



کاربرد نانوسیال ترکیبی Fe₃O₄/Silica به عنوان سیال عامل کلکتور خورشیدی جذب مستقیم

مریم کرمی^{1*}، سید محمد حسینی پاکدل²، شهرام دلفانی³، محمدعلی اخوان بهابادی⁴

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

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

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

4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

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

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 مهر 1396

پذیرش: 14 دی 1396

ارائه در سایت: 03 بهمن 1396

کلید واژگان:

کلکتور خورشیدی

جذب مستقیم

نانوسیال ترکیبی

نانوذرات اکسید آهن

نانوذرات سیلیس

در این تحقیق، کارایی کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس بر پایه آب دیونیزه به عنوان سیال پایه، به صورت تجربی بررسی شده است. پایداری و خواص تابشی نانوسیالهای ترکیبی تهیه شده، با استفاده از روش طیفسنجی نوری بررسی شده است. جهت بررسی تجربی عملکرد کلکتور جذب مستقیم با هدف کاربری در سیستمهای گرمایش خورشیدی خانگی دستگاه آزمونی براساس استاندارد EN12975-2 طراحی و ساخته شده است. نتایج تحلیل تجربی نشان داد که کارایی کلکتور با استفاده از نانوسیال ترکیبی، با افزایش جزء حجمی نانوسیال افزایش می یابد، طوری که کارایی کلکتور در مقدار بیشینه خود با استفاده از نانوسیال با جزء حجمی های 500 ppm و 1000 ppm در دبی 0.0225 kg/s به ترتیب 73.9، 79.8 و 83.7 درصد است؛ در حالی که این مقدار برای سیال پایه 63 درصد می باشد. از سوی دیگر، با توجه به جزء حجمی های بسیار کم نانوسیال مورد استفاده در کلکتورهای جذب مستقیم، لزجت سیال پایه افزایش ناچیزی را تجربه می کند و توان پمپاژ در صورت پایداری نانوسیال، تغییر چشمگیری نخواهد کرد. براساس نتایج فوق، عملکرد کلکتور جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس در مقایسه با سیال پایه تحت شرایط کارکردی مشابه بهتر بوده و در صورتی که بتوان از نانوسیال ترکیبی پایدار به عنوان سیال عامل کلکتور جذب مستقیم بهره برد، می توان به کارایی بالاتری نسبت به سیال پایه در تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی مفید دست یافت.

Application of Fe₃O₄/Silica hybrid nanofluid as working fluid of direct absorption solar collector

Maryam Karami^{1*}, Seyed Mohammad Hosseini Pakdel², Shahram Delfani³, Mohammad Ali Akhavan-Behabadi²

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

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

3- Department of Mechanical Engineering, 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 22 October 2017
Accepted 04 January 2018
Available Online 23 January 2018

Keywords:
Solar Collector
Direct Absorption
Hybrid Nanofluid
Fe₃O₄ Nanoparticle
Silica Nanoparticle

ABSTRACT

In this study, the performance of direct absorption solar collector is experimentally investigated using Fe₃O₄/Silica hybrid nanofluid based on deionized water. First, stability of prepared nanofluids is considered using spectral absorbency method. Then, spectrophotometry method is used for measuring optical properties of nanofluids. A prototype of this new type of collector was built with applicability for solar water heating systems. The procedure of EN 12975-2 standard was used for testing the thermal performance of the collector. Results show that collector efficiency is enhanced by nanofluid concentration, so that collector maximum efficiency is 73.9%, 79.8% and 83.7% using nanofluid with concentration of 500 ppm, 1000 ppm and 2000 ppm, respectively. This value is 63% using the base fluid as working fluid. Regarding very low volume fractions of nanofluids used in direct absorption solar collectors, the viscosity of the base fluid experience insignificant increase, therefore, pumping power will not increase significantly. Such increase in efficiency show that direct absorption solar collector performance using hybrid nanofluid is much better than that of using the water at the same operating conditions. Application of stable hybrid nanofluid results in higher conversion efficiency of solar energy to useful energy.

1- مقدمه

صورت می گیرد؛ در حالی که انواع دیگر کلکتور (مانند کلکتورهای صفحه

تخت)، تابش خورشید را توسط سطح جذب می کنند و این امر به بالا رفتن

در کلکتورهای جذب مستقیم (یا حجمی) جذب نور توسط حجم سیال

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تولید انتروپی تعیین می‌شود. انتقال حرارت و تولید انتروپی در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم حاوی نانوسیال مس-آب توسط پروین و همکاران [10] مورد بررسی قرار گرفته است. تمرکز مطالعه آن‌ها روی تاثیر جزء حجمی نانوذرات و عدد رینولدز روی عدد نوسل، تولید انتروپی و کارایی کلکتور بوده است. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش جزء حجمی و عدد رینولدز، عدد نوسل و تولید انتروپی افزایش می‌یابد.

گوپتا و همکاران [11] به بررسی تجربی کلکتور خورشیدی جذب مستقیم پرداختند. آزمایش با استفاده از چهار کسر حجمی متفاوت، با نانوذرات Al₂O₃ 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 راندمان کلکتور می‌شود. آنان در تحقیق دیگری، به بررسی تاثیر دبی روی بازده کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانو سیال Al₂O₃-H₂O پرداختند. براساس نتایج، بازده کلکتور برای دبی و 2 lpm به مقدار 4.2% و 8.1% افزایش پیدا کرده است [12].

کرمی و همکاران [13] عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم را برای کاربردهای مسکونی را با طراحی و ساخت دستگاه براساس استاندارد EN 12975-2 [14] بررسی کردند و یک نمونه اولیه از این نوع کلکتور را برای کاربری آب گرم کن خانگی ساختند. آزمایش با دبی‌های مختلفی در دو حالت سطح داخلی کلکتور جاذب و بازتابنده انجام شد. بازده کلکتور با سطح داخلی جاذب حدود 4.11% بیشتر از حالت سطح داخلی بازتابنده در دبی 90 l/h به دست آمد. آن‌ها برای بررسی عملکرد کلکتور با استفاده از نانوذرات اکسید فلزی در سیال عامل، نانوسیال اکسید مس را تهیه کرده و مشاهده کردند که با افزایش کسر حجمی نانوسیال و دبی آن، بازده کلکتور حدود 9-17% در مقایسه با سیال پایه بهبود می‌یابد [13]. در تحقیق دلفانی و همکاران [15] مشخص شد که کارایی کلکتور جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال نانولوله کربنی حدود 10-29% بالاتر از کارایی آن با سیال پایه است. وکیلی و همکاران [16] عملکرد کلکتورهای خورشیدی حجمی را که در سیستم‌های آب گرم خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند با استفاده از نانوسیال نانوصفحات گرافن بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بازده کلکتور با افزایش کسر جرمی افزایش می‌یابد. براساس نتایج، بهترین بازده کلکتور در دبی 0.015 kg/s برای نانوسیال و سیال پایه بدست آمده است. درصد بهبود کارایی در کسر جرمی 0.005 و دبی 0.015 kg/s نسبت به سیال پایه، حدود 23.2% گزارش شده است. در جدول 1 چکیده‌ای از مطالعات انجام شده درباره کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم دما پایین با سیال عامل نانوسیال را ارائه شده است.

