در آزمون‌های بازده حرارتی، گردش می‌کند. اندازه‌گیری ثابت زمانی در طول یک دوره گرمایش انجام می‌شود. برای انجام این کار ابتدا کلکتور با یک پوشش منعکس‌کننده خورشیدی از منبع تابش جدا می‌شود، سپس پوشش منعکس‌کننده برداشته و دمای ورودی سیال، دمای خروجی سیال و دمای هوای محیط پایش می‌شود. ثابت زمانی کلکتور در واقع زمان سپری شده از لحظه برداشتن پوشش تا لحظه‌ای است که در آن دمای کلکتور به $63/2$ درصد دمای پایای خود می‌رسد؛ به عبارت دیگر ثابت زمانی کلکتور عبارت است از زمانی که اختلاف دمای بین سیال خروجی و هوای محیط، برابر $63/2$ درصد مقدار خود در شرایط پایا شود.

۲-۵ روش اجرای آزمون تصحیح زاویه تابش

برای این آزمون شدت تابش خورشیدی باید بالاتر از 300 W/m^2 باشد و راستای کلکتور طوری تنظیم شود که در محدوده $\pm 2/5^\circ$ نسبت به زاویه تابشی که آزمون برای آن انجام می‌شود، حفظ شود؛ یعنی برای اجرای این آزمون، ردیاب خورشیدی خاموش می‌شود و راستای کلکتور نسبت به جهت تابش تغییر نمی‌کند. میانگین دمای سیال انتقال گرما نیز تا $\pm 1 \text{ K}$ نسبت به دمای هوای محیط کنترل می‌شود. مقدار بازده یک بار پیش از ظهر خورشیدی و یک بار پس از ظهر خورشیدی تعیین می‌شود. زاویه تابش متوسط بین کلکتور و پرتو خورشیدی در هر دو نقطه داده‌برداری یکسان است. بازده کلکتور برای یک زاویه تابش خاص، برابر با متوسط دو مقدار در نظر گرفته می‌شود.

۲-۶ محاسبات و روابط مربوط به آزمون‌های مؤلفه‌های

کلکتور

توان مفید واقعی از رابطه (۱) حساب می‌شود:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_f \cdot \Delta T \quad (1)$$

است. چنانچه تنها از دو جمله اول سمت راست معادله (۵) برای برازش منحنی استفاده شود، یک تناسب خطی برای داده‌ها به دست می‌آید. استفاده از تناسب خطی به‌ویژه در شرایطی که ضریب a_2 منفی باشد و برازش مرتبه دوم از نظر آماری بی‌معنی باشد ضروری است. رابطه (۲) بازده را بر مبنای سطح ناخالص حساب می‌کند. در نتیجه رابطه (۵) نیز بازده را بر مبنای سطح ناخالص و دمای میانگین سیال تعیین می‌کند. چنانچه در رابطه (۲) به جای سطح ناخالص از سطح جذب‌کننده، $A_A(m^2)$ و در رابطه (۵) به جای دمای میانگین از دمای ورودی سیال استفاده شود روابط (۲) و (۵) به ترتیب به صورت روابط (۶) و (۷) در می‌آیند:

$$\dot{Q} = A_A \cdot G \cdot \eta_{hem,A,\vartheta_{in}} \quad (6)$$

$$\eta_{hem,A,\vartheta_{in}} = \eta_{0,hem,A} - a_1 \frac{\vartheta_{in} - \vartheta_a}{G} - a_2 \cdot G \left(\frac{\vartheta_{in} - \vartheta_a}{G} \right)^2 \quad (7)$$

روابط (۶) و (۷) می‌توانند به طریقی مشابه آنچه که پیش‌تر آورده شد، برای تعیین بازده بر مبنای سطح جذب‌کننده و دمای ورودی سیال استفاده شوند. با استفاده از معادلات (۲) و (۵)، توان خروجی کلکتور به ازای هر ماژول به صورت معادله (۸) نوشته می‌شود:

$$\dot{Q} = A_G \cdot G \cdot \left(\eta_{0,hem,G} - a_1 \frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{G} - a_2 \cdot G \left(\frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{G} \right)^2 \right) \quad (8)$$

حاصل ضرب $A_G \cdot G \cdot \eta_{0,hem,G}$ به‌عنوان توان بیشینه، $\dot{Q}_{peak}(W)$ در نظر گرفته می‌شود.

