

## بررسی عددی اثر استفاده از نانوسیال به عنوان سیال واسط بر عملکرد گرمایشی سیستم گردآور خورشیدی سهموی مرکب بر اساس قطر بهینه لوله داخلی

محمدباقر محمد صادقی آزاد\*<sup>۱</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران  
سید احسان رفیعی<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

گردآور یکی از روش‌های دستیابی به انرژی گرمایی پاک و از مهم‌ترین و کاراترین آن گردآورهای سهموی مرکب هستند. این مقاله سعی بر سنجش میزان انتقال گرما در یک گردآور سهموی 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 (پویستگ، ممنتوم و انرژی) در یک گردآور به طول ۵۰۰ و قطر ۵۵ میلیمتر استفاده شده است. بر اساس نتایج عددی، برای یک گردآور با قطر ۵۵ میلیمتر استفاده از لوله های آب ۶ میلیمتری بیشترین انتقال گرما به میزان ۱/۹۴۷ C و برای کسر حجمی ۸٪ اکسید آلومینیوم بدست خواهد آمد. در تمام کسرهای حجمی نانو سیال (۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد) برای لوله با قطر ۶ میلیمتر نتایج حاکی از این است که گردابه های تشکیل شده حول لوله آب سرد بزرگتر از گردابه های حول لوله آب گرم هستند و این موضوع به دلیل گرادیان دمای بالای موجود بین دیواره ها و لوله آب سرد است.

واژه های کلیدی: گردآور سهموی مرکب؛ نانوسیال؛ انرژی خورشیدی؛ جابه جایی آزاد.

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

M. B. Mohammad Sadeghi Azad  
S. E. Rafiee

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

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  $TiO_2$  در آب پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانوسیال در مقایسه با آب، باعث افزایش انتقال گرما در یک مبادله کن گرمایی دو لوله ای خواهد شد. کاناداسان و همکارانش [۵] در طی یک کار آزمایشگاهی به بررسی انتقال گرما و افت فشار نانوسیال آب-CuO در یک مبادله کن گرمایی مارپیچ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از نانوسیال عدد ناسلت در نسبت های حجمی ۰/۱٪ و ۰/۲٪ به ترتیب برابر ۳۷٪ و ۴۹٪ افزایش مییابد. هیومینیک و هیومینیک [۶] در یک کار عددی به بررسی انتقال گرمای نانوسیال در مبادله کن گرمایی دو لوله ای مارپیچ در شرایط جریان لایه ای پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از نانوسیالهایی نظیر  $TiO_2$  و CuO که در سیال پایه آب، به صورت همگن پراکنده شده اند، می توان به بیشترین افزایش در ضریب انتقال گرمای جابه جایی دست یافت. همچنین، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی نانو ذرات انتقال گرما نیز افزایش می یابد. پالم و همکارانش [۷]

### ۱- مقدمه

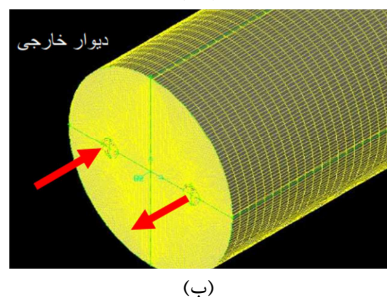
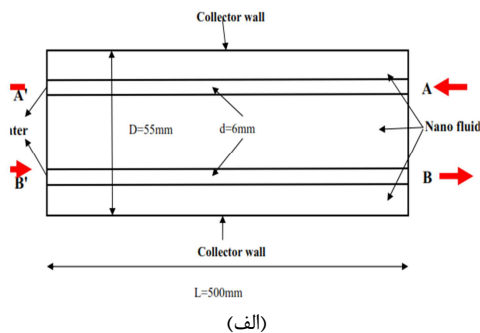
بهبود فرایند خنک کاری توسط سیالات به عنوان یکی از مهم ترین چالش های موجود در کاهش مصرف انرژی در بسیاری از صنایع مانند الکترونیک، حمل و نقل، تولید توان و ماشین کاری بسیار مهم است. ضریب رسانایی گرمایی یکی از ویژگی های مؤثر سیال در فرایندهای انتقال گرما بوده و با افزایش این ویژگی آهنگ انتقال گرما را میتوان بهبود بخشید. ایده استفاده از ذرات در ابعاد نانو برای اولین بار توسط ماکسول [۱] مطرح گردید و انقلاب بزرگی در زمینه انتقال گرما در سیالات پدید آمد. در واقع او دیدگاه تازه ای در مورد سوسپانسیون سیال جامد با ذراتی در ابعاد نانو مطرح کرد. اولین بار ماسودا و همکاران [۲] این سیال حاوی ذرات معلق را بانام نانوسیال معرفی کردند. بعد از آن‌ها چوی در آزمایشگاه آرگون آمریکا این مفهوم را به طور گسترده ای توسعه داد. چوی [۳] را بدعت گذار استفاده از نانو ذرات پراکنده در سیال پایه می دانند. دانگ تونگ و وانگ وایس [۴]