با توجه به بررسی روند تحقیقات روی کلکتورهای جذب مستقیم خورشیدی، می‌توان به این نتیجه رسید که این موضوع به یکی از موضوعات مورد علاقه محققان مختلف در سال‌های اخیر تبدیل شده است. از سوی دیگر، در ادامه تحقیقات درباره نانوسیال، اخیراً محققان به استفاده از نانوسیال‌های ترکیبی با مخلوط کردن نانوذرات نامشابه در یک سیال پایه روی آورده‌اند. ایده استفاده از نانوسیال‌های ترکیبی، برای بهبود بیشتر مشخصات نانوسیال ترکیبی مانند انتقال حرارت و افت فشار با در نظر گرفتن مزایا و معایب هر نانوسیال به صورت جداگانه است [17]. بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون عملکرد کلکتور جذب مستقیم خورشیدی با کاربرد در دماهای پایین کاری (زیر 100°C) با استفاده از نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس مورد مطالعه قرار نگرفته است و تحقیق

دما سطح و در نتیجه، افزایش اتلافات حرارتی به محیط بیرون از طریق سطح منجر می‌شود [1]. در شرایط یکسان، کلکتور خورشیدی جذب مستقیم (حجمی)، به دلیل حذف لوله‌ها، مقاومت حرارتی کمتری نیز در مقابل تبدیل نور خورشید به حرارت مفید از خود نشان می‌دهد [2]. ارزیابی عملکرد کلکتورهای خورشیدی که انرژی را از طریق مایعات مملو از ذره (سوسپانسیون‌های مایع- ذره) دریافت می‌نمایند، توسط محققان مختلف با روش‌های تئوری و تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. یکی از اولین کلکتورهای جذب مستقیم با استفاده از سیال عامل مایع، کلکتوری بود که با استفاده از یک سیال سیاه (آب دارای جوهر هندی¹) برای جذب مستقیم تابش و بهبود کارایی در اواخر دهه 1970 آزمایش گردید [3]. این سیال سیاه، محلول آب حاوی ذرات سیاه رنگ با تجمعاتی به اندازه میکرون بود که در لوله‌های پلاستیکی شفاف که به صورت مارپیچی درآمده بود، جریان یافته و در معرض تابش خورشید قرار گرفته بود. میناردی و چانگ در تحقیق خود بیان کردند که به دلیل حذف فلز از ساختمان کلکتور و استفاده از شیشه/ یا پلاستیک علاوه بر کاهش هزینه‌ها، مشکلات خوردگی نیز مرتفع خواهد شد [3].

در سال‌های اخیر محققان تاثیر استفاده از نانوسیال (سوسپانسیون مایع- نانوذره) به عنوان سیال عامل را روی بهبود کارایی کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم در مقایسه با کلکتور صفحه تخت (شارپایین) مطالعه کردند. به عنوان اولین تحقیق، تیگی و همکاران [4] سوسپانسیون نانوذره آلومینیوم در آب را به صورت عددی بررسی کرده و به این نتیجه دست یافتند که تحت شرایط کاری مشابه، افزایش کارایی 10% با استفاده از کلکتور جدید نسبت به یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت معمولی به دست می‌آید.

اولین مطالعه تجربی روی کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم نانوسیال‌بنیان، توسط اتانیکار و همکاران [5] در سال 2010 انجام شد که در آن، نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج تجربی حاصل از ساخت یک میکروکلکتور مقایسه شده و افزایش حدود 5% کارایی کلکتور جذب مستقیم با استفاده از نانوذرات گرافیت، نانولوله کربنی و نقره نسبت به کلکتورهای معمول تایید گردید. وی با همکاری گلدن در تحقیق دیگری به بررسی اقتصادی استفاده از نانوسیال در کلکتور خورشیدی پرداخت. طبق نتایج آن‌ها، کلکتور خورشیدی حاوی نانوسیال کارایی حرارتی بالاتر و انرژی جبرانی کمتری نسبت به کلکتور متداول دارد [6]. نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط اتانیکار و همکاران روی اثر اندازه نانوذرات بر عملکرد گرمایی نشان داد که هرچه قطر ذرات کوچکتر باشد، کارایی کلکتور افزایش خواهد یافت [7].

ویرااجاوان و همکاران [8] مدلی تحلیلی برای طراحی کلکتورهای حجمی خورشیدی ارائه کردند. آن‌ها سیال پایه ترمینول VP-1 با نانوذرات گرافیت را در کانالی به عمق یک سانتی‌متر بررسی کرده و نتیجه گرفتند که کارایی سیستم، حدود 35% در طول بی‌بعد 0.86 بدست می‌آید. لاجوردی و همکاران [9] کاربرد نانوسیال‌های گرافیت را در جذب تابش خورشیدی به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوسیال گرافیت با جزء حجمی 0.000025% بیش از 50% تابش ورودی را جذب می‌کند؛ درحالی که، تنها 0.0045 دلار بر لیتر افزایش هزینه را در بردارد.

همه فرایندهای ترمودینامیکی شامل بازگشت‌ناپذیری‌هایی هستند که باعث کاهش کارایی سیستم‌ها می‌شود. مقدار این بازگشت‌ناپذیری با نرخ

¹ India ink

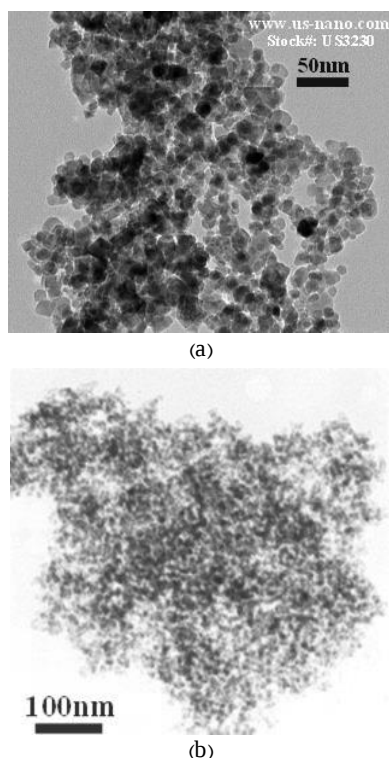


Fig. 1 Image of scanning electron microscope (a) Iron oxide (b) Silica

شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (a) اکسید آهن (b) سیلیس

مقدار نانومواد لازم برای تهیه 100 میلی لیتر نانوسیال ترکیبی با جزء حجمی و نسبت‌های موردنظر با استفاده از سیال پایه (آب دیونیزه) در جدول 2 نشان داده شده است.

