



تحلیل انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با به کارگیری نانوسیال نقره

مهران بزرگی¹، مریم کرمی^{2*}، شهرام دلفانی³

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

* تهران، صندوق پستی 15719-14911، karami@khu.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، بازده انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی جذب مستقیم نوع مسکونی با به کارگیری نانوسیال نقره با پوشش پلی وینیل پیرولیدین به صورت تجربی تعیین شده است. در مرحله اول، پایداری و خواص ترموفیزیکی و تابشی نانوسیال با استفاده از روشهای تئوری و تجربی ارزیابی شده و سپس، عملکرد حرارتی کلکتور با استفاده از دستگاه آزمون در محیط بیرون براساس استاندارد EN12975-2 بررسی شده است. بررسی خواص اپتیکی نانوسیال با استفاده از روش طیفسنجی نشان داد که نانوذرات نقره با پوشش پلی وینیل پیرولیدین با غلظت 1000 ppm در بیشترین حالت موجب افزایش ضریب میرایی سیال پایه تا 6.24 cm^{-1} می شود. نتایج تحلیل انرژی کلکتور نشان داد که با افزایش دبی و غلظت نانوسیال بازده کلکتور به صورت مجانبی افزایش می یابد. مشاهده شد که با افزایش غلظت نانوسیال، بازده انرژی افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار بهینه خود با کاهش همراه است. این مقدار بهینه برای تمامی دبی ها، 500 ppm است. بازده انرژی با اختلاف دمای کاهش یافته نیز روندی مشابه غلظت داشته و در $0.01 \text{ m}^2\text{K/W}$ به مقدار بهینه خود می رسد. کاهش بازده انرژی با افزایش دبی نشان می دهد که تلفات ناشی از افت فشار تاثیر چشمگیری بر عملکرد کلکتور از منظر انرژی دارد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 اسفند 1396
پذیرش: 17 فروردین 1397
ارائه در سایت: 07 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

کلکتور خورشیدی

جذب مستقیم

نانوسیال نقره

ضریب میرایی

بازده انرژی

Energy and exergy analysis of direct absorption solar collector by using silver nanofluid

Mehran Bozorgi, Maryam Karami*, Shahram Delfani

1- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Installations, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

* P.O.B. 15719-14911, Tehran, Iran, karami@khu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 March 2018
Accepted 06 April 2018
Available Online 27 April 2018

Keywords:

Solar collector
Direct Absorption
Silver Nanofluid, Extinction Coefficient
Exergy Efficiency

ABSTRACT

In this study, energy and exergy efficiency of residential-type direct absorption solar collector using PVP-coated silver nanofluid has been evaluated experimentally. First, stability and thermophysical and optical properties of nanofluid have been considered using the theoretical and experimental methods. Then, outdoor thermal performance of collector is investigated using the experimental setup based on EN12975-2. Measurement of optical properties of nanofluid using the spectrophotometry method show that the extinction coefficient of the base fluid is increased up to 6.24 cm^{-1} using 1000 ppm PVP-coated silver nanoparticles. Results of energy analysis show that the collector efficiency is increased by increase of flowrate and concentration of nanofluid asymptotically. It is observed that exergy efficiency is firstly increased by nanofluid concentration and then, decreased after reaching the optimum value. The optimum concentration was 500 ppm for all flowrates. The variation of exergy efficiency by reduced temperature difference is similar to volume fraction. The optimum exergy efficiency is obtained at $0.01 \text{ m}^2\text{K/W}$. The decrease of exergy efficiency by flowrate indicated that exergy losses due to pressure drop have the significant effect on the collector performance.

خواهد بود [1]. ساخت کلکتورهایی با هدف جذب مستقیم انرژی خورشید توسط سیال عامل، اولین بار در دهه 70 میلادی انجام گرفت [2,3]. در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم نسبت به نوع متداول، به دلیل حذف صفحه ی جاذب، مقاومت حرارتی کمتری در مسیر جذب انرژی خواهد بود [4]. همچنین در سال های اخیر، پژوهش های زیادی در مورد استفاده از نانوسیال ها جهت بهبود وضعیت انتقال حرارت در کاربردهای مهندسی به

1- مقدمه

با توجه به روند افزایش جمعیت جهان و مشکلاتی که سوخت های فسیلی دارند، استفاده از انرژی خورشیدی برای تامین حرارت مورد نیاز برای سیستم های تاسیساتی، امری ضروری و اجتناب ناپذیر تلقی می گردد. در این میان استفاده از کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم به جای کلکتورهای متداول، به منظور افزایش میزان انرژی جذب شده، از ارزش ویژه ای برخوردار

همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. تمرکز مطالعه‌ی آن‌ها روی تاثیر جزء حجمی نانوذرات و عدد رینولدز روی عدد ناسلت، تولید انرژی و کارایی کلکتور بوده است. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش جزء حجمی و عدد رینولدز، عدد ناسلت و تولید انرژی افزایش می‌یابد [17]. همچنین پروین و همکاران در پژوهشی دیگر، به صورت عددی تاثیر استفاده از چهار سیال عامل متفاوت را در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم بررسی نموده و با محاسبه‌ی عدد ناسلت، عدد بیژن، تولید انرژی و بازده کلکتور بیان کردند که هر چه میزان جذب انرژی تشعشعی سیال عامل بیشتر باشد، بازده کلکتور نیز بیشتر خواهد بود [18].

موهان و همکاران در پژوهشی به صورت تجربی تاثیر استفاده از نانوسیال هیبریدی دی‌اکسید سلنیوم و اکسیدمس در آب را به جای آب در کلکتورهای جذب مستقیم بررسی نمودند و گزارش کردند که با افزایش غلظت نانوسیال و افزایش دبی، می‌توان بازده کلکتور را بهبود بخشید [19]. کومار داس و همکاران به کمک نرم‌افزار فلوئنت، اختلاف فشار و انتقال حرارت را در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که عدد Nu و انتقال حرارت کلکتور به صورت تابعی از عدد رینولدز است؛ به شکلی که با افزایش Re ، اختلاف فشار در کلکتور و عدد ناسلت افزایش می‌یابد [20].

گوپتا و همکاران [21] به بررسی تجربی کلکتور خورشیدی جذب مستقیم پرداختند. آزمایش با استفاده از چهار کسر حجمی متفاوت، با نانوذرات اکسید آلومینیوم با اندازه 20 نانومتر انجام شد. نتایج نشان داد استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل، خواص تابشی و ترموفیزیکی را بهبود می‌بخشد که در نتیجه موجب افزایش بازده کلکتور می‌شود. کرمی و همکاران تاثیر نانوذرات اکسید مس را بر عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با هدف کاربری در آبرگرمکن خانگی، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها آب و اتیلن گلیکول را با نسبت 30-70 به عنوان سیال پایه انتخاب کرده و پس از پایدار کردن نانوسیال، مطابق با استاندارد EN12975-2 تاثیر دبی و غلظت نانوسیال را بر عملکرد کلکتور خورشیدی مورد مطالعه قرار دادند [22]. وکیلی و همکاران در پژوهشی مشابه، با استفاده از نانوصفحات گرافن موفق به افزایش 23 درصدی بازده کلکتور خورشیدی نسبت به سیال پایه شدند. مطابق با نتایج این پژوهش، بازده کلکتور خورشیدی جذب مستقیم در صورت استفاده از نانوسیال گرافن به عنوان سیال عامل، در دبی 0.015 kg/s به 93.2 درصد می‌رسد [23]. دلفانی و همکاران در پژوهشی تاثیر نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره را بر بازده کلکتور خورشیدی جذب مستقیم مورد آزمایش قرار دادند. این آزمایش تجربی که مطابق با استاندارد EN12975-2 انجام گرفت، نشان داد که با افزایش غلظت نانوسیال بازده افزایش پیدا می‌کند، تا جایی که در دبی 0.025 kg/s بازده کلکتور به 89.3 درصد می‌رسد [24].