برای تعیین ظرفیت گرمایی مؤثر کلکتور، مطابق آنچه در بخش ۲-۲ آورده شد، دو حالت پایا وجود دارد. رفتار گذاری کلکتور بین این دو حالت با رابطه (۹) نشان داده می‌شود:

$$C \frac{d\vartheta_m}{dt} = A_G \cdot G \cdot \eta_{0,hem,G} - \dot{m} \cdot c_f \cdot \Delta T - A_G \cdot U \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) \quad (9)$$

که در آن $U(W/(m^2K))$ ضریب اتلاف گرمایی کلی اندازه‌گیری شده کلکتور بر مبنای T^*_m است. با انتگرال‌گیری از معادله (۹) بین دو حالت پایا، معادله (۱۰) برای ظرفیت گرمایی کلکتور به دست می‌آید:

که در آن $\dot{Q}(W)$ توان مفید واقعی، $\dot{m}(kg/s)$ نرخ جریان جرمی سیال انتقال گرما، $c_f(J/(kg.K))$ ظرفیت گرمایی ویژه سیال انتقال گرما و $\Delta T(K)$ اختلاف دمای بین سیال خروجی و ورودی است. لازم به ذکر است که مقدار c_f در دمایی متناظر با دمای میانگین سیال در نظر گرفته می‌شود. انرژی خورشیدی تابیده شده برابر با $A_G \cdot G$ است که در آن $A_G(m^2)$ سطح ناخالص کلکتور و $G(W/m^2)$ شدت تابش خورشیدی نیم‌کره‌ای است. با توجه به بازده کلکتور بر مبنای اختلاف دمای کاهیده و شدت تابش نیم‌کره‌ای، η_{hem,G,ϑ_m} توان مفید واقعی، \dot{Q} به صورت رابطه (۲) بازنویسی می‌شود:

$$\dot{Q} = A_G \cdot G \cdot \eta_{hem,G,\vartheta_m} \quad (2)$$

میانگین دمای سیال انتقال گرما، $\vartheta_m(^\circ C)$ عبارت است از:

$$\vartheta_m = \vartheta_{in} + \frac{\Delta T}{2} \quad (3)$$

که در آن $\vartheta_{in}(^\circ C)$ دمای ورودی سیال به کلکتور است. با تعریف دمای میانگین سیال، اختلاف دمای کاهیده که برای رابطه (۲) به آن اشاره شد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T^*_m = \frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{G} \quad (4)$$

که در آن $T^*_m(m^2K/W)$ اختلاف دمای کاهیده و $\vartheta_a(^\circ C)$ دمای هوای محیط است.

برای به‌دست‌آوردن منحنی بازده لحظه‌ای η_{hem} باید از برازش منحنی آماری با استفاده از روش حد اقل مربعات استفاده کرد. به این ترتیب رابطه (۵) به صورت زیر خواهد بود:

$$\eta_{hem,G,\vartheta_m} = \eta_{0,hem,G} - a_1 \frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{G} - a_2 \cdot G \left(\frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{G} \right)^2 \quad (5)$$

که در آن $\eta_{0,hem,G}$ مقدار بیشینه η_{hem,G,ϑ_m} متناظر با $T^*_m = 0$ و سطح ناخالص، $a_1(W/(m^2.K))$ ضریب اتلاف گرمایی در $\vartheta_m = \vartheta_a$ و $a_2(W/(m^2.K^2))$ ضریب اتلاف گرمایی وابسته به دما

آزمون واقع در پژوهشگاه صنعت نفت در شهر تهران، با طول جغرافیایی $35^{\circ} 44' 17''$ و عرض جغرافیایی $51^{\circ} 15' 32''$ انجام می‌شوند. این آزمایش در روز ۱۲ اسفندماه سال ۱۳۹۵ انجام شده است و داده‌های آن استخراج شده‌اند. در جدول (۱) اطلاعات کلکتور خورشیدی مورد مطالعه آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات کلکتور خورشیدی.

Table 1. The properties of the solar collector.

Properties	Type/Amount
Collector gross area (m ²)	2.32
Absorbent area (m ²)	2.25
Total mass of collector without fluid (kg)	20
Collector type	Flat plate
Cover material	Glass
Number of covers	1
Operating fluid	Water

داده‌های اندازه‌گیری شده برای به‌دست‌آوردن نتایج و نمودارها نیز، در جدول (۲) ارائه شده‌اند. داده‌های جدول (۲) میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده هستند که در مقاطع مختلف روز و به ازای چهار دمای میانگین مختلف در محدوده کاری کلکتور خورشیدی مورد مطالعه، داده‌برداری شده‌اند؛ به عبارت دیگر، به ازای هر دمای میانگین متفاوت، با فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای، از مؤلفه‌های جدول (۲) چهار بار داده‌برداری انجام گرفته است و میانگین این چهار مقدار، در جدول (۲) گزارش شده است.