نمونه‌ها در سه نسبت 50:50، 25:75 و 75:25 (Fe₃O₄:SiO₂) و سه غلظت 2000 ppm، 1000 ppm و 500 ppm تهیه شده‌اند. نمونه نانوسیال‌های ترکیبی اکسید آهن/سیلیس در نسبت‌ها و غلظت‌های مختلف در "شکل 2" مشاهده می‌شود.

3- پایداری نانوسیال

"شکل 2" پایداری نسبی نانوسیال‌های تهیه شده پس از 6 ساعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های نانوسیال ترکیبی با نسبت (Fe₃O₄:SiO₂) 75:25 (نمونه‌های F₁، F₄ و F₇) ته‌نشین شده‌اند؛ اما نمونه‌های دیگر از پایداری نسبتاً خوبی برخوردارند. این امر ضرورت افزودن نانوسیال سیلیس برای بهبود پایداری نانوسیال اکسید آهن را نشان می‌دهد. چرا که

جدول 2 جزء حجمی نانوسیال‌ها و جرم نانو مواد به کار رفته در 100 میلی لیتر سیال پایه

Table 2 Nanofluid volume fraction and mass of the nanomaterials used in 100 ml of base fluid

نمونه	جزء حجمی (ppm)	نسبت (درصد) (Fe ₃ O ₄ :SiO ₂)	جرم نانو ذره اکسید آهن (mg)	جرم نانو ذره سیلیس (mg)
F ₁	2000	75:25	150	57.5
F ₂	2000	50:50	100	115
F ₃	2000	25:75	50	172.5
F ₄	1000	75:25	75	28.75
F ₅	1000	50:50	50	57.5
F ₆	1000	25:75	25	86.25
F ₇	500	75:25	37.5	14.37
F ₈	500	50:50	25	28.75
F ₉	500	25:75	12.5	43.12

جدول 1 مروری بر مطالعات پیشین درباره کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم دما پایین با سیال عامل نانوسیال

Table 1 An overview of previous studies about low- temperature nanofluid-based direct absorption solar collectors

نوع مطالعه	نانوسیال	مرجع
عددی	آلومینیوم/آب	[4]
عددی/تجربی	نقره-نانولوله کربنی-گرافیت/آب	[5]
تحلیلی	VP-1 ترمینول/گرافیت	[8]
عددی	گرافیت/آب	[9]
عددی	مس/آب	[10]
تجربی	اکسید آلومینیوم/آب	[11,12]
تجربی	اکسید مس/آب-اتیلن گلیکول	[14]
عددی/تجربی	نانولوله کربنی/آب-اتیلن گلیکول	[15]
تجربی	گرافن/آب	[16]

حاضر به عنوان اولین کار تحقیقاتی تجربی در زمینه استفاده از نانوسیال ترکیبی در دماهای پایین کاری می‌باشد. از این‌رو، نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس با هدف بهبود پایداری نانوسیال اکسید آهن و همچنین بهبود خواص تابشی نانوسیال سیلیس، در نسبت‌ها و غلظت‌های مختلف تهیه شده و علاوه بر بررسی پایداری و خواص نانوسیال، عملکرد کلکتور نیز با استفاده از آن مورد بررسی قرار گرفته است.

2- تهیه نانوسیال

در این تحقیق برای ساخت نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس از نانوذرات اکسید آهن با قطر 30 نانومتر و خلوص 99% و چگالی 5100 kg/m³ محصول شرکت یو-اس نانو¹ و نانوسیال سیلیس با قطر 15 نانومتر و خلوص 98% و چگالی 1150 kg/m³ محصول شرکت اربسلو² و آب دیونیزه به عنوان سیال پایه استفاده شده است. توزیع نانوذرات اکسید آهن و سیلیس در مقیاس نانومتری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی³ در "شکل 1" نشان داده شده است.

در این تحقیق از دستگاه همگن ساز فراصوت مدل هیلشر اپ 400-اس⁴ (400W, 24kHz) جهت پراکنده سازی نانوذرات استفاده شده است. مدت زمان التراسونیک برای ساخت نمونه‌ها 60 دقیقه با توان 95 درصد می‌باشد. برای تهیه نانوسیال اکسید آهن در ابتدا نانوذرات اکسید آهن به همراه پایداری کننده و آب دیونیزه به عنوان سیال پایه به مدت نیم ساعت در دستگاه قرار داده می‌شوند. نانوسیال تهیه شده با این روش، پایداری سوسپانسیون ضعیفی دارد چرا که نانوذرات در اثر نیروی جاذبه پس از مدت کوتاهی ته‌نشین می‌شود. در این تحقیق، از CTAB با نسبت جرمی 1:0.01 (Fe₃O₄:CTAB) به عنوان پایداری کننده برای تهیه نانوسیال اکسید آهن استفاده شده است [18-20]. سپس برای تهیه نانوسیال سیلیس با غلظت موردنظر، نانوذرات سیلیس با آب دیونیزه ترکیب شده و به مدت 15 دقیقه در دستگاه التراسونیک قرار داده می‌شود [18]. در انتها برای تهیه نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس، نانوسیال اکسید آهن در دستگاه قرار داده شده و به تدریج نانوسیال سیلیس در مدت 15 دقیقه به آن اضافه می‌شود تا دو نانوسیال به خوبی با هم و سیال پایه مخلوط شوند.

¹ US-Nano

² Erbsloh

³ SEM

⁴ Hielscher UP400s

یا همان فاصله‌ای است که نور در ماده طی می‌کند. در "شکل 3" میزان جذب نمونه‌ها برحسب جزء حجمی نشان داده شده است. رابطه خطی بین جزء حجمی نمونه‌های نانوسیال اکسید آهن/سیلیس در آب دیونیزه و جذب طیفی آن‌ها مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار، پایداری نسبی نانوسیال‌ها تضمین می‌شود.

