ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir

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

 $^4$ مریم کرمی $^{1*}$ ، سید محمد حسینی پاکدل $^2$ ، شهرام دلفانی $^5$ ، محمدعلی اخوان بهابادی

حكىدە 💧

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

2- فارغ التحصيل كارشناسي ارشد، مهندسي مكانيك، دانشگاه تهران، تهران

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

4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

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

# اطلاعات مقاله

در این تحقیق، کارایی کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/سیلیس بر پایه آب دیونیزه به عنوان سیال	مقاله پژوهشی کامل نبس 20 می 120 م
پایه، به صورت تجربی بررسی شده است. پایداری و خواص تابشی نانوسیالهای ترکیبی تهیه شده، با استفاده از روش طیفسنجی نوری بررسی	دریافت: 30 مهر 1396 از ش 1/1 در 1396
شده است. جهت بررسی تجربی عملکرد کلکتور جذب مستقیم با هدف کاربری در سیستمهای گرمایش خورشیدی خانگی دستگاه آزمونی	پدیرس: ۲۹ دی 1390 ا ارائه در سابت: 03 بهمن 1396
براساس استاندارد 2-EN12975 طراحی و ساخته شده است. نتایج تحلیل تجربی نشان داد که کارایی کلکتور با استفاده از نانوسیال ترکیبی، با	ر در ي. ۲۰ ن کليد واژگان:
افزایش جزء حجمی نانوسیال افزایش مییابد، طوری که کارایی کلکتور در مقدار بیشینه خود با استفاده از نانوسیال با جزء حجمیهای 500	كلكتور خورشيدى
1000 ppm ،ppm و 2000 و 2000 در دبی 0.0225 kg/s به ترتیب 73.9، 79.8 و 83.7 درصد است؛ در حالی که این مقدار برای سیال	جذب مستقيم
پایه 63 درصد میباشد. از سوی دیگر، با توجه به جزء حجمی های بسیار کم نانوسیال مورد استفاده در کلکتورهای جذب مستقیم، لزجت سیال	نانوسيال تركيبي
پایه افزایش ناچیزی را تجربه میکند و توان پمپاژ در صورت پایداری نانوسیال، تغییر چشمگیری نخواهد کرد. براساس نتایج فوق، عملکرد	نانوذرات اكسيد أهن
کلکتور جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/سیلیس در مقایسه با سیال پایه تحت شرایط کارکردی مشابه بهتر بوده و در	نانوذرات سيليس
صورتی که بتوان از نانوسیال ترکیبی پایدار بهعنوان سیال عامل کلکتور جذب مستقیم بهره برد، میتوان به کارایی بالاتری نسبت به سیال پایه	
در تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی مفید دست یافت.	

# Application of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Silica hybrid nanofluid as working fluid of direct absorption solar collector

# Maryam Karami<sup>1\*</sup>, Seyed Mohammad Hosseini Pakdel<sup>2</sup>, Shahram Delfani<sup>3</sup>, Mohammad Ali Akhavan-Behabadi<sup>2</sup>

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** ABSTRACT

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

In this study, the performance of direct absorption solar collector is experimentally investigated using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/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, respec/tively. This vaule 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 significsantly. 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.

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

1- مقدمه

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

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 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Silica hybrid nanofluid as working fluid of direct absorption solar collector, *Modares W* Please cite this article using: Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 02, pp. 37-44, 2018 (in Persian)

دمای سطح و در نتیجه، افزایش اتلافات حرارتی به محیط بیرون از طریق سطح منجر می شود [1]. در شرایط یکسان، کلکتور خور شیدی جذب مستقیم (حجمی)، بهدلیل 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 (سوسپانسیون های 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 هندی) برای جذب مستقيم تابش و بهبود كارايى در اوخر دهه 1970 آزمايش گرديد [3]. اين سیال سیاه، محلول آب حاوی ذرات سیاه رنگ با تجمعاتی به اندازه میکرون بود که در لولههای پلاستیکی شفاف که بهصورت مارپیچی درآمده بود، جریان یافته و در معرض تابش خورشید قرار گرفته بود. میناردی و چانگ در تحقيق خود بيان كردند كه به دليل حذف فلز از ساختمان كلكتور 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) بهعنوان سیال عامل را روی بهبود کارایی کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم در مقایسه با کلکتور صفحه تخت (شارپایین) مطالعه کردند. به عنوان اولین تحقیق، تیاگی و همکاران [4] سوسپانسیون نانوذره آلومینیوم در آب را بهصورت 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 بهدست میآید.