کیانی ایرانپور و همکاران تاثیر پارامترهای موثر بر کارایی کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال آب-اکسیدمس را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ضخامت شیشه بازده بین 3.22 تا 7.36 درصد کاهش می‌یابد [25]. کرمی و همکاران در مقاله‌ای اقدام به بررسی تاثیر استفاده از نانوسیال ترکیبی اکسید آهن و سیلیس در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم کردند. آن‌ها نشان دادند که با ترکیب دو نانوسیال می‌توان خواص سیال پایه را بهبود بخشید و بازده کلکتور را تا 20 درصد نسبت به سیال پایه افزایش داد [26]. کرمی و همکاران در پژوهش دیگری، خواص نانوذرات الماس را مورد مطالعه قرار داده و کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم و متداول را با هم مقایسه کردند [27]. نشان دادند

صورت تجربی و تئوری انجام گرفته است [6,5]. بنابراین با بهره گرفتن از خواص نانوسیال‌ها در کلکتورهای خورشیدی از نوع جذب مستقیم، می‌توان عملکرد سیستم خورشیدی را بهبود بخشید [7].

اولین قدم برای استفاده‌ی نانوسیال به عنوان سیال عامل در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم، بررسی خواص نانوسیال است. پایداری، خواص حرارتی و خواص تابشی از جمله خواصی است که برای هر نانوسیال بایستی مورد بررسی قرار گیرد. در یک دهه‌ی گذشته پژوهش‌های بسیاری بر روی خواص نانوسیال‌ها به جهت استفاده در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم، انجام گرفته است. کرمی و همکاران در پژوهش‌هایی به طور جداگانه خواص نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی، کربن نانوبال و اکسید مس را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که به وسیله‌ی نانوذرات فوق می‌توان خواص تابشی و حرارتی سیال پایه را تا حد مطلوبی بهبود بخشید [8-10]. وکیلی و همکاران در تحقیق خود بر روی نانوسیال حاوی نانوصفحات گرافن نشان دادند که با توجه به افزایش ضریب جذب و ضریب میرایی حاصل شده، می‌توان از این نانوسیال به عنوان سیال عامل در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم استفاده کرد [11]. میلانسه و همکاران، خواص اپتیکی سه نانوسیال حاوی اکسید روی، اکسید آهن و اکسید سلنیوم را جهت کاربری در سیستم‌های حرارتی در دماهای بالا مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که عواملی مانند PH، پوشش نانوذره و مدت زمان استفاده از دستگاه اولتراسونیک می‌تواند بر خواص تابشی نانوسیال تاثیر گذار باشد [12]. ژانگ و همکاران در پژوهشی به منظور افزایش بازده کلکتور خورشیدی جذب مستقیم، خواص چند نانوسیال مورد بررسی قرار دادند. نانوسیال حاوی نانوذرات طلا، سیلیسیم، اکسید آلومینیوم، اکسید آهن و الماس، موادی بودند که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفتند [13].

خاشان و همکاران نیز در مقاله‌ای خواص نانوسیال ترکیبی اکسید آهن و اکسید سیلیسیم را به جهت استفاده در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم مورد مطالعه قرار دادند [14]. آن‌ها نشان دادند که با غلظت 1 mg ترکیب نانوذرات نامبرده در 1 ml آب، می‌توان توان جذب انرژی تابشی را 32.9 درصد افزایش داد. با مشخص شدن پتانسیل نانوسیال‌ها و امکان استفاده از آن‌ها به عنوان سیال عامل در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم، پژوهش‌های تئوری و تجربی زیادی بر روی عملکرد این نوع کلکتور تحت شرایط مختلف انجام گرفت. تیاهی و همکاران نخستین طرح‌های پژوهشی را در این زمینه انجام دادند. آن‌ها با کمک حل عددی، به بررسی عملکرد کلکتورهای جذب مستقیم غیرمتمرکز پرداختند که محیط جذب در نظر گرفته شده در این کار تحقیقاتی، نانوذرات آلومینیوم معلق در آب بوده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی آن‌ها نشان داد که بازده کلکتور تا کسر حجمی 0.5 درصد به یکباره و به سرعت افزایش می‌یابد. سپس با افزایش کسر حجمی این روند رشد کاهش یافته و با شیب ملایمی پیش می‌رود. هنگامی که سیال از ذرات غنی می‌شود، بازده کلکتور حدود 80 درصد خواهد بود که این مقدار در مقایسه با کلکتورهای صفحه تخت متداول رشد 10 درصدی داشته است [15].

اتانیکار و همکاران به کمک حل عددی و همچنین با ساخت یک میکروکلکتور حجمی به بررسی عملکرد کلکتور با استفاده از نانوسیال‌های گرافیت و نانولوله‌های کربنی و نقره بر پایه‌ی آب پرداختند. آن‌ها با انجام کار تجربی و آزمایشات دریافتند که تفاوت ناچیزی بین عملکرد نانوسیال گرافیت و نانولوله‌های کربنی وجود دارد [16]. انتقال حرارت و تولید انرژی در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم حاوی نانوسیال مس و آب توسط پروین و

جدول 1 مشخصات نانوذره نقره با پوشش پلی وینیل پیرولیدین
Table 1 Properties of PVP coated silver nanoparticle

مشخصه	مقدار
درصد خلوص	99.99%
چگالی واقعی	10.5 g/cm ³
قطر نانوذره	20 nm
رنگ	مشکی
شکل ظاهری	کروی

مشکل اصلی نانوسیال‌ها، به خصوص نانوسیالات فلزی ناپایداری آن‌هاست. ته-نشینی نانوذرات در سیال پایه منجر به گرفتگی مجاری شده و علاوه بر آن بر خواص تابشی و حرارتی نانوسیال نیز تاثیر می‌گذارد. در این پژوهش برای بررسی پایداری نانوسیال از آزمایش تعیین پتانسیل زتا و تعیین سائز نانوذرات در سیال پایه استفاده شد. این کار به کمک دستگاه زتاسائزر مدل ZEN 3600 شرکت مالورن، که قادر به اندازه‌گیری پتانسیل زتای ذرات در دامنه 5 nm تا 10 μm و اندازه ذرات پراکنده شده در حلال، در دامنه 0.6 μm تا 6 μm را دارا می‌باشد، انجام گرفت.

سیستم‌های کلوییدی با پتانسیل زتای بالا (مثبت یا منفی) از لحاظ الکتریکی پایدار هستند. به‌طور کلی مقدار پتانسیل زتای 25 mv (مثبت یا منفی) به‌عنوان مقدار مرزی در پایداری نانوسیال معرفی شده است [33]. مقدار پتانسیل زتای به دست آمده برای نانوسیال نمونه‌ی 1000 ppm در این پژوهش 41.6 mv- بوده که با توجه به فاصله‌ی عدد فوق با بازه‌ی ذکر شده، می‌توان گفت نانوسیال از لحاظ پایداری وضعیت مطلوبی دارد.

برای مطالعه‌ی تاثیر استفاده از یک نانوسیال بر عملکرد کلکتور خورشیدی، توجه به خواص ترموفیزیکی و تابشی تغییر یافته‌ی سیال پایه بسیار مهم است. در این تحقیق چگالی نانوسیال مورد استفاده در این پژوهش، از رابطه‌ی پاک و چو [34] محاسبه گردیده است.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \quad (1)$$

که در (رابطه 1)، ϕ غلظت نانوسیال، ρ_{bf} چگالی سیال پایه و ρ_{np} نشانگر چگالی نانوذرات است. برای محاسبه‌ی گرمای ویژه نیز از رابطه‌ی پیشنهادی هانلی [35]، که در (رابطه 2) نشان داده شده است، استفاده شد. در (رابطه 2)، C_p گرمای ویژه بوده و زیرنویس‌های nf و bf و np به ترتیب به نانوسیال، سیال پایه و نانوذره اشاره دارد.

$$C_{p,nf} = \frac{\phi(\rho C_p)_{np} + (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf}}{\phi\rho_{np} + (1 - \phi)\rho_{bf}} \quad (2)$$

لزجت نانوسیال نیز از رابطه بچلر [36] که در (رابطه 3) نشان داده شده است، مشخص می‌شود. رابطه بچلر نیروی برآونی بین ذرات را در نظر گرفته و دقت آن از روابطی مانند رابطه برینکمن و انیشتین بیشتر است [36]. در (رابطه 3)، μ_{nf} و μ_{bf} به ترتیب لزجت دینامیکی نانوسیال و سیال پایه هستند.