4- خواص تابشی نانوسیال

خواص تابشی نانوسیال سیلیس و نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس با استفاده از دستگاه طیف‌سنج دوپرتویی کاری شرکت سازنده واریان بررسی شده است. نتایج عبور نور از نانوسیال سیلیس و نانوسیال ترکیبی در "شکل‌های 4 و 5" نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها معلوم است، افزودن نانوذرات اکسید آهن به نانوسیال سیلیس، عبور نور از نانوسیال سیلیس را به میزان قابل توجهی کاهش داده است؛ طوری که نمونه با نسبت 50:50 و جزء حجمی 500ppm بیشترین عبور نور را در طول موج حدود 1070 nm به میزان 40% دارد که این مقدار در مورد نانوسیال سیلیس با همین جزء حجمی در همان طول موج، حدود 60% است. در نمونه‌های با جزء حجمی 2000 ppm عبور نور به شدت کاهش یافته است و در نمونه با نسبت 50:50 تقریباً هیچ نوری از نمونه عبور نمی‌کند؛ در حالی که نمونه نانوسیال سیلیس با جزء حجمی 2000ppm همچنان بیش از نیمی از نور را عبور می‌دهد. این امر ضرورت استفاده از نانوذرات اکسید آهن برای بهبود خواص تابشی نانوسیال سیلیس را تایید می‌کند. با توجه به نتایج "شکل‌های 4 و 5"، سه نانوسیال F2، F5 و F8 از غلظت‌های مختلف (500ppm، 1000ppm و 2000ppm) با نسبت 50:50 (عبور نور کمتر و پایداری بهتر نسبت به سایر نمونه‌ها) به عنوان نمونه‌های اصلی سیال عامل کلکتور انتخاب می‌شود. برای بررسی بهتر خواص تابشی این نمونه‌ها، ضریب میرایی $K(\lambda)$ براساس میزان عبور نور $T(\lambda)$ و براساس قانون بیر-لمبرت مطابق رابطه (2) محاسبه شده است. در این قانون، L طول مسیر عبور نور از نمونه یعنی 10 میلی متر می‌باشد:

$$T(\lambda) = e^{-K(\lambda)L} \quad (2)$$

همان‌طور که در "شکل 6" مشاهده می‌شود، نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس با جزء حجمی 2000 ppm در حالت بیشینه موجب افزایش ضریب میرایی تا 17.57 cm^{-1} نسبت به سیال پایه شده است.

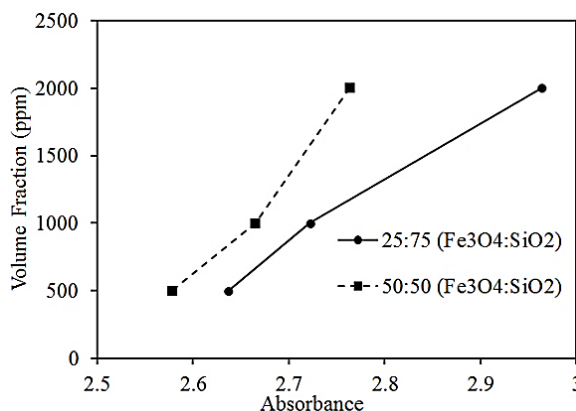


Fig. 3 Linear relationship between light absorption and the volume fraction of the wavelength of maximum

شکل 3 رابطه خطی بین جذب نور و جزء حجمی نمونه‌ها در طول موج بیشینه

نمونه‌های نانوسیال سیلیس تهیه شده از پایداری بسیار خوبی (حداقل 6 ماه پس از تولید) برخوردارند؛ در حالی که نمونه‌های اکسید آهن ساخته شده، تنها 2 ساعت پس از تهیه، ته‌نشین می‌شدند.

در این تحقیق، برای بررسی دقیق‌تر از روش جذب طیفی [21] جهت بررسی پایداری نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس با استفاده از دستگاه طیف‌سنج دوپرتویی کری 15 شرکت سازنده واریان¹ استفاده شده است. با توجه به این که نمونه‌های نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس با نسبت 75:25 (Fe₃O₄:SiO₂) پایداری کمی (در حدود 6 ساعت) دارند، از بررسی پایداری این نمونه‌ها به روش جذب طیفی صرف‌نظر شده است.

در طیف‌سنج دوپرتویی نور قبل از این که به نمونه برسد به دو پرتوی مجزا تفکیک می‌شود که این مسئله یک امتیاز تلقی می‌شود زیرا خواندن مرجع و نمونه به صورت همزمان انجام می‌شود. در نوع قدیمی‌تر یعنی تک-پرتویی این امکان وجود نداشت.

تغییرات جذب نمونه‌ها برحسب ساعت پس از آلتراسونیک در طول موج بیشینه در جدول 3 نشان داده شده است. براساس جدول 3 جذب نانوسیال‌های ترکیبی با افزایش زمان ته‌نشینی، تغییر جزئی دارد (بیشترین درصد تغییر در جذب نمونه‌ها، حدود $\pm 1\%$ می‌باشد) و پایداری نمونه‌های نانوسیال اکسید آهن/سیلیس حداقل تا یک هفته بعد از ساخت تضمین می‌شوند. این نتیجه نشان می‌دهد که اضافه کردن نانوسیال سیلیس به نانوسیال اکسید آهن موجب بهبود پایداری آن شده و نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس از پایداری بسیار بهتری نسبت به نانوسیال اکسید آهن برخوردار می‌باشد.

براساس قانون بیر-لمبرت، جذب محلول رابطه مستقیم با جزء حجمی (غلظت) آن دارد:

$$A = \alpha CL \quad (1)$$

که در آن A جذب² محلول، α ضریب جذب مولی⁴، C غلظت و L طول مسیر

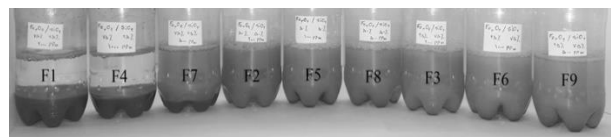


Fig. 2 Samples of iron oxide and silica compound nanofluids in different proportions and concentrations

شکل 2 نمونه نانوسیال‌های ترکیبی اکسید آهن/سیلیس در نسبت‌ها و غلظت‌های مختلف

جدول 3 تغییرات جذب برحسب ساعت پس از آلتراسونیک

ساعت پس از التراسونیک				نسبت (درصد) (Fe ₃ O ₄ :SiO ₂)	جزء حجمی (ppm)	نمونه
168	72	24	0			
جذب						
2.958	2.918	2.963	2.952	50:50	2000	F ₂
2.753	2.763	763.2	743.2	25:75	2000	F ₃
2.632	2.682	722.2	742.2	50:50	1000	F ₅
2.669	2.619	665.2	671.2	25:75	1000	F ₆
2.619	2.579	2.637	2.619	50:50	500	F ₈
2.569	2.539	578.2	565.2	25:75	500	F ₉

¹ Cary 5

² Varian

³ Absorbance

⁴ Absorptivity

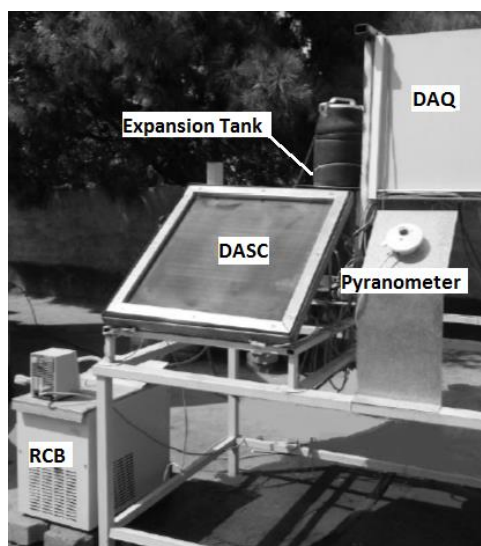


Fig. 7 Experimental setup for DASC outdoor performance test (DASC: Direct Absorption Solar Collector; RCB: Refrigerated Circulating Bath; DAQ: Data Acquisition System)

شکل 7 تصویر کلکتور جذب مستقیم مورد آزمون (DASC: کلکتور خورشیدی جذب مستقیم؛ RCB: حمام سیرکولاسیون تبریدی؛ DAQ: سیستم اخذ داده‌ها)

ضخامت 10 میلی‌متر جهت محدود کردن اتلاف حرارتی به محیط بیرون از پشت و دیواره‌های جانبی عایق کاری شده است.

