



بررسی تجربی تاثیر جریان ثانویه بر عملکرد کلکتور صفحه تخت خورشیدی با استفاده از نانوسیال

مجتبی مروج^{۱*}، فاطمه نامدارنیا^۲ و لیلا پرتابیان^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام‌نور

^۲ دانش‌آموخته، دانشگاه پیام‌نور

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر جریان ثانویه بر بازده کلکتور صفحه تخت، یک کلکتور دایروی با لوله‌های مارپیچ و یک کلکتور معمولی مستطیلی با هم و با شرایط یکسان ساخته شده و همزمان مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفته‌اند. ارزیابی بر اساس استاندارد ASHRAE و در جنوب ایران بوده است. آزمایشات بر اساس شرایط مختلف محیطی با استفاده از دو سیال عامل آب معمولی و نانوسیال اکسید روی/آب انجام شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که با تغییر در شرایط محیطی و همزمان با افزایش تابش و همچنین با افزایش دبی بازده هر دو کلکتور مستطیل و دایروی افزایش می‌یابد؛ ولی عملکرد کلکتور دایروی بهتر که دلیل اصلی آن تاثیر جریان ثانویه در افزایش انتقال حرارت از جدار لوله‌ها به سیال عامل است. علاوه بر این هنگام استفاده از نانوسیال به جای آب به عنوان سیال عامل، اگرچه بازده هر دو کلکتور افزایش می‌یابد که امری بدیهی و اثبات شده است، ولی تاثیر جریان ثانویه بر انتقال حرارت در استفاده از نانوسیال کاملاً چشمگیر بوده که به دلیل حرکات ذرات نانوسیال در سوسپانسیون این تاثیر مضاعف می‌شود؛ همچنین حداکثر بازده ثبت شده مربوط به کلکتور دایره‌ای با استفاده از نانوسیال و به میزان ۷۷٫۶٪ بوده است.

کلمات کلیدی: کلکتور صفحه تخت خورشیدی؛ لوله‌های مارپیچ؛ جریان ثانویه؛ نانوسیال؛ بازده.

Experimental Study of the Effect of Secondary Flow on the Efficiency of Solar Flat Plate Collector Applied Nanofluid

M. Moravej^{1,*}, F. Namdarnia², L. Partabian²

¹ Assisrnt Professor, Mech. Eng., Payame Noor Univ., Iran.

² Graduate in Payame Noor Univ., Iran.

Abstract

In this study in order to study the effect of secondary flow on the efficiency of solar collectors, a circular collector with helical tube and a regular collector is constructed and tested at the same time. The assessment was based on the ASHRAE standard and in southern Iran. Experiments were carried out based on different environmental conditions using normal water agent and zinc oxide/ water nanofluid. The results of this study show that with variation in ambient conditions as well as increasing the efficiency and increasing the efficiency of both the circular and rectangle flat plate solar collector performance, the main reason is the secondary flow effect on the enhancement of heat transfer from the tubes to the operating fluid. Also, while using nanofluid instead of water as a factor fluid, although the efficiency of both solar collector is increased, the secondary effect on heat transfer in the use of nanofluid is significantly enhanced due to the motion of particles particles in suspension. In addition, the maximum number of registered solar collector efficiency by using nanofluid was about 77.6% in circular collector.

Keywords: Flat Plate Solar Collector; Secondary Flow; Helical Tubes; Nanofluid; Efficiency.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۶۶۷۲۴۴۷۳؛ فکس: ۰۶۱۵۲۶۶۴۹۴۰

آدرس پست الکترونیک: moravej60@pnu.ac.ir

۱- مقدمه

کلکتورهای خورشیدی یکی از پرکاربردترین وسایل و تجهیزات خورشیدی محسوب می‌شوند که وظیفه انتقال حرارت از اشعه تابشی خورشید به سیال واسطه‌ای همچون آب یا هوا را دارند. معروفترین کلکتور خورشیدی، همان کلکتورها یا آبگرمکن‌های صفحه تخت خورشیدی است که از صفحات مسطح تشکیل شده و به صورت ثابت (بدون ردیابی) و براساس عرض جغرافیایی نصب می‌شوند. این آبگرمکن‌ها دارای راندمان بالایی نیستند و افزایش کارایی آنها یکی از موضوعات تحقیقی در این‌باره است. انتقال حرارت در کلکتورها درون لوله‌های حاوی سیال عامل انجام می‌شود. میزان این انتقال حرارت مستقیماً به بازدهی کلکتور ارتباط دارد و هرچه بیشتر شود، بازدهی بیشتر می‌شود. روش‌های متعددی تاکنون در سراسر دنیا برای افزایش کارایی آبگرمکن‌های خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته که تغییرات در صفحه جذب، پوشش شیشه‌ای، نوع سیال و حتی هندسه از محورهای تحقیق بوده است [۱-۷].

یکی از این روش‌ها استفاده از سیالات جدید ناقل حرارت به نام نانوسیال است که از سوسپانسیون ذرات ریز در مقیاس نانو و معمولاً فلزی با سیالات پایه همچون آب به دست می‌آید. از دیگر روش‌های متداول برای بالا بردن کارایی کلکتورهای خورشیدی می‌توان به تغییر در هندسه کلکتور اشاره کرد که اخیراً تحقیقاتی پیرامون تاثیر جریان ثانویه ناشی از هندسه‌های انحادار و لوله‌های پیچ‌دار انجام شده است.

در پژوهشی دیگر ایرانپور و همکاران [۱]، بررسی عددی تاثیر پارامترهای موثر بر بازده کلکتور خورشیدی را با استفاده از نانوسیال اکسیدمس-آب مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه ایشان پارامترهای مختلف چون ضخامت شیشه و ضخامت عایق ارزیابی شد و در نتایج مشخص گردید که با افزایش ضخامت شیشه بازده در کسری از ۳/۲۲ تا ۷/۳۶ درصد کاهش می‌یابد؛ همچنین افزایش ضخامت عایق در محدوده بین ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر باعث افزایش کارایی بین ۱/۵۳ تا ۲/۹۵ درصد می‌گردد.

یو و همکاران [۲] پژوهش نظری را روی انتقال حرارت در لوله‌های مارپیچ چند بار تابیده و تاثیر عدد رینولدز بر آن را انجام دادند. در این تحقیق ایشان مشابه عملکرد

کلکتورهای خورشیدی، میزان شار حرارتی از جداره‌ها ثابت، ولی عدد رینولدز در لوله‌ها متغیر بود. نتایج تحقیق نشان داد که افزایش عدد ناسلت و انتقال حرارت در لوله مارپیچ در مقایسه با لوله راست و مستقیم بیشتر بوده و همزمان با افزایش عدد رینولدز این رشد در انتقال حرارت و ضرایب آن بیشتر نیز می‌شود.

