

## بررسی عددی اثر استفاده از نانو سیال به عنوان سیال واسط بر عملکرد گرمایشی سیستم گرداور خورشیدی سهمی مرکب براساس قطر بهینه لوله داخلی

محمد باقر محمد صادقی آزاد\*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

سید احسان رفیعی

### چکیده

گرداور یکی از روش‌های دستیابی به انرژی گرمایی پاک و از مهم‌ترین و کاراترین آن گرداورهای سهمی مرکب هستند. این مقاله سعی بر سنجش میزان انتقال گرما در یک گرداور سهمی مرکب حاوی دو لوله آب و یک نانو سیال آب پایه دارد. در این تحقیق از یک مدل سه بعدی با استفاده از نرم افزار Fluent (حجم محدود) برای شبیه سازی و حل معادلات حاکم (پیوستگی، منتووم و انرژی) در یک گرداور به طول ۵۰۰ و قطر ۵۵ میلیمتر استفاده شده است. بر اساس نتایج عددی، برای یک گرداور با قطر ۵۵ میلیمتر استفاده از لوله‌های آب ۶ میلیمتری بیشترین انتقال گرما به میزان  $1947\text{ C}$  و برای کسر حجمی  $8\%$  اکسید آلومنیوم بدست خواهد آمد. در تمام کسرهای حجمی نانو سیال  $(0, 2, 4, 6, 8 \text{ and } 10)$  درصد برای لوله با قطر ۶ میلیمتر نتایج حاکی از این است که گردابه‌های تشکیل شده حول لوله آب سرد بزرگتر از گردابه‌های حول لوله آب گرم هستند و این موضوع به دلیل گرادیان دمای بالای موجود بین دیواره‌ها و لوله آب سرد است.

واژه‌های کلیدی: گرداور سهمی مرکب؛ نانو سیال؛ انرژی خورشیدی؛ جابه‌جاگی آزاد.

## Numerical Study of Using Nano Fluid as Media for Compound Parabolic Solar Collector Based on Optimum Inner Diameter

M. B. Mohammad Sadeghi Azad

Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

S. E. Rafiee

Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

### Abstract

The collector is one of the ways to achieve clean thermal energy, and the most important of these systems can be pointed out to the compound parabolic concentrator (CPC). This paper focuses on measuring the amount of heat transfer in a CPC containing two water pipes as well as a water-based nano-fluid. In this research, a 3D model using Fluent software (Finite volume Method) was used to simulate and solve the governing equations (continuity, momentum and energy) in a collector with 500 and 55 mm for length and diameter, respectively. Based on the numerical results, for a collector with diameter of 55 mm, the use of 6 mm water pipes will achieve the highest heat transfer rate around 1.974 C for 8% volume fraction. The results indicate that the vortices formed around the cold water pipe are larger than vortices around the hot water pipe in all nano volume fractions (0, 2, 4, 6, 8 and 10%) for a pipe with diameter of 6 mm and this is because of the high temperature gradient between the walls and the cold pipe.

**Keywords:** Compound Parabolic Concentrator; Nano fluid; Solar Energy; Free convection.

به بررسی انتقال گرمای نانو ذرات  $\text{TiO}_2$  در آب پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانو سیال در مقایسه با آب، باعث افزایش انتقال گرمای در یک مبادله کن گرمایشگاهی به برسی کاناداسان و همکارانش [۵] در طی یک کار آزمایشگاهی به برسی انتقال گرمای و افت فشار نانو سیال آب- $\text{CuO}$  در یک مبادله کن گرمایی مارپیچ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از نانو سیال عدد ناصلت در نسبت های حجمی  $0/1$ ٪ /  $0/2$ ٪ /  $0/4$ ٪ /  $0/6$ ٪ /  $0/8$ ٪ /  $0/10$ ٪ به ترتیب برابر  $37\%$  /  $49\%$  /  $51\%$  /  $53\%$  /  $55\%$  /  $57\%$  افزایش می‌باید. هیومینیک و هیومینیک [۶] در یک کار عددی به بررسی انتقال گرمای نانو سیال در مبادله کن گرمایی دو لوله‌ای مارپیچ در شرایط جریان لایه ای پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از نانو سیال‌های نظری  $\text{TiO}_2$  و  $\text{CuO}$  که در سیال پایه آب، به صورت همگن پراکنده شده‌اند، می‌توان به بیشترین افزایش در ضریب انتقال گرمای جابه‌جاگی دست یافت. همچنین، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی نانو ذرات انتقال گرمای نیز افزایش می‌باید. پالم و همکارانش [۷]

### ۱- مقدمه

بهبود فرایند خنک کاری توسط سیالات به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در کاهش مصرف انرژی در بسیاری از صنایع مانند الکترونیک، حمل و نقل، تولید توان و ماشین‌کاری بسیار مهم است. ضریب رسانایی گرمایی یکی از ویژگی‌های مؤثر سیال در فرایندهای انتقال گرما بوده و با افزایش این ویژگی آهنگ انتقال گرما را میتوان بهبود بخشید. ایده استفاده از ذرات در ابعاد نانو برای اولین بار توسط ماسکول [۱] مطرح گردید و انقلاب بزرگی در زمینه انتقال گرما در سیالات پدید آمد. درواقع او دیدگاه تازه‌ای در مورد سوسپانسیون سیال جامد با ذراتی در ابعاد نانو مطرح کرد. اولین بار ماسودا و همکاران [۲] این سیال حاوی ذرات معلق را بنام نانو سیال معرفی کردند. بعد از آن‌ها چوی در آزمایشگاه آرگون آمریکا این مفهوم را به طور گسترده‌ای توسعه داد. چوی [۳] را بدبخت‌گذار استفاده از نانو ذرات پراکنده در سیال پایه می‌دانند. دانگ تونگ و وانگ وايس [۴]