اولین مطالعه تجربی روی کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم نانوسیال بنیان، 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].

ویراراجاوان 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 25٪ در طول بی عده 0.86 بدست میآید.

لاجوردی و همکاران [9] کاربرد نانوسیالهای گرافیت را در جذب تابش خورشیدی بهصورت عددی بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که نانوسیال گرافیت با جزء حجمی 0.00025٪ 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

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 نوسلت، تولید انتروپی و کارایی کلکتور بوده است. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش جزء حجمی و عدد رینولدز، عدد نوسلت 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با اندازه 20 نانومتر انجام شد. نتایج نشان داد استفاده از نانوسیال بهعنوان 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O پرداختند. براساس نتایج، بازده کلکتور برای دبی و 2 Ipm به مقدار %4.2 و %1.8 افزایش پیدا کرده است [1].

کرمی و همکاران [13] عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم را برای کاربردهای مسکونی را با طراحی و ساخت دستگاه براساس استاندارد EN 2-12975 [14] بررسی کردند و یک نمونه اولیه از این نوع کلکتور را برای کاربری آب گرمکن خانگی ساختند. آزمایش با دبیهای مختلفی در دوحالت 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 h/l 90 بهدست 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 %1-9 در مقايسه با سيال پايه بهبود مييابد [13]. در تحقيق دلفاني و همكاران [15] مشخص شد که کارایی کلکتور جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال نانولوله كربنى حدود %29-10 بالاتر از كارايي آن با سيال پايه است. وكيلى و همکاران [16] عملکرد کلکتورهای خورشیدی حجمی را که در سیستمهای آب گرم خانگی مورد استفاده قرار می گیرند 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 كسر جرمى 0.005 و دبى 0.015 kg/s نسبت به سيال پايه، حد.ود 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، اخیرا 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 بهصورت جداگانه است [17]. بررسی مطالعات انجام شده نشان میدهد که تاکنون عملکرد کلکتور جذب مستقیم خورشیدی با کاربرد در دماهای پایین کاری (زیر  $2^001$ ) با استفاده از نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس مورد مطالعه قرار نگرفته است و تحقیق

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> India ink

#### کاربرد نانوسیال ترکیبی ${ m Fe_3O_4/Silica}$ بهعنوان سیال عامل کلکتور خورشیدی جذب مستقیم

**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									

مرجع	نانوسيال	نوع مطالعه
[4]	آلومينيوم/آب	عددى
[5]	نقره-نانولوله كربني-گرافيت/آب	عددی/تجربی
[8]	VP-1ترمينول گرافيت/	تحليلى
[9]	گرافیت/ آب	عددى
[10]	مس/آب	عددى
[11,12]	اكسيدآلومينيوم/آب	تجربى
[14]	اكسيدمس/آب- اتيلن گليكول	تجربى
[15]	نانولوله كربني/آب- اتيلن گليكول	عددی/ تجربی
[16]	گرافن/آب	تجربى

حاضر بهعنوان 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 اکسیدآهن 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 اکسیدآهن/سیلیس از نانودرات اکسیدآهن با قطر 30 نانومتر و خلوص %99 و چگالی5100 kg/m محصول شرکت یو-اس نانو<sup>1</sup> و نانوسیال سیلیس با قطر 15 نانومتر و خلوص %98 و چگالی 1150 kg/m<sup>3</sup> محصول شرکت اربسلو<sup>۲</sup> و آب دیونیزه بهعنوان سیال پایه استفاده شده است. توزیع نانوذرات اکسیدآهن و سیلیس در مقیاس نانومتری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup> در "شکل 1" نشان داده شده است.