جدول ۲. مقادیر میانگین مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده به ازای دماهای میانگین مختلف.

Table 2. The average values of measured parameters for different mean temperatures.

Measured parameter	T _m = 26.89	T _m = 41.66	T _m = 56.30	T _m = 70.93
Total radiation, G (W/M ²)	1015	1034	1038	1072
Percent of diffused radiation, G _d /G	12.40	13.20	13.63	12.72
Ambient temperature, θ _a (°C)	21.83	23.18	24.18	24.75
Wind speed, V _w (m/s)	3.672	3.096	2.861	3.126
Fluid inlet temperature, θ _{in} (°C)	22.62	37.98	53.33	68.70
Increase in fluid temperature, ΔT (K)	8.536	7.367	5.953	4.471
Mass flow rate, ṁ (kg/s)	0.039	0.039	0.039	0.039
Specific heat capacity of fluid, c _f (kJ/kgK)	4180	4179	4182	4190

$$C = \frac{A_G \eta_{0,hem.G} \int_{t_1}^{t_2} G dt - \dot{m} \cdot c_f \int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt - A_G \cdot U \left[\int_{t_1}^{t_2} (\theta_{in} - \theta_a) dt + \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt \right]}{\theta_{m2} - \theta_{m1}} \quad (10)$$

از نتایج آزمون ΔT ، $\theta_{in} - \theta_a$ و G به صورت تابعی از زمان رسم می‌شوند. سطوح زیر منحنی‌ها بین دو حالت پایا به ترتیب عبارت‌اند از $\int_{t_1}^{t_2} G dt$ ، $\int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt$ و $\int_{t_1}^{t_2} (\theta_{in} - \theta_a) dt$. عرض از مبدأ $\eta_{0,hem.G}$ و شیب حالت خطی بازده لحظه‌ای، U ، با استفاده از نتایج آزمون بازده معلوم هستند. به این ترتیب مقدار ظرفیت حرارتی مؤثر با اعمال این مقادیر تجربی در معادله (۱۰) تعیین می‌شوند. ضریب تصحیح زاویه تابش کلکتور به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_{hem}(\theta_L, \theta_T) = \frac{\eta_{0,hem}(\theta_L, \theta_T)}{\eta_{0,hem}(\theta_{L,def}, \theta_{T,def})} \quad (11)$$

که در آن θ_L زاویه تابش طولی، θ_T زاویه تابش عرضی، $\theta_{L,def}$ زاویه مرجع در جهت طولی که برابر صفر است و $\theta_{T,def}$ زاویه مرجع در جهت عرضی که برابر صفر است، هستند. چون مخرج کسر سمت راست رابطه (۱۱) قبلاً از عرض از مبدأ منحنی بازده به دست آمده است، می‌توان مقادیر $K_{hem}(\theta_L, \theta_T)$ را برای زوایای تابش مختلف حساب کرد.

۳. نتایج و تفسیر آن‌ها

در این بخش نتایج چهار آزمون بازده، ظرفیت حرارتی، ضریب تصحیح زاویه تابش و افت فشار ارائه می‌شود. این آزمون‌ها در بستر