میرزایی [۸] به مطالعه تجربی تاثیر نانوسیال CuO و بررسی ویژگی‌های حرارتی کلکتور صفحه تخت پرداخت. وی نشان داد که با استفاده از این نانو سیال در دبی‌های 1lit/min, 2lit/min و 4lit/min افزایش کارایی کلکتور در مقایسه با آب خالص به ترتیب به میزان ۱۵/۲٪، ۱۷/۱٪ و ۵۵/۱٪ افزایش می‌یابد.

در تحقیقی دیگر نقره‌آبادی و همکاران [۹]، به بررسی استفاده از نانوسیال در کلکتور سه بعدی خورشیدی با هندسه مخروطی پرداختند و عملکرد حرارتی آن را با سیال پایه آب و نانوسیال سیلیس-آب مورد ارزیابی تجربی قرار دادند. نتایج بررسی ایشان نشان داد، در کلکتور مخروطی با لوله‌های مارپیچ به ویژه در دبی‌های بالا تفاوت محسوسی بین بازده کلکتور هنگام استفاده از نانوسیال در مقایسه با آب وجود دارد که دلیل اصلی آن را جریان ثانویه گزارش نمودند. یوسفی و همکاران [۱۰]، تحقیقی در خصوص اثر نانوسیال $Al_2O_3/water$ روی کلکتور صفحه تخت خورشیدی انجام دادند و از درصدهای مختلف غلظت وزنی از جمله ۲٪ و ۴٪ استفاده نموده و افزایش بالغ بر ۲۸/۳٪ در بازده حرارتی کلکتور برای حالت غلظت ۲٪ گزارش داد؛ همچنین این محققان مطالعه جامعی براساس غلظت‌های جرمی متعدد و نیز سایزهای مختلف نانو ذرات در نانو سیال H_2 انجام دادند که ضمن اشاره به افزایش چشمگیر هدایت حرارتی در نانو سیال پایه، دمای بدست آمده را مربوط به نانو سیال با سایز 1%wt, 25nm گزارش کردند که در مقایسه با آب تا ۲۴/۵۲٪ افزایش داشته است [۱۱].

صفاریان و همکاران [۱۲] تحقیق نظری جامعی در خصوص مدل‌های مختلف لوله‌های حاوی سیال عامل در کلکتورهای صفحه تخت انجام دادند. این تحقیق شامل هندسه‌های متفاوت برای لوله سیال عامل شامل، مدل‌های مارپیچ، موجی و رفت و برگشتی بود. ایشان همچنین سیالات مختلف از جمله آب، نانوسیالات اکسیدمس-آب و اکسید

۲- مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر جریان چرخشی و جریان ثانویه از لوله های مارپیچ و حلزونی شکل در یک کلکتور با هندسه جدید استفاده شده است. این کلکتور با هندسه دایره‌ای شکل و از نوع ثابت و صفحه تخت بوده که دارای لوله‌های مارپیچی از طرفین به سمت مرکز دایره نصب شده‌اند. کلکتور مذکور توسط مولفین طراحی و ساخته شده که در شکل ۱ نمایش داده شده است. همانگونه که در این شکل قابل مشاهده است، در کنار کلکتور دایره‌ای مارپیچ، یک کلکتور صفحه تخت با هندسه مرسوم چهارگوش مستطیلی، با همان شرایط و مواد ساخته شده و با موقعیت یکسان همزمان به جهت ارزیابی و مطالعه بهتر اثرات چرخشی تحت بررسی و آزمایش قرار گرفته است. جدول ۱ مشخصات فیزیکی و هندسی این کلکتورها را نمایش می‌دهد.

۲-۱- نحوه انجام آزمایش

چیدمان آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش و داده‌برداری به همراه نحوه قرار گرفتن کلکتورها در فرایند جذب تابش از خورشید و انتقال حرارت به سیال عامل در شکل ۲ ارایه گردیده است. در این شکل عدد ۱ معرف شیر قطع و وصل، شماره‌های ۲ و ۳ و ۴ ترموکوپل، شماره ۵ دستگاه ثبت داده، عدد ۶ مشخص کننده کلکتور، ۷ پمپ، ۸ دی‌سنج و ۹ شیر فشار شکن است. با توجه به شکل ۲ واضح است که سیال عامل



شکل ۱- کلکتورهای دایروی و مستطیلی مورد استفاده

آلومینیوم-آب با درصدهای مختلف و دبی‌های متفاوت را مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که نانوسیال اکسید مس-آب با غلظت ۴٪ وزنی، بیشترین افزایش انتقال حرارت را حتی تا ۷۸٪ در لوله موجی شکل دارد. از سوی دیگر با در نظر گرفتن افت فشار در حالات مختلف سیال و هندسه لوله، مناسب‌ترین هندسه را هندسه مارپیچ یا افزایش انتقال حرارت تا حدود ۴۴٪ معرفی نمود. گودرزی و همکاران [۱۳]، مطالعه را بر نوع خاصی از کلکتور ثابت سه بعدی با هندسه استوانه‌ای با لوله‌های مارپیچ انجام دادند. مطالعه ایشان به صورت تجربی و آزمایشگاهی انجام شد و نتایج تحقیق حاکی از افزایش بازده به دلیل شکل استوانه‌ای کلکتور و تاثیر حالت دورانی حرکت سیال و جریان ثانویه بود که با افزایش عدد رینولدز تاثیر آن بیشتر نیز می‌شد.

الشیخ و همکاران [۱۴] پژوهش جامعی روی کاربردهای نانوسیالات در کلکتورهای خورشیدی انجام دادند. در آن مطالعه، انواع و مدل‌های مختلف کلکتورهای خورشیدی که در آن‌ها نانوسیال به عنوان سیال پایه مورد آزمایش قرار گرفته بود، گزارش شد و مشخص گردید، بسته به نوع، غلظت، نوع سیال عامل و دیگر مشخصات نانوسیال میزان افزایش کارایی متفاوت خواهد بود؛ همچنین منباری و همکاران [۱۵] نیز به تحقیق روی استفاده از نانوسیال در کلکتور سهموی خورشیدی پرداختند. در بررسی آن‌ها از نانوسیال اکسیدمس-آب با اندازه حداکثری ۱۰۰ نانومتر برای نانوذرات و غلظت‌های کمتر از ۰/۰۰۸ درصد استفاده شد. نتایج تحقیق حاکی از افزایش بین ۱۸ تا ۵۲ درصدی کارایی هنگام استفاده از نانوسیال به جای آب بود.

در پژوهش حاضر، هدف بررسی اثرات جریان چرخشی و جریان ثانویه روی بازده کلکتورهای خورشیدی است که در تحقیقات پیشین به آن اشاره شده است. برای رسیدن به این منظور، از هندسه دایره به جای هندسه معمول کلکتورهای صفحه تخت استفاده می‌شود که بیشتر به صورت متوازی‌الاضلاع (مربع و مستطیل و دوزنقه) بوده است. به منظور افزایش بازده حرارتی از لوله‌های مارپیچ و بدون رایزر از طرفین تا مرکز دایره استفاده شده است. بررسی هم برای آب معمولی و هم نانوسیال صورت پذیرفته است.