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \quad (3)$$

با توجه به (رابطه 3)، افزایش لزجت دینامیکی سیال پایه در غلظت‌های پایین نانوذرات (کمتر از 1000 ppm)، بسیار کم است. بنابراین، افزایش افت فشار که رابطه مستقیمی با لزجت دینامیکی دارد، چشمگیر نخواهد بود. گرمی و همکاران در پژوهش خود نشان دادند که توان پمپاژ در شرایطی که افت فشار تغییر کمی داشته باشد، افزایش محسوسی نخواهد داشت [26].

روابط مختلفی برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال وجود دارد؛ ولی این روابط برای غلظت‌های پایین (کمتر از 1000 ppm) پیش‌بینی مناسبی از تغییر ضریب هدایتی نانوسیال ندارند. از سوی دیگر، اهمیت ضریب

که با غلظت گرمی 0.001 درصد نانوسیال الماس، می‌توان بازده کلکتور خورشیدی جذب مستقیم را 19.6 درصد نسبت به سیال پایه بهبود بخشید. میبیدی و همکاران در پژوهشی با استفاده از نتایج تجربی، به کمک قانون دوم ترمودینامیک اقدام به آنالیز عملکرد کلکتورهای خورشیدی متداول کردند. آن‌ها نانوسیال اکسید سیلیسیم را در غلظت‌های حجمی 0.75 و 1 درصد تهیه کرده و بازده اگزرژی، تولید آنتروپی و عدد بیژن را محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش غلظت نانوسیال، بازده اگزرژی افزایش می‌یابد [28].

گرچی و رنجبر در پژوهشی به‌صورت عددی و تجربی تاثیر استفاده از نانوسیال‌های گرافیت و نقره را در کلکتورهای خورشیدی با شار حرارتی کم مورد مطالعه قرار دادند [29]. آن‌ها همچنین در یک پژوهش تجربی دیگر، اقدام به محاسبه‌ی بازده حرارتی و اگزرژی کلکتور خورشیدی با استفاده از دو نانوسیال گرافیت و نقره کردند. همچنین آن‌ها به کمک روش‌شناسی سطح پاسخ¹، ارتباط بین پارامترهای تاثیرگذار و بازده‌های حرارتی و اگزرژی را به‌دست آوردند [30].

چن و همکاران در پژوهشی با استفاده از نانوسیال نقره و با کمک تحلیل انتقال حرارت گذرای یک بعدی، تاثیر پارامترهای غلظت نانوسیال، ارتفاع کلکتور و شار حرارتی را بر عملکرد کلکتور بررسی کردند [31]. مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با کاربری در سیستم‌های حرارتی مسکونی از منظر قانون دوم ترمودینامیک بررسی نشده است. در این پژوهش، علاوه بر تحلیل انرژی (قانون اول ترمودینامیک) کلکتور با استفاده از نانوسیال نقره و ارائه رابطه تجربی جامع برای بازده انرژی کلکتور که به کمک آن می‌توان بازده کلکتور را بدون انجام آزمون تحت شرایط مختلف کارکردی به‌دست آورد، تاثیر پارامترهای عملکردی مثل دبی و غلظت نانوسیال بر بازده انرژی و اگزرژی (قانون دوم ترمودینامیک) بررسی شده است. با مطالعه و محاسبه بازده اگزرژی می‌توان عوامل تلفات اگزرژی را شناسایی کرد و راهکارهایی برای کاهش آن‌ها اندیشید.

2- تحلیل تجربی

از آن‌جا که جزئیات دستگاه آزمون و روش‌های تجربی به کار رفته در تعیین خواص ترموفیزیکی و تابشی نانوسیال و همچنین روش انجام آزمایش عملکرد حرارتی کلکتور مطابق با استاندارد EN12975-2 به‌طور مفصل در مراجع [22] و [32] آمده است، در این مقاله تنها توضیح مختصری درباره این موارد ارائه می‌شود.

2-1- نانوسیال و خواص آن

نانوذره‌ی نقره با پوشش پلی‌وینیل‌پیرولیدین² با مشخصات "جدول 1" تهیه و با سیال پایه که در این پژوهش آب دیونیزه بوده است، در سه غلظت ppm 250، 500 و 1000 (به ترتیب Ag1، Ag2، و Ag3) آزمایش شد؛ برای آماده‌سازی نمونه‌ها، هر نمونه به مدت 60 دقیقه در دستگاه هم‌زن فراصوتی میله‌ای هایسلر مدل UP400S قرار گرفت. برای جلوگیری از بالا رفتن دما و تاثیر منفی آن بر پایداری نانوسیال، در هر 20 دقیقه، 2 دقیقه دستگاه را خاموش کرده تا نانوسیال بتواند انرژی دریافتی را دفع نماید.

¹ RSM

² Polyvinylpyrrolidone (PVP)

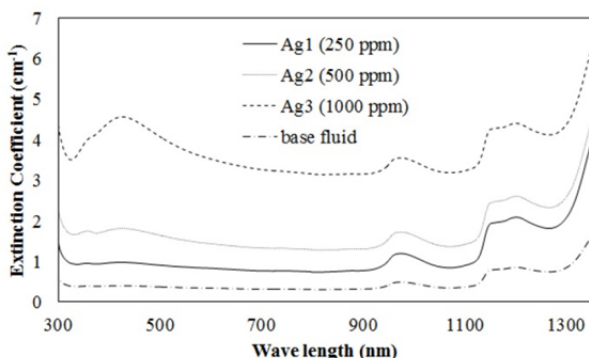


Fig. 2 Extinction coefficient of nanofluids at different wavelengths

شکل 2 ضریب میرایی نانو سیال‌های نمونه در طول موج‌های مختلف

است. دستگاه آزمون عملکرد کلکتور خورشیدی در محیط بیرون مطابق با استاندارد EN 12975-2 در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی واقع در شهر تهران (35.6961°N, 51.4231°E) طراحی، ساخته و نصب شده است. براساس استاندارد، زاویه نصب کلکتور برابر با عرض جغرافیایی شهر تهران، 35° است. در این زاویه شار دریافتی توسط کلکتور بیشینه خواهد بود. در این پژوهش، عملکرد کلکتور با استفاده از نانوسیال نقره با پوشش PVP در سه غلظت 250 ppm، 500 ppm و 1000 ppm (به ترتیب Ag1، Ag2 و Ag3) و سه دبی 0.0075 kg/s، 0.015 kg/s و 0.0225 kg/s مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با استاندارد EN 12975-2، دبی سیال عامل برای آزمون باید حداقل 0.02 kg/s برای هر مترمربع کلکتور باشد که برای ابعاد کلکتور این تحقیق، تقریباً برابر با 0.0075 kg/s است. برای بررسی تاثیر دبی بر عملکرد کلکتور، دو دبی بالاتر از این مقدار حداقل نیز برای آزمون انتخاب گردید. شرح چگونگی انجام آزمون و شرایط مورد نیاز برای انجام آزمایشات به طور کامل در مقاله کرمی و همکاران آورده شده است [22].