طرح‌واره سیکل آزمون براساس استاندارد EN 12975-2 در "شکل 8" آمده است. یک پمپ و یک شیر کنترل دبی (متصل به لوله آب بعد از پمپ) برای ایجاد دبی یکنواخت به کار می‌رود. یک منبع انبساط با ظرفیت حدود 5 لیتر استفاده می‌شود که برای جلوگیری از اتلافات حرارتی عایق‌بندی شده است. برای کنترل دمای اولیه، سیال عامل با استفاده از حمام سیرکولاسیون گرم یا سرد می‌شود تا دمای ورودی ثابت بماند.

تجهیزات اندازه‌گیری شامل دو دبی‌سنج با دقت $\pm 1\%$ بازه اندازه‌گیری مدل توربینی ویزن 1000 شرکت سازنده لیکو، چهار دماسنج PT100 برای اندازه‌گیری دماهای سیال در ورود و خروج کلکتورها با دقت $\pm 0.1^\circ C$ ، یک دماسنج دیگر برای اندازه‌گیری دمای هوا، پیرانومتر Kipp&Zonen-CMP3 برای اندازه‌گیری تابش خورشیدی کلی و یک آنومترم (سرعت‌سنج) TESTO 425 برای اندازه‌گیری سرعت هوا با دقت ± 0.03 m/s است. یک سیستم ثبت داده‌ها نیز برای ثبت تمامی اندازه‌گیری‌ها به کار رفته است.

برای محاسبه بازده کلکتور (η) از رابطه (3) استفاده شده است. صورت کسر نشان‌دهنده توان مفید کلکتور و مخرج کسر انرژی خورشیدی دریافت شده توسط کلکتور را نشان می‌دهد. مطابق با استاندارد بازده لحظه‌ای برحسب اختلاف دمای کاهش‌یافته (T_m^*) با استفاده از رابطه (4) بدست می‌آید. اختلاف دمای کاهش‌یافته از رابطه (5) تعیین می‌شود. محل برخورد نمودار بازده با محور عمودی، نشان‌دهنده بازده بیشینه (η_0) و شیب نمودار بازده (a_1) ضریب اتلاف حرارت از کلکتور خواهد بود:

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{A_G \cdot G_T} \quad (3)$$

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_m^* - a_2 G_T (T_m^*)^2 \quad (4)$$

$$T_m^* = \frac{T_{in} - T_{amb}}{G_T} \quad (5)$$

که در آن، $\dot{m}$ و c_p به ترتیب دبی و گرمای ویژه سیال عامل، T_{in} و T_{out} به ترتیب دمای سیال عامل ورودی و خروجی به کلکتور است. A_G مساحت دهانه کلکتور و G_T تابش خورشید کلی برخوردی به کلکتور است.

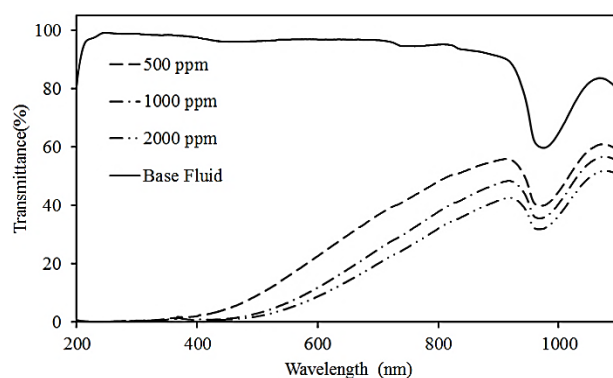


Fig. 4 Transmittance of silica nanofluids at different wavelengths

شکل 4 میزان عبور نور از نانوسیال سیلیس در طول موج‌های مختلف

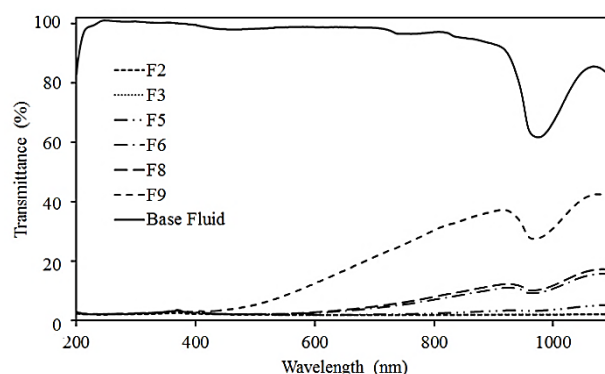


Fig. 5 Transmittance of hybrid nanofluids at different wavelengths

شکل 5 میزان عبور نور از نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس در طول موج‌های مختلف

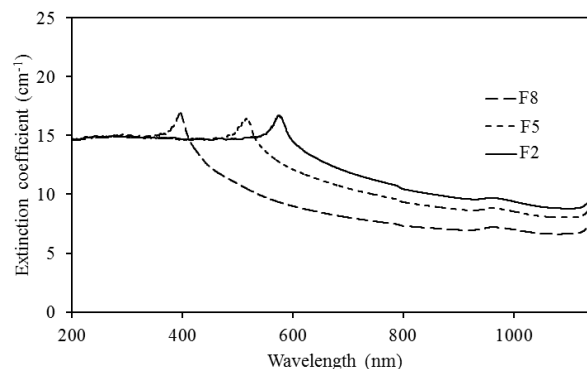


Fig. 6 Extinction coefficient of hybrid nanofluids at different wavelengths

شکل 6 ضریب میرایی نانوسیال‌های ترکیبی اکسید آهن/سیلیس در طول موج‌های مختلف

5- بازده کلکتور

دستگاه آزمون عملکرد کلکتور خورشیدی در محیط بیرون براساس استاندارد EN 12975-2 در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی واقع در شهر تهران ($35.6961^\circ N, 51.4231^\circ E$) طراحی، ساخته و نصب شده است (شکل 7). زاویه نصب کلکتور جهت دریافت بیشترین تابش خورشیدی در این سیستم برابر با عرض جغرافیایی شهر تهران، 35° است.