جدول ۱- مشخصات کلکتورها

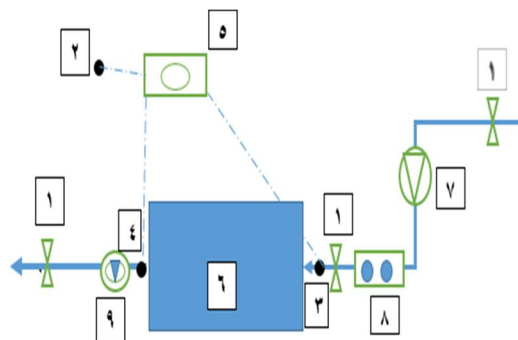
مشخصات	کلکتور دایره	کلکتور مستطیل	واحد
مساحت کلکتور	یک مترمربع	یک متر مربع	مترمربع
مساحت جاذب	۱	۱	مترمربع
ضخامت جدار شیشه‌ای	۶	۶	میلی‌متر
ضخامت جاذب	۱٫۵	۱٫۵	میلی‌متر
لوله‌های حاوی سیال	قطر خارجی ۶٫۲ ضخامت ۱٫۱	قطر خارجی ۶٫۲ ضخامت ۱٫۱	میلی‌متر
وزن کلکتور	۳۳	۳۱٫۳	کیلوگرم
ضخامت عایق زیرین	۲۰	۲۰	میلی‌متر

جدول ۲- شرایط استاندارد ASHRAE

پارامتر	استاندارد ASHRAE	واحد
دقت دمای سیال ورودی	± ۱	°C
دقت دمای سیال خروجی	± ۰٫۵	°C
اندازه‌گیری دمای هوای محیط	در ارتفاع ۱۲۰ سانتیمتری از زمین و با فاصله حداقل ۱/۵ متری از کلکتور	°C
دقت در اندازه‌گیری دمای محیط	± ۰٫۵	°C
دقت در اندازه‌گیری دبی سیال عامل	± ۱	%
دقت در اندازه‌گیری تابش خورشیدی	± ۵۰	W/m ²

جدول ۳- دستگاه‌های اندازه‌گیری

نام وسیله	کمیت اندازه‌گیری	دقت اندازه‌گیری	واحد
ترمومتر مدل	ثابت دما	۰٫۱	°C
روتامتر	دبی	۰٫۵	lit/min
بادسنج	باد	۰٫۱	m/s
سولارمتر	تابش خورشیدی	۱	W/m ²
ترموکوپل K	دما	۰٫۰۰۴	mV/°C



شکل ۲- چیدمان آزمایشگاهی ارزیابی عملکرد کلکتور

در حالت اولیه (سرد) پس از ورود به کلکتور با عبور از لوله‌های متصل به جاذب گرم شده و سیال گرم از کلکتور خارج می‌شود و این اساس ارزیابی عملکرد حرارتی کلکتور است. برای این ارزیابی از استاندارد ASHRAE استفاده شده که شرایط آن در جدول ۲ قابل مشاهده است. به منظور اندازه‌گیری داده‌های آزمایش وسایل اندازه‌گیری مختلف کاربرد داشته که مشخصات هر یک از آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. تمامی دستگاه‌های اندازه‌گیری قبل از شروع آزمایشات کالیبره بوده و پس از آزمایش در پایان روز جمع‌آوری و تمییزکاری شده و مجدداً روز بعد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای ارزیابی بهتر و جامع‌تر هردو کلکتور در بام ساختمان آموزشی دانشگاه و در شرایط یکسان با فاصله قریب ۲ متر از یکدیگر و در یک راستا قرار گرفته و داده‌ها همزمان ثبت شده‌اند. محل آزمایش در دانشگاه پیام‌نور شهرستان آغا‌جاری در جنوب ایران در ارتفاع ۱۳۱ متری از سطح دریا، با طول جغرافیایی ۳۰ درجه و ۶۹ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۴۹ درجه و ۸۲ دقیقه شرقی بوده است.

هر دو کلکتور در ساعات اولیه صبح تا عصر فعال بوده و داده برداری در ایام سال ۱۳۹۸ صورت گرفته است. به منظور ارزیابی دقیق‌تر و حذف داده‌های غیر دقیق، زمان ارائه شده در نتایج از ساعت ۹ الی ۱۶ است. سنجش عملکرد کلکتور بر اساس استاندارد ASHRAE بوده و کلکتورها پیوسته در معرض نور خورشید و جریان سیالی که توسط پمپ دیافراگرمی برقی تولید شده، قرار داشته‌اند و داده‌ها در شرایط پایدار و شبه پایدار ثبت شده است. آزمایشات نیز مرتب تکرار شده و در شرایط مختلف داده‌برداری صورت پذیرفته است.

۲-۲- ثابت زمانی کلکتور

یکی از ویژگی‌های خاص هر کلکتور خورشیدی زمانی است که به نوعی معرفی کننده میزان ظرفیت گرمایی کلکتورها و عملکرد کلکتور در شرایط گذرا بوده و معمولاً به دو روش‌های اندازه‌گیری می‌شود. یکی از روش‌های اندازه‌گیری به این صورت است که اگر یک کلکتور در حال کار باشد و بلافاصله یک حایل یا پارچه سیاه، تابش رسیده به کلکتور صفر شود، چه مدت زمانی طول می‌کشد که دمای سیال خروجی به ۶۳٪ دمای نهایی سیال برسد. رابطه (۱) برای محاسبه ثابت زمانی به کار می‌رود.

$$\frac{e}{T_{O,i} - T_i} = \frac{1}{T_{O,r} - T_i} \quad (1)$$

که در آن T_i دمای ورودی به کلکتور، $T_{O,i}$ دمای خروجی از کلکتور در حالت پایدار و $T_{O,r}$ دمای خروجی از کلکتور پس از زمان Γ است [۵-۹]. با عنایت به استاندارد ASHRAE میزان بازده کلکتور براساس میزان تابش و انرژی رسیده به کلکتور، اختلاف دمای بین ورودی و خروجی از کلکتور مشخصات حرارتی سیال عامل و نیز دبی سیال به دست می‌آید. در واقع می‌توان با در نظر گرفتن نسبت گرمایی به دست آمده از کلکتور توسط سیال عامل و حرارت و انرژی خورشیدی رسیده به آن میزان بازده را محاسبه نمود. انرژی مفید کسب شده توسط سیال عبوری از کلکتور عبارتست از [۱۶]:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

که در آن Q_u میزان انرژی به دست آمده از کلکتور، \dot{m} دبی جریان سیال عامل، C_p حرارت ویژه سیال عامل و T_{in} ، T_{out} به ترتیب دمای ورودی و خروجی سیال عامل هستند.

