



## بررسی عددی تأثیر پارامترهای مؤثر بر روی کارایی کلکتور خورشیدی حجمی با استفاده از نانوسیال آب-اکسید مس

علیرضا کیانی ایرانیپور<sup>۱\*</sup>، مریم کرمی<sup>۲</sup> و شهرام دلفانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشگاه خوارزمی، کرج

<sup>۳</sup> استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۲/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۹

### چکیده

کلکتورهای خورشیدی، سیستم‌هایی هستند که با انتقال انرژی خورشیدی به سیال، باعث افزایش دمای آن می‌شوند. استفاده از سیالات پایه معمولی از قبیل، آب و اتیلن گلیکول به علت خواص حرارتی نسبتاً ضعیف، راندمان پایینی در این وسایل ایجاد می‌کند؛ لذا اخیراً دانشمندان به فکر استفاده از نانوسیال‌ها افتاده‌اند که دارای خواص حرارتی ویژه‌ای هستند. در این مقاله، اثر پارامترهای جدیدی مثل، ضخامت شیشه، ضخامت عایق کف کلکتور و استفاده از کف جاذب به جای کف بازتابنده روی کارایی کلکتور خورشیدی جذب مستقیم در سیال پایه و نانوسیال، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از شبیه‌سازی عددی در این کار استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی، نتایج تجربی موجود در مقالات به کار گرفته شده است. نانوسیال در کسرهای حجمی ۰/۰۵٪ و ۰/۱٪، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزایش ضخامت شیشه، راندمان در کسرهای حجمی مختلف بین ۳/۲۲ تا ۷/۳۶ درصد کاهش می‌یابد. افزایش ضخامت عایق از ۲۵ تا ۱۰۰ میلیمتر به طور میانگین راندمان را بین ۱/۵۳ تا ۲/۹۵ درصد زیاد می‌کند. نهایتاً مشاهده می‌شود، استفاده از کف جاذب به جای کف بازتابنده، تأثیر قابل توجهی روی راندمان به خصوص در کسرهای حجمی پایین دارد؛ به طوری که در سیال پایه افزایش راندمان معادل با ۱۶/۱۱٪ رخ می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** کلکتور خورشیدی حجمی؛ شبیه‌سازی عددی؛ نانوسیال آب-اکسید مس؛ افزایش کارایی.

## Numerical Investigations of the Influence of Effective Parameters on Efficiency of DASC with CuO-H<sub>2</sub>O Nanofluid

A.K. Iranpour<sup>1,\*</sup>, M. Karami<sup>2</sup>, Sh.Delfani<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.S. Student, Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assist. Prof., Mech. Eng., Kharazmi Univ., Karaj, Iran.

<sup>3</sup> Assist. Prof., Department of Building Installations, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

### Abstract

Solar collector is a device that increases temperature of fluids with transmission of solar energy to working fluid. Using base fluids such as water and ethylene glycol causes low efficiency in these devices. Due to low thermal properties. Recent researches showed that nanofluids have wide use as working fluid of solar collectors, because of special thermophysical and thermo-optical properties. In this paper effects of new parameters for instance, thickness of glass and insulation and use of black internal surface instead of reflective internal surface, have been investigated on efficiency of DASC in different working fluids. Numerical simulation used in this paper. Simulated nanofluids have 0, 0.005% and 0.01% volume fractions. The efficiency in different volume fractions decrease between 3.22 to 7.36% by increasing thickness of glass. Changing thickness of insulation improved the efficiency of collector by 1.53- 2.95% in the base fluid and nanofluid. Finally, results showed that use of black internal surface specially in low volume fraction has significant effect in efficiency; Note that efficiency improved by 16.11% in the base fluid.

**Keywords:** Direct Absorption Solar Collector; Numerical Simulation; CuO-H<sub>2</sub>O Nanofluid; Efficiency Improvement.

## ۱- مقدمه

دارا بودن انرژی مناسب لازمه دستیابی به یک اقتصاد قوی و پویا است و استفاده از منابع گوناگون می‌تواند دسترسی به منابع مختلف را تسهیل کند. با توجه به مشکلاتی نظیر، آلودگی هوا و محدودیت منابع تجدیدناپذیر (سوخت‌های فسیلی) که امروزه با آنها رو به رو هستیم، لزوم توجه به منابع پاک و در دسترس انرژی بیش از پیش مشخص می‌شود، با این شرایط انرژی خورشیدی، یکی از مطمئن‌ترین گزینه‌ها برای تولید انرژی الکتریکی و گرمایی شناخته می‌شود. اگر انرژی خورشیدی رسیده به زمین به درستی کنترل شود، جهان بیشتر از این به سوخت‌های فسیلی نیاز نخواهد داشت [۱ و ۲]. کشور ایران به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی و امکان استفاده از این انرژی جهت تأمین نیازهای خود، بسیار غنی است و دریافتی انرژی خورشیدی در آن حدود ۴۰۰۰ برابر انرژی مصرفی آن است که می‌توان کلیه نیازهای کشور را با استفاده از انرژی آفتاب تأمین کرد. نانوسیال‌ها به سوسپانسیون نانوذرات فلزی و غیرفلزی (با اندازه کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر) در سیال پایه اطلاق می‌شود. افزودن آن‌ها موجب افزایش خواص حرارتی و تابشی سیال‌های پایه می‌شود. تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده از نانوسیال‌ها به عنوان سیال پایه کلکتورهای خورشیدی حجمی صورت گرفته است که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

تیاگی و همکارانش، برای اولین بار و در یک کار عددی به بررسی عملکرد کلکتور خورشیدی غیرمتمرکز پرداختند. در این مطالعه، از نانوسیال آب و آلومینیوم به عنوان محیط جاذب استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که راندمان کلکتور تا کسر حجمی شدیداً افزایش می‌یابد، اما در کسرهای حجمی بالاتر، این روند رشد کند می‌شود. با بررسی اثر عمق جذب، قطر نانوذره و طول کلکتور مشاهده شد که تنها عمق جذب اثر قابل توجهی بر راندمان دارد [۳].