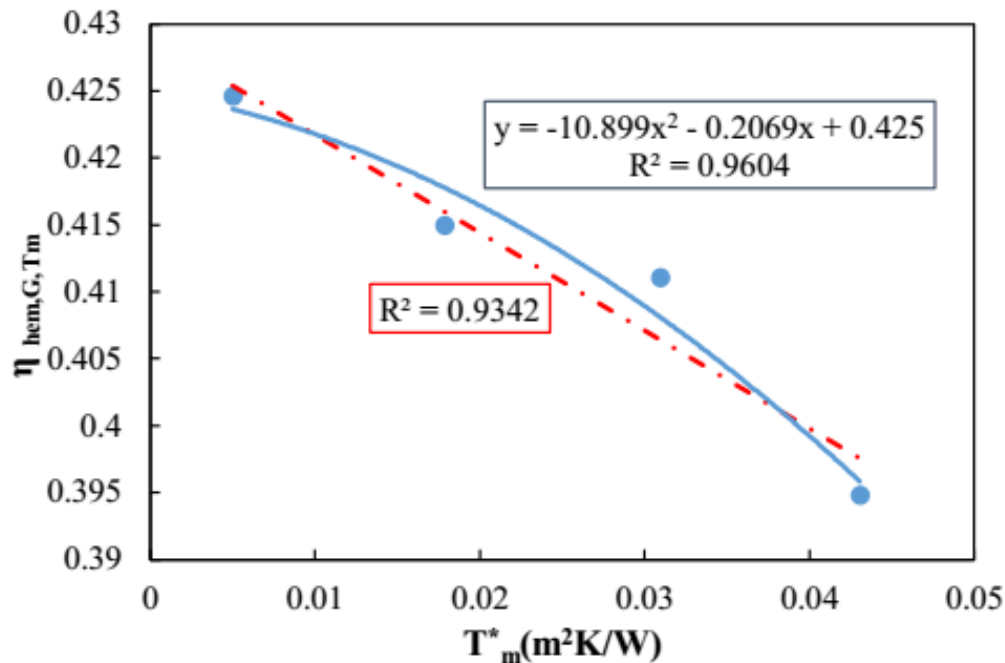
۱-۳ نتایج آزمون بازده

نتیجه آزمون بازده، نمودارهای بازده بر مبنای سطح ناخالص و بازده بر مبنای سطح جاذب بر حسب اختلاف دمای کاهیده میانگین است. در شکل (۴) نمودار بازده حرارتی بر مبنای سطح ناخالص و دمای میانگین بر حسب اختلاف دمای کاهیده میانگین ارائه شده است.

در شکل (۴) معادله دو منحنی برازش شده به دست آمده است؛ چنان که در این شکل پیداست مربع باقی مانده های نمودار درجه دوم، همبستگی بهتری را با داده ها نشان می دهد و با توجه به علامت های ضرایب، از نظر فیزیکی نیز کاملاً معنی دار است. با توجه به رابطه (۵) و شکل (۴)، ضریب اتلاف حرارتی در $\theta_m = \theta_a$ برابر با $0.2069 \text{ W/m}^2\text{K}$ به دست می آید. لازم به یادآوری است که این ضریب مربوط به سطح ناخالص پنل است و طبیعی است که با تغییر سطح و در نظر گرفتن سطح جاذب، اختلاف اندکی در این ضریب مشاهده خواهد شد. هم چنین بیشترین مقدار η_{hem,G,θ_m} یا همان $\eta_{0,hem,G}$ که متناظر با اختلاف دمای کاهیده میانگین صفر است،

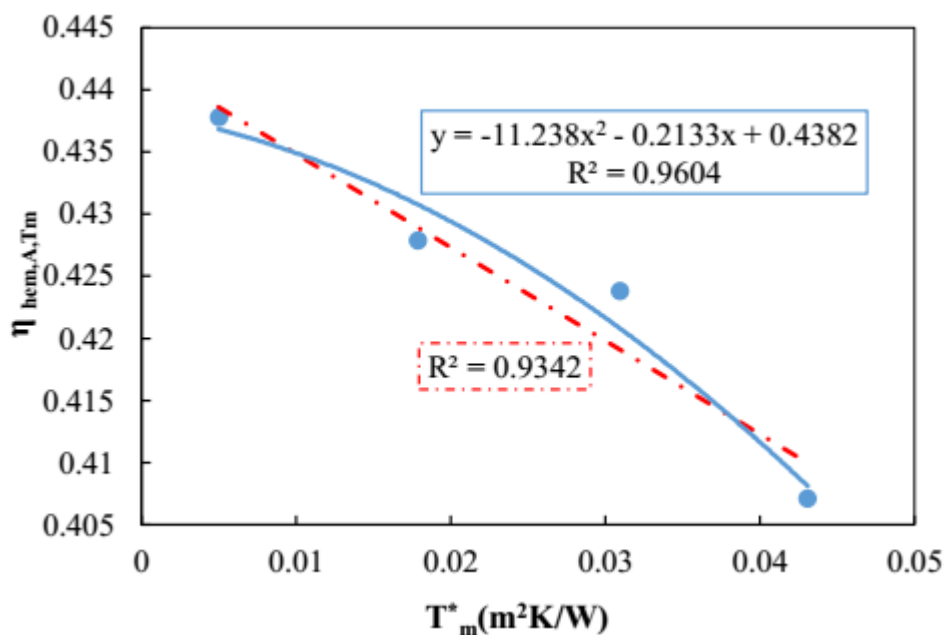
طبق معادله موجود در شکل (۴) برابر با 0.425 به دست می آید؛ یعنی در شرایط ایده آل از نظر دمایی، که دمای میانگین برابر با دمای هوای محیط باشد، پنل حاضر بازدهی برابر با $42/5$ درصد خواهد داشت. چنان که پیداست با افزایش دمای هوا و افزایش دمای میانگین، بازده کاهش می یابد، به طوری که به ازای افزایش اختلاف دمای کاهیده از $0.05 \text{ m}^2\text{K/W}$ تا $0.043 \text{ m}^2\text{K/W}$ بازده حدود ۳ درصد کم می شود. شکل (۴) و معادله نمودار برازش شده موجود در آن، مبنای ارزیابی عملکرد بر اساس استاندارد ۷۱۲۹ سازمان ملی استاندارد ایران است؛ اما چنان چه سطح جاذب به عنوان سطح انتقال حرارت در نظر گرفته شود نمودار آن مطابق شکل (۵) خواهد بود.