انرژی مفید کسب شده توسط کلکتور بر حسب مقدار تشعشع خورشیدی ورودی و تلفات حرارتی از بدنه کلکتور عبارت است از [۱۶]:

$$Q_u = A_p F_R [Rad - U_L(T_{in} - T_a)] \quad (3)$$

که در آن A_p سطح جاذب F_R ضریب برداشت حرارت، Rad میزان تابش خورشیدی، U_L ضریب افت کلی حرارت و T_a دمای محیط است. ضریب برداشت حرارت نیز بر اساس رابطه (۴) قابل تعریف است [۵ و ۱۶].

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{U_L A_p} [1 - \exp(-F' U_L A_p / \dot{m} C_p)] \quad (4)$$

که در آن F' ضریب کلکتور است. در حالت پایدار انرژی مفید دریافتی توسط کلکتور عبارتست از:

$$Q_u = A_p Rad - U_L A_p (T_p - T_a) \quad (5)$$

که در آن T_p دمای صفحه‌ی جاذب و U_L افت کلی از کلکتور است [۱۶]. حال به کمک داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری در هر ۱۵ دقیقه که شامل دمای آب ورودی و خروجی، دمای محیط و شدت تابش دریافتی است و جایگذاری در رابطه (۶) بازده کلکتور محاسبه می‌شود. عوامل تاثیرگذار بر میزان بازده شامل، دبی جرمی، تفاضل دمای آب خروجی و ورودی و شدت تابش دریافتی کل است که در اینجا به تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود [۲۴].

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c Rad} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{Rad} \quad (6)$$

$$\eta_i = F_R (\tau \alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{Rad} \right) \quad (7)$$

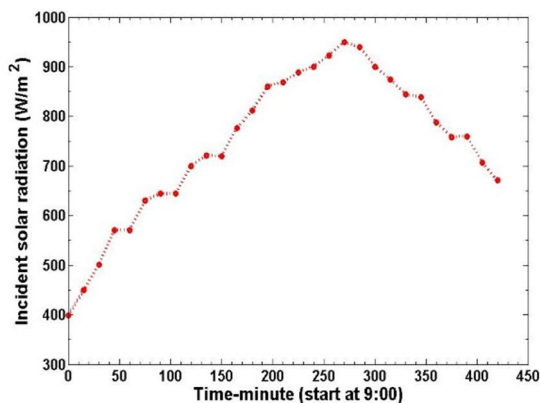
بر اساس معادله (۵)، اگر مقادیر بازده به صورت تابع و بر اساس متغیر $\left(\frac{T_i - T_a}{Rad} \right)$ ترسیم شود، منحنی به دست آمده شامل یک خط بوده که محل تقاطع آن با محور عمودی مقدار $F_R (\tau \alpha)$ بوده و این مقدار نشان دهنده بیشینه بازده گردآور است و هنگامی اتفاق می‌افتد که دمای سیال ورودی به گردآور معادل دمای محیط باشد. محل تقاطع این خط با محور افقی نقطه سکون گردآور نام دارد که در آن بازده گردآور به صفر می‌رسد و وقتی رخ می‌دهد که میزان دبی صفر شود. شیب خط مورد نظر نیز برابر $F_R U_L$ است که معرف میزان تلفات انرژی از گردآور خورشیدی است.

۲-۳- آنالیز عدم قطعیت

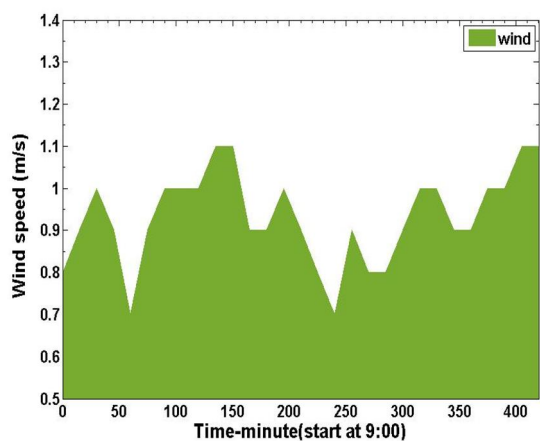
وجود خطا در همه اندازه‌گیری‌ها در آزمایشات امری اجتناب ناپذیر است. انواع خطاهای موجود در محاسبات و اندازه‌گیری در مطالعه حاضر شامل، خطای کالیبراسیون دستگاه‌ها، قرائت چشمی ارقام و همچنین نوع دستگاه‌های به کار رفته است. خطای داده‌ها شامل اندازه‌گیری دما، دبی و تابش خورشیدی است. برای محاسبه عدم قطعیت در آزمایشات انجام شده از روش RSSM (ROOT SUM SQUARE METHOD) استفاده شده که در رابطه ۸ ارائه گردیده است.

$$S = \sqrt{\left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta u_2}{u_2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta u_3}{u} \right)^2 + \dots} \quad (8)$$

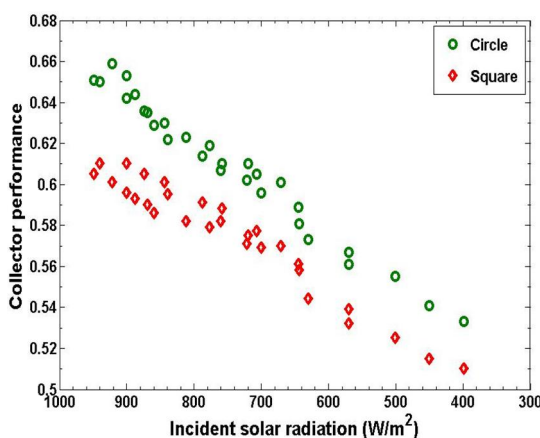
لذا برای تحقیق حاضر با توجه به رابطه ۶ می‌توان نوشت:



شکل ۳- اندازه‌گیری تابش خورشیدی در یکی از روزهای آزمایش کلکتور



شکل ۴- اندازه‌گیری میزان سرعت باد در محل آزمایش کلکتور



شکل ۵- بررسی عملکرد کلکتورهای دایروی و مستطیلی بر اساس معیار تابش رسیده به کلکتور

$$S_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta DT}{DT}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Rad}{Rad}\right)^2} \quad (9)$$

با توجه به محاسبات و اندازه‌گیری‌ها، میزان عدم قطعیت محاسبه شده برای داده‌های فوق برای دبی، دما و تابش خورشیدی به ترتیب برابر ۶٫۳٪، ۲٫۹٪ و ۰٫۱٪ است که با گذاشتن این اعداد در رابطه (۹) می‌توان ادعا نمود که عدم قطعیت محاسبه میزان بازده کلکتورها قریب ۷٪ است.