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

مقایسه کردند. آن‌ها از روغن و آب تحت فشار به‌عنوان 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 گردآور 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 تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد می‌تواند از بسیاری از هزینه‌های آزمایش بکاهد. این تحقیق در جهت 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 در نهایت از قسمت B از آن خارج خواهد شد. قطر لوله خارجی ۵۵ میلی‌متر و لوله‌های داخلی ۶ میلی‌متر و طول لوله گردآور مورد بررسی ۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در تمام طول شبیه‌سازی از شبکه بندی 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 بندی در شکل ۱ قابل مشاهده هستند.



شکل ۱- (الف) طرحواره مسئله (ب) شبکه بندی گردآور معادله پیوستگی:

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

معادله انتقال مومنوم:

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

شبیه‌سازی‌های عددی جریان جابجایی اجباری لایه ای نانوسیالات را به همراه خواص وابسته به دما، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که نانوسیالات بر پایه آب به همراه کسر حجمی ۴٪ می‌توانند افزایش ۲۰٪ در ضریب انتقال گرمایی متوسط دیواره را در مقایسه با آب خالص تولید کنند. با استفاده از یک مدل پراکندگی، زینالی هریس و همکارانش [۸] اخیراً شبیه‌سازی‌های عددی مربوط به انتقال گرمای جابجایی جریان لایه ای نانوسیالات آبی در یک لوله مدور به همراه دمای ثابت دیواره را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که ناسلت با افزایش غلظت نانو ذرات و کاهش اندازه نانو ذرات افزایش می‌یابد. محاسبات عددی آن‌ها تطابق قابل توجهی با داده‌های تجربی آن‌ها داشته است. افشار و همکاران [۹] به صورت عددی نانوسیال 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 براونی بر حرکت نانو ذرات تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. مطالعات انجام گرفته روی اثر نانوسیالات در کارایی گردآورها نشان از مثبت بودن اثر نانو ذرات دارد. طبق مطالعات تجربی مقدم و همکاران [۱۰] که از نانو ذره CuO در ترکیب با آب در یک گردآور استفاده کرده‌اند، نانو سیال باعث افزایش ۲۱/۸٪ کارایی گردآور شده است. طبق مطالعات آزمایشگاهی یوسفی و همکاران [۱۱] با نانو سیال CuO-Synthesized/EG افزایش در کسر جرمی نانو ذرات افزایش در کارایی گردآورها را به همراه دارد. مطالعه نظری روی اثر نانو ذرات مختلف در گردآورها نشان داد که از بین نانو ذرات  $Al_2O_3$ ،  $TiO_2$ ،  $SiO_2$  و  $SWCNT$  نانو ذره  $SWCNT$  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 گردآور با شکل‌های گوناگون و نانو ذرات مختلف (آلومینیوم بروماید و اتیلن گلیکول) با افزایش کسر جرمی نانو ذرات، دمای خروجی گردآور افزایش را نشان می‌دهد همچنین در تمام شکل‌های نانو ذرات، تولید آنتروپی کاهش یافته است. در مطالعه آزمایشگاهی لازروس و همکاران [۱۳] با نانو ذره نقره بیشترین کارایی گردآور (۷۰٪) در کسر جرمی ۰/۰۴٪ با دبی ۶ لیتر در دقیقه اتفاق افتاده است. در مطالعات هه و همکاران [۱۴] اثر نانو ذره مس باعث افزایش ۲۳/۸۳٪ کارایی گردآور شده که اندازه ذرات اثر قابل توجهی را بر عملکرد نشان داد. مورالیدهاران و همکاران [۱۵] در مطالعه آزمایشگاهی روی نانوسیال ترمینول- $Al_2O_3$  در انتقال گرما در یک گردآور متمرکز کننده خطی مشاهده کردند که ضریب رسانایی الکتریکی به اندازه ۱۱/۷٪ افزایش یافته است همچنین بیشترین جذب در طول موج‌های بالا و کسر حجمی بالای نانوذره روی داده است. ژنگ و همکاران [۱۶] گردآور سهموی مرکب مارپیچ را برای اولین بار ارائه دادند که ترکیبی از گردآورهای تخت و سهموی مرکب است. طبق مطالعات کارایی گردآور بالای ۶۰/۵٪ مشاهده شده است که می‌تواند آب گرم با دمای کم را در مناطق سردسیری فراهم کند. بلوس و همکاران [۱۷] گردآور سهموی مرکب را در نرم افزار Solid 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 گرما اثر می گذارد، 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 می کنند [۳].