به‌طور خلاصه، روش آزمون بدین صورت است که ابتدا کلکتور با استفاده از یک پوشش بازتابنده (فویل آلومینیومی) و پتر سایبان در مقابل تابش خورشید محافظت می‌شود تا شرایط پایا حاصل و دمای ورود و خروج یکسان شود، سپس پوشش به سرعت از روی کلکتور برداشته می‌شود و اندازه‌گیری‌ها تا رسیدن به شرایط پایای ثانویه ادامه می‌یابد. شرایط پایا زمانی حاصل می‌شود که هیچ‌یک از مشخصه‌های اندازه‌گیری‌شونده از مقدار متوسط خود در مدت زمان اندازه‌گیری بیشتر از مقادیر جدول 2 تجاوز نکند. به بیان دیگر، برای این که شرایط پایا وجود داشته باشد، مقادیر متوسط هر مشخصه که در بازه 30 ثانیه‌ای گرفته می‌شود، باید با مقدار متوسط در طول مدت زمان اندازه‌گیری مقایسه شود.

جدول 2 پارامترهای مختلف جهت دستیابی به شرایط پایا [32]

مقدار	متغیر
700	حداقل تابش خورشید جهت انجام تست (W / m ²)
±50	تغییرات تابش عمود بر سطح (W / m ²)
±1.5	تغییرات دمای محیط (K)
±1%	تغییرات دبی حجمی جریان
±0.1	تغییرات دمای سیال ورودی (K)
±0.1	تغییرات دمای سیال خروجی (K)
2-4	سرعت پاد (m/s)

هدایت حرارتی در سیستم‌های گرمایی باعث شد تا در این تحقیق از روش تجربی سیم داغ گذرا برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال استفاده شود. این کار توسط دستگاه ک. د. پرو¹ شرکت سازنده دکاگن استفاده گردیده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی ضریب هدایت حرارتی، در "شکل 1" نشان داده شده است. از آن‌جا که ذرات نانو در مقایسه با ذرات میکرو و ذرات بزرگتر دیگر، سطح تماس بسیار بیشتری دارند، فزونی سطح تماس موجب افزایش سطح موثر انتقال گرما می‌گردد؛ این موضوع در "شکل 1" نشان داده شده است. با افزایش غلظت، میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی در دماهای بالا نسبت به دماهای پایین بارزتر است. علت این موضوع افزایش توام ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و خود نانوذرات می‌باشد. بنابراین افزایش غلظت نانوسیال، با افزایش در میزان هدایت گرمایی نانوسیال همراه خواهد بود.

با توجه به اهمیت ضریب میرایی در کلکتورهای جذب مستقیم، به عنوان معیاری برای قدرت جذب انرژی تابشی توسط سیال عامل، این ضریب به طور تجربی اندازه‌گیری شد. جزئیات روش اندازه‌گیری ضریب میرایی نانوسیال‌ها در مرجع [23] آمده است. ضریب میرایی سیال پایه و نانوسیال با غلظت‌های مختلف در "شکل 2" نشان داده شده است. مطابق با نتایج حاصله، نانو ذرات نقره با پوشش پلی‌وینیل‌پیرولیدین با غلظت 1000 ppm در بیشترین حالت موجب افزایش ضریب میرایی سیال پایه تا 6.24 بر سانتی‌متر می‌شود. مطابق با آزمایش عبور انجام شده، نانوسیال با غلظت 1000 ppm تقریباً تمام نور تابیده شده را جذب می‌کند و میزان عبور آن برابر با صفر است. بنابراین غلظت 1000 ppm به‌عنوان بیشترین غلظت و برای بررسی تاثیر غلظت نانوسیال بر عملکرد کلکتور، دو غلظت پایین‌تر از این مقدار نیز برای آزمون انتخاب گردید. نکته‌ای که در شکل مشخص است، افزایش توان جذب انرژی تابشی نانوسیال با افزایش غلظت نانوسیال است. در واقع با اضافه شدن نانوذرات به سیال پایه، میزان عبور نور کاهش یافته و با توجه به تیره بودن ذرات، جذب نور افزایش می‌یابد. در "شکل 2" مشاهده می‌شود که در بعضی از طول موج‌ها ضریب میرایی نانوسیال نقره با پوشش PVP با غلظت 1000 ppm، نسبت به سیال پایه 7 برابر می‌شود. می‌توان گفت که نانوسیال نقره با پوشش PVP می‌تواند نقش مهمی در افزایش بازده جذب انرژی تشعشعی ایفا کند.

2-2- آزمون عملکرد کلکتور در محیط بیرون

در "شکل 3" طرحواره سیکل آزمون و تصویر دستگاه آزمون قابل مشاهده

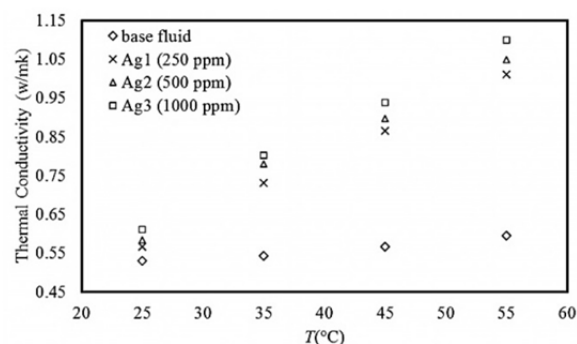


Fig. 1 Variations of thermal conductivity by temperature

شکل 1 تغییرات ضریب هدایت حرارتی با دما

¹ KD Pro

با دمای محیط برابر بوده و اتلافات حرارتی ناچیز باشد. همچنین مقدار شیب این نمودار برابر با ضریب a_1 است که مطابق با استاندارد این ضریب نشان دهنده ضریب اتلافات حرارتی کلی کلکتور می باشد. ضریب a_2 نیز نشان دهنده ضریب وابستگی اتلافات حرارتی به دما است که اگر این ضریب منفی باشد، بایستی از مدل درجه یک و خطی استفاده نمود [32]. بدین ترتیب، بازده کلکتور با استفاده از پارامترهای اندازه گیری شده در هر آزمون، محاسبه می شود.

برای ارائه رابطه تجربی برای بازده کلکتور با استفاده از داده های تجربی، باید توجه شود که عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم متأثر از پارامترهای زیادی است. این پارامترها عبارتند از خواص ترموفیزیکی و تابشی سیال عامل (چگالی، ویسکوزیته، ظرفیت گرمایی، ضریب هدایت حرارتی و ضریب میرایی)، خواص جریان (دبی)، خواص هندسی (سطح مقطع و عمق کلکتور)، شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت کلی، اختلاف دمای سیال عامل در ورود و خروج کلکتور و اختلاف دمای سیال عامل و دمای محیط. در این مقاله، برای بررسی تاثیر پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم، از روش تحلیل ابعادی استفاده شده است. فرض می شود که رابطه ی بین پارامترها به صورت (رابطه 7) باشد و تابع f بایستی به کمک نتایج تجربی تعیین شود. نکته ی قابل ذکر این است که مقدار ضریب میرایی میانگین مقادیر در طول موج های اندازه گیری شده می باشد.

$$f(\mu, C_p, \dot{m}, G, A, Ke, U, \Delta T_i, \Delta T_o, h) = 0 \quad (7)$$

گروه های بی بعد حاکم بر مساله به کمک تئوری پای باکینگهام به شکل "جدول 3" به دست می آید. در (رابطه 7)، دبی جریان در کلکتور، G شار حرارتی خورشید، A سطح کلکتور، Ke ضریب میرایی سیال عامل، μ ویسکوزیته سیال عامل، C_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال عامل، U ضریب انتقال حرارت کلی، ΔT_i اختلاف دمای سیال عامل در ورود به کلکتور و دمای محیط، ΔT_o اختلاف دمای خروجی سیال عامل و دمای ورودی آن و h عمق کلکتور می باشد.