۳- یافته‌های تحقیق

در شکل ۳ میزان تابش رسیده به سطح کلکتور اندازه‌گیری و ترسیم شده است. همان‌گونه که در این شکل پیداست، تابش در زمان ابتدایی صبح که ساعت ۹:۰۰ است، از مقادیر کم شروع شده و حدود ۴ ساعت بعد، یعنی هنگام ظهر به مقادیر بیشینه خود می‌رسد. تابش‌های رسیده به کلکتور بسته به زمان آزمایش و نیز شرایط آب و هوایی آن لحظه دارد. آنچه در شکل ۳ ارایه شده، تابش در هوای صاف و بدون ابر بوده که در واقع از بهترین داده‌های ثبت شده برای این کمیت بوده است. مقادیر ترسیم شده تابش عمود بر سطح کلکتور است. در شکل ۴ یکی دیگر از پارامترهای محیطی و آب و هوایی، یعنی میزان سرعت نسیم و باد در محل آزمایش مستقیماً اندازه‌گیری و نمایش داده شده است. بادسنج در کنار کلکتورها و به فاصله حدود ۲ متری از آن‌ها قرار داشته و در همه جهتها سرعت باد را ثبت نموده است. در مجموع در هر لحظه فارغ از جهت وزش باد بیشینه سرعت آن ثبت و ترسیم شده است. آنچه قابل مشاهده است، هر چه زمان به عصر نزدیک‌تر شده، میانگین سرعت باد افزایش می‌یابد.

۳-۱- مقایسه عملکرد دو کلکتور دایروی و مستطیلی

براساس تابش

در شکل ۵ نمودار کارایی کلکتورهای دایروی و مستطیلی بر اساس میزان تابش رسیده به کلکتور ارایه شده است. با افزایش تابش خورشیدی که بیشتر هنگام نزدیک به ظهر اتفاق می‌افتد، میزان کارایی هم در کلکتور مستطیلی و هم دایروی افزایش می‌یابد. در واقع هرچه شار حرارتی ورودی به جاذب بیشتر می‌شود، میزان حرارت تبادل شده بین جاذب و لوله‌ها و از لوله به سیال عامل بیشتر می‌شود که دلیل افزایش بازده در کلکتور است و این موضوع در کلکتور دایروی شدت

ارایه شده توسط نقره‌آبادی [۹] و همکاران در استفاده از لوله‌های مارپیچ در کلکتور مخروطی و نیز گودرزی و همکاران [۱۳] در استفاده از لوله‌های دوار دور کلکتور استوانه‌ای است.

۳-۳- بررسی تاثیر نانوسیال

به منظور مقایسه جامع‌تر و ارزیابی دقیق‌تر هر دو کلکتور دایروی و مستطیلی، از نانوسیال اکسیدروی-آب به عنوان سیال عامل استفاده شده است. نانوسیال فوق به صورت دو مرحله‌ای توسط شرکت نانوسنت صدر در ایران تهیه شده است. در شکل ۷ عکس واقعی از نانوسیال تهیه شده داده است؛ همچنین نمودار DLS از نانوسیال در شکل ۸ و مشخصات نانوسیال در جدول ۴ ارایه گردیده است. برای محاسبه بازده کلکتور با استفاده از نانوسیال باید از رابطه زیر برای محاسبه ضریب گرمای ویژه نانوسیال استفاده نمود. بدیهی است که میزان کارایی همچنان از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$C_{p,nf} = C_{p,np}(\mu) + C_{p,bf}(1 - \mu) \quad (10)$$



شکل ۷- عکس واقعی از نانوسیال مورد استفاده

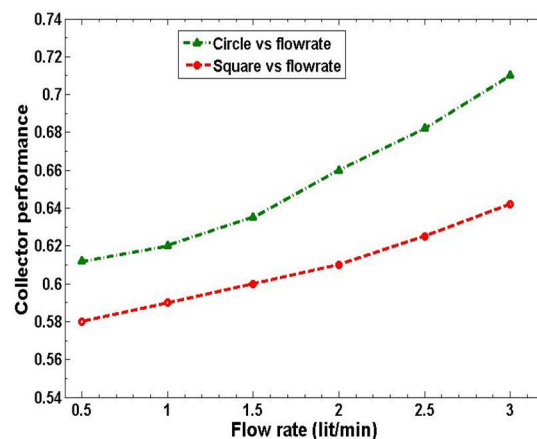
جدول ۴- مشخصات نانوسیال

مشخصه	میزان	مشخصه	میزان
نام نانوسیال	ZnO-H ₂ O	پایدارگر	پلی اتیلن گلیکول
غلظت	۱٪ وزنی	ویسکوزیته	۰٫۸۸۷
pH	۷	ضریب پراکنش	۱٫۳۳

بیشتری دارد. این رفتار با تحقیقات مرور شده در پژوهش‌های پیشین [۸-۱۱] مطابق است. هرچه تابش کمتر می‌شود، میزان کارایی بصورت نزولی با شیب آرام کم می‌شود.

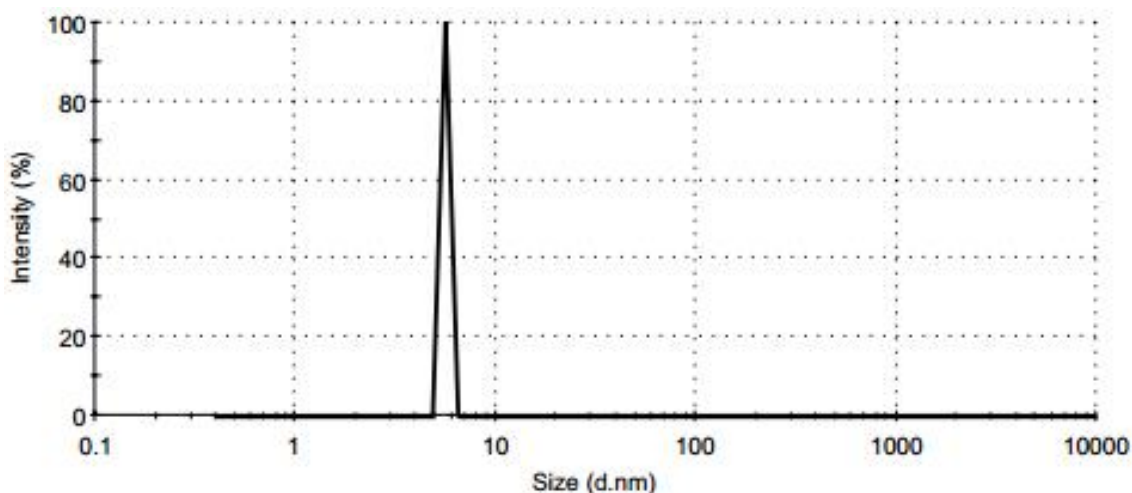
۳-۲- بررسی تاثیر دبی

در شکل ۶ نمودار مقایسه‌ای برای ارزیابی میزان کارایی کلکتورهای مستطیلی و دایروی ارایه شده که بر اساس میزان دبی حجمی سیال عامل تنظیم شده است. در این نمودار در شرایط مشابه برای هر دو کلکتور دبی آب از ۰٫۵ تا ۳ لیتر بر دقیقه دبی تغییر یافته و کارایی و عملکرد حرارتی کلکتورها برای هر ۰٫۵ لیتر اندازه‌گیری شده است. همان‌گونه که از این شکل پیداست، با افزایش دبی که به نوعی افزایش سرعت محسوب می‌شود، کارایی کلکتور به دلیل رشد عدد رینولدز، افزایش می‌یابد که برای هر دو کلکتور مستطیلی و دایروی این موضوع واضح است. این رفتار مشابه نتایج ارایه شده در تحقیقات قبلی [۸-۱۲] است. نکته حایز اهمیت در این نمودار تغییر در رشد بازده همراه با افزایش دبی در کلکتور دایروی نسبت به کلکتور مستطیلی است.