در این تحقیق از دستگاه همگن ساز فراصوت مدل هیلشر اپ 400 – اس<sup>+</sup> (400W, 24kHz) جهت پراکندهسازی نانوذرات استفاده شده است. مدت زمان التراسونیک برای ساخت نمونهها 60 دقیقه با توان 95 درصد میباشد. برای آب دیونیزه به عنوان سیال پایه به مدت نیم ساعت در دستگاه قرار داده می-شوند. 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 که نانوذرات در اثر نیروی جاذبه پس از مدت کوتاهی تهنشین میشود. در این پایدارکننده برای تهیه نانوسیال اکسید آهن استفاده شده است [81-20]. یونیزه ترکیب شده و به مدت 15 دقیقه در دستگاه التراسونیک قرار داده میشود [81]. در انتها برای تهیه نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/سیلیس با آب میشود [81]. در انتها برای تهیه نانوسیال سیلیس با غلظت موردنظر، نانوذرات سیلیس با آب میشود [81]. در انتها برای تهیه نانوسیال برکیبی اکسیدآهن/سیلیس، میشود [81]. در انتها برای تهیه نانوسیال برکیبی اکسیدآهن/سیلیس، میشود [81]. در انتها برای تهیه نانوسیال به خوبی با هم و سیال



0nm

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 و 75:25 و Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:SiO<sub>2</sub>) و سه غلظت 2000 ppm و 1000 ppm و 1000 تهیه شدهاند. نمونه نانوسیالهای ترکیبی اکسیدآهن/سیلیس در نسبتها و غلظتهای مختلف در "شکل 2" مشاهده می شود.

# 3- پايداري نانوسيال

"شکل 2" پایداری نسبی نانوسیالهای تهیه شده پس از 6 ساعت را نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود، نمونههای نانوسیال ترکیبی با نسبت (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:SiO<sub>2</sub>) (نمونههای F<sub>4</sub> ،F<sub>1</sub> و F<sub>1</sub>) تهنشین شدهاند؛ اما نمونههای دیگر از پایداری نسبتا خوبی برخوردارند. این امر ضرورت افزودن نانوسیال سیلیس برای بهبود پایداری نانوسیال اکسیدآهن را نشان میدهد. چرا که

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

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

جرم نانو ذره	جرم نانو ذره	نسبت (درصد)	جزء حجمى	411
سیلیس (mg)	اکسیدآهن (mg)	(Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> :SiO <sub>2</sub> )	(ppm)	نمونه
57.5	150	75:25	2000	$F_1$
115	100	50:50	2000	$F_2$
172.5	50	25:75	2000	$F_3$
28.75	75	75:25	1000	$F_4$
57.5	50	50:50	1000	$F_5$
86.25	25	25:75	1000	$F_6$
14.37	37.5	75:25	500	$F_7$
28.75	25	50:50	500	$F_8$
43.12	12.5	25:75	500	$F_9$

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> US-Nano <sup>2</sup> Erbsloh

Erbsloh SEM

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Hielscher UP400s

#### کاربرد نانوسیال ترکیبی Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Silica بهعنوان سیال عامل کلکتور خورشیدی جذب مستقیم

نمونههای نانوسیال سیلیس تهیه شده از پایداری بسیار خوبی (حداقل 6 ماه پس از تولید) برخوردارند؛ در حالی که نمونههای اکسیدآهن 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 اکسیدآهن/سیلیس با استفاده از دستگاه طیفسنج دوپرتویی کری <sup>5</sup> شرکت سازنده واریان<sup>۲</sup> استفاده شده است. با توجه به اینکه نمونههای نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/سیلیس با نسبت 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 می شود که این مسئله یک امتیاز تلقی می شود زیرا خواندن مرجع و نمونه به صورت همزمان انجام می شود. در نوع قدیمی تر 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 1% میباشد) و پایداری نمونههای نانوسیال اکسیدآهن/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 اکسیدآهن/سیلیس از پایداری بسیار بهتری نسبت به نانوسیال اکسیدآهن برخوردار می باشد.

براساس قانون بیر- لمبرت، جذب محلول رابطه مستقیم با جزء حجمی (غلظت) آن دارد: (1) A = aCL

(1) A = αCL
 که در آن A جذب<sup>¬</sup> محلول، α ضریب جذب مولی<sup>†</sup>, C غلظت و L طول مسیر



Fig. 2 Samples of iron oxide and silica compound nanofluids in different proportions and concentrations  $% \left( {{{\mathbf{x}}_{i}}} \right) = {{\mathbf{x}}_{i}} \right)$ 

**شکل 2** نمونه نانوسیالهای ترکیبی اکسیدآهن/ سیلیس در نسبتها و غلظتهای مختلف

جدول 3 تغییرات جذب برحسب ساعت پس از آلتراسونیک Table 3 Absorbance changes in hours after ultrasonication ساعت پس از التراسونیک

	-		0	نسبت (درمرد)	A77 617		
168 72		72	72 24		(Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> :SiO <sub>2</sub> )	بر مع مع مع المعنى (ppm)	نمونه
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	$F_9$

<sup>1</sup> Cary 5

(2)

<sup>2</sup> Varian <sup>3</sup> Absorbance

<sup>4</sup> Absorptivity

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 اکسیدآهن/سیلیس در آب دیونیزه و جذب طیفی آنها مشاهده می شود. با توجه به نمودار، پایداری نسبی نانوسیالها تضمین می شود.