2-2- تحلیل انرژی

در حالت کلی و برای هر سیستم با جریان پایا، موازنه انرژی از (رابطه 8) به دست می آید [29]:

$$\dot{E}x_{dest} = \dot{E}x_{heat} - \dot{E}x_{work} + \dot{E}x_{mass,in} - \dot{E}x_{mass,out} \quad (8)$$

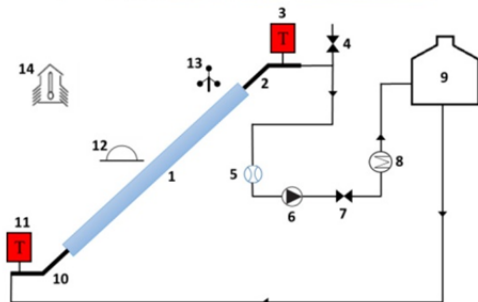
پارامتر $\dot{E}x_{dest}$ مربوط به اتلاف انرژی ناشی از برگشت ناپذیری سیستم یا همان انرژی نابود شده و عبارات سمت راست مربوط به انتقال خالص انرژی توسط گرما، کار و جرم به سیستم است. انتقال انرژی از طریق گرما به کلکتور از (رابطه 9) محاسبه می شود [28].

$$\dot{E}x_{heat} = \eta_{opt} GA \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_s} \right) + UA(T_m - T_{amb}) \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_m} \right) \quad (9)$$

جدول 3 گروه های بی بعد حاکم بر مساله

Table 3 Non-dimensional groups of problem

گروه بی بعد	توضیح
$\eta = \frac{\dot{m} C_p \Delta T_o}{GA}$	بازده کلکتور خورشیدی جذب مستقیم
$N_A = Ke \cdot H$	عدد جذب انرژی تابشی
$Re = \frac{\dot{m}}{\mu \sqrt{A}}$	عدد رینولدز جریان
$N_{Lr} = \frac{U \Delta T_i}{G}$	عدد تلفات کلکتور



1-Collector, 2-Insulated pipe, 3-Temperature sensor, 4-Air vent, 5-Flowmeter, 6-Pump, 7-Flow control valve, 8-Heater/Cooler for primary temperature control, 9-Expansion Tank, 10-Insulated pipe, 11-Temperature sensor, 12-Pyranometer.

Fig. 3 Schematic of the standard test loop and image of the experimental setup DASC outdoor performance test [22]

شکل 3 طرحواره سیکل آزمون و تصویر دستگاه آزمون کلکتور خورشیدی جذب مستقیم در محیط بیرون

3- تحلیل انرژی و انرژی

به کمک تحلیل انرژی و انرژی کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم، پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد کلکتور مشخص شده و تاثیر هر پارامتر بر افزایش یا کاهش بازده تعیین می گردد. بنابراین می توان راه کارهای افزایش بازده را تعیین نموده و با مشخص شدن پارامترهایی که منجر به افت بازده می شوند، تاثیر آن ها را حتی الامکان کاهش داد.

1-1- تحلیل انرژی

انرژی ورودی به کلکتور خورشیدی، مقدار شار حرارتی است که به سطح کلکتور می تابد. بازده حرارتی کلکتور خورشیدی مطابق با (رابطه 4) به دست می آید [32].

$$\eta = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})}{AG} \quad (4)$$

در (رابطه 4)، $\dot{m}$ دبی کلکتور، c_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال عامل، A سطح مقطع کلکتور و G شار حرارتی برخوردی به سطح کلکتور است. مطابق با استاندارد EN12975-2، بازده حرارتی لحظه ای کلکتور به کمک (رابطه 5) محاسبه می شود. در این رابطه T^* اختلاف دمای کاهش یافته است که مقدار آن از (رابطه 6) به دست می آید [32]:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T^* - a_2 G (T^*)^2 \quad (5)$$

$$T^* = \frac{T_m - T_{amb}}{G} \quad (6)$$

در (رابطه 6) T_m میانگین دمای ورودی و خروجی کلکتور است. اگر نمودار بازده لحظه ای نسبت به T^* رسم شود، مقدار عرض از مبدا نمودار برابر با η_0 خواهد بود. این مقدار زمانی به دست می آید که دمای سیال ورودی به کلکتور

بیشتر بوده و در مجموع بازده افزایش بیشتری می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت نانوسیال ضریب هدایت حرارتی سیال عامل بیشتر شده و با افزایش این ضریب مقدار ضریب انتقال حرارت کلی افزایش یافته و این امر باعث ازدیاد اتلافات حرارتی ناشی از اختلاف دمای سیال عامل و دمای محیط می‌شود.

افزایش دبی دو اثر منفی و مثبت بر بازده کلکتور می‌گذارد. اثر منفی این است که با بیشتر شدن دبی سیال عامل، عدد رینولدز جریان بیشتر شده و این موضوع باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و در نتیجه، افزایش ضریب انتقال حرارت کلی و افزایش تلفات حرارتی می‌شود؛ اما اثر مثبت به این نکته برمی‌گردد که با افزایش دبی، دمای سیال در کلکتور کمتر افزایش پیدا کرده و اتلاف حرارتی کمتری با محیط اطراف خواهد داشت. از آن‌جا که

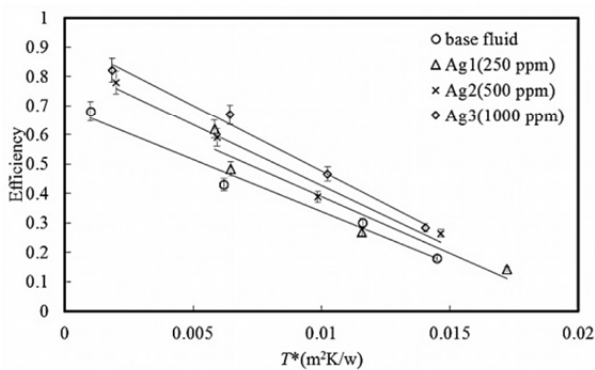


Fig. 4 Effect of nanofluid concentration on collector efficiency at 0.0225 kg/s flow rate

شکل 4 تاثیر غلظت نانوسیال بر بازده کلکتور در دبی 0.0225 kg/s

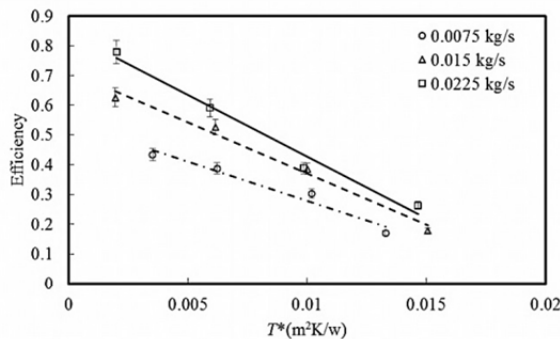


Fig. 5 Efficiency curve for Ag2 for different flow rates

شکل 5 منحنی بازده کلکتور برای نانوسیال Ag2 در دبی‌های مختلف

جدول 4 نتایج آزمایشات در دبی و غلظت‌های مختلف

Table 4 Test results for different flowrate and nanofluid concentration

دبی سیال عامل در کلکتور (kg/s)						سیال عامل
0.015			0.0075			
R^2	a_1	η_0	R^2	a_1	η_0	
0.983	31.4	0.1	0.988	27.5	0.5	سیال پایه
0.992	34.1	0.67	0.999	26.7	0.53	نانوسیال با غلظت 250 ppm
0.986	34.5	0.71	0.959	26.9	0.54	نانوسیال با غلظت 500 ppm
0.968	33.2	0.73	0.962	27.1	0.58	نانوسیال با غلظت 1000 ppm

T_m دمای میانگین سیال عامل داخل کلکتور است. T_s دمای ظاهری خورشید است که برابر با 0.75 دمای واقعی خورشید به عنوان یک جسم سیاه است و مقدار تقریبی آن برابر با 4350 K می‌باشد. η_{opt} ضریب بازده ایتیکی و نشان‌دهنده درصدی از انرژی خورشیدی کل است که به سیال جذب می‌رسد که در این تحقیق، برابر با 0.84 می‌باشد [28].