از مقایسه شکل های (۴) و (۵) مشاهده می شود که اگر سطح جاذب به عنوان سطح انتقال حرارت در نظر گرفته شود، بازده حدود ۱ درصد افزایش می یابد. هم چنین بازده بیشینه از $42/5$ درصد به $43/8$ درصد افزایش می یابد. ضریب انتقال حرارت نیز در حدود ۳ درصد زیاد می شود.



شکل ۴. نمودار بازده حرارتی بر مبنای سطح ناخالص و دمای میانگین بر حسب اختلاف دمای کاهیده میانگین.

Figure 4. The thermal efficiency based on gross area and average temperature versus average reduced temperature difference.



شکل ۵. نمودار بازده حرارتی بر مبنای سطح جاذب و دمای میانگین بر حسب اختلاف دمای کاهیده میانگین.

Figure 5. The thermal efficiency based on absorber area and average temperature versus average reduced temperature difference.

(۱۰) مقدار ظرفیت حرارتی مؤثر به دست می‌آید. داده‌های مربوط به این آزمون در جدول (۳) ارائه شده است. در تمام طول آزمون دبی جرمی برابر با دبی جرمی آزمون بازده است.

۲-۲ نتایج آزمون ظرفیت حرارتی مؤثر

چنان‌که در بخش ۳-۲ ذکر شد، برای تعیین ظرفیت حرارتی مؤثر، ابتدا سطح کلکتور با یک پوشش منعکس‌کننده پوشانده و پس از برداشتن این پوشش، دمای ورودی و خروجی کلکتور، دمای هوای محیط و شدت تابش اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از رابطه

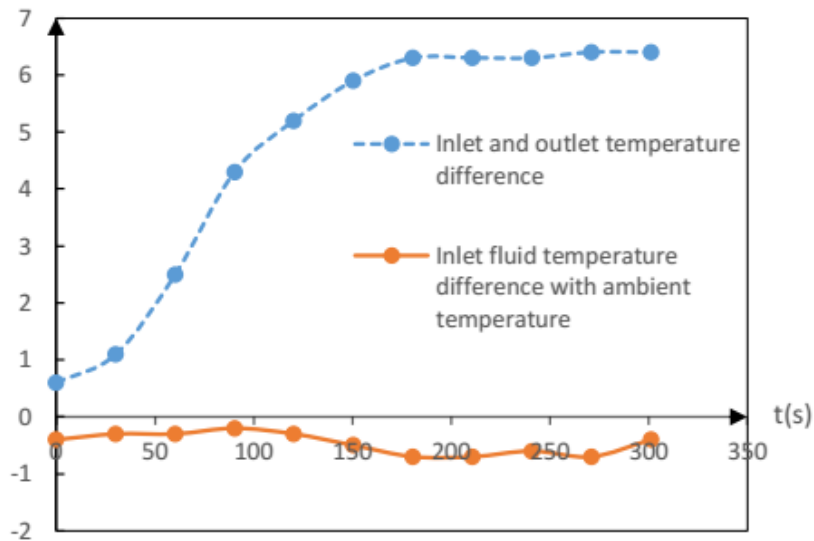
جدول ۳. مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده برای آزمون ظرفیت حرارتی مؤثر.

Table 3. The measured parameters for effective heat capacity test.

Time t(s)	Intensity of radiation G(W/m ²)	Ambient temperature ϑ_a (°C)	Fluid inlet temperature ϑ_{in} (°C)	Fluid outlet temperature ϑ_e (°C)
0	838	27.5	27.1	27.7
30.23	836	27.5	27.2	28.3
60.28	831	27.5	27.2	29.7
90.31	833	27.4	27.2	31.5
120.39	834	27.6	27.3	32.5
150.52	833	27.7	27.2	33.1
180.7	832	27.8	27.1	33.4
210.77	831	27.9	27.2	33.5
240.89	825	27.9	27.3	33.7
270.94	823	28	27.3	33.7
301.17	823	27.8	27.4	33.8