شکل ۶- بررسی تاثیر دبی بر بازده کلکتورهای دایروی و مستطیلی

با بررسی نمودار مشخص است که در دبی‌های بالاتر روند رشد بازده در کلکتور دایروی شیب تندتری به خود می‌گیرد؛ دلیل اصلی آن را می‌توان تاثیر جریان ثانویه به دلیل نیروی گریز از مرکز بیان کرد که با افزایش عدد رینولدز تاثیر بیشتری از خود نشان می‌دهد و این موضوع مشابه گزارش



شکل ۸- عکس DLS و مشخصات نانوذرات مورد استفاده در نانوسیال

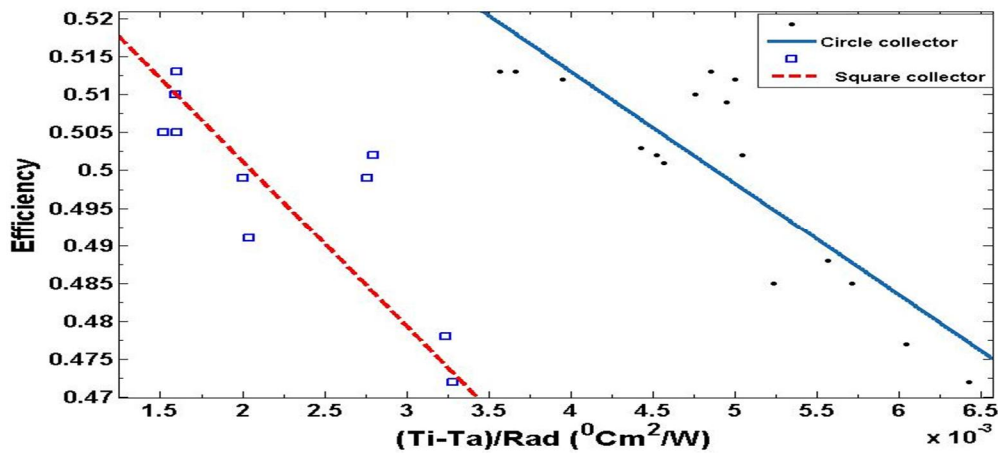
۸ و ۹ یعنی مقایسه بین تاثیر استفاده از نانوسیال و آب معمولی، واضح است که استفاده از نانوسیال باعث افزایش بازده در هر دو کلکتور شده که با توجه با تحقیقات پیشین [۸-۱۱] این موارد قبلا بررسی و اثبات شده است؛ اما نکته حایز اهمیت تاثیر جریان چرخشی بر نانوسیال موجود در لوله است که خود باعث افزایش مضاعف کارایی در کلکتور دایروی نسبت به مستطیلی شده است.

جدول ۵- مقایسه ضرایب در دو کلکتور

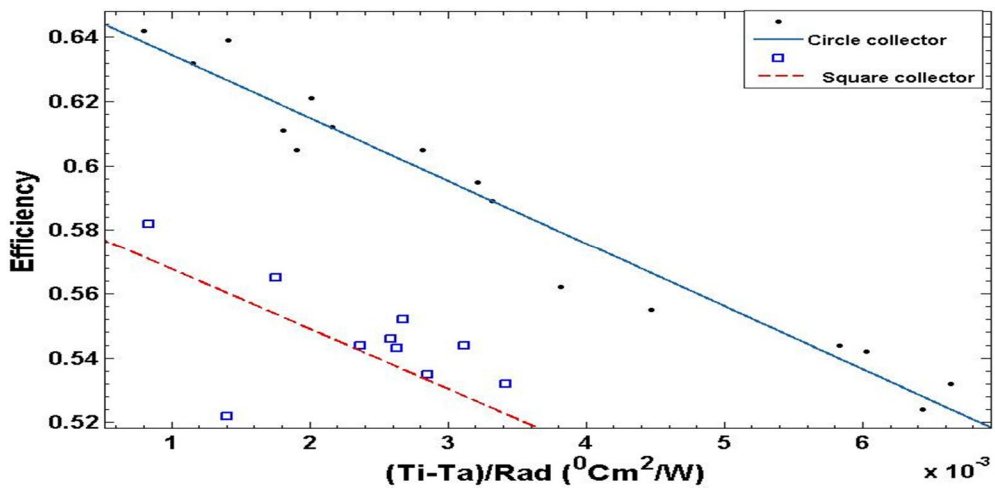
نوع سیال	دبی (lit/min)	F_{RUL}	$F_R(\tau\alpha)$	کلکتور
آب	۰٫۵	۱۶٫۳۴	۰٫۵۸۲	دایروی
آب	۰٫۵	۲۱٫۸۴	۰٫۵۴۵	مستطیلی
نانوسیال	۰٫۵	۱۹٫۵۲	۰٫۶۵۴	دایروی
نانوسیال	۰٫۵	۱۹٫۹۹	۰٫۵۹۲	مستطیلی
آب	۲	۱۰٫۹۲	۰٫۶۱۲	دایروی
آب	۲	۱۶٫۱۵	۰٫۵۸۹	مستطیلی
نانوسیال	۲	۱۰٫۰۷	۰٫۷۰۸	دایروی
نانوسیال	۲	۱۴٫۶۸	۰٫۶۴۸	مستطیلی

در شکل‌های ۸ تا ۱۲ میزان کارایی کلکتورهای مستطیلی و دایروی بر حسب پارامتر $(Ti-Ta)/Rad$ در شرایط مختلف نمایش داده شده است. با توجه به رابطه (۶)، در این نمودارها، محل تقاطع خطوط نمایش داده شده با محور عمودی مقدار $F_R(\tau\alpha)$ یا متغیر جذب انرژی در کلکتور و برابر حداکثر بازده کلکتور در آن شرایط است و شیب خطوط برابر متغیر F_{RUL} یا متغیر اتلاف انرژی در کلکتور است؛ همچنین جدول ۵ مربوط به تعیین این مقادیر است که برای هر دو کلکتور و در شرایط مختلف یعنی در دبی متفاوت برای سیال عامل هم برای استفاده از آب و هم نانوسیال نمایش داده شده است. در شکل ۸ و ۹ میزان بازده هر دو کلکتور در دبی 0.5 Lit/min مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۸ سیال عامل به کار رفته در هر دو کلکتور آب معمولی و در شکل ۹ نانو سیال مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به این دو شکل می‌توان گفت که هر دو کلکتور رفتار نسبتا مشابهی از لحاظ اتلافات انرژی داشته‌اند که دلیل اصلی نحوه ساخت و شرایط محیطی مشابه و همچنین مواد یکسان بکار رفته در آن‌ها است.