# 4- خواص تابشي نانوسيال

خواص تابشی نانوسیال سیلیس و نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/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. همان طور که از شکلها معلوم است، افزودن نانوذرات اكسيدآهن به نانوسيال سيليس، عبور نور از نانوسيال سیلیس را به میزان قابل توجهی کاهش داده است؛ طوری که نمونه با نسبت 50:50 و جزءحجمي 500ppm بيشترين عبور نور را در طول موج حدود 1070 nm به میزان 40% دارد که این مقدار در مورد نانوسیال سیلیس با همین جزءحجمی در همان طول موج، حدود 60% است. در نمونههای با جزءحجمی ppm 2000 عبور نور به شدت کاهش یافته است و در نمونه با نسبت 50:50 تقریبا هیچ نوری از نمونه عبور نمی کند؛ 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 اکسیدآهن برای بهبود خواص تابشی نانوسیال سیلیس را تایید میکند. با توجه به نتایج "شکلهای 4 و 5"، سه نانوسیال F3 ،F2 و F8 از غلظتهای مختلف (500ppm، 1000ppm و 2000ppm) با نسبت 50:50 (عبور نور كمتر و پايدارى بهتر مبت به سایر نمونهها) بهعنوان نمونههای اصلی سیال عامل کلکتور انتخاب می شود. برای بررسی بهتر خواصی تابشی این نمونهها، ضریب میرایی (K( $\lambda$ ) براساس میزان عبور نور ( $\lambda$ ) 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:

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

همان طور که در "شکل 6" مشاهده می شود، نانوسیال ترکیبی اکسید آهن/سیلیس با جزء حجمی 2000 ppm در حالت بیشینه موجب افزایش ضریب میرایی تا 17.57 cm<sup>-1</sup> 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



Fig. 7 Experimental setup for DASC outdoor performance test (DASC: Direct Absorption Solar Collector; RCB: Refrigerated Circulating Bath; DAQ: Data Acquisition System)
 شكل 7 تصوير كلكتور جذب مستقيم مورد آزمون (DASC: كلكتور خورشيدى)
 جذب مستقيم؛ RCB: حمام سيركولاسيون تبريدى؛ DAQ: سيستم اخذ دادمها)

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

طرحواره سیکل آزمون براساس استاندارد 2-EN 12975 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 می رود. یک منبع انبساط با ظرفیت حدود 5 لیتر استفاده می شود که برای جلوگیری از اتلافات حرارتی عایق بندی شده است. برای کنترل دمای اولیه، سیال عامل با استفاده از حمام سیر کولاسیون گرم یا سرد می شود تا دمای ورودی ثابت بماند.

تجهیزات اندازه گیری شامل دو دبی سنج با دقت %1± بازه اندازه گیری مدل توربینی ویژن 1000 شرکت سازنده لیکو، چهار دماسنج PT100 برای اندازه گیری دماهای سیال در ورود و خروج کلکتورها با دقت ℃0.1±، یک دماسنج دیگر برای اندازه گیری دمای هوا، پیرانومتر Kipp&Zonen-CMP3 برای اندازه گیری تابش خورشیدی کلی و یک آنمومتر (سرعتسنج) TESTO 125 برای اندازه گیری سرعت هوا با دقت m/s است. یک سیستم ثبت دادهها نیز برای ثبت تمامی اندازه گیری ها به کار رفته است.