$\dot{E}_{work}$ در کلکتور بیانگر انرژی ناپود شده به دلیل افت فشار ایجاد شده بوسیله لزجت سیال است که باید توسط پمپ جبران شود، از (رابطه 10) محاسبه می‌شود [28]:

$$\dot{E}_{work} = T_{amb} \frac{\dot{m} \Delta P \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{amb}} \right)}{\rho_{nf} T_{out} - T_{in}} \quad (10)$$

انرژی جریان‌های ورودی و خروجی به ترتیب با (رابطه 11) تعیین می‌شود. در (رابطه 11) پارامترهای h و s انتالپی و انترپی بوده و زیرنویس‌های out , in , amb و h به ترتیب مربوط به ورودی، خروجی و محیط اشاره دارند.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x_{mass,in}} &= m[(h_{in} - h_{amb}) - T_{amb}(s_{in} - s_{amb})] \\ \dot{E}_{x_{mass,out}} &= m[(h_{out} - h_{amb}) - T_{amb}(s_{out} - s_{amb})] \end{aligned} \quad (11)$$

در نهایت انرژی ناپود شده در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم، از (رابطه 12) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x_{dest}} &= \eta_0 GA \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}} \right) - \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \\ &\quad + \dot{m} C_p T_{amb} \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right) \\ &\quad + UA \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_m} \right) \left(\frac{T_m}{T_{amb}} - 1 \right) \\ &\quad + T_{amb} \frac{\dot{m} \Delta P \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{amb}} \right)}{\rho_{nf} T_{out} - T_{in}} \end{aligned} \quad (12)$$

افت فشار در کلکتور را می‌توان به کمک معادله‌ی انرژی به دست آورد که مقدار آن مطابق با (رابطه 18) به دست می‌آید [28].

$$\Delta P = \rho_{nf} g (L \sin \beta + h_L) \quad (13)$$

$$h_L = \frac{2 \dot{m}}{\rho_{nf} g A^2} \left(f \frac{L}{D_h} + \sum K_L \right) \quad (14)$$

در (رابطه 13)، β زاویه‌ی کلکتور با سطح افق، L طول کلکتور و h_L افت هد کل است. پارامترهای D_h ، f و K_L به ترتیب ضخامت کلکتور، ضریب اصطکاک و ضریب تلفات موضعی هستند. ضریب اصطکاک در رژیم جریان آرام به کمک (رابطه 15) به دست می‌آید. K_L نیز در ورودی کلکتور برابر با 1 و در خروجی کلکتور برابر با 1.5 می‌باشد.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (15)$$

در نهایت با مشخص شدن مقدار انرژی ناپود شده، بازده انرژی به کمک (رابطه 16) محاسبه می‌شود [29].

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\dot{E}_{x_{dest}}}{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right) \eta_0 GA} \quad (16)$$

4- بحث و نتایج

نتایج آزمون‌های عملکرد کلکتور در محیط بیرون، برای سیال پایه و نانوسیال در غلظت‌های مختلف در سه دبی آزمایش شده، در "شکل‌های 4 و 5" نشان داده شده است. با توجه به نتایج، در دبی 0.0225 kg/s، مقدار بیشینه‌ی بازده انرژی کلکتور برای سیال پایه و نانوسیال‌های Ag1، Ag2 و Ag3 به ترتیب برابر با 69، 77، 84 و 92 درصد می‌باشد. مقادیر بازده بیشینه (η_0) و ضریب اتلافات حرارتی کلی (a_1) برای دو دبی 0.0075 kg/s و 0.015 kg/s در "جدول 4" آمده است.

در دبی ثابت، هر چه نانوسیال غلیظ‌تر باشد، میزان جذب انرژی خورشید

با توجه به آزمایشات انجام شده و به کمک (رابطه 16)، بازده آگزری کلکتور خورشیدی جذب مستقیم محاسبه می‌شود. تغییرات بازده آگزری با اختلاف دمای کاهش یافته در "شکل 7" مشاهده می‌گردد. در توضیح روند تغییرات می‌توان اشاره کرد که با افزایش دمای ورودی به کلکتور، تلفات حرارتی به محیط بیرون (جمله سوم (رابطه 12)) افزایش می‌یابد؛ ضمن این که بالا رفتن دمای ورودی به کاهش اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال به کلکتور شده و جمله دوم (رابطه 12) نیز کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش دما باعث کاهش لزجت نانوسیال شده و به کاهش افت فشار (جمله آخر (رابطه 12)) منجر می‌گردد. تعامل بین این موارد، روندی صعودی- نزولی را برای منحنی بازده آگزری با اختلاف دمای کاهش یافته را ایجاد می‌کند. این روند نشان- دهنده این است که دماهای ورودی بالا و پایین به کلکتور، هر دو منجر به اتلاف آگزری در کلکتور می‌شود. نقطه بهینه نمودار برای دبی‌های مختلف، حدود $0.01 \text{ m}^2\text{K/W}$ است.

تأثیر تغییر غلظت نانوسیال بر بازده آگزری در "شکل 8" نشان داده شده است. با افزایش غلظت نانوسیال، قدرت جذب انرژی تابشی سیال بیشتر شده و این موضوع منجر به افزایش دمای خروجی کلکتور می‌گردد. با افزایش دمای خروجی کلکتور، جمله دوم (رابطه 12) (انرژی مفید خروجی از کلکتور) بیشتر شده و آگزری ناپذیر شده کاهش و در نتیجه، بازده آگزری افزایش می‌یابد. از طرفی، افزایش اختلاف دمای سیال با دمای محیط، اتلافات حرارتی و در نتیجه آگزری ناپذیر شده را افزایش می‌دهد. در غلظت‌های پایین برآیند کاهش می‌یابد. بنابراین، همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، نقطه بهینه

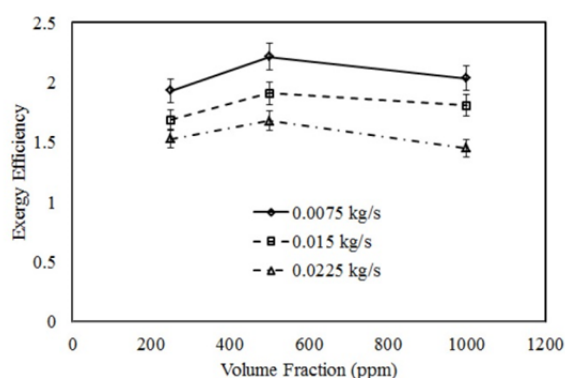


Fig. 7 Effect of nanofluid concentration on collector exergy efficiency at 0.015 kg/s flow rate

شکل 7 تأثیر غلظت نانوسیال بر بازده آگزری کلکتور در دبی 0.015 kg/s

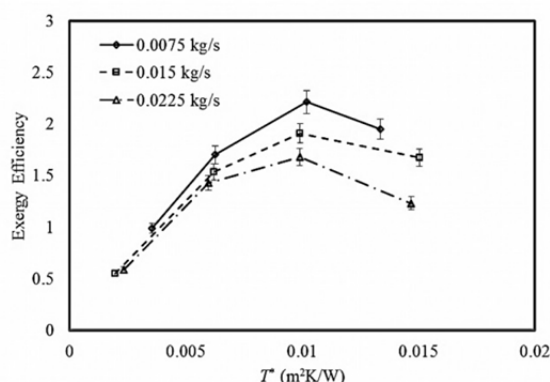


Fig. 8 Exergy efficiency curve for Ag2 for different flow rates

شکل 8 منحنی بازده آگزری در دبی‌های مختلف برای نانوسیال Ag2

رابطه‌ای افت حرارتی با اختلاف دما به صورت مستقیم و با ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به صورت غیرمستقیم است، می‌توان گفت که با افزایش دبی بازده کلکتور افزایش پیدا می‌کند.