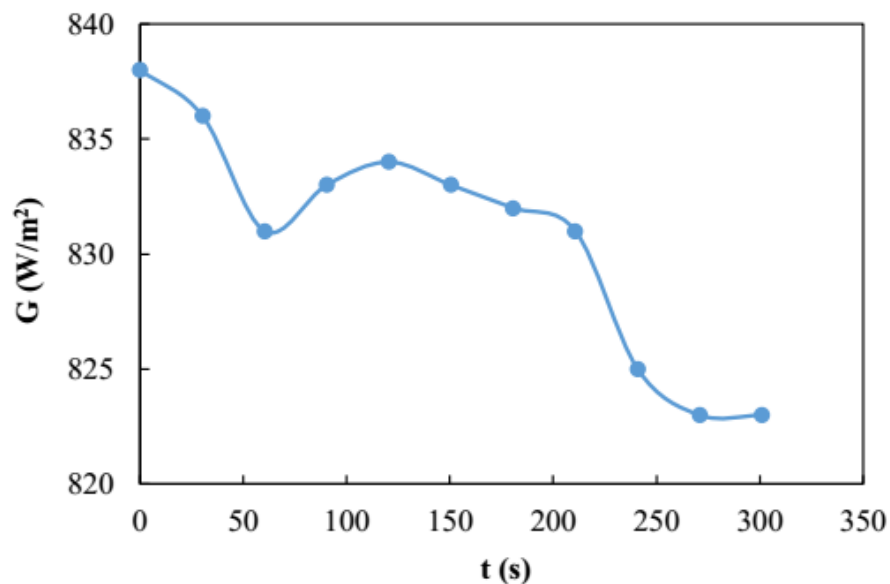
نمودارهای $\Delta T, \theta_{in} - \theta_a$ و G بر حسب زمان استفاده می‌شود. این نمودارها به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شوند. با استفاده از شکل‌های (۶) و (۷)، نتایج آزمون بازده و رابطه (۱۰)، با روشی که در بخش ۲-۵ ارائه شد، مقدار ظرفیت حرارتی مؤثر میانگین، برابر با $C = 42618 J/K$ به دست می‌آید.

از آنجایی که آزمون در بعد از ظهر خورشیدی انجام شده است، شدت تابش به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. آزمون فوق چهار بار تکرار می‌شود و داده‌های جدول (۳) چهار بار اندازه‌گیری می‌شوند و در پایان میانگین حسابی آن‌ها به‌عنوان ظرفیت حرارتی مؤثر به حساب می‌آید. مطابق رابطه (۱۰) برای محاسبه ظرفیت حرارتی مؤثر از



شکل ۶. نمودار اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی و اختلاف دمای سیال ورودی و هوا بر حسب زمان.

Figure 6. The variation of inlet and outlet temperature difference and inlet fluid and ambient temperature difference with time.



شکل ۷. نمودار شدت تابش بر حسب زمان در طول آزمون ظرفیت حرارتی مؤثر.

Figure 7. The variation of radiation intensity with time during effective heat capacity test.

۳-۳ نتایج آزمون ثابت زمانی

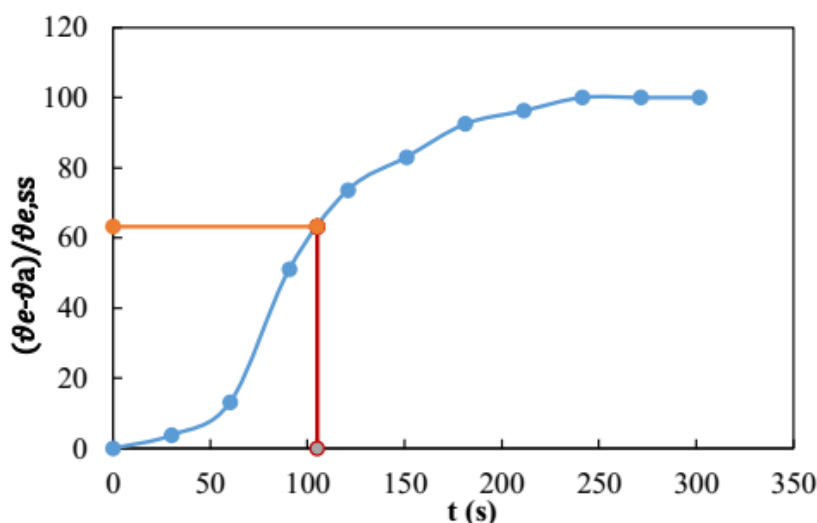
در این آزمون مطابق آنچه در بخش ۲-۴ شرح داده شد، در ابتدا یک پوشش منعکس کننده سطح کلکتور را می‌پوشاند و پس از برقراری شرایط پایا، این پوشش برداشته می‌شود. سپس دمای ورودی و خروجی سیال و دمای هوا پایش می‌شوند. وقتی اختلاف دمای خروجی و دمای هوا به $63/2$ درصد مقدار پایای خود رسید، ثابت زمانی کلکتور به دست می‌آید. اطلاعات اندازه‌گیری شده در