کلکتور جذب مستقیم دارای بدنه‌ای از جنس آلومینیوم دارای ابعاد 60 در 60 سانتی متر مربع بوده که در آن مسیری برای ورود و خروج سیال عامل در نظر گرفته شده است. کل بدنه کلکتور با استفاده از عایق پلی یورتان به

استفاده از نانوسیال در کلکتورهای جذب مستقیم، هزینه‌های پمپاژ و مشکلات گرفتگی/ ته نشینی است. همان‌طور که در تحقیقات درباره کلکتورهای جذب مستقیم آمده است، جزء حجمی نانوذرات مناسب برای این نوع کلکتور، بسیار پایین (کمتر از 0.002) است [24]. این امر نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات، هزینه چندانانی را به سیستم تحمیل نخواهد کرد. علاوه بر این، توان پمپاژ نیز با این جزء حجمی پایین، افزایش چشمگیری نخواهد داشت. برای اثبات این موضوع، از رابطه زیر برای محاسبه لزجت موثر نانوسیال استفاده می‌شود:

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + C_{\mu} f_v \quad (6)$$

که در آن، C_{μ} از طریق یک رابطه با پارامترهای دیگر سیال تعیین می‌شود. در موارد زیادی، $C_{\mu} = 10$ تقریب مناسبی است [24]. اگر $f_v = 0.002$ باشد (بیشترین جزء حجمی نانوسیال‌های این تحقیق)، واضح است که تغییر جزئی در لزجت سیال پایه به وجود آمده است. با توجه به این که چگالی نیز در این جزء حجمی‌های پایین تغییر چندانانی ندارد، می‌توان گفت توان پمپ در صورت پایداری نانوسیال، تغییر چندانانی نخواهد کرد.

شکل 10 تغییرات کارایی کلکتور را برحسب اختلاف دمای کاهش یافته برای دبی‌های مختلف و سیال عامل F₂ نشان می‌دهد. کارایی بیشینه کلکتور برای دبی‌های 0.0075 kg/s و 0.015 kg/s و 0.0225 kg/s به ترتیب برابر 57%، 73% و 83% می‌باشد. کارایی کلکتور با افزایش دبی ورودی افزایش می‌یابد. با افزایش دبی، به دلیل این که نانوسیال مدت زمان کمتری در معرض تابش خورشید داخل کلکتور قرار می‌گیرد، دمای سیال کاهش یافته و در نتیجه، اتلاف حرارت به محیط بیرون کم می‌شود. بنابراین، کارایی کلکتور افزایش می‌یابد. در دبی‌های پایین، زمان بین ورود و خروج سیال بالاست و به همین دلیل دمای سیال افزایش بیشتری می‌یابد. این امر، اتلافات حرارتی جابجایی و تشعشعی بیشتری را به دنبال دارد.

نکته قابل توجه دیگر این است که میزان تغییر کارایی بیشینه با افزایش دبی از 0.0075 kg/s به 0.015 kg/s بیشتر از تغییر کارایی بیشینه با افزایش دبی از 0.015 kg/s به 0.0225 kg/s است. به عنوان مثال تغییر کارایی بیشینه با افزایش دبی از 0.0075 kg/s به 0.015 kg/s با استفاده از نانوسیال F₂ برابر 15.7 درصد، در حالی که افزایش کارایی بیشینه با تغییر دبی از 0.015 kg/s به 0.0225 kg/s برابر 10.6 درصد می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که در دبی‌های کم، کارایی با دبی افزایش می‌یابد و در دبی‌های بالاتر مستقل از

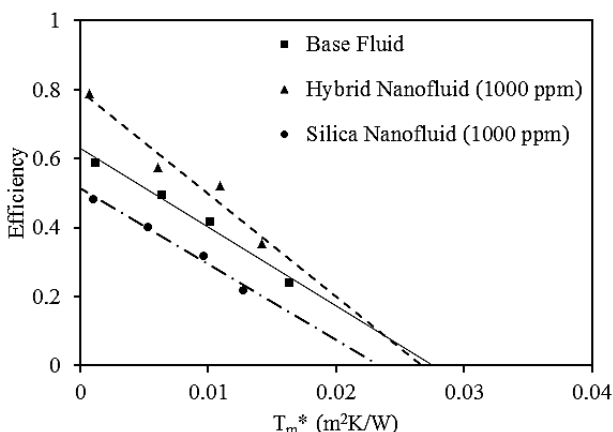
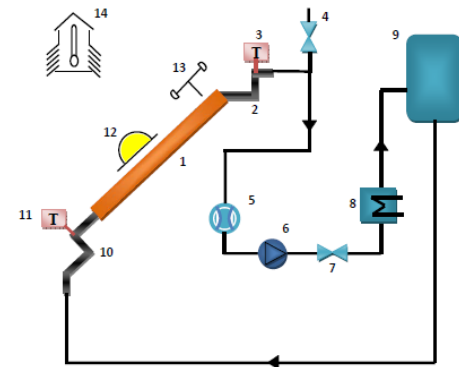


Fig. 9 Effect of working fluid on collector efficiency at 0.0225 kg/s flowrate

شکل 9 تاثیر نوع سیال عامل بر کارایی کلکتور جذب مستقیم در دبی 0.0225 kg/s



1) Collector 2) Insulated Pipe 3) Temperature Sensor 4) Air Vent 5) Flowmeter 6) Pump 7) Control Valve 8) Circulating Bath 9) Expansion Tank 10) Insulated Pipe 11) Temperature Sensor 12) Pyranometer 13) Anemometer 14) Ambient Air Temperature Sensor

Fig. 8 Schematic of DASC outdoor performance test

شکل 8 طرحواره سیکل آزمون عملکرد در محیط بیرون کلکتور جذب مستقیم [14]

تاثیر نوع سیال عامل (سیال پایه، نانوسیال سیلیس با جزء حجمی 1000 ppm و نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس با جزء حجمی 1000 ppm (F₅)) در دبی 0.0225 kg/s در "شکل 9" نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بازده کلکتور با استفاده از نانوسیال سیلیس به عنوان سیال عامل نسبت به سیال پایه، کمتر است. نکته جالب این است که با وجود این که عبور نور از نانوسیال سیلیس کمتر از سیال پایه است، نانوسیال سیلیس بازتاب قابل توجهی داشته و احتمالاً این امر باعث شده است که جذب این نانوسیال کمتر از سیال پایه بوده و در نتیجه، بازده کلکتور با استفاده از این نانوسیال نسبت به حالت استفاده از سیال پایه و نانوسیال ترکیبی کمتر باشد.

لازم به ذکر است که طیف جذب به دست آمده از طیف سنج دوپرتویی با استفاده از میزان عبور و با صرف نظر از بازتاب توسط خود دستگاه محاسبه می‌شود. بنابراین خطای زیادی دارد و نمی‌توان به آن استناد کرد چرا که اتفاقاً اثرات بازتاب در آن با وجود قابل ملاحظه بودن، صرف نظر شده است و در واقع فقط میزان عبور نور که توسط این دستگاه‌ها اندازه گیری می‌شود، دقت مناسبی دارد. بنابراین با توجه به این که عبور نور نانوسیال سیلیس نسبت به آب کمتر است، به احتمال زیاد بیشتر بودن بازتاب از آن باعث شده است که جذب کاهش یافته و بازده کاهش یابد.