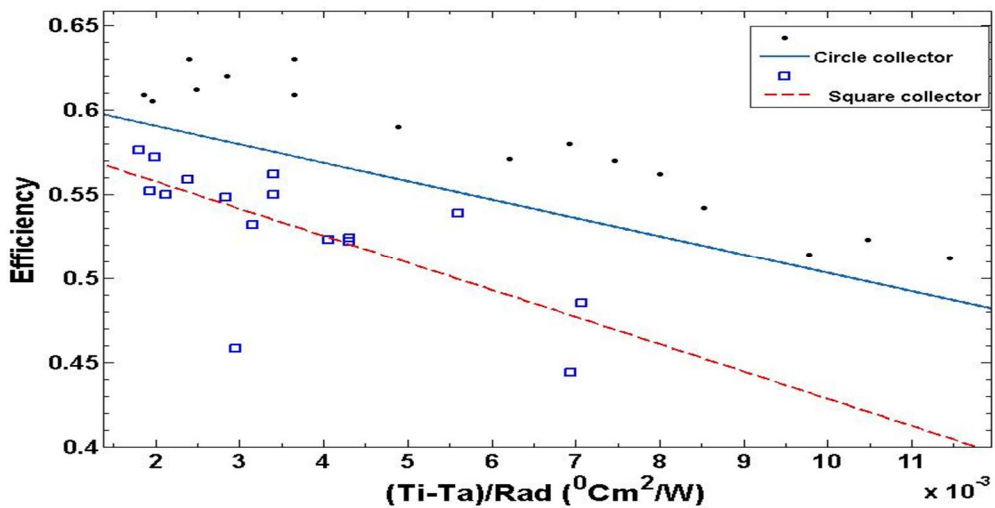
اما حداکثر میزان بازده در هر دو کلکتور نسبت به هم متفاوت است؛ به نوعی که در مجموع، کارایی کلکتور دایروی از کلکتور مستطیلی در محدوده بالاتری از مقیاس قرار دارد که دلیل اصلی این افزایش، جریان چرخشی و ثانویه موجود در آن است؛ همچنین با مقایسه بین دو شکل



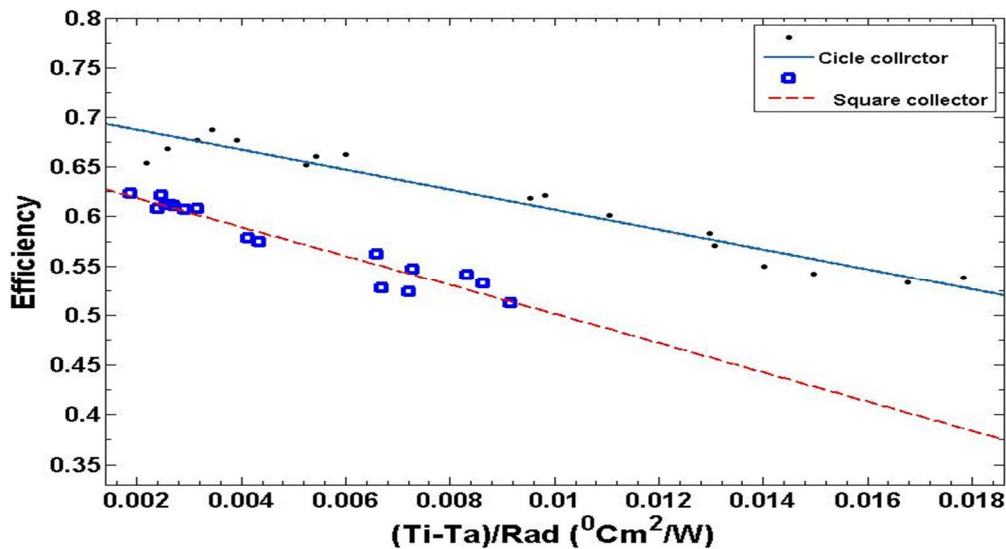
شکل ۹- مقایسه دو کلکتور در دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه با سیال عامل آب



شکل ۱۰- مقایسه ضرایب در دو کلکتور در دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه با نانوسیال



شکل ۱۱- مقایسه دو کلکتور در دبی ۲ لیتر بر دقیقه با سیال عامل آب



شکل ۱۲- مقایسه دو کلکتور در دبی ۲ لیتر بر دقیقه با نانوسیال

۴- بحث و نتیجه‌گیری

روش‌های مختلفی برای افزایش کارایی در کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی وجود دارد که از جمله می‌توان به استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل و تغییر در هندسه به منظور تغییر در مدل انتقال حرارت اشاره کرد. در این پژوهش استفاده از نانوسیال و اثر جریان ثانویه ناشی از وجود لوله‌های مارپیچ و انحنای به صورت تجربی بررسی شده است. برای ارزیابی دقیق از یک کلکتور صفحه تخت مستطیلی و یک کلکتور صفحه تخت دایروی با لوله‌های مارپیچ که با مواد مشابه و شرایط کاملا یکسان ساخته شده، همزمان آزمایش به عمل آمده است. ارزیابی بر اساس استاندارد ASHRAE و در جنوب ایران بوده است. آزمایشات بر اساس شرایط مختلف محیطی با استفاده از دوسیال عامل آب معمولی و نانوسیال اکسید روی/آب انجام شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که با تغییر در شرایط محیطی و همزمان با افزایش تابش و همچنین با افزایش دبی بازده هر دو کلکتور مستطیلی و دایروی افزایش می‌یابد؛ ولی عملکرد کلکتور دایروی بهتر است که دلیل اصلی آن تاثیر جریان ثانویه در افزایش انتقال حرارت از جدار لوله‌ها به سیال عامل است؛ همچنین هنگام استفاده از نانوسیال به جای آب به عنوان سیال عامل، اگرچه بازده هر دو کلکتور افزایش می‌یابد که بدیهی است، ولی تاثیر جریان ثانویه بر انتقال حرارت در استفاده از نانوسیال کاملا چشمگیر