برای محاسبه بازده کلکتور ( $\eta$ ) 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 ( $\eta_0$ ) و شیب نمودار بازده ( $a_1$ ) ضریب اتلاف حرارت از کلکتور خواهد بود:

$$n = \frac{\dot{m}c_{\rm p}(T_{\rm out} - T_{\rm in})}{(3)}$$

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

$$T_{in} - T_{amb}$$
(4)

$$T_{\rm m}^* = \frac{10}{G_{\rm T}} \tag{5}$$

که در ان، *ش*و و <sub>C</sub><sub>p</sub> به ترتیب دبی و گرمای ویژه سیال عامل، T<sub>in</sub> و T<sub>out</sub> به ترتیب دمای سیال عامل ورودی و خروجی به کلکتور است. A<sub>G</sub> مساحت دهانه کلکتور و <sub>G</sub>T تابش خورشید کلی برخوردی به کلکتور است.



**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 اکسیدآهن/سیلیس در طول موجهای



Fig. 6 Extinction coefficient of hybrid nanofluids at different wavelengths شکل 6 ضریب میرایی نانوسیالهای ترکیبی اکسیدآهن/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 (شکل 7). (35.6961°) 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، <sup>3</sup>50 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



 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 ppn و نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/سیلیس با جزء حجمی 1000 (F5)) در دبی 0.0225 kg/s در "شکل 9" نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، بازده کلکتور با استفاده از نانوسیال سیلیس بهعنوان 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 احتمالا 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 بهدست آمده از طیفسنج دوپرتویی با استفاده از میزان عبور و با صرفنظر از بازتاب توسط خود دستگاه محاسبه میشود. بنابراین خطای زیادی دارد و نمیتوان به آن استناد کرد چرا که اتفاقا از اثرات بازتاب در آن با وجود قابل ملاحظه بودن، صرفنظر 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 0, این بیشتری بیسینه $(\eta_0)$  نانوسیال سیلیس، سیال پایه و نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/سیلیس در دبی 1000 به ترتیب 51 20 و 79 درصد می- باشد.

نتایج، توانایی بیشتر نانوسیال ترکیبی آکسیدآهن/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 اکسیدآهن/سیلیس برخوردار میباشد این نتایج نشان میدهد که افزودن نانوسیال اکسیدآهن به نانوسیال سیلیس و ساخت نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/سیلیس موجب بهبود خواص تابشی و کارایی کلکتور شده است.

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

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

$$\frac{\mu_{\rm eff}}{\mu_{\rm f}} = 1 + C_{\mu} f_{\rm v} \tag{6}$$

که در آن،  $_{\mu}$  از طریق یک رابطه با پارامترهای دیگر سیال تعیین می شود. در موارد زیادی، 10 =  $_{\mu}$  تقریب مناسبی است [24]. اگر 0.002 =  $f_{\nu}$  باشد (بیشترین جزءحجمی نانوسیالهای این تحقیق)، واضح است که تغییر جزئی در لزجت سیال پایه بهوجود آمده است. با توجه یه این که چگالی نیز در این جزءحجمی های پایین تغییر چندانی ندارد، میتوان گفت توان پمپ در صورت پایداری نانوسیال، تغییر چندانی نخواهد کرد.

"شکل 10" تغییرات کارآیی کلکتور را برحسب اختلاف دمای کاهش -یافته برای دبیهای مختلف و سیال عامل F<sub>2</sub> نشان میدهد. کارآیی بیشینه کلکتور برای دبیهای مختلف و سیال عامل F<sub>2</sub> نشان میدهد. کارآیی بیشینه برابر %75، %73 و %88 میباشد. کارآیی کلکتور با افزایش دبی ورودی افزایش مییابد. با افزایش دبی، بهدلیل اینکه 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 کارآیی بیشینه با افزایش دبی از 8/0.007 به 0.015 kg/s بیشتر از تغییر کارآیی بیشینه با افزایش دبی از 0.025 kg/s 0.007 به 0.0225 kg/s محاوان مثال تغییر کارآیی 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 کارآیی بیشینه با تغییر دبی از kg/s 0.0225 kg/s به 0.015 به 0.025 kg/s می باشد. این موضوع نشان می دهد که در دبیهای کم، کارایی با دبی افزایش می یابد 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

آن خواهد بود. به عبارت دیگر، با افزایش بیشتر دبی، کارآیی 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]:

(7) Nu = (3.442 + 0.157 f<sub>v</sub>)Re<sup>0.1528</sup>
(7) افزایش عدد نوسلت نیز افزایش ضریب تلفات حرارتی از کلکتور را نشان میدهد. افزایش شیب نمودارهای بازده با جزء حجمی نانوسیال در "شکل 10"، مجددا نشان میدهد 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 "شكل 11" تأثير جزء حجمی نانوسیال تركیبی اكسیدآهن/سیلیس بر كارآیی كلكتور جذب مستقیم در دبی جرمی kg/s 2002 نشان داده شده است. همانطور كه از نتایج پیداست، كارایی كلكتور با استفاده از سیال پایه كمتر از حالت استفاده از نانوسیال تركیبی بهعنوان سیال عامل است. در دبی ثابت، هر چه نانوسیال غلیظتر باشد، میزان جذب انرژی خورشید بیشتر بوده و در مجموع كارآیی افزایش بیشتری مییابد. كارآیی بیشینه كلكتور با استفاده از نانوسیال  $F_5$ ,  $F_2$  و  $F_5$  . 2002 به ترتیب 7.88 4.7 و میافده از نانوسیال  $F_5$ ,  $F_2$  و  $F_5$  . 2000 به ترتیب 7.89 و ممان طور كه قبلا بیان شد بهعلت افزایش جذب انرژی خورشیدی توسط همان طور كه قبلا بیان شد بهعلت افزایش جذب انرژی خورشیدی توسط نانوسیال نسبت به سیال پایه است كه منجر به افزایش كارآیی می شود.

# 6- نتیجه گیری

در این تحقیق، در گام نخست، نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/سیلیس بر پایه آب دیونیزه در نسبتها و غلظتهای مختلف ساخته شد و پایداری آن با استفاده از روش جذب طیفی مورد بررسی قرار گرفت. نمونههای نانوسیال سیلیس تهیه شده در این تحقیق، حداقل بعد از 6 ماه بهصورت عینی از پایداری مناسبی برخوردار بوده و همچنین نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/ سیلیس نیز حداقل تا یک ماه پس از تولید از پایداری مناسبی برخوردار بوده است (حدود 1% تغییر در جذب نمونهها). بررسی خواص تابشی با استفاده



Fig. 10 Effect of flowrate on collector efficiency using F2 nanofluid  $F_2$  شکل 10 تاثیر دبی برکارآیی کلکتور با نانوسیال  $F_2$ 



Fig. 11 Effect of volume fraction of hybrid nanofluid on collector efficiency at 0.0225 kg/s شكل 11 تاثير جزء حجمى نانو سيال تركيبى اكسيدآهن/ سيليس بر كارآيى كلكتور در دبى kg/s

از روش طیفسنجی نوری نشان داد که نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/سیلیس از جذب بیشتری نسبت به نانوسیال سیلیس و سیال پایه برخوردار است طوری که نمونه F2 با جزء حجمی ppm در حالت بیشینه موجب افزایش ضریب میرایی تا <sup>۱</sup>-17.57 cm نسبت به سیال پایه می شود. نتیجه جالبی که از بررسی تجربی عملکرد کلکتور جذب مستقیم بهدست آمد آن است که با استفاده از نانوسیال سیلیس بهعنوان سیال عامل، کارایی کلکتور حتى در مقايسه با سيال پايه نيز كمتر است. اين امر از بازتاب نور توسط اين سیال ناشی شده است. همچنین استفاده از نانوسیال ترکیبی اکسیدآهن/ لميس به عنوان سيال عامل، موجب افزايش كارآيي كلكتور نسبت به حالت استفاده از نانو سیال سیلیس و سیال پایه در تمامی دبیهای ورودی خواهد شد. نتایج نشان داد کارآیی کلکتور در بیشترین مقدار خود با استفاده از نانوسيال تركيبي در دبي 83.7 kg/s و جزءحجمي 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 کارآیی بیشینه با افزایش دبی از 0.0075 به 0.015 kg/s بیشتر از تغییر کارآیی بیشینه با افزایش دبی از kg/s 0.015 به 0.0225 kg/s است. این امر نشان میدهد که مقدار بهینهای 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 سیستمهای گرمایش خورشیدی با اهداف مختلف بهویژه برای کاربریهای دما پایین (کمتر از C° C) مانند سیستههای ترکیبی گرمایش خورشیدی (تامین همزمان آب گرم و گرمایش فضا) را فراهم میکند.

#### 7- مراجع

- 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

- [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 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 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 lowtemperature 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>– H<sub>2</sub>O 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-Behabadi, Performance characteristics of a residential-type direct absorption solar collector using MWCNT nanofluid, *Renewable Energy*, Vol. 87, pp. 754–764, 2016.