کلکتور با استفاده از نانوسیال ترکیبی به عنوان سیال عامل، از بازده بیشتری نسبت به سیال پایه و نانوسیال سیلیس برخوردار است. طبق "شکل 9"، کارایی بیشینه (η_0) نانوسیال سیلیس، سیال پایه و نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس در دبی 0.0225 kg/s، به ترتیب 51، 62 و 79 درصد می‌باشد.

نتایج، توانایی بیشتر نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس را در جذب تابش خورشید، نسبت به سیال پایه و نانوسیال سیلیس تایید می‌کند. با توجه به اینکه نانوسیال سیلیس از کارایی کمتری نسبت به سیال پایه و نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس برخوردار می‌باشد این نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوسیال اکسید آهن به نانوسیال سیلیس و ساخت نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس موجب بهبود خواص تابشی و کارایی کلکتور شده است.

یکی از ویژگی‌های مهم نانوذرات در مقایسه با ذرات بزرگتر، امکان اضافه کردن نانوذرات به سیستم‌های پمپاژ و لوله کشی با کمترین اثرات نامطلوب گرفتگی یا خوردگی است [23,22]. با این وجود، یکی از چالش‌های مهم در

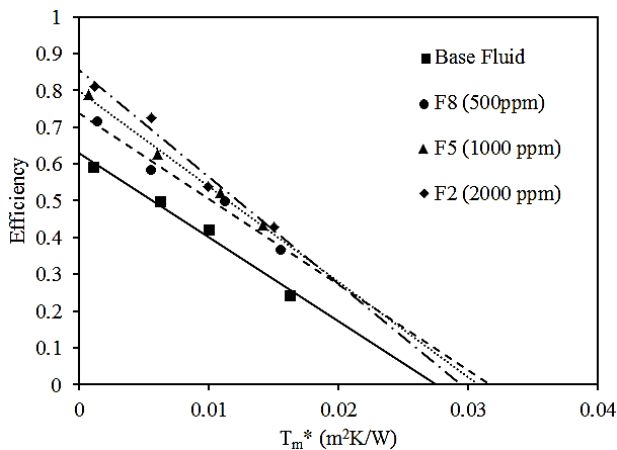


Fig. 11 Effect of volume fraction of hybrid nanofluid on collector efficiency at 0.0225 kg/s

شکل 11 تاثیر جزء حجمی نانو سیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس بر کارایی کلکتور در دبی 0.0225 kg/s

از روش طیفسنجی نوری نشان داد که نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس از جذب بیشتری نسبت به نانوسیال سیلیس و سیال پایه برخوردار است طوری که نمونه F2 با جزء حجمی 2000 ppm در حالت بیشینه موجب افزایش ضریب میرایی تا 17.57 cm^{-1} نسبت به سیال پایه می شود. نتیجه جالبی که از بررسی تجربی عملکرد کلکتور جذب مستقیم به دست آمد آن است که با استفاده از نانوسیال سیلیس به عنوان سیال عامل، کارایی کلکتور حتی در مقایسه با سیال پایه نیز کمتر است. این امر از بازتاب نور توسط این سیال ناشی شده است. همچنین استفاده از نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس به عنوان سیال عامل، موجب افزایش کارایی کلکتور نسبت به حالت استفاده از نانو سیال سیلیس و سیال پایه در تمامی دبی های ورودی خواهد شد. نتایج نشان داد کارایی کلکتور در بیشترین مقدار خود با استفاده از نانوسیال ترکیبی در دبی 0.0225 kg/s و جزء حجمی 2000 ppm برابر 83.7 درصد بوده که حدود 20 درصد بالاتر از کارایی کلکتور با استفاده از است. همچنین مشخص شد که تغییر میزان کارایی بیشینه با افزایش دبی از 0.0075 به 0.015 kg/s بیشتر از تغییر کارایی بیشینه با افزایش دبی از 0.015 به 0.0225 kg/s است. این امر نشان می دهد که مقدار بهینه ای برای دبی کلکتور با هدف افزایش کارایی وجود دارد. افزایش کارایی حاصل از کاربرد نانوسیال ترکیبی به عنوان سیال عامل در کلکتور جذب مستقیم، امکان کارکرد بهتر سیستم های گرمایش خورشیدی با اهداف مختلف به ویژه برای کاربری های دما پایین (کمتر از 70 °C) مانند سیستم های ترکیبی گرمایش خورشیدی (تامین همزمان آب گرم و گرمایش فضا) را فراهم می کند.

7- مراجع

- [1] N. Arai, Y. Itaya, M. Hasatani, Development of a Volume heat-trap' type Solar collector using a fine-particle semitransparent liquid suspension (FPSS) as a heat Vehicle and heat storage medium, *Solar Energy*, Vol. 32, No. 1, pp. 49-56, 1984.
- [2] R. A. Taylor, P. E. Phelan, T. P. Otanicar, R. Adrian, R. Prasher, Nanofluid optical property characterization: Towards efficient direct absorption solar collectors, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, No. 1, pp. 225-236, 2011.
- [3] J. E. Minardi, H. N. Chuang, Performance of a blackliquid flat-plate solar collector, *Solar Energy*, Vol. 17, pp. 179-83, 1975.
- [4] H. Tyagi, P. Phelan, R. S. Prasher, Predicted efficiency of nanofluid-based direct absorption solar receiver, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 131, pp. 041004-1:7, 2009.
- [5] T. P. Otanicar, P. E. Phelan, R. S. Prasher, G. Rosengarten, R. A. Taylor, Nanofluid-based direct absorption solar collector, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 2, pp. 033102-1:13, 2010.
- [6] T. Otanicar, J. Golden, Comparative environmental and economic analysis of

آن خواهد بود. به عبارت دیگر، با افزایش بیشتر دبی، کارایی کلکتور مستقل از تغییرات آن خواهد بود و افزایش کارایی کلکتور با افزایش دبی، روندی مجانبی دارد.

نکته مهم دیگری که در "شکل 10" مشاهده می شود، افزایش شیب نمودارهای بازده با افزایش دبی نانوسیال است. همان طور که گفته شد، شیب نمودارها نشان دهنده ضریب اتلاف حرارتی کلکتور است. این امر نشان می دهد که افزایش دبی سیال عامل به افزایش تلفات حرارتی از کلکتور منجر شده است. در واقع، افزایش دبی سیال، افزایش عدد رینولدز و با توجه به رابطه زیر، افزایش عدد نوسلت را باعث شده است [10]:

$$Nu = (3.442 + 0.157 f_p) Re^{0.1528} \quad (7)$$

افزایش عدد نوسلت نیز افزایش ضریب تلفات حرارتی از کلکتور را نشان می دهد. افزایش شیب نمودارهای بازده با جزء حجمی نانوسیال در "شکل 10"، مجدداً نشان می دهد که نتایج تجربی تحقیق حاضر با نتایج عددی پروین و همکاران [10] از هماهنگی خوبی برخوردار است؛ چرا که در این رابطه نیز، عدد نوسلت با جزء حجمی نانوسیال رابطه مستقیم دارد.