با افزایش دبی تاثیر جریان ثانویه بر انتقال حرارت و در نتیجه بازده کلکتور بیشتر شده که دلیل اصلی آن افزایش عدد رینولدز است. بررسی این موضوع در دو شکل ۱۰ و ۱۱ برای دبی ۲ lit/min هم برای نانوسیال و هم آب معمولی در هر دو کلکتور دایروی و مستطیلی انجام شده است. آنچه در این دو شکل مشخص است، این است که با افزایش دبی هم برای استفاده از نانوسیال و هم آب معمولی، کارایی هر دو کلکتور افزایش می‌یابد که مشابه پژوهش‌های ارایه شده قبلی [۸-۱۱] است. در واقع با افزایش دبی و سرعت عدد رینولدز و نیروهای اینرسی بیشتر می‌شود؛ همچنین ضرایب انتقال حرارت از جمله ناسلت بیشتر می‌گردد. با افزایش ضریب انتقال حرارت در لوله، میزان حرارت منتقل شده از جداره به سیال عامل بیشتر شده؛ لذا بازده کلکتور افزایش می‌یابد. این موضوع برای هر دو کلکتور صادق است؛ یعنی هم بازده کلکتور مستطیل و مربع و هم دایروی با افزایش دبی افزایش می‌یابد؛ اما رشد میزان بازده در کلتور دایروی با افزایش دبی در کلکتور دایروی بیشتر است که به دلیل تاثیر جریان ثانویه است؛ ولی میزان رشد کارایی در کلکتور دایروی به ویژه هنگام استفاده از نانوسیال بیشتر است که حاکی از تاثیر عوامل مهم تحرکات نانو ذرات مانند حرکت براونی، جریان ثانویه و عدد رینولدز است.

۷- مراجع

- [۱] کیانی ایرانیپور ع، کرمی م، دلفانی ش (۱۳۹۶) بررسی عددی تأثیر پارامترهای مؤثر بر روی کارایی کلکتور خورشیدی حجمی با استفاده از نانوسیال آب-اکسید مس. *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۰۰-۹۱: ۷(۱).
- [2] Yoo GJ, Choi HK, Dong WR (201) Fluid flow and heat transfer characteristics of spiral coiled tube: Effects of Reynolds number and curvature ratio. *J Cent South Univ* 19: 471-476.
- [3] Rezvanpour M, Borooghani D, Torabi F, Pazoki M (2020) Using $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ as a phase change material for thermo-regulation and enhancing photovoltaic panels' conversion efficiency: Experimental study and TRNSYS validation. *Renew Energy* 146: 1907-1921.
- [4] Moravej M, Namdarnia F (2018) Experimental Investigation of the Efficiency of a Semi-Spherical Solar piping Collector. *J Renew Energy Env* 5(2): 22-30.
- [5] Moravej M, Saffarian MR, Li LK, Doranehgard MH, Xiong Q (2019) Experimental investigation of circular flat-panel collector performance with spiral pipes. *J Therm Anal Cal* 1-8.
- [6] Mahian O, Kianifar A, Sahin AZ, Wongwises S (2014) Performance analysis of a minichannel-based solar collector using different nanofluids. *Energy Conv Manage* 88: 129-138.
- [7] Meibodi SS, Kianifar A, Niazmand H, Mahian O, Wongwises S (2015) Experimental investigation on the thermal efficiency and performance characteristics of a flat plate solar collector using SiO_2/EG -water nanofluids. *Int Com Heat Mass Trans* 65: 71-75.
- [8] Mirzaei M (2019) Experimental investigation of CuO nanofluid in the thermal characteristics of a flat plate solar collector. *Env Prog Sust Energy* 38(1): 260-267.
- [9] Noghrehabadi AR, Hajidavalloo E, Moravej M (2016) An experimental investigation on the performance of a symmetric conical solar collector using $\text{SiO}_2/\text{water}$ nanofluid. *Transp Phenom Nano Micro Scales* 5(1): 23-29.
- [10] Yousefi T, Shojaeizadeh E, Veysi F, Zinadini S (2012) An experimental investigation on the effect of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanofluid on the efficiency of flat plate solar collector. *Renew Energy* 39: 293-298.
- [11] Yousefi T, Shojaeizadeh E, Veysi F, Zinadini S (2012) An experimental investigation on the effect of pH variation of $\text{MWCNT-H}_2\text{O}$ nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. *Sol Energy* 86(2): 771-779.
- [12] Saffarian MR, Moravej M, Doranehgard MH (2020) Heat transfer enhancement in a flat plate

بوده که به دلیل حرکات ذرات نانوسیال در سوسپانسیون این تأثیر مضاعف می‌شود.

۶- فهرست علائم

مساحت سطح جاذب کلکتور (m^2)	A_p
ظرفیت گرمایی ویژه سیال عامل (J/Kg k)	C_p
ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال (J/Kg k)	$C_{p,nf}$
ظرفیت گرمایی ویژه نانوذرات (J/Kg k)	$C_{p,np}$
ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه (J/Kg k)	$C_{p,bf}$
اختلاف دمای بین ورودی- خروجی سیال از کلکتور ($^{\circ}\text{C}$)	DT
ضریب اتلافات حرارتی	F_R
ضریب کلکتور	F'
تابش خورشیدی (W/m^2)	Rad
دبی جرمی سیال عامل (Kg/s)	\dot{m}
میزان انرژی مفید به دست آمده از کلکتور (W)	Q_u
درصد خطای بازده کلکتور	S_{η}
دمای محیط ($^{\circ}\text{C}$)	T_a
دمای ورودی سیال به کلکتور ($^{\circ}\text{C}$)	T_{in}
دمای خروجی سیال از کلکتور ($^{\circ}\text{C}$)	T_{out}
دمای جاذب ($^{\circ}\text{C}$)	T_p
ضریب اتلاف حرارت کلی کلکتور خورشیدی ($\text{W/m}^2 \text{K}$)	U_L
علائم یونانی	
ضریب جذب و صدور تشعشع کلکتور	T_{α}
غلظت نانوسیال	μ
بازده آبی کلکتور خورشیدی	η_i

- [15] Menbari A, Alemrajabi AA, Rezaei, A (2016) Heat transfer analysis and the effect of CuO/Water nanofluid on direct absorption concentrating solar collector. *App Therm Eng* 104: 176-183.
- [16] Duffie JA, Beckman WA (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York, Wiley, 4th Ed.
- [17] Rajabi Khanghahi, A, Zamen M, Soufari M, Amidpour M, Abbasnejad A (2017) Theoretical Investigation of Consumption Patterns Effect on Optimal Orientation of Collector in Solar Water Heating System. *J Renew Energy Env* 4(1): 1-10.
- solar collector with different flow path shapes using nanofluid. *Renew Energy* 146: 2316-2329.
- [13] Goudarzi K, Shojaeizadeh E, Nejati F (2014) An experimental investigation on the simultaneous effect of CuO-H₂O nanofluid and receiver helical pipe on the thermal efficiency of a cylindrical solar collector. *Appl Therm Eng* 73: 1236-1243.
- [14] Elsheikh AH, Sharshir SW, Mostafa ME, Essa FA, Ali, MK (2018) Applications of nanofluids in solar energy: a review of recent advances. *Renew Sust Energy Rev* 82: 3483-3502.