این آزمون در جدول (۴) ارائه شده است. در تمام طول آزمون دبی جرمی برابر با دبی جرمی آزمون بازده است. طبق جدول (۴)، اختلاف دمای خروجی سیال با دمای هوا در شرایط پایا برابر با $5/3$ درجه سلسیوس است. در شکل (۸) درصد اختلاف دمای سیال خروجی با دمای هوا نسبت به مقدار پایای این کمیت، بر حسب زمان نشان داده شده است.

جدول ۴. داده‌های اندازه‌گیری شده برای آزمون ثابت زمانی.

Table 4. The measured data for time constant test.

Time t(s)	Ambient temperature ϑ_a (°C)	Fluid inlet temperature ϑ_{in} (°C)	Fluid outlet temperature ϑ_e (°C)
0	27.30	26.90	27.30
30.06	27.20	27.00	27.40
60.31	27.30	27.10	28.00
90.55	27.20	27.40	29.90
120.72	27.00	27.70	30.90
150.84	27.10	27.80	31.50
181.11	27.10	27.70	32.00
211.17	27.10	27.60	32.20
241.33	27.00	27.50	32.30
271.64	27.00	27.30	32.30
301.77	27.00	27.10	32.30



شکل ۸. نمودار آزمون ثابت زمانی.

Figure 8. The time constant test results.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد یک کلکتور خورشیدی صفحه‌تخت شیشه‌دار نمونه بر اساس استاندارد ۷۱۲۹ سازمان ملی استاندارد ایران ارزیابی شد؛ این ارزیابی از راه انجام پنج آزمون: بازده حرارتی، ظرفیت حرارتی مؤثر، ثابت زمانی، ضریب تصحیح زاویه تابش و افت فشار انجام پذیرفت. در این مقاله، مطالعه‌ای تجربی بر روی یک کلکتور خورشیدی نمونه انجام شد. نتایج این مطالعه می‌تواند با استانداردهای برچسب مصرف انرژی مقایسه و از این راه با دیگر کلکتورهای خورشیدی در پژوهش‌های آتی مقایسه شود. روش ارائه شده در این مقاله می‌تواند به‌عنوان روشی معتبر برای بررسی عملکرد کلکتورهای خورشیدی مشابه به کار رود. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که کلکتور خورشیدی حاضر از نظر بازده حرارتی بر مبنای سطح ناخالص و دمای میانگین سیال، دارای بازده بیشینه ۴۲/۵ درصد در شرایط آرمانی از نظر دمایی است. این شرایط معادل با برابر بودن دمای محیط با دمای میانگین سیال است و با افزایش دمای سیال نسبت به دمای محیط، بازده کلکتور کاهش می‌یابد. همچنین اگر سطح جاذب به‌عنوان سطح مبنای انتقال حرارت در نظر گرفته شود، بازده کلکتور اندکی افزایش را نشان خواهد داد. ظرفیت حرارتی مؤثر این کلکتور برابر با $42618 J/K$ و ثابت زمانی آن برابر با ۱۰۶ ثانیه به دست آمد. همچنین ضریب تصحیح زاویه تابش برای زاویه تابش ۴۵ درجه برابر

بر اساس شکل (۸)، ثابت زمانی کلکتور برابر با ۱۰۶ ثانیه به دست می‌آید.

۳-۴ نتایج آزمون تصحیح زاویه تابش

مطابق با رابطه (۱۱)، ضریب تصحیح زاویه تابش مطابق جدول (۵) به دست می‌آید؛ روش اجرای این آزمون نیز در بخش ۲-۴ شرح داده شد.