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

لزجت اندازه ی مقاومت یک سیال در برابر تغییر شکل ناشی از تنش های طولی یا تنش های برشی می باشد. رابطه زیر برای لزجت نانو سیالات برقرار است [۳]:

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

محققان در اکثر مطالعات خود روابطی را برای تعیین ضریب رسانایی گرمایی نانو سیالات یا ترکیب نانوذره جامد با سیال پایه ارائه داده اند که مهم ترین و پرکاربردترین آن ها رابطه هامپلتون 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]:

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

که در آن  $\phi$ ,  $k$ ,  $\beta$  و  $\mu$  به ترتیب کسر جرمی نانو ذره در نانو سیال، جابجایی 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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	۱/۳

در این مقاله از اعداد بی بعد با پارامترهای سیال پایه استفاده شده است. که به ترتیب  $Pr = \nu_f / \alpha_f$ ,  $Pe = v_f / \alpha_f$ ,  $Ec = (\mu_f \alpha_f / (\rho C_p)_f \Delta T L^2)$  عدد رایلی و عدد پرانتل عدد اکرت هستند. برای اعتبار سنجی مسئله از نتایج تحقیق آتول و همکاران [۲۲] استفاده شده است (شکل ۲ الف). پس از حل معادلات پیوستگی، منتم و انرژی روی 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 به دقت خوبی تخمین زده شده است. پس از اعتبار سنجی روش حل معادلات حاکم برای جابجایی آزاد نانوسیالات، معادلات روی شبکه سه بعدی مسئله انجام می گیرد.

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

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

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

معادله انرژی:

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

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

در معادلات فوق  $C_{pmf}$ ,  $k_{nf}$ ,  $\mu_{nf}$ ,  $\rho_{nf}$  و  $\beta_{nf}$  به ترتیب ظرفیت گرمایی، رسانایی گرمایی، لزجت دینامیکی، چگالی و ضریب انبساط گرمایی نانو سیال هستند که طبق معادلات (۵ و ۶ و ۷ و ۸) به دست می آید.

### ۲- بررسی روابط تابش خورشید

متوسط تابش خورشیدی در سطح واحد عمود را که از خارج جو زمین به زمین می رسد، ثابت خورشیدی  $G_{sc}$  می گویند. 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 سال، تابش عمودی مستقیم اندازه گیری شده بر روی سطح در  $n$  امین روز سال  $G_s$  بین دو محدوده ۱۳۳۰ تا ۱۴۰۰ را می توان توسط رابطه دافی و بکمن محاسبه کرد [۲۰]:

$$G_s = G_{sc} \times \left( 1 + 0.033 \times \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right) \quad (7)$$

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

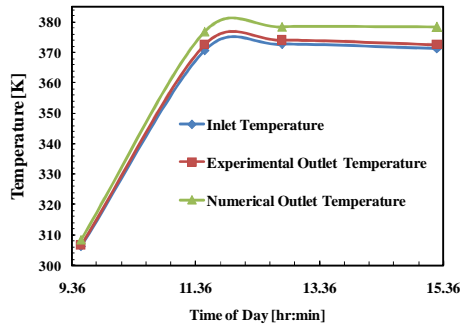
$$\frac{\bar{H}}{H_o} = a + b \left( \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (8)$$

در رابطه فوق  $\bar{H}$  بیانگر میانگین تابش کل روزانه در همراه است. همچنین  $H_o$  بیانگر تابش اندازه گیری شده در خارج از جو است و برای محاسبه آن می تواند از رابطه زیر استفاده کرد [۲۰].