به کمک نتایج حاصل از آزمون کلکتور خورشیدی با نانوسیال نقره با پوشش PVP، در شرایط مختلف آزمایش، هر کدام از اعداد بی‌بعد محاسبه گردید. به منظور بررسی دقیق‌تر و مشخص شدن رابطه‌ی اعداد بی‌بعد با یکدیگر، از رگرسیون خطی استفاده شد و بازده انرژی کلکتور به صورت تابعی از دیگر پارامترها به شکل (رابطه 17) به دست آمد.

$$\eta = 0.105 + 0.0665 (N_A) + 0.013 (Re) - 1.043 (N_L) \\ R^2 = 0.979$$

(17)

(رابطه 17) برای محدوده‌ی $0 \leq N_L \leq 1$ و $1 \leq N_A \leq 6$ ، $20 < Re < 200$ صادق می‌باشد. با دقت در (رابطه 17) می‌توان تأثیر کیفی پارامترهای موثر را تعیین نمود؛ رابطه‌ی بازده با ضریب میرایی، دبی و ضخامت کلکتور مستقیم بوده و با افزایش این پارامترها بازده افزایش خواهد یافت. به جهت بررسی دقیق‌تر صحت رابطه‌ی به دست آمده، نتایج با دو کار پژوهشی دیگر مقایسه شد. کرمی و همکاران [22] و همچنین دلفانی و همکاران [24]، در پژوهش مشابهی، به بررسی عملکرد کلکتور خورشیدی با استفاده از نانوسیال اکسید مس و نانولوله کربنی پرداختند. با محاسبه‌ی اعداد بی‌بعد هر کدام، بازده کلکتور به کمک (رابطه 17) محاسبه و با مقدار تجربی به دست آمده مقایسه شد. نتیجه‌ی این مقایسه در "شکل 6" مشخص شده است. در این نمودار، محور افقی مقادیر بازده کلکتور خورشیدی حاصل از نتایج تجربی و محور عمودی، مقادیر متناظر بازده کلکتور حاصل از (رابطه 17) می‌باشد. شیب خط برازشی که از میان داده‌ها رسم می‌شود، هر چه به عدد 1 نزدیک‌تر باشد، دقت نتایج بیشتر خواهد بود. برای "شکل 6"، شیب خط عبور داده شده از داده‌ها برابر با 1.0696 می‌باشد. اختلاف کم بین عدد به دست آمده و عدد 1 نشان از دقت رابطه‌ی به دست آمده دارد.

با توضیحات داده شده و همچنین مشخصات منحنی عبور داده شده از میان داده‌های "شکل 6"، می‌توان نتیجه گرفت که (رابطه 17) با تقریبی قابل قبول پاسخ صحیحی ارائه می‌دهد. این رابطه تمامی پارامترهای موثر بر عملکرد کلکتور خورشیدی را در بر گرفته و تأثیر هر کدام را پیش بینی می‌کند، که این موضوع ارزش این رابطه را بیشتر می‌نماید. با داشتن اطلاعات جغرافیایی منطقه، شرایط کارکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم و خواص سیال عامل، می‌توان بازده کلکتور خورشیدی جذب مستقیم را تحت هر شرایطی محاسبه نمود.

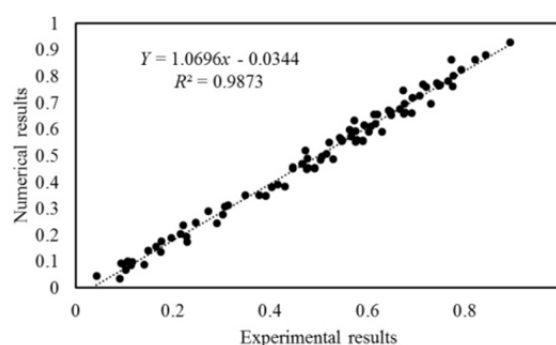


Fig. 6 Comparing collector efficiency calculated by empirical correlation and experimental results

شکل 6 مقایسه بازده کلکتور به دست آمده از رابطه تجربی و نتایج آزمایشات

P	فشار (Pa)
s	انتروپی (J/K)
T	دما (K)
U	ضریب انتقال حرارت کلی ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
علامه یونانی	
τ	عبور
ρ	چگالی (kgm^{-3})
λ	طول موج (nm)
ν	سرعت (ms^{-1})
η	بازده
μ	ویسکوزیته دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
φ	عرض جغرافیایی
زیرنویس‌ها	
a	جذب
amb	محیط
bf	سیال پایه
dest	ناپود شده
e	میرایی
f	سیال
h	هیدرولیکی
in	ورودی
l	نشت
out	خروجی
opt	اپتیکی
nf	نانوسیال
np	نانوذره

7- مراجع

- [1] Sh. Delfani, M. Karami, M. A. Akhavan-Behabadi, Experimental investigation on performance comparison of nanofluid-based direct absorption and flat plate solar collectors, *International Journal of Nano Dimension*, Vol. 7, No. 1, pp. 85, 2016.
- [2] J. E. Minardi, H. N. Chuang, Performance of a "black" liquid flat-plate solar collector, *Solar Energy*, Vol. 17, No. 3, pp. 179-183, 1975.
- [3] M. Abdelrahman, P. Fumeaux, P. Suter, Study of solid-gas-suspensions used for direct absorption of concentrated solar radiation, *Solar Energy*, Vol. 22, No. 1, pp. 45-48, 1979.
- [4] M. J. Muhammad, I. A. Muhammad, N. A. C. Sidik, M. N. A. W. M. Yazid, R. Mamat, G. Najafi, The use of nanofluids for enhancing the thermal performance of stationary solar collectors: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 63, No. 11, pp. 226-236, 2016.
- [5] V. Trisaksri, S. Wongwises, Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 11, No. 3, pp. 512-523, 2007.
- [6] W. Daungthongsuk, S. Wongwises, A critical review of convective heat transfer of nanofluids, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 11, No. 5, pp. 797-817, 2007.
- [7] L. Godson, B. Raja, D. M. Lal, S. Wongwises, Enhancement of heat transfer using nanofluids—an overview, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 14, No. 2, pp. 629-641, 2010.
- [8] M. Karami, M. A. Akhavan-Behabadi, Sh. Delfani, A. Ghosatloo, A new application of carbon nanotubes nanofluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 121, No. 2, pp. 114-118, 2014.
- [9] M. Karami, M. Raisee, Sh. Delfani, M. A. Akhavan-Behabadi, A. Rashidi, Sunlight absorbing potential of carbon nanoball water and ethylene glycol-based nanofluids, *Optics and Spectroscopy*, Vol. 115, No. 3, pp. 400-405, 2013.
- [10] M. Karami, M. A. Akhavan-Behabadi, M. R. Dehkordi, Sh. Delfani, Thermo-optical properties of copper oxide nanofluids for direct absorption of solar radiation, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 144, No. 1, pp. 136-142, 2016.

دو اثر گفته شده، به افزایش بازده اگزرژی و در غلظت‌های بالاتر، اثر افزایش تلفات حرارتی به افزایش انرژی مفید خروجی غلبه کرده و بازده اگزرژی ای برای غلظت نانوسیال وجود دارد که در این پژوهش، غلظت 500 ppm برای نانوسیال نقره و در همه دبی‌ها، از منظر اگزرژی بهینه می‌باشد.