در "شکل 11" تاثیر جزء حجمی نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس بر کارایی کلکتور جذب مستقیم در دبی جرمی 0.0225 kg/s نشان داده شده است. همان طور که از نتایج پیداست، کارایی کلکتور با استفاده از سیال پایه کمتر از حالت استفاده از نانوسیال ترکیبی به عنوان سیال عامل است. در دبی ثابت، هر چه نانوسیال غلیظ تر باشد، میزان جذب انرژی خورشید بیشتر بوده و در مجموع کارایی افزایش بیشتری می یابد. کارایی بیشینه کلکتور با استفاده از نانوسیال F₂، F₅ و F₈ در دبی 0.0225 kg/s به ترتیب 84.7، 79.8 و 73.9 درصد بوده که این مقدار برای سیال پایه 63 درصد می باشد. این امر همان طور که قبلاً بیان شد به علت افزایش جذب انرژی خورشیدی توسط نانوسیال نسبت به سیال پایه است که منجر به افزایش کارایی می شود.

6- نتیجه گیری

در این تحقیق، در گام نخست، نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس بر پایه آب دیونیزه در نسبت ها و غلظت های مختلف ساخته شد و پایداری آن با استفاده از روش جذب طیفی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه های نانوسیال سیلیس تهیه شده در این تحقیق، حداقل بعد از 6 ماه به صورت عینی از پایداری مناسبی برخوردار بوده و همچنین نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس نیز حداقل تا یک ماه پس از تولید از پایداری مناسبی برخوردار بوده است (حدود $\pm 1\%$ تغییر در جذب نمونه ها). بررسی خواص تابشی با استفاده

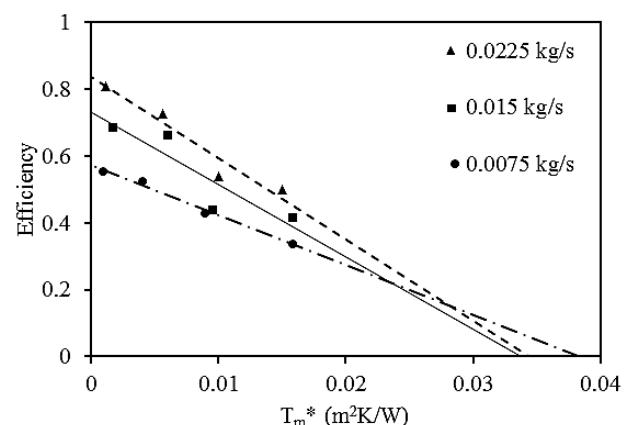


Fig. 10 Effect of flowrate on collector efficiency using F2 nanofluid
شکل 10 تاثیر دبی بر کارایی کلکتور با نانوسیال F₂

- [16] M. Vakili, S. M. Hosseinalipour, S. Delfani, S. Khosrojerdi, M. Karami, Experimental investigation of graphene nano platelets nano fluid-based volumetric solar collector for domestic hot water systems, *Solar Energy*, Vol. 131, pp. 119–130, 2016.
- [17] J. Sarkar, P. Ghosh, A. Adil, A review on hybrid nanofluids: Recent research, development and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, pp. 164–177, 2015.
- [18] L. S. Sundar, P. Bhramara, N. T. R. Kumar, M. K. Singh, A. C. M. Sousa, Experimental heat transfer, friction factor and effectiveness analysis of Fe₃O₄ nanofluid flow in a horizontal plain tube with return bend and wire coil inserts, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, pp. 440–453, 2017.
- [19] B. Du, J. Li, B. M. Wang, Z. T. Zhang, Preparation and breakdown strength of Fe₃O₄ nanofluid based on transformer oil, *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2012.
- [20] K. Khoshnevis, M. Barkhi, D. Zare, D. Davoodi, M. Tabatabaei, Preparation and characterization of CTAB-Coated Fe₃O₄ nanoparticles, *Journal of Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, Vol. 42, pp. 644–648, 2012.
- [21] M. Karami, M. A. Akhavan Bahabadi, S. Delfani, A. Ghozatloo, 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, pp. 114–118, 2014.
- [22] X. Q. Wang, A. S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: A review, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 46, pp. 1–19, 2007.
- [23] J. A. Eastman, U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson, S. Lee, Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, *Proceedings of Materials Research Society Symposium*, Boston, MA, USA. 457, pp. 3–11, 1997.
- [24] P. Prasher, D. Song, J. Wang, P. Phelan, Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications, *Applied Physics Letters*, Vol. 89, No.13, 2006.
- conventional and nanofluid solar hot water technologies, *Environmental Science and Technology*, Vol. 43, No. 15, pp. 6082–7, 2009.
- [7] 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.
- [8] L. Mu, Q. Zhu, L. Si, Radiative properties of nanofluids and performance of a direct solar absorber using nanofluids, *Proceedings of the ASME 2nd International Conference on Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer*, Vol. 1, Shanghai, China, December 18–21, 2009.
- [9] E. P. B. Filho, O. S. H. Mendoza, C. L. L. Beicker, A. Menezes, D. Wen, Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 84, pp. 261–267, 2014.
- [10] S. Parvin, R. Nasrin, M. A. Alim, Heat transfer and entropy generation through nanofluid filled direct absorption solar collector, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 71, pp. 386–95, 2014.
- [11] H. K. Gupta, G. D. Agrawal, J. Mathur, An experimental investigation of a low temperature Al₂O₃-H₂O nano fluid based direct absorption solar collector, *Solar Energy*, Vol. 118, pp. 390–396, 2015.
- [12] H. K. Gupta, G. D. Agrawal, J. Mathur, Investigations for effect of Al₂O₃-H₂O nano fluid flow rate on the efficiency of direct absorption solar collector, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 5, pp. 70–78, 2015.
- [13] M. Karami, M. A. Akhavan-Bahabadi, S. Delfani, M. Raise, Experimental investigation of CuO nano fluid-based Direct Absorption Solar Collector for residential applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52, pp. 793–801, 2015.
- [14] Thermal solar systems and components – solar collectors – part 2: test methods, English version of DIN EN 12975-2:2006.
- [15] S. Delfani, M. Karami, M. A. Akhavan-Bahabadi, Performance characteristics of a residential-type direct absorption solar collector using MWCNT nanofluid, *Renewable Energy*, Vol. 87, pp. 754–764, 2016.