اتانیکار و همکارانش، عملکرد یک میکروکلکتور جذب مستقیم را به شکل تجربی و عددی، مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، به بررسی تأثیر نانوسیال‌های گرافیت، نانولوله کربنی و نقره بر پایه آب پرداخته شد. نتایج تجربی نشان داد که استفاده از نانوذره نقره با قطر متوسط ۲۰ نانومتر، راندمان کلکتور خورشیدی جذب مستقیم را به اندازه ۵ درصد نسبت به سیال پایه افزایش می‌دهد. نتایج بدست آمده از کار تجربی

و عددی نشان داد که راندمان کلکتور تا کسر حجمی، افزایش چشمگیری دارد؛ اما از آن به بعد شیب افزایش راندمان بسیار کند شده تا جایی که به مقدار ثابتی می‌رسد. نهایتاً بررسی اثر قطر نانوذرات نقره روی راندمان کلکتور نشان داد که این پارامتر با افزایش قطر، کاهش ناچیزی پیدا می‌کند [۴].

لیو و همکارانش با استفاده از حل عددی و روش تجربی، به بررسی استفاده از نانوذره گرافن بر پایه سیال یونی در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم، در دمای کاری بالا پرداختند. نتایج آنها حاکی از آن بود که محیط جاذب با درصد وزنی ۰/۰۰۵ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر و تحت تابش  $20 \times 1000$  وات بر مترمربع، راندمان را تا ۷۰٪ افزایش می‌دهد [۵].

لو و همکارانش، افزایش راندمان و خواص نوری یک کلکتور جذب مستقیم را به صورت تجربی-عددی و با استفاده از نانوسیال‌های مختلف، مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از نانوسیال‌های اکسید تیتانیوم، اکسید آلومینیوم، نقره، مس، اکسید سیلیسیوم، گرافیت و نانولوله کربنی بر پایه روغن استفاده شد. نتایج نتایج نشان داد که دمای خروجی و راندمان به ترتیب، ۳۰-۱۰۰ کلوین و ۲-۲۵ درصد افزایش می‌یابد [۶].

پروین و همکارانش، در یک کار عددی پارامترهای عدد ناسلت، تولید آنتروپی متوسط، عدد بیجن و راندمان یک کلکتور حجمی بر پایه نانوسیال آب-مس را به صورت تابعی از عدد رینولدز و کسر حجمی، مورد مطالعه قرار دادند. معادلات حاکم با استفاده از روش المان محدود و تکنیک باقیمانده وزنی گلرکین حل شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که عدد ناسلت و آنتروپی تولیدی متوسط با افزایش کسر حجمی مس، افزایش می‌یابد؛ همچنین با مقایسه راندمان کلکتور بر پایه آب-مس و آب-آلومینیوم مشاهده شد، راندمان کلکتور با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز در هر دو مورد افزایش می‌یابد و این افزایش در آلومینیوم اندکی بیشتر است [۷].

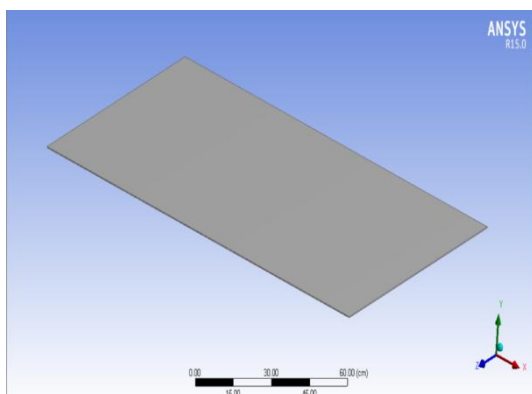
باندرا و همکارانش، افزایش راندمان یک سیستم خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال آب-نقره را به صورت تجربی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند، در کسر حجمی ppm ۶/۵ میزان انرژی حرارتی ذخیره شده تا ۱۴٪ افزایش می‌یابد. آنها همچنین نشان دادند که نرخ جذب ویژه

افزایش دهد. شیشه مانند سیال، یک محیط جاذب تشعشع بوده، با افزایش ضخامت، میزان تشعشع ورودی را کاهش می‌دهد؛ از طرف دیگر به علت ضریب هدایت حرارتی پایین به عنوان عایق عمل کرده، موجب کاهش تلفات می‌شود. کف جاذب بر خلاف کف بازتابنده، تشعشعات عبوری از محیط نانوسیال را جذب کرده، از طریق هدایت و جابجایی به سیال منتقل می‌کند؛ این امر به خصوص در کسرهای حجمی پایین می‌تواند اثر مثبتی در افزایش کارایی داشته باشد. در این مطالعه، اثر پارامترهای ذکر شده به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار آنسیس فلونت<sup>۱</sup>، مورد بررسی قرار می‌گیرد و میزان تأثیرگذاری هر کدام روی راندمان محاسبه می‌شود.

## ۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

با تعیین خواص ترموفیزیکی و تابشی سیال عامل، می‌توان به حل معادلات حاکم با استفاده از روش‌های حل عددی پرداخت. مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق، مدل ترکیبی شامل، معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی و معادله انتقال حرارت تشعشعی برای بررسی رفتار کلکتورهای جذب مستقیم است. بدین منظور معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی و همچنین انتقال تابش به صورت همزمان حل شده، پس از تعیین توزیع دمای داخل کلکتور، کارایی آن پیش‌بینی می‌شود.

در شکل ۱ نمایشی از هندسه کلکتور قابل مشاهده است:



شکل ۱- نمایشی از هندسه کلکتور

<sup>۱</sup> Ansys FLUENT

تا کسر حجمی ۶/۵ ppm افزایش یافته و از آن به بعد به علت افزایش فعل و انفعال این ذرات، کاهش می‌یابد [۸].