همان‌طور که نتایج "شکل‌های 7 و 8" نشان می‌دهد با افزایش دبی، بازده اگزرژی کاهش می‌یابد. افزایش دبی به افزایش تلفات اگزرژی در اثر افت فشار منجر شده و این کاهش به حدی است که اثر افزایش انرژی مفید خروجی را تحت تاثیر قرار داده و اگزرژی ناپود شده افزایش می‌یابد.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد کلکتور جذب مستقیم نوع مسکونی با استفاده از نانوسیال نقره با پوشش پلی‌وینیل‌پیرولیدین از منظر انرژی و اگزرژی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش را می‌توان به شکل زیر طبقه‌بندی کرد:

- نانوسیال نقره با پوشش پلی‌وینیل‌پیرولیدین در سه غلظت متفاوت تهیه گردید و به کمک دستگاه زتاسایزر پایداری آن مورد سنجش قرار گرفت. همچنین ضریب میرایی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانوسیال، توان جذب انرژی تابشی و انتقال حرارت هدایتی سیال افزایش می‌یابد.
- در صورت به کارگیری نانوسیال به جای آب به عنوان سیال عامل، بازده کلکتور افزایش قابل توجهی خواهد داشت. با توجه به نتایج آزمایش مشخص شد که با افزایش غلظت و دبی سیال عامل، بازده حرارتی کلکتور افزایش می‌یابد که این افزایش روند مجانبی داشته و پیش بینی می‌شود که هم برای غلظت و هم برای دبی یک مقدار بهینه وجود داشته باشد. یک رابطه تجربی جامع برای بازده کلکتور براساس پارامترهای عملکردی آن ارائه شد.
- به کمک نتایج آزمایشات، بازده اگزرژی کلکتور نیز تعیین و مشخص گردید که با افزایش دبی، بازده اگزرژی به علت افزایش تلفات ناشی از افت فشار کاهش می‌یابد. روند تغییرات بازده اگزرژی با غلظت نانوسیال نشان می‌دهد که در غلظت بهینه 500 ppm بازده اگزرژی به بیشترین مقدار خود 2.2% میرسد.

6- فهرست علامه

a_1	ضریب اتلافات حرارتی (Wm^{-2}K)
a_2	ضریب وابستگی اتلافات حرارتی به دما ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$)
A	سطح مقطع کلکتور (m^2)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ($\text{KJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
D	قطر (m)
Ex	اگزرژی (J)
G	شار حرارتی (KWm^{-2})
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
H	ضخامت کلکتور (m)
k	ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
K_e	ضریب میرایی سیال (cm^{-1})
$\dot{m}$	دبی جرمی (kgs^{-1})

- volumetric solar collector for domestic hot water systems, *Solar Energy*, Vol. 131, No. 9, pp. 119-130, 2016.
- [24] Sh. Delfani, M. Karami, M.A. Akhavan-Behabadi, Performance characteristics of a residential-type direct absorption solar collector using MWCNT nanofluid, *Renewable Energy*, Vol. 87, No. 3, pp. 754-764, 2016.
- [25] A. K. Iranpour, M. Karami, Sh.Delfani, Numerical Investigations of the Influence of Effective Parameters on Efficiency of DASC with CuO-H₂O Nanofluid, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 7, No. 01, pp.91-100, 2017. (in Persian)
- [26] M. Karami, S. M. Hosseini Pakdel, Sh. Delfani, M. A. Akhavan-Behabadi, Application of Fe₃O₄/Silica hybrid nanofluid as working fluid of direct absorption solar collector, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 37-44, 2018. (in Persian)
- [27] M. Karami, B. Asghari, S. Delfani, M.A. Akhavan-Behabadi, Potential of nanodiamond/water nanofluid as working fluid of volumetric solar collectors, *Journal of Solar Energy Research*, Vol. 2, No.3, pp. 71-78, 2017.
- [28] S. S. Meibodi, A. Kianifar, O. Mahian, S. Wongwises, Second law analysis of a nanofluid-based solar collector using experimental data, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 126, No. 2, pp. 617-625, 2016.
- [29] T. B. Gorji, A. Ranjbar, A numerical and experimental investigation on the performance of a low-flux direct absorption solar collector (DASC) using graphite, magnetite and silver nanofluids, *Solar Energy*, Vol. 135, No. 13, pp. 493-505, 2016.
- [30] T. B. Gorji, A. Ranjbar, Thermal and exergy optimization of a nanofluid-based direct absorption solar collector, *Renewable Energy*, Vol. 106, No. 17, pp. 274-287, 2017.
- [31] M. Chen, Y. He, J. Zhu, D. Wen, Investigating the collector efficiency of silver nanofluids based direct absorption solar collectors, *Applied Energy*, Vol. 181, No. 21, pp. 65-74, 2016.
- [32] S. Fischer, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, B. Perers, P. Bergquist, B. Hellström, Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2, *Solar Energy*, Vol. 76, No. 1-3, pp. 117-123, 2004.
- [33] W. Yu, H. Xie, A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications, *Journal of nanomaterials*, Vol. 2012, No. 1, pp. 1, 2012.
- [34] B. C. Pak, Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998.
- [35] H. O'Hanley, J. Buongiorno, T. McKrell, L.-w. Hu, Measurement and model validation of nanofluid specific heat capacity with differential scanning calorimetry, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 181079, 2012.
- [36] G. Batchelor, The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles, *Journal of fluid mechanics*, Vol. 83, No. 1, pp. 97-117, 1977.
- [11] M. Vakili, S. Hosseinalipour, Sh. Delfani, S. Khosrojerdi, Photothermal properties of graphene nanoplatelets nanofluid for low-temperature direct absorption solar collectors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 152, No. 9, pp. 187-191, 2016.
- [12] M. Milanese, G. Colangelo, A. Creti, M. Lomascolo, F. Iacobazzi, A. De Risi, Optical absorption measurements of oxide nanoparticles for application as nanofluid in direct absorption solar power systems-Part II: ZnO, CeO₂, Fe₂O₃ nanoparticles behavior, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 147, No. 4, pp. 321-326, 2016.
- [13] H. Zhang, H.-J. Chen, X. Du, G. Lin, D. Wen, Dependence of photothermal conversion characteristics on different nanoparticle dispersions, *Journal of nanoscience and nanotechnology*, Vol. 15, No. 4, pp. 3055-3060, 2015.
- [14] S. Khashan, S. Dagher, S. Al Omari, N. Tit, E. Elnajjar, B. Mathew, A. Hilal-Alnaqbi, Photo-thermal characteristics of water-based Fe₃O₄@ SiO₂ nanofluid for solar-thermal applications, *Materials Research Express*, Vol. 4, No. 5, pp. 055701, 2017.
- [15] H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher, Predicted efficiency of a nanofluid-based direct absorption solar receiver, *proceeding of American Society of Mechanical Engineers*, California, USA, 27-30 July, 2007.
- [16] T. Otanicar, R. A. Taylor, P. E. Phelan, R. Prasher, Impact of size and scattering mode on the optimal solar absorbing nanofluid, *Proceedings of the ASME 3rd International Conference on Energy Sustainability*, ASME, San Francisco, California, USA, 19-23 July, 2009.
- [17] S. Parvin, R. Nasrin, M. Alim, Heat transfer and entropy generation through nanofluid filled direct absorption solar collector, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 71, No. 4, pp. 386-395, 2014.
- [18] S. Parvin, S. Ahmed, R. Chowdhury, Effect of solar irradiation on forced convective heat transfer through a nanofluid based direct absorption solar collector, in *Proceeding of AIP Publishing*, Vol. 1851, No. 1, pp. 26-27, 2017.
- [19] V. M. Mohan, A. Sajeeb, Improving the efficiency of DASC by adding CeO₂/CuO hybrid nanoparticles in water, *International Journal of Nanoscience*, Vol. 17, No. 01n02, pp. 1760011, 2018.
- [20] P. K. Das, A. K. Santra, R. Ganguly, Performance analysis of direct absorption solar collector using multiphase model, *Proceeding of 23rd National Heat and Mass Transfer Conference and 1st International ISHMT-ASTFE Heat and Mass Transfer Conference*, Thiruvananthapuram, India, 17-20 December, 2015.
- [21] H. K. Gupta, G. D. Agrawal, J. Mathur, An experimental investigation of a low temperature Al₂O₃-H₂O nanofluid based direct absorption solar collector, *Solar Energy*, Vol. 118, No. 8, pp. 390-396, 2015.
- [22] M. Karami, M. A. Akhavan-Behabadi, Sh. Delfani, M. Raisee, Experimental investigation of CuO nanofluid-based Direct Absorption Solar Collector for residential applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52, No. 12, pp. 793-801, 2015.
- [23] M. Vakili, S. Hosseinalipour, Sh. Delfani, S. Khosrojerdi, M. Karami, Experimental investigation of graphene nanoplatelets nanofluid-based