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.sadeghiazad@azaruniv.ac.ir

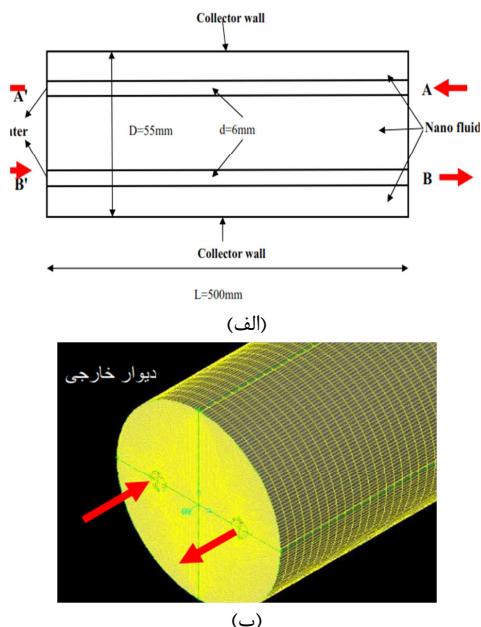
تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۰۸

مقایسه کردند. آن‌ها از روغن و آب تحت فشار به عنوان سیال پایه استفاده کردند که آب تحت فشار کارایی بالایی را نسبت به روغن نشان داد. همانطور که از تحقیقات ذکر شده در این قسمت مشهود است، بررسی سه بعدی و مدلسازی کامل یک گرداور و همچنین ارائه یک مدل نسبتاً دقیق برای پیش‌بینی عملکرد آن تاکنون به صورت موثری انجام نشده است و اکثر فعالیت‌های علمی تا کنون به صورت آزمایشگاهی بوده است. لذا ارائه یک روش حل عددی و سه بعدی که بتواند تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد می‌تواند از سیاری از هزینه‌های آزمایش بکاهد. این تحقیق درجهت پر کردن این شکاف ساماندهی شده است.

## ۱- روش عددی

شکل ۱ حجم کنترل مورد بررسی را نشان می‌دهد که جریان ورودی از لوله A از قسمت' A' خارج و از ورودی B' به لوله برگشت وارد می‌شود که درنهایت از قسمت B از آن خارج خواهد شد. قطر لوله خارجی ۵۵ میلی‌متر و لوله‌های داخلی ۶ میلی‌متر و طول لوله گرداور مورد بررسی ۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در تمام طول شبیه‌سازی از شبکه بنده کاملاً سازمان یافته استفاده شده که نتایج هم از دقت و هم از سرعت کافی در استخراج برخوردار باشند. شکل‌های طرحواره مسئله به همراه مدل شبکه بنده در شکل ۱ قابل مشاهده هستند.



شکل ۱- (الف) طرحواره مسئله (ب) شبکه بنده گرداور معادله پیوستگی:

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

معادله انتقال مومنتوم:

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

شبیه‌سازی‌های عددی جریان جابجایی اجباری لایه ای نانوپیلات به همراه خواص وابسته به دما، مورد بررسی قراردادند. آن‌ها دریافتند افزایش ۲۰٪ در ضریب انتقال گرمایی متوسط دیواره را در مقایسه با آب خالص تولید کنند. با استفاده از یک مدل پراکندگی، زیست‌الهی و همکارانش [۸] اخیراً شبیه‌سازی‌های عددی مربوط به انتقال گرمایی جابجایی جریان لایه ای نانوپیلات آبی در یک لوله مدور به همراه دمای ثابت دیواره را مورد بررسی قراردادند. آن‌ها گزارش کردند که ناتلس با افزایش غلظت نانو ذرات و کاهش اندازه نانو ذرات افزایش می‌یابد. محاسبات عددی آن‌ها تطبیق قابل توجهی با داده‌های تجربی آن‌ها داشته است. افشار و همکاران [۹] به صورت عددی نانوپیلات دوفازی را شبیه‌سازی کردند و اثر پارامترهای مختلف بر پراکندگی نانو ذرات در یک رژیم جریان لغزشی را مطالعه کردند. آن‌ها تأثیر قطر ذرات، محل شروع پخش ذرات در میکرو کانال و ضریب‌های لغزش در پراکندگی ذرات را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نیروی بروانی بر حرکت نانو ذرات تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. مطالعات انجام گرفته روی اثر نانوپیلات در کارایی گرداورها نشان از مشتبه بودن اثر نانو ذرات دارد. طبق مطالعات تجربی مقدم و همکاران [۱۰] که از نانو ذره CuO در ترکیب با آب در یک گرداور استفاده کردند، نانوپیلات باعث افزایش ۲۱/۸٪ کارایی گرداور شده است. طبق مطالعات آزمایشگاهی یوسفی و همکاران [۱۱] با نانوپیلات CuO-Synthesized/EG افزایش در کسر جرمی نانو ذرات افزایش در کارایی گرداورها را به همراه دارد. مطالعه نظری روی اثر نانو ذرات Al2O3-TiO2 SWCNT و SiO2 نانو ذره باعث کاهش تولید آنتروپی به اندازه ۴/۳۴٪ و افزایش ضریب انتقال گرما به اندازه ۱۵/۳۳٪ می‌شود. طبق مطالعات نظری ماهیان و همکاران [۱۲] در یک گرداور با شکل‌های گوناگون و نانو ذرات مختلف (آلومینیوم بروماید و اتیلن گلیکول) با افزایش کسر جرمی نانو ذرات، دمای خروجی گرداور افزایش را نشان می‌دهد همچنین در تمام شکل‌های نانو ذرات، تولید آنتروپی کاهش یافته است. در مطالعه آزمایشگاهی لازاروس و همکاران [۱۳] با نانو ذره نقره بیشترین کارایی گرداور (۷۰٪ در کسر جرمی ۰/۰۰٪ با دبی ۶ لیتر در دقیقه افتاده است. در مطالعات هه و همکاران [۱۴] اثر نانوذره مس باعث افزایش ۲۳/۸۳٪ کارایی گرداور شده که اندازه ذرات اثر قابل توجهی را بر عملکرد نشان داد. مورالیدهاران و همکاران [۱۵] در مطالعه آزمایشگاهی روی نانوپیلات تمیبل Al2O3 در انتقال گرما در یک گرداور متتمرکز کننده خطی مشاهده کردند که ضریب رسانایی الکتریکی به اندازه ۱۱/۷٪ افزایش یافته است همچنین بیشترین جذب در طول موج‌های بالا و کسر جرمی بالای نانوذره روی داده است. زنگ و همکاران [۱۶] گرداور سهموی مرکب مارپیچ را برای اولین بار ارائه دادند که ترکیبی از گرداورهای تخت و سهموی مرکب است. طبق مطالعات کارایی گرداور بالای ۶۰/۵٪ مشاهده شده است که می‌تواند آب گرم با دمای کم را در مناطق سردسیری فراهم کند. Solid Works و همکاران [۱۷] گرداور سهموی مرکب را در نرم‌افزار Works طراحی و شبیه‌سازی کردند و با مطالعات آزمایشگاهی

$$\delta = 23.45 \sin(360 \frac{284+n}{365}) \quad (11)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (12)$$

### ۳- خواص ترموفیزیکی نانو سیال

رسانایی گرمایی نانوسیالات توجه اصلی در این علم را به خود اختصاص داده است. دیگر خواص مهم غیر از رسانایی گرمایی که بر ضریب انتقال گرمایی می‌گذارد، عبارتند از: چگالی، گرمای ویژه و لزجت نانوسیال. خواص گرمایی و فیزیکی نانوسیال به صورت زیر هستند. چگالی نانوسیالات را معمولاً از رابطه زیر محاسبه می‌کنند [۳]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi) \rho_{bf} + \phi \rho_p \quad (13)$$

لزجت اندازه‌ی مقاومت یک سیال در برابر تغییر شکل ناشی از تنش‌های طولی یا تنش‌های برشی می‌باشد. رابطه زیر برای لزجت نانو سیالات برقرار است [۳]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (14)$$

محققان در اکثر مطالعات خود روابطی را برای تعیین ضریب رسانایی گرمایی نانو سیالات یا ترکیب نانوذره جامد با سیال پایه ارائه داده‌اند که مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها رابطه هامیلتون و کروسر است [۳]:

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)} k_f \quad (15)$$

همچنین روابط خطی زیر برای ظرفیت گرمایی مخصوص و ضریب انبساط گرمایی برقرار است [۳]:

$$(\rho \beta_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho \beta_p)_{bf} + \phi(\rho \beta_p)_p \quad (16)$$

که در آن  $\phi$ ،  $k$ ،  $\beta$  و  $\mu$  به ترتیب کسر جرمی نانو ذره در نانو سیال، جایجایی گرمایی، انبساط گرمایی و لزجت دینامیکی است.

جدول ۱- خواص نانوسیال مورد بررسی

	$\rho(kg/m^3)$	$C_p(j/kg.K)$	$k(W/m.K)$	$\beta \times 10^5(K^{-1})$
Water	۹۹۸/۲	۴۱۷۹	.۰/۶	۲۰/۷
$Al_2O_3$	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	۱/۳

در این مقاله از اعداد بی بعد با پارامترهای سیال پایه استفاده شده است. که به ترتیب  $Ra = (g \beta_f q L^4 / v_f \alpha_f k)$ ،  $P_r = v_f / \alpha_f$  عدد رایلی و عدد پرانتل عدد اکرت اعداد بی بعد حاکم بر مسئله هستند. برای اعتبار سنجی مسئله از نتایج تحقیق آتول و همکاران [۲۲] استفاده شده است (شکل ۲ الف). پس از حل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی روزی شبکه مستطیلی مشابه، نمودار دمای بی بعد برای خط میانی شبکه به صورت شکل ۲ ب است. در شکل ۲ ب،  $V^*$  و  $X^*$  به ترتیب معرف سرعت بدون بعد و موقعیت مکانی بدون بعد هستند. با توجه به شکل ۲ برای عدد رایلی  $10^7$  و پرانتل  $10^7$  نمودار دما بدقت خوبی تخمین زده شده است پس از اعتبار سنجی روش حل معادلات حاکم برای جایجایی آزاد نانوسیالات، معادلات روزی شبکه سه بعدی مسئله انجام می‌گیرد.

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$+ \rho_{nf} \beta_{nf} (T - T_{ref}) \quad (4)$$

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

معادله انرژی:

$$(\rho c_p)_{nf} \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \rho q_e + \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \beta_{nf} T \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} + \Phi \quad (6)$$

$$\Phi = 2\mu_{nf} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_{nf} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu_{nf} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (7)$$

در معادلات فوق  $\beta_{nf}$ ،  $\mu_{nf}$ ،  $k_{nf}$ ،  $C_{pnf}$  و  $\rho_{nf}$  به ترتیب ظرفیت گرمایی، رسانایی گرمایی، لزجت دینامیکی، چگالی و ضریب انبساط گرمایی نانو سیال هستند که طبق معادلات (۲) و (۴) به دست می‌آید.

### ۲- بررسی روابط تابش خورشید

متوسط تابش خورشیدی در سطح واحد عمود را که از خارج جو زمین به زمین می‌رسد، ثابت خورشیدی  $G_{SC}$  می‌گویند. واحد این ثابت در سیستم SI به صورت وات بر متر مربع است و مقدار آن در این مقاله ۱۳۷۳ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است. در طول n سال، تابش عمودی مستقیم اندازه‌گیری شده بر روی سطح در امین روز سال  $G_S$  بین دو محدوده ۱۳۳۰ تا ۱۴۰۰ را می‌توان توسط رابطه دافعی و یکمن محاسبه کرد [۲۰]:

$$G_S = G_{SC} \times \left( 1 + 0.033 \times \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right) \quad (8)$$

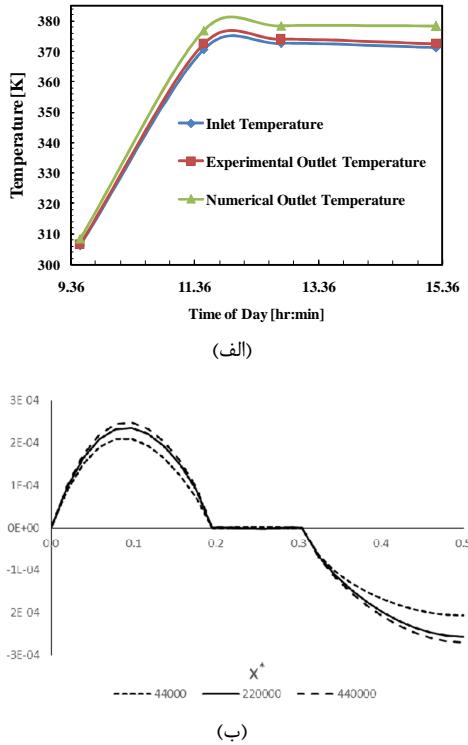
اوین مدلی که براساس پارامتر ساعات آفتابی، میزان تابش را برای سطح افقی برآورد می‌کند، رابطه تجربی (آنگستروم [۱۸]) و (پریسکات [۱۹]) است:

$$\overline{H_o} = a + b \left( \frac{\overline{n}}{\overline{N}} \right) \quad (9)$$

در رابطه فوق  $\overline{H}$  بیانگر میانگین تابش کل روزانه در هرماه است. همچنین  $\overline{H_o}$  بیانگر تابش اندازه‌گیری شده در خارج از جو است و برای محاسبه آن می‌تواند از رابطه زیر استفاده کرد [۲۰].

$$\overline{H_o} = 24 \times \frac{3600}{\pi} G_S \times \left[ \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \cos \delta \right] \quad (10)$$

که  $\phi$  عرض جغرافیایی محل مورد نظر و  $\delta$  زاویه میل خورشید نسبت به استوا بر حسب درجه ( $-23.45 \leq \delta \leq 23.45$ ) است که مقدار آن را می‌تواند از معادله کوپر [۲۱] محاسبه نمود.  $\omega_s$  زاویه ساعت خورشیدی بر حسب درجه است و مقدار آن برای طلوع و غروب خورشید به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود:

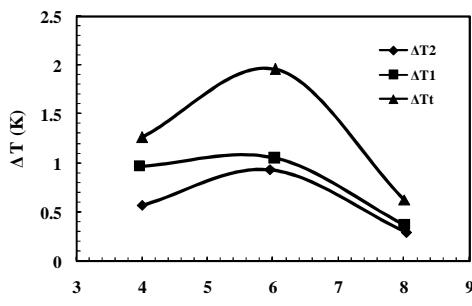


شکل ۲- (الف) نمودار اعتبار سنجی با نتایج آنالوگ و همکاران [۲۲]  
 (ب) نتایج بررسی استقلال از شبکه

## ۵- نتایج

### ۱- بررسی تغییرات انتقال گرما برای لوله با قطرهای مختلف

مقدار شار گرمایی و عدد رابطی معادل به ترتیب  $86.363 w/m^2$  و  $6.89 \times 10^7$  می باشد. با توجه به شرایط مرزی مسئله برای دیواره  $q''$  و برای دیواره  $Wall_s$  مقدار شار  $q''$  موردنظر است. همچنین از تصحیح فشار upwind مرتبه اول و فشار PRESTO! استفاده شده است. همچنانی از تصحیح فشار SIMPLE با توجه به پایا بودن حل استفاده شده است.



شکل ۳- تغییرات دمای میانی بر اساس تغییرات قطر

شکل ۳ نمودار تغییرات دمای ابتداء و انتهای دو لوله و اختلاف دمای کلی را نشان می دهد که در آن  $\Delta T_1 = T_{A'} - T_A$  و  $\Delta T_t = T_B - T_{A'}$  است. با توجه به شکل ۳ بیشترین مقدار اختلاف دما برای لوله ای با قطر ۶ میلی متر برابر با

شرایط مرزی مسئله به شرح زیر است:

$$u = 0, v = 0, w = w_0, T = T_{in} \quad A \text{ سرد}$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, p = 0 \quad B \text{ گرم}$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, p = 0 \quad A'$$

$$u = 0, v = 0, w = -w_{A'} \quad B'$$

$$u = v = w = 0 \quad AA' \text{ و } BB'$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = q'', u = v = w = 0 \quad Wall_s$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 5q'', u = v = w = 0 \quad Wall_c$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \text{دو دیواره رو برو و پشت}$$

معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی با شرایط مرزی فوق و با در نظر گرفتن معادلات نانو سیال با استفاده از نرم افزار Fluent حل می شود. در ورودی لوله آب سرد دما با پروفیل دمایی یکنواخت  $T_{in}=300K$  بر مرز اعمال شده است همچنین دبی یکنواخت  $0.16746 m/s$  یا سرعت  $0.004726 kg/m^3$  به گونه ای تنظیم شده است که عدد رینولدز مقدار ۱۰۰۰ را در ورودی لوله داشته باشد. اسکیم های مورد استفاده در این مقاله برای ترم های جایه جایی از upwind اسکیم پایدار PRESTO! مرتبه اول و فشار استفاده شده است. همچنانی از تصحیح فشار SIMPLE با توجه به پایا بودن حل استفاده شده است.

## ۴- آزمون استقلال از شبکه

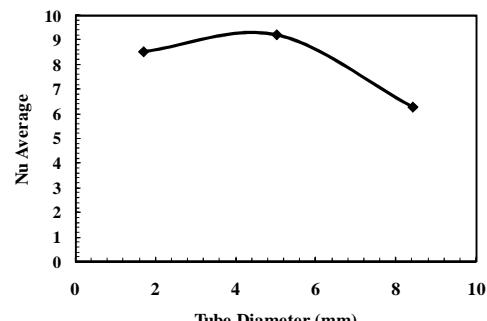
برای اطمینان از استقلال از شبکه از سه شبکه ۴۴۰۰۰، ۲۲۰۰۰ و ۴۴۰۰۰ استفاده شده است. نمودار شکل ۶ نمودار پروفیل سرعت  $v$  را برای شعاع افقی لوله در قسمت میانی لوله حجم کنترل  $-0.0275 < x < 0, y = 0, z = 0.25$  نشان می دهد. با توجه به شبکه ۲۲۰۰۰ بهترین شبکه مورد استفاده برای حل مسئله است (شکل ۲ ب).

گرداور در ساعت ۱۰ صبح یکم تیر یا  $Ra = 0.689 \times 10^8$  نشان می‌دهد. با افزایش در کسر حجمی نانوذرات گردابه‌های ایجاد شده بیشتر به صورت عمود می‌چرخد که علت آن افزایش سرعت  $\dot{x}$  گردابه‌ها و کاهش سرعت  $x$  آنها است. ریز گردابه‌های ایجاد شده در کنار لوله‌های آب گذرنده از محفظه با افزایش در کسر حجمی کوچکتر می‌شوند. این گردابه‌ها مانع برای انتقال گرما محسوب می‌شوند که کوچکتر شدن آن‌ها علت مهمی برای افزایش انتقال گرما است.

## ۲- بررسی تغییرات انتقال گرمای درصدهای حجمی مختلف

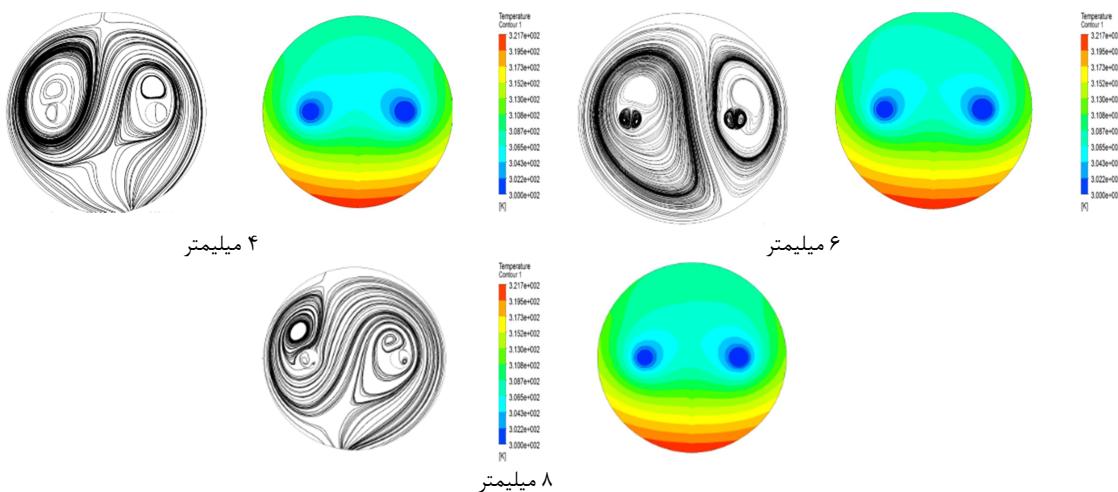
مسئله برای ساعت ۱۰ صبح روز یکم تیر و با کسر حجمی‌های مختلف نانو سیال  $Al_2O_3$ -Water ( $Al_2O_3$ , ۲, ۴, ۶, ۸, ۱۰ درصد) حل شده است. اثر کسر حجمی نانو ذره در انتقال گرما یا افزایش گرما با محاسبات روی کسر حجمی‌های صفر، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد از نانوسیال  $Al_2O_3$  با قطر ذره ۳۳ نانومتر در حالت تک فاز برای ساعت ۱۰ صبح ۱ تیر انجام شده است. شکل ۶ نشان دهنده کانتورهای دمایی و خطوط جریان برای درصدهای مختلف نانوذرات اکسید آلمینیوم در سیال میانی است. همانطور که از شکل ۶ مشخص است با افزایش درصد نانوذرات ریز گردابه‌های اطراف لوله‌ها با کاهش اندازه روبرو خواهد شد. این کاهش اندازه تا ۸٪ کسر حجمی ادامه پیدا می‌کند و با افزایش کسر حجمی به ۱۰٪ این اندازه افزایش پیدا می‌کند و در مواردی به دو ریز گردابه تبدیل می‌گردد.

۱/۹۴۷ درجه سلسیوس می‌باشد. در قطرهای کوچکتر از ۶ میلی‌متر شار خارجی وارد شده بر گرداور کمتر بر لوله‌های آب اثر گذاشته و مانع افزایش دما در لوله‌های آب می‌شود. همچنین برای لوله‌هایی با قطر بیشتر از ۶ میلی‌متر عمل اثر حجم نانو ذره کم نگیر شده و رفتہ شبیه لوله آب ساده عمل می‌کند. لذا قطر ۶ میلی‌متر بهینه ترین نقطه برای حداکثر گرمای دریافتی محاسبه می‌شود. شکل ۴ نمودار تغییرات عدد ناسلت میانگین در دو لوله آب در کسر حجمی ۲٪ نانو سیال را نشان می‌دهد. از آنجا که عدد رایلی برای این مسئله  $Ra = 0.689 \times 10^8$  است و از اینجا که با قرارگرفتن یک سطح سرد در یک محیط گرم مواجه هستیم لذا از رابطه  $Nu_L = 0.15 Ra^{1/3}$  برای محاسبه ناسلت متوسط استفاده شده است. با توجه به شکل در قطر لوله ۶ میلی‌متر نسبت به قطرهای ۸ دارای عدد ناسلت میانگین بیشتری حاصل می‌شود.

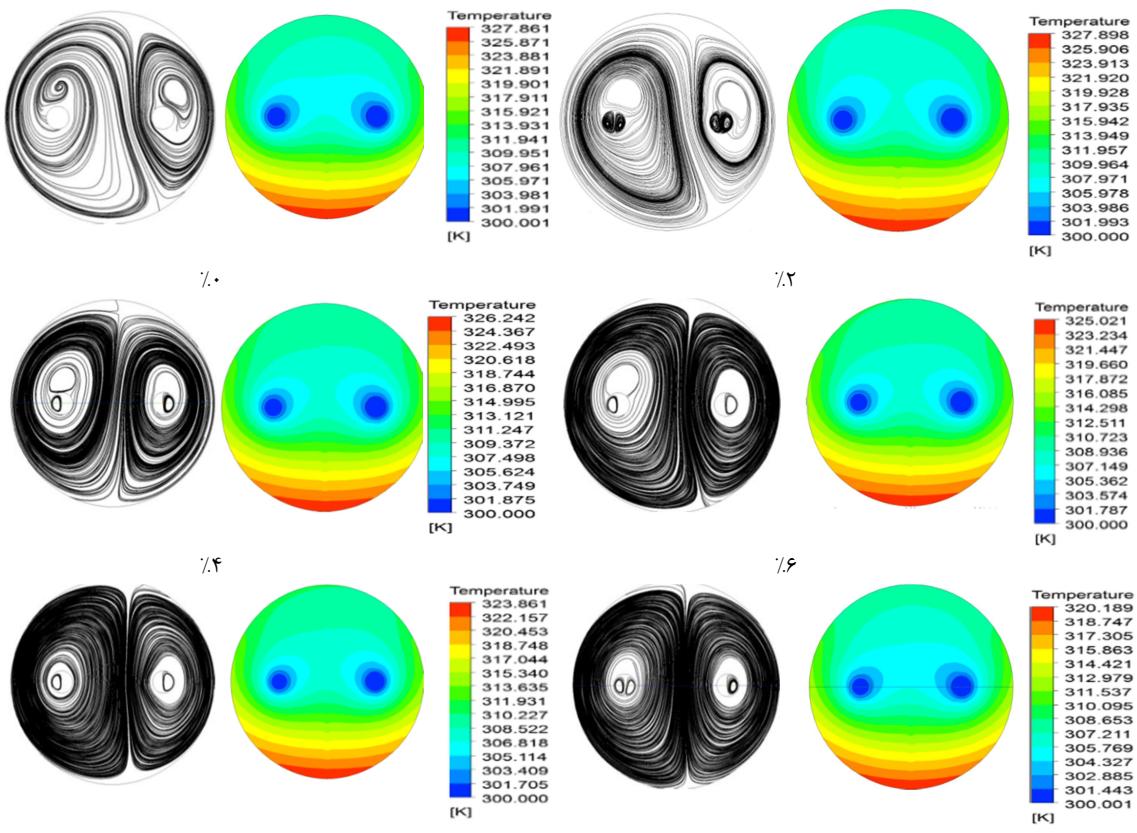


شکل ۴- نمودار تغییرات عدد ناسلت میانگین در دو لوله آب برای کسر حجمی ۲٪ نانو سیال برای لوله‌های مختلف

شکل ۵ کانتورهای دما و خطوط جریان را برای مقطع میانی

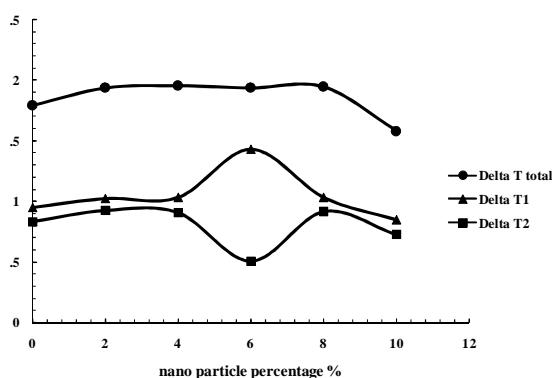


شکل ۵- خطوط جریان برای سطح مقطع میانی لوله در  $z=0/25$  برای کسر حجمی ۲٪ نانوسیال در ساعت ۱۰ روز یکم تیر برای قطرهای مختلف



شکل ۶- خطوط جریان برای سطح مقطع میانی لوله در ساعت ۱۰ روز یکم تیر برای لوله با قطر ۶ میلیمتر

بیشترین مقدار عدد ناسلت را نتیجه می دهد. شکل ۸ نشان می دهد که استفاده بیشتر از نانوذرات (تا ۱۰٪) به شکل قابل توجهی میزان انتقال گرما را کاهش خواهد داد به شکلی که قابلیت نانو سیال میانی در انتقال گرما از آب خالص هم کمتر خواهد شد.



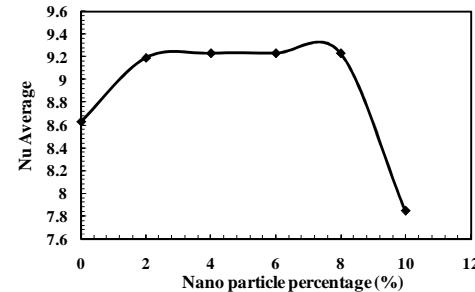
شکل ۷- مقدار اختلاف دمای دو طرف لوله' و BB' و AA به را با ترتیب به صورت  $\Delta T_2 = T_B - T_{B'}$  و  $\Delta T_1 = T_A - T_{A'}$  و  $\Delta T_t = T_B - T_A$  نشان می دهد

شکل ۷ مقدار اختلاف دمای دو طرف لوله' و  $\Delta T_1 = T_{A'} - T_A$  و  $\Delta T_t = T_B - T_A$  و  $\Delta T_2 = T_B - T_{B'}$  و  $\Delta T_t = T_B - T_{B'}$  نشان می دهد.

با توجه به نمودار افزایش در کسر حجمی نانو سیال تا کسر ۰.۸ باعث افزایش اختلاف دمای می شود. ولی در حالت ۱۰٪ انتقال گرما کاهش پیدا کرده و به میزان کمتر از آب خالص نیز بر می گردد. با توجه به نمودار  $\Delta T_1$  و  $\Delta T_2$  انتقال گرما در دو لوله رفت و برگشتی هم وابسته به شار اعمالی به لوله و هم وابسته به اختلاف دمای نقطه به نقطه دو لوله رفت و برگشتی است که بر هم تأثیر می گذاردند.

برای کسر حجمی ۰.۶ مشاهده می شود که  $\Delta T_1 << \Delta T_2$  که این نقطه می تواند بهینه ترین نقطه برای تعیین تأثیر شار گرمایی روی آب گرم و سرد باشد که اثر شار اعمالی روی ورودی آب ۳۰۰ کلوین به اندازه ۱/۴۳ کلوین است که در مقابل برای لوله بازگشتی این اثر به ۰/۵ درجه رسیده است. شکل ۸ نمودار تغییرات عدد ناسلت میانگین در دو لوله آب نسبت به افزایش در کسر حجمی نانو سیال را نشان می دهد. با توجه به شکل با افزایش در کسر حجمی تا ۰.۸ عدد ناسلت میانگین افزایش پیدا می کند ولی این افزایش بین نانو سیال صفر درصد و ۱۰٪ بیشتر به نظر می رسد. بررسی برای ساعت میانگین در دو لوله آب نسبت به افزایش در کسر حجمی ای افزایش دما را برای ساعت ۱۲ نشان می دهد. مطابق نتایج حاصل از شکل ۸، به نظر می رسد که بهترین درصد استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم ۰.۸ است که چرا که

- Mechanical Engineering Congress and Exposition.* Vol. 66, pp. 99–105, 1995.
- [4] Duangthongsuk W. and Wongwises S., Enhancement and Pressure Drop Characteristics of  $TiO_2$  – Water Nanofluid in a Double-Tube Counter Flow Heat Exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 7, pp. 2059–2067, 2009.
- [5] Kannadasan N., Ramanathan K., and Suresh S., Comparison of Heat Transfer and Pressure Drop in Horizontal and Vertical Helically Coiled Heat Exchanger with  $CuO$ /Water Based Nano Fluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, pp. 64–70, 2012.
- [6] Huminic G. and Huminic A., Heat Transfer Characteristics in Double Tube Helical Heat Exchangers Using Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 19–20, pp. 4280–4287, 2011.
- [7] Palm S. J., Roy G., and Nguyen C. T., Heat Transfer Enhancement With The Use of Nanofluids in Radial Flow Cooling Systems with The Use of Nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 35, No. 17, pp. 497–511, 2006.
- [8] Heris S. Z., Esfahany M. N. and Etemad S. G., Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of  $Al_2O_3$ /Water Nanofluid in Circular Tube. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, No. 5, pp. 203–210, 2007.
- [9] Afshar H., Shams M., Nainian S. M. M. and Ahmadi G., Two-Phase Study of Fluid Flow and Heat Transfer in Gas-Solid Flows (nanofluids). *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 110, pp. 3878–3882, 2012.
- [10] Moghadam A. J., Farzane-Gord M., Sajadi M. and Hoseyn-Zadeh M., Effects of  $CuO$ /Water Nanofluid on the Efficiency of A Flat-Plate Solar Collector. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 58, pp. 9–14, 2014.
- [11] Yousefi T., Veysi F., Shojaeizadeh E. and Zinadini S., An Experimental Investigation on The Effect of  $Al_2O_3-H_2O$  Nanofluid on The Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors. *Renewable Energy*, Vol. 39, No. 1, pp. 293–298, 2012.
- [12] Mahian O., Kianifar A., Zeinali Heris S. and Wongwises S., First and Second Laws Analysis of A Minichannel-Based Solar Collector Using Boehmite Alumina Nanofluids: Effects of Nanoparticle Shape and Tube Materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 78, pp. 1166–1176, 2014.
- [13] Lazarus G., Roy S., Kunhappan D., Cephas E. and Wongwises S., Heat Transfer Performance of Silver/Water Nanofluid in A Solar Flat-Plate Collector. *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 104–112, 2015.
- [14] He Q., Zeng S. and Wang S., Experimental Investigation on The Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors with Nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 88, pp. 165–171, 2014.
- [15] Muraleedharan M., Singh H., Suresh S. and Udayakumar M., Directly Absorbing Thermoinal- $Al_2O_3$  Nano Heat Transfer Fluid for Linear Solar Concentrating Collectors. *Solar Energy*, Vol. 137, pp. 134–142, 2016.
- [16] Zheng W., Yang L., Zhang H., You S. and Zhu C., Numerical and Experimental Investigation on A New Type of Compound Parabolic Concentrator Solar Collector. *Energy Conversion and Management*, Vol. 129, pp. 11–22, 2016.
- [17] Bellos E., Korres D., Tzivanidis C. and Antonopoulos K. A. Design, Simulation and Optimization of A Compound Parabolic Collector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 16, pp. 53–63, 2016.
- [18] Angstrom A., Report to The International Commission for Research on Actinometric Investigations of Solar and Atmospheric Radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 50, No. 210, pp. 121–126, 1924.
- [19] Prescott J. A., Evaporation from A Water Surface in Relation to Solar Radiation. *Trans R Soc Sci Aus*, Vol. 64, No. 1, pp. 114–125, 1940.
- [20] Duffie J. A. and Beckman W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes* Solar Engineering, 2013.
- [21] Cooper P. I., The Absorption of Radiation in Solar Stills. *Solar Energy*, Vol. 12, No. 3, pp. 333–346, 1969.
- [22] JadHAV Atul S., Gudekar A. S., Patil R. G., Kale D. M., Panse S. V. and Joshi J. B., Performance Analysis of A Novel and Cost Effective CPC System. *Energy Conversion and Management* Vol. 66, pp. 56–65, 2013.



شکل ۸- عدد ناصلت میانگین برای درصد های مختلف نانو ذرات

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی اثر استفاده از درصد های مختلف نانو ذرات در سیال میانی گردآور خورشیدی سهمی مرکب بر میزان انتقال گرمای آن به آب مصرفی پرداخته شده است. از یک مدل سه بعدی با مش بندی سازمان یافته برای پیشبرد شبیه سازی استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر ارائه شده است:

- (۱) افزایش در کسر حجمی نانو ذرات مجرب به عمودی شدن گردابه ها یا توزیع یکواخت دما و سرعت می شود که نتیجه آن افزایش در انتقال گرمای است.
- (۲) ریز گردابه های ایجاد شده در کنار لوله های آب مانع برای انتقال گرمای محسوب می شوند و اندیشه این تدبیر برای جلوگیری از ایجاد آن ها می تواند به افزایش انتقال گرمای کم کند.
- (۳) با افزایش کسر حجمی نانو ذرات ریز گردابه ها کوچکتر شده که نتیجه آن افزایش در انتقال گرمای است.
- (۴) نمودار اختلاف دما نشان می دهد که با افزایش کسر حجمی نانو ذرات تا  $\approx 8\%$  افزایش دما در خروج لوله ها نسبت به ورودی لوله آب رخ می دهد
- (۵) با افزایش کسر حجمی از  $\approx 8\%$  به  $\approx 10\%$  انتقال گرمای کاهش پیدا می کند.
- (۶) اختلاف دمای بین دو طرف لوله های آب هم متأثر از شار اعمالی یا عدد رایلی و هم متأثر از دمای لوله آب مجاور است.
- (۷) تأثیر نانوسیال در انتقال گرمای آب برای آب سرد بیشتر از آب گرم است زیرا همواره نمودار اختلاف دمای آب سرد بالاتر از آب گرم قرارداد.
- (۸) کسر حجمی  $\approx 6\%$  بهینه ترین نقطه برای تعیین اثر شار گرمایی روی آب سرد و گرم است زیرا برای آب سرد افزایش دمای بیشتری نسبت به آب گرم ثبت شده است.
- (۹) نتایج نمودار ناصلت نشان می دهد که بهینه ترین انتقال گرمای در کسر حجمی  $\approx 8\%$  رخداده است.

## ۷- منابع

- [1] Maxwell J. C., *A Treatise on Electricity and Magnetism* Dover Publications, Clarendon press, Vol. 1, 1954.
- [2] Kumar T., Pradyumna G. and Jahar S., Investigation of Thermal Conductivity and Viscosity of Nanofluids. *Journal of Environmental Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 768–777, 2012.
- [3] Choi S. U. S. and Eastman J. A., Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles. *ASME International*