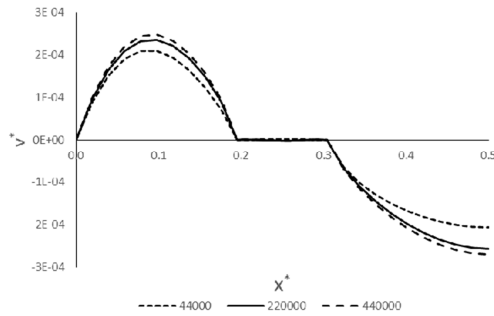
$$\bar{H}_o = 24 \times \frac{3600}{\pi} G_s \times \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \cos \delta \right] \quad (9)$$

$$\bar{I}_o = 24 \times \frac{3600}{\pi} G_s \times \left[ \cos \phi \cos \delta \sin(\sin \omega - \sin \omega) + \frac{\pi(\omega - \omega)}{180} \sin \phi \cos \delta \right] \quad (10)$$

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



(الف)



(ب)

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

شرایط مرزی مسئله به شرح زیر است:

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

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

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

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

دیواره لوله‌های AA' و BB'

$$u = v = w = 0 \quad \text{دیواره خارجی Wall}_s$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = q'', u = v = w = 0 \quad \text{دیواره خارجی Wall}_c$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 5q'', u = v = w = 0 \quad \text{دیواره روبرو و پشت}$$

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

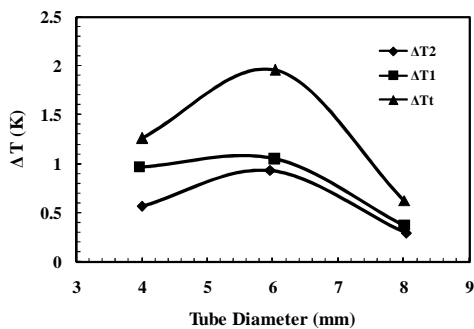
#### ۴- آزمون استقلال از شبکه

برای اطمینان از استقلال از شبکه از سه شبکه ۴۴۰۰۰، ۲۲۰۰۰ و ۴۴۰۰۰۰ استفاده شده است. نمودار شکل ۶ نمودار پروفیل سرعت ۷ را برای شعاع افقی لوله در قسمت میانی لوله حجم کنترل  $-0.0275 < x < 0, y = 0, z = 0.25$  نشان می‌دهد. با توجه به شکل شبکه ۲۲۰۰۰۰ بهترین شبکه مورد استفاده برای حل مسئله است (شکل ۲ ب).

#### ۵- نتایج

##### ۵-۱- بررسی تغییرات انتقال گرما برای لوله با قطرهای مختلف

مقدار شار گرمایی و عدد رابلی معادل به ترتیب  $86.363 w/m^2$  و  $6.89 \times 10^7$  می‌باشد. با توجه به شرایط مرزی مسئله برای دیواره  $Wall_s$  مقدار شار  $q''$  و برای دیواره  $Wall_c$  با ضریب تمرکز ۵ مقدار  $5q''$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- تغییرات دمای لوله میانی بر اساس تغییرات قطر

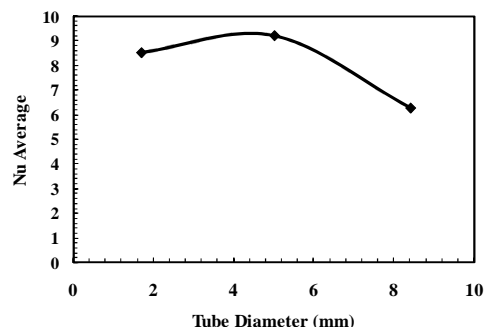
شکل ۳ نمودار تغییرات دمای ابتدا و انتهای دو لوله و اختلاف دمای کلی را نشان می‌دهد که در آن  $\Delta T_1 = T_{A'} - T_A$  و