کرمی و همکارانش، افزایش راندمان کلکتور خورشیدی جذب مستقیم را به صورت تجربی، مورد بررسی قرار دادند. از نانوسیال اکسید مس بر پایه مخلوط آب و اتیلن گلیکول، با کسر حجمی ۷۰:۳۰ به عنوان محیط جاذب استفاده شد. تست‌ها در دبی ۵۴ تا ۹۰ لیتر بر ساعت (۰/۱۵-۰/۲۵ کیلوگرم بر ثانیه) و برای دو سطح داخلی سیاه و بازتابنده انجام گرفت. نتایج نشان داد، راندمان کلکتور با استفاده از سطح داخلی سیاه و در دبی ۹۰ لیتر بر ساعت به اندازه ۱۱/۴٪ از سطح داخلی بازتابنده بیشتر است؛ همچنین مشاهده شد، با افزایش کسر حجمی و دبی جرمی نانوسیال،

راندمان افزایش یافته، استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل راندمان را بین ۹ تا ۱۷ درصد نسبت به سیال پایه افزایش می‌دهد؛ همچنین آنها عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال آب و نانولوله کربنی را به صورت عددی، مورد بررسی قرار دادند. معادلات انرژی و انتقال حرارت تشعشعی به شکل عددی حل شده، از پروفیل سرعت سهموی داخل کلکتور استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد، استفاده از پروفیل سهموی، دمای خروجی سیال را نسبت به پروفیل ثابت کمتر نشان می‌دهد؛ همچنین با حضور نانوذرات نانولوله کربنی در سیال پایه راندمان حدود ۱۷٪ نسبت به کلکتور معمولی افزایش می‌یابد [۹،۱۰].

گوپتا و همکارانش، راندمان یک کلکتور خورشیدی حجمی را با استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. تست‌ها با استفاده از نانوذره با قطر ۲۰ نانومتر و در چهار کسر حجمی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ درصد انجام شد. نتایج نشان داد، با استفاده از نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف راندمان به ترتیب، ۲۲/۱، ۳۹/۶، ۲۴/۶ و ۱۸/۷۵ درصد افزایش می‌یابد. این نتایج حاکی از آن است که راندمان نسبت به کسر حجمی، دارای یک نقطه بهینه است که بالاتر و پایین‌تر از آن نقطه، راندمان کاهش می‌یابد [۱۱].

ضخامت عایق و شیشه و همچنین نوع کف، از عوامل تأثیرگذار بر راندمان کلکتور خورشیدی جذب مستقیم، به خصوص با استفاده از نانوسیال است. عایق با کاهش شار حرارتی خروجی مخصوصاً در دماهای بالا می‌تواند راندمان را

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

معادله انرژی در جریان سه بعدی پایا، با جمله چشمه تشعشعی به صورت معادله (۵) است:

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + \mu \phi - \nabla \cdot q_r \quad (5)$$

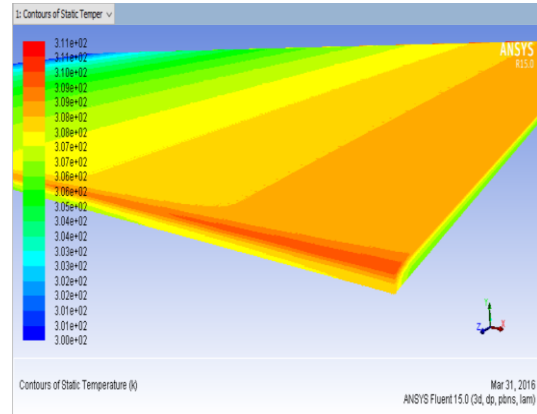
برای حل معادلات نیاز به تعیین جمله  $q_r$  است. جمله همان شار حرارت تشعشعی است که با انتگرال گیری از جواب رابطه (۶) در زوایای فضایی و طول موجهای مختلف محاسبه می شود [۴]:

$$\frac{di_\lambda}{dS} = -(K_{a\lambda} + K_{s\lambda}) i_\lambda(S) + K_{a\lambda} i_{\lambda b}(S) + K_{s\lambda} \frac{1}{4} \int_0^4 i_\lambda(S, \omega_i) (\omega, \omega_i) d\omega_i \quad (6)$$

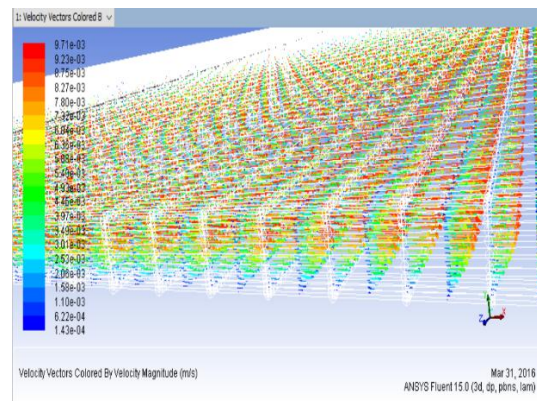
که  $i_\lambda$  شدت طیفی تابش،  $i_{\lambda b}$  گسیل جسم سیاه است که از رابطه پلانک به دست می آید،  $\Phi$  تابع فاز پخش<sup>۱</sup>،  $\omega$  زاویه فضایی و  $S$  مسیر دلخواه است.  $K_{a\lambda}$  ضریب جذب طیفی و  $K_{s\lambda}$  ضریب پخش طیفی است. جمع این ضرایب  $K_{e\lambda}$  ضریب اطفاء<sup>۲</sup> طیفی را نشان می دهد. جمله اول سمت راست معادله فوق، میرایی<sup>۳</sup> تابش ناشی از جذب و پخش تابش توسط محیط، جمله دوم افزایش شدت تابش به دلیل گسیل تابش توسط محیط (در اثر بالا رفتن دمای محیط) و جمله سوم نیز، افزایش تابش در اثر پخش تابش برخوردی توسط محیط را نشان می دهد.

پخش نانوذرات براساس تقریب رایلی (که در آن پارامتر اندازه بسیار کوچکتر از یک است یعنی  $\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} \ll 1$ ) در

در شکل های ۲ و ۳ به ترتیب، کانتور دما و بردارهای سرعت نانوسیال در دبی ۲ لیتر بر دقیقه و کسر حجمی ۰/۰۲ ارائه شده است:



شکل ۲- کانتور دمای نانوسیال



شکل ۳- بردارهای سرعت نانوسیال

### ۲-۱- معادلات حاکم

معادله بقای جرم برای سیال تراکم ناپذیر در حالت پایای سه بعدی به شکل معادله (۱) است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

بقای مومنتم برای جریان تراکم ناپذیر و پایای سه بعدی به شکل معادلات (۲)، (۳) و (۴) است:

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

<sup>1</sup> Scattering Phase Function

<sup>2</sup> Extinction Coefficient

<sup>3</sup> Attenuation

گسیل تابش ناشی از بالا رفتن دمای محیط ( $i_{\lambda b}$ ) با استفاده از رابطه تابش جسم سیاه پلانک یعنی، رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$i_{\lambda b}(\lambda, T(x, y, z)) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} \quad (11)$$

که  $h$  ثابت پلانک،  $k_B$  ثابت بولتزمن،  $c$  سرعت نور در محیط و  $\lambda$  طول موج است.

پس از ساده‌سازی و حل معادله انتقال حرارت تشعشی، شار حرارتی تابشی از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$\nabla \cdot q_r(S) = 4 \int_{\lambda} K_{a\lambda} \left[ i_{\lambda b}(\lambda, S) - \frac{1}{4\pi} \int_{\omega_i=0}^{4\pi} i(\lambda, S, \omega) d\omega_i \right] d\lambda \quad (12)$$

به منظور شبیه‌سازی جریان سیال به همراه نانوذرات، فرض می‌شود که نانوذرات با محیط پیرامون خود دمای یکسانی دارد. نسبت سطح به حجم زیاد این ذرات به انتقال حرارت آبی آنها به محیط پیرامون منجر می‌شود؛ همچنین فرض می‌شود که نانوذرات برای مدت نامحدود در سیال به صورت معلق باقی بمانند و همراه با سیال و با سرعت لغزش ناچیز حرکت می‌کنند [۱۲]. با توجه فرضیات انجام شده معادلات به صورت تکفاز حل می‌شود. چگالی نانوسیال از رابطه ارائه شده توسط پاک و چو [۱۳] محاسبه می‌شود:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (12)$$

به منظور محاسبه گرمای ویژه نانوسیال از رابطه هانلی و همکارانش [۱۴] استفاده می‌شود:

$$c_{p,nf} = \frac{\phi(\rho c_p)_p + (1 - \phi)(\rho c_p)_f}{\rho_{nf}} \quad (13)$$

برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی از مدل ارائه شده توسط ماکسول [۱۵] و برای محاسبه ویسکوزیته از مدل برینکم [۱۶] استفاده می‌شود:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)} \quad (14)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \cdot \left( \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \right) \quad (15)$$

به منظور محاسبه ضرایب جذب و پخش در معادلات، می‌توان از تقریب پخش رایلی استفاده کرد. این تقریب دارای محدودیت اندازه ذرات بوده، از طرف دیگر توانایی بسیار

مقایسه با تابش جذب‌شده، قابل صرف نظر است [۳]. از نظر فیزیکی، پخش رایلی به عنوان رژیمی که در آن اندازه ذره بسیار کوچکتر از طول موج تابش برخوردی است، تعریف می‌شود. براساس تقریب پخش رایلی و فرض پخش مستقل که در محدوده کسر حجمی کمتر از ۰/۰۶ است، ضریب اطفاء برای یک ذره کروی از رابطه (۷) بدست می‌آید [۴]:

$$K_{e\lambda} = \frac{3f_v Q_{e\lambda}(\alpha, m)}{2D} \quad (7)$$

که  $f_v$  کسر حجمی ذرات،  $Q_{e\lambda}$  راندمان اطفاء<sup>۱</sup> و  $m$  ضریب شکست بی بعد<sup>۲</sup> ذرات است.

راندمان اطفاء، مجموع کارایی جذب ( $Q_{a\lambda}$ ) و پخش ( $Q_{s\lambda}$ ) است، از روابط (۸) و (۹) بدست می‌آید [۴]:

$$Q_{a\lambda} = 4\alpha \cdot \text{Im} \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \left[ 1 + \frac{2}{15} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \frac{m^4 + 27m^2 + 38}{2m^2 + 3} \right] \right\} \quad (8)$$

$$Q_{s\lambda} = \frac{8}{3} \alpha^4 \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \quad (9)$$

با بررسی معادلات (۸) و (۹) می‌توان دریافت که راندمان پخش ( $Q_{s\lambda}$ ) با توان چهارم اندازه ذره تغییر می‌کند. علاوه بر آن، مشاهده می‌شود که راندمان جذب ( $Q_{a\lambda}$ ) غالباً به صورت خطی با اندازه ذره تغییر می‌کند. هرچند عبارت  $\alpha^2$  در جمله موهومی معادله وجود دارد، به علت اینکه  $\alpha \ll 1$  است، این امر درست می‌باشد؛ بنابراین، می‌توان از جمله سوم معادله انتقال حرارت تشعشی صرف نظر کرد که معادل با افزایش تابش در اثر پخش تابش برخوردی توسط محیط است ( $k_{s\lambda} \ll 0$ ) [۳].

نهایتاً با ساده‌سازی معادله (۶) به معادله (۱۰) تبدیل می‌شود:

$$\frac{di_{\lambda}}{dS} = -K_{a\lambda} i_{\lambda}(S) + K_{a\lambda} i_{\lambda b}(S) \quad (10)$$

این معادله شامل، کاهش شدت تابش طیفی در راستای  $S$  بر حسب ضریب اطفاء نانوسیال، به همراه افزایش آن به واسطه تابش حرارتی گسیل شده از نانوسیال در دماهای بالا است.

<sup>1</sup> Extinction Efficiency

<sup>2</sup> Normalized Refractive Index

که در معادلات بالا  $A_c$  سطح مقطع کلکتور،  $F_R$  فاکتور برداشت<sup>۱</sup>،  $(\tau\alpha)$  حاصلضرب جذب-عبور<sup>۲</sup>،  $U_L$  ضریب افت کلی<sup>۳</sup> و  $I$  تشعشع خورشیدی برخوردی است. پس از به دست آوردن راندمان کلکتور در دماهای مختلف، از برازش داده‌ها یک خط بدست می‌آید. محل برخورد این منحنی با محور عمودی برابر  $F_R(\tau\alpha)$  بوده که پارامتر انرژی جذب شده نامیده می‌شود<sup>۴</sup>. در نقطه‌ای که دمای سیال ورودی به کلکتور برابر با دمای محیط باشد، راندمان کلکتور بیشترین مقدار خود را دارا است؛ همچنین شیب نمودار رسم شده برابر با  $F_R U_L$  است که پارامتر افت انرژی<sup>۵</sup> نامیده می‌شود. در محل برخورد منحنی با محور افقی راندمان صفر است که به عنوان نقطه ایستایی شناخته می‌شود.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی حل عددی از داده‌های تجربی گوپتا و همکارانش [۱۱] در دبی دو لیتر بر دقیقه و کسر حجمی ۰ و ۰/۰۵٪ استفاده شده است. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب، مقایسه نتایج عددی و تجربی را در کسر حجمی ۰ و ۰/۰۵٪ بر حسب پارامتر دمای کاهش‌ی تعریف شده در استاندارد ASHRAE نشان می‌دهد:

برای سیال پایه و نانوسیال، در نقاط اندازه‌گیری شده نتایج حل عددی به ترتیب ۱/۶۷ و ۱/۶۳ درصد با نتایج تجربی تفاوت دارد.

#### ۳-۲- استقلال از شبکه

برای حصول اطمینان از اینکه جواب‌ها نسبت به مش تغییر زیادی نداشته باشد، شبکه‌هایی با تعداد نقاط مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. پارامتر مورد نظر در این بررسی، راندمان کلکتور است. نتایج حاصل از استقلال شبکه در جدول ۱ ارائه شده است.

پایینی در پیش‌بینی خواص تابشی دارد [۱۷]؛ بنابراین در این مقاله به منظور افزایش دقت در محاسبه ضرایب، از کار آزمایشگاهی ارائه شده توسط کرمی و همکارانش [۱۸] استفاده شده است.

#### ۲-۲- شرایط مرزی

به منظور تحلیل انرژی داخلی کلکتور، از شرایط مرزی ارائه شده در معادلات (۱۷) و (۱۸) استفاده می‌شود:

$$x = 0, 0 < y < H, 0 < z < W \rightarrow T(0, y, z) = T_{in}, u(0, y, z) = U_0 \quad (16)$$

$$y = 0, x, z > 0 \rightarrow -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = (1 - \tau_g - \rho_g) G_T - h(T_g - T_{amb}) \quad (17)$$

$T_{in}$  دمای ورودی،  $U_0$  سرعت ورودی،  $G_T$  شار خورشیدی برخوردی روی کلکتور و  $h(=h_{cv} + h_r)$  ضریب انتقال حرارت معادل جابجایی و تشعشع با محیط دردمای  $T_{amb}$ ،  $\tau_g$  و  $\rho_g$  ضرایب عبور و بازتاب شیشه است. همچنین  $T_g$  دمای سطح بالای شیشه است که از حل معادله هدایت حرارتی در شیشه بدست می‌آید. به عبارت دیگر، سطح بالایی شیشه، حرارت را با مکانیزم‌های جابجایی و تشعشع از دست می‌دهد. سطح ورودی کلکتور به عنوان ورودی با دما و سرعت ثابت در نظر گرفته می‌شود.

#### ۲-۳- محاسبه راندمان کلکتور

توان مفید کلکتور از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (18)$$

برای محاسبه راندمان کلکتور از رابطه (۲۰) استفاده می‌شود:

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{A.G_T} \quad (19)$$

به منظور بررسی عملکرد کلکتور، نمودار راندمان برحسب پارامتر دمایی کاهش‌ی ترسیم می‌شود. بر طبق استاندارد ASHRAE، توان مفید دریافتی و راندمان از روابط (۲۱) و (۲۲) بدست می‌آید:

$$Q_u = \dot{m}c_p(T_o - T_i) = A_c F_R [I(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (20)$$

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_c \cdot G_T} = \frac{F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_T}}{G_T} \quad (21)$$

<sup>1</sup> Removal Factor

<sup>2</sup> Absorptance-Transmittance Product

<sup>3</sup> Overall Loss Coefficient

<sup>4</sup> Absorbed Energy Parameter

<sup>5</sup> Energy Loss Parameter

همانطور که مشاهده می‌شود، بین مش‌های شماره ۸ و ۹ اختلاف راندمان زیر یک دهم درصد است، همچنین اختلاف بین درجه حرارت خروجی، کمتر از یک صدم کلوین است، از طرفی افزایش بیش از حد تعداد سلول‌ها، زمان حل را بسیار افزایش می‌دهد، بنابراین از مش شماره ۸ برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

### ۳-۳- اثر ضخامت شیشه بر راندمان کلکتور

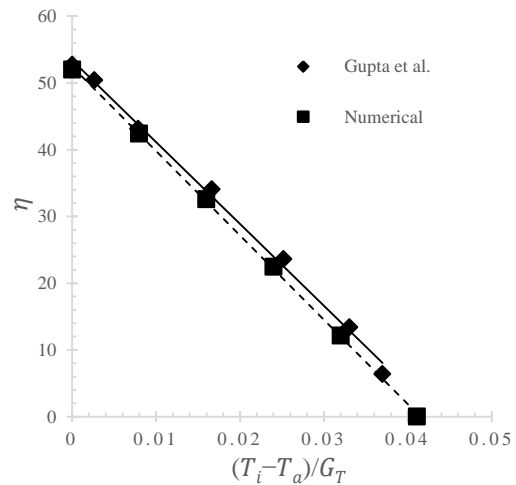
شیشه مانند سیال پایه یک محیط شفاف حجمی است که تابش برخوردی را جذب و پخش می‌کند، بنابراین با افزایش ضخامت آن تابش ورودی به سیال کاهش می‌یابد؛ از جهت دیگر به علت ضریب هدایت حرارتی پایین، می‌تواند با افزایش ضخامت اتلافات را کاهش دهد. در شکل‌های ۶ و ۷، اثر ضخامت شیشه دریافت‌کننده تابش بر راندمان کلکتور خورشیدی جذب مستقیم، در دبی ۲ لیتر بر دقیقه و برای سیال پایه و نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۱ درصد قابل مشاهده است:

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت، میزان جذب تابش برخوردی توسط شیشه افزایش می‌یابد؛ همچنین به علت اینکه شیشه نسبت به عایق ضریب هدایت حرارتی بسیار بیشتری دارد، افزایش ضخامت آن تأثیر قابل توجهی بر کاهش اتلافات و در نتیجه شیب منحنی راندمان ندارد و منحنی‌ها تقریباً موازی هستند.

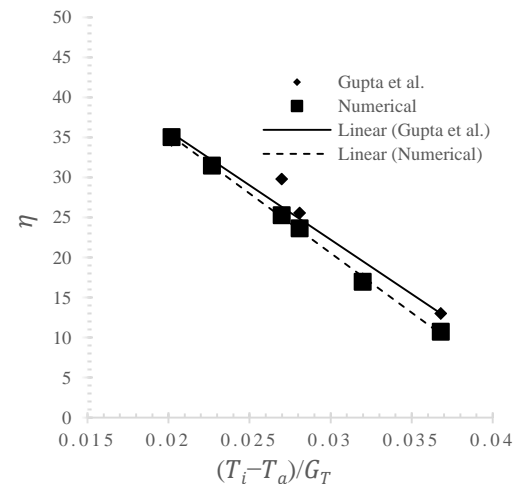
در سیال پایه با افزایش ضخامت از ۳ به ۶ و از ۶ به ۱۲ میلی‌متر راندمان به ترتیب، ۳/۲۲ و ۵/۸۴ درصد و در نانوسیال با افزایش ضخامت از ۳ به ۶ و از ۶ به ۱۲ میلی‌متر راندمان به ترتیب، ۳/۹۲ و ۷/۳۶ درصد کاهش می‌یابد؛ همچنین همانطور که انتظار می‌رود، اثر ضخامت در نانوسیال بیشتر از سیال پایه است.

### ۳-۴- اثر ضخامت عایق بر راندمان کلکتور

در شکل‌های ۸ و ۹، راندمان کلکتور بر حسب پارامتر دمای کاهشی و برای ضخامت‌های مختلف عایق رسم شده است. نمودارها در دبی ۲ لیتر بر دقیقه و به ترتیب برای سیال پایه و نانوسیال در کسر حجمی ۰/۰۱ درصد، رسم شده است.



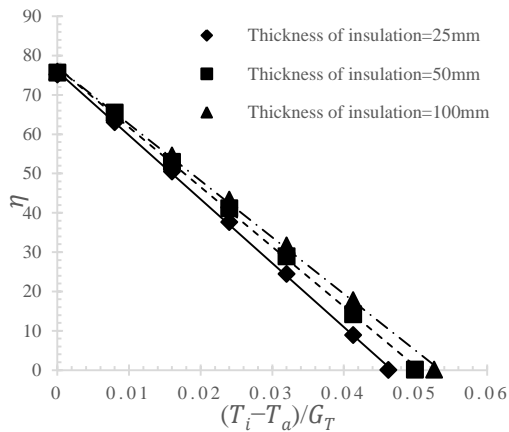
شکل ۴- مقایسه نتایج عددی و تجربی در سیال پایه



شکل ۵- مقایسه نتایج عددی و تجربی در نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۵ درصد

جدول ۱- نتایج حاصل از استقلال از شبکه

شماره	اندازه شبکه	راندمان
۱	۱×۱۵×۵۰	۴۸/۵۹
۲	۲×۱۵×۵۰	۵۰/۲۹
۳	۲×۳۰×۱۰۰	۵۰/۳۱
۴	۴×۳۰×۱۰۰	۵۱/۱۰
۵	۴×۶۰×۲۰۰	۵۱/۱۱
۶	۶×۶۰×۲۰۰	۵۱/۶۰
۷	۸×۶۰×۲۰۰	۵۱/۸۱
۸	۱۲×۶۰×۲۰۰	۵۲/۰۰
۹	۱۶×۶۰×۲۰۰	۵۲/۰۹
۱۰	۱۶×۱۲۰×۴۰۰	۵۲/۱۰



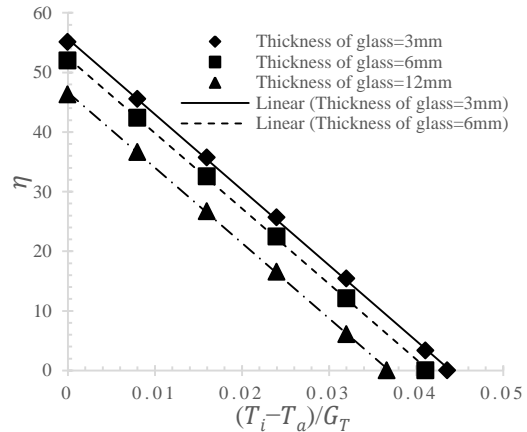
شکل ۹- اثر ضخامت عایق بر راندمان کلکتور با استفاده از نانوسیال در کسر حجمی ۰/۰۱ درصد

با افزایش ضخامت عایق کف کلکتور، همانطور که انتظار می‌رود، راندمان افزایش می‌یابد. در نقاطی که اختلاف دمای بین سیال ورودی و محیط کم است، راندمان‌ها تفاوت چندانی ندارند؛ اما با افزایش این اختلاف، نمودارها واگرا شده، شیب نمودار کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تلفات جابجایی و تشعشعی است؛ همچنین اثر کاهش اتلافات در نانوسیال، بیشتر از سیال پایه است. در سیال پایه با افزایش ضخامت عایق از ۲۵ به ۵۰ میلی‌متر و از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌متر راندمان به ترتیب، ۲/۴۲ و ۱/۵۳ درصد افزایش می‌یابد؛ این در حالیست که در نانوسیال به ترتیب، ۲/۹۵ و ۱/۸۹ درصد افزایش رخ می‌دهد.

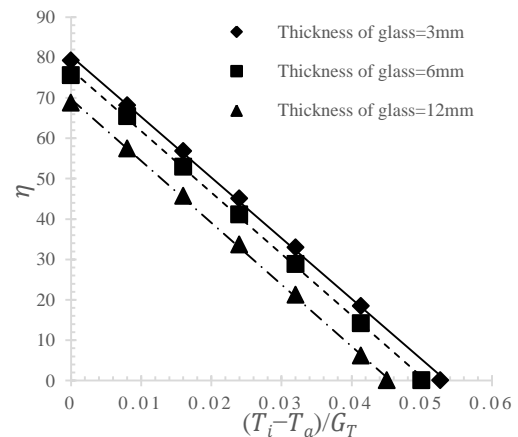
### ۵-۳- اثر نوع کف بر راندمان کلکتور

در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲، اثر استفاده از کف جاذب به جای کف بازتابنده در دبی ۲ لیتر بر دقیقه و در کسرهای حجمی ۰ و ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ درصد، بررسی شده است.

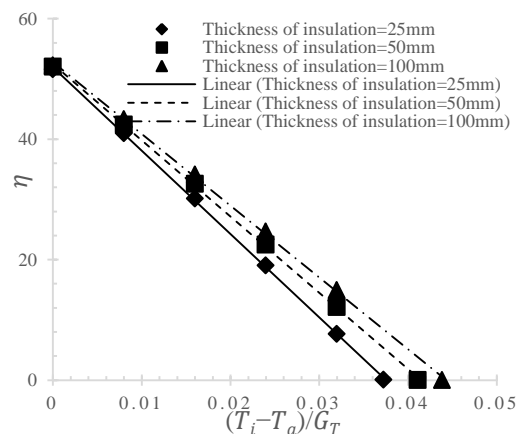
استفاده از کف جاذب به جای کف بازتابنده باعث می‌شود، تشعشع پس از عبور از محیط سیال عامل، به جای بازتاب و خروج از آن توسط کف جذب شده، از طریق مکانیزم‌های هدایت و جابجایی به سیال منتقل شود. این امر سبب افزایش راندمان می‌شود؛ همچنین مشاهده می‌شود، با افزایش کسر حجمی راندمان دو کف به هم نزدیک می‌شود که دلیل آن، افزایش توانایی جذب سیال عامل است. در سیال پایه راندمان به اندازه ۱۶/۱۱ درصد افزایش می‌یابد،



شکل ۶- اثر ضخامت شیشه بر راندمان کلکتور با استفاده از سیال پایه

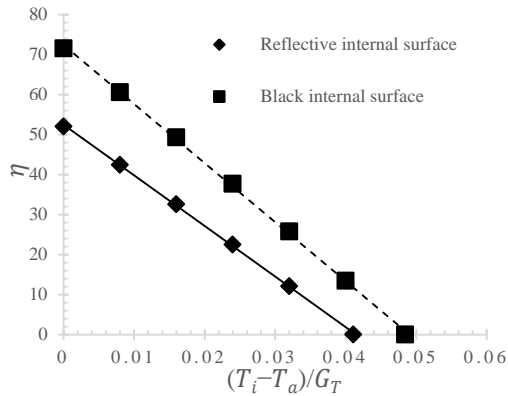


شکل ۷- اثر ضخامت شیشه بر راندمان کلکتور با استفاده از نانوسیال در کسر حجمی ۰/۰۱ درصد

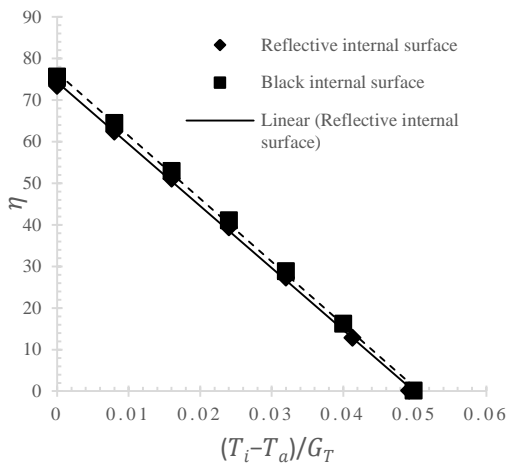


شکل ۸- اثر ضخامت عایق بر راندمان کلکتور با استفاده از سیال پایه

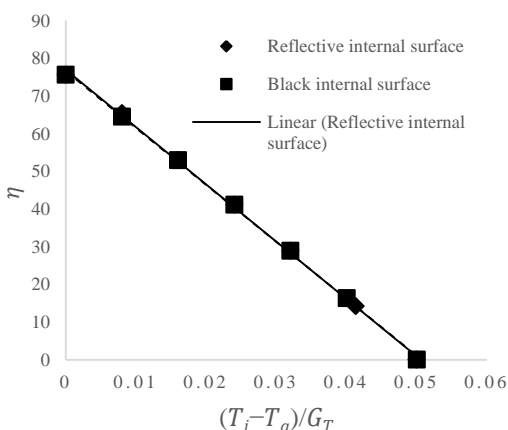




شکل ۱۰- مقایسه راندمان کلکتور با استفاده از کف جاذب و کف بازتابنده در سیال پایه



شکل ۱۱- مقایسه راندمان کلکتور با استفاده از کف جاذب و کف بازتابنده در نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۰۵ درصد



شکل ۱۲- مقایسه راندمان کلکتور با استفاده از کف جاذب و کف بازتابنده در نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۱ درصد

این در حالیست که در کسر حجمی ۰/۰۰۵ درصد، این افزایش به ۱/۸۹ درصد رسیده، در کسر حجمی ۰/۰۱ درصد، تقریباً صفر می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر پارامترهایی مانند ضخامت شیشه، ضخامت عایق و نوع کف روی راندمان کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال آب-اکسید مس، به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج در دبی ۲ لیتر بر دقیقه و در کسرهای حجمی مختلف، بر حسب پارامتر دمای کاهشی ارائه شد. موارد زیر مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این بررسی را نشان می‌دهد:

- با افزایش ضخامت شیشه از ۳ به ۶ و از ۶ به ۱۲ میلی‌متر، راندمان سیال پایه به ترتیب، ۳/۲۲ و ۵/۸۴ درصد کاهش می‌یابد. در نانوسیال این کاهش راندمان به ترتیب، به ۳/۹۲ و ۷/۳۶ درصد می‌رسد که نشان دهنده تأثیر بیشتر ضخامت شیشه بر راندمان نانوسیال است.
- به طور کلی با افزایش ضخامت عایق، راندمان افزایش می‌یابد. هنگامی که اختلاف دمای بین سیال ورودی و محیط کم است، راندمان‌ها تفاوت چندانی ندارند؛ اما با افزایش این اختلاف، نمودارها واگرا شده، شیب نمودار کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت از ۲۵ به ۵۰ میلی‌متر و از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌متر راندمان سیال پایه به ترتیب، ۲/۴۲ و ۱/۵۳ درصد و راندمان نانوسیال به ترتیب، ۲/۹۵ و ۱/۸۹ درصد افزایش می‌یابد.
- استفاده از کف جاذب به جای کف بازتابنده، راندمان سیال پایه و نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۰۵ درصد را به ترتیب ۱۶/۱۱ و ۱/۸۹ درصد، افزایش می‌دهد؛ این در حالیست که در کسر حجمی ۰/۰۱ درصد، افزایش راندمان به صفر می‌رسد.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که ضخامت عایق تأثیر چندانی بر راندمان ندارد؛ در حالی که تغییر ضخامت شیشه به خصوص در کسرهای حجمی بالا و همچنین استفاده از کف جاذب به جای کف بازتابنده در کسرهای حجمی پایین، تأثیر چشمگیری روی راندمان دارند.

nanofluid-based Direct Absorption Solar Collector for residential applications. *Renew Sust Energ Rev* 52: 793-801.

- [10] Karami M, Raisee M, Delfani S (2014) Numerical investigation of nanofluid-based solar collectors. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 64(1): 012044.
- [11] Gupta HK, Agrawal GD, Mathur J (2015) An experimental investigation of a low temperature Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid based direct absorption solar collector. *Sol Energy* 118: 390- 396.
- [12] Lenert A, Wang EN (2012) Optimization of nanofluid volumetric receivers for solar thermal energy conversion. *Sol Energy* 86(1): 253-265.
- [13] Pak BC, Cho YI (1998) Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp Heat Transfer* 11(2): 151-170.
- [14] O'Hanley H, Buongiorno J, McKrell T, Hu LW (2012) Measurement and model validation of nanofluid specific heat capacity with differential scanning calorimetry. *Adv Mech Eng* 4: 181079.
- [15] Oster G, Wasserman M, Zwerling C (1964) Theoretical interpretation of moiré patterns. *JOSA* 54(2): 169-175.
- [16] Brinkman H (1952) The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J Chem Phys* 2(4): 571-571.
- [17] Lee SH, Jang SP (2013) Extinction coefficient of aqueous nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes. *Int J Heat Mass Tran* 67: 930-935.
- [18] Karami M, Akhavan-Behabadi M, Dehkordi MR, Delfani S (2016) Thermo-optical properties of copper oxide nanofluids for direct absorption of solar radiation. *Sol Energ Mat Sol C* 144: 136-142.
- [1] Manikandan KS, Kumaresan G, Velraj R, Iniyan S (2012) Parametric study of solar parabolic trough collector system. *Asian J Appl Sci Eng* 5(6): 384-393.
- [2] Choudhury A, Nargund A (2011) State variable model of a solar power system. *Trends Appl Sci Res* 6(6): 563.
- [3] Tyagi H, Phelan P, Prasher R (2009) Predicted efficiency of a lowtemperature nanofluid-based direct absorption solar collector. *J Sol Energ-T ASME* 131(4): 041004.
- [4] Otanicar TP, Phelan PE, Prasher RS, Rosengarten G, Taylor RA (2010) Nanofluid-based direct absorption solar collector. *IJRSE* 2(3): 033102.
- [5] Liu J, Ye Z, Zhang L, Fang X, Zhang Z (2015) A combined numerical and experimental study on graphene/ionic liquid nanofluid based direct absorption solar collector. *Sol Energ Mat Sol C* 136: 177-186.
- [6] Luo Z, Wang C, Wei W, Xiao G, Ni M (2014) Performance improvement of a nanofluid solar collector based on direct absorption collection (DAC) concepts. *Int J Heat Mass Tran* 75: 262-271.
- [7] Parvin S, Nasrin R, Alim M (2014) Heat transfer and entropy generation through nanofluid filled direct absorption solar collector. *Int J Heat Mass Tran* 71: 386-395.
- [8] Bandarra Filho EP, Mendoza OSH, Beicker CLL, Menezes A, Wen D (2014) Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system. *Energ Convers Manage* 84: 261-267.
- [9] Karami M, Akhavan-Bahabadi M, Delfani S, Raisee M (2015) Experimental investigation of CuO

## ۵- مراجع