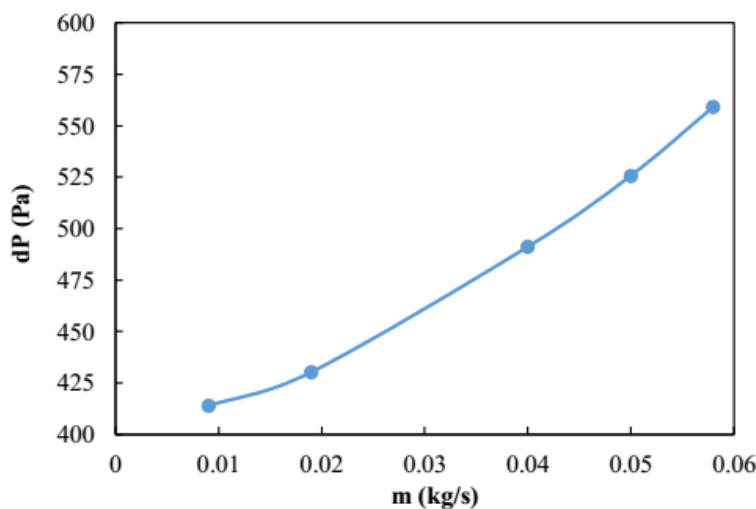
جدول ۵. ضرایب تصحیح زاویه تابش.

Table 5. The correction factors for different angles of incidence.

Angle (degrees)	K_{θ}
0	1
30	0.98
45	0.85
60	0.76

۳-۵ نتایج آزمون افت فشار

در این آزمون با تغییر نرخ جریان جرمی، افت فشار سیال به‌وسیله یک فشارسنج مقایسه‌ای (مطابق با شکل (۳)) اندازه‌گیری می‌شود. نتایج این آزمون مطابق با شکل (۹) است. طبق شکل (۹)، با افزایش نرخ جریان عبوری، افت فشار نیز بیشتر می‌شود که نتیجه‌ای قابل انتظار است.



شکل ۹. افت فشار سیال بر حسب نرخ جریان عبوری از کلکتور.

Figure 9. The pressure drop versus mass flow rate.

- [7] Fernández-García, A., Valenzuela, L., Zarza, E., Rojas, E., Pérez, M., Hernández-Escobedo, Q., Manzano-Agugliaro, F., "SMALL-SIZED parabolic-trough solar collectors: Development of a test loop and evaluation of testing conditions". *Energy*, 152, pp. 401-415, (2018).
- [8] Iranmanesh, M., Akhijahani, H. S., Jahromi, M. S. B., "CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system". *Renewable Energy*, 145, pp. 1192-1213, (2020).
- [9] Shafieian, A., Daghigh, R., "Theoretical and experimental performance evaluation of evacuated tubes heat pipe collector in Sanandaj". *Journal of Energy Management*, 6(2), pp. 36-45, In Persian, (2016).
- [10] Jowzi, M., Veysi, F., Gholamzadeh, M., "Experimental analysis of thermal performance of the modified vacuum tube solar collector". *Modares Mechanical Engineering*, 17 (3), pp. 55-62, In Persian, (2017).
- [11] Khorasanizadeh, H., Sadripour, S., Aghaei, A. R., "Numerical investigation of thermo-hydraulic characteristics of corrugated air-heater solar collectors". *Modares Mechanical Engineering*, 16 (13), pp.42-46, In Persian, (2017).
- [12] Iranian national standardization organization (INSO), *Solar energy-solar thermal collectors-test methods*, 7129-1, (2016),
- [13] <https://www.ripi.ir/services-and-products/lab-services>
- ۰/۸۵ حساب شد. افت فشار سیال در کلکتور نیز با نرخ جریان جرمی آن رابطه مستقیم دارد و با تغییر آن از حدود 0.1 kg/s تا 0.6 kg/s افت فشار از حدود 400 Pa تا حدود 600 Pa تغییر می‌کند.

مراجع

- [1] Huang, B. J., Lin, T. H., Hung, W. C., Sun, F. S., "Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems". *Solar energy*, 70(5), pp. 443-448, (2001).
- [2] Fischer, S., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., Perers, B., Bergquist, P., Hellström, B., "Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2". *Solar Energy*, 76(1-3), pp. 117-123, (2004).
- [3] Kim, Y., Han, G., Seo, T., "An evaluation on thermal performance of CPC solar collector". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(4), pp. 446-457. (2008).
- [4] Panaras, G., Mathioulakis, E., Belessiotis, V., "A method for the dynamic testing and evaluation of the performance of combined solar thermal heat pump hot water systems". *Applied energy*, 114, pp. 124-134, (2014).
- [5] Sabahi, H., Tofigh, A. A., Kakhki, I. M., Bungypoor-Fard, H., "Design, construction and performance test of an efficient large-scale solar simulator for investigation of solar thermal collectors". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 15, pp. 35-41, (2016).
- [6] Saedodin, S. A. H. Z. S., Zamzajian, S. A. H., Nimvari, M. E., Wongwises, S., Jouybari, H. J., "Performance evaluation of a flat-plate solar collector filled with porous metal foam: Experimental and numerical analysis". *Energy Conversion and Management*, 153, pp. 278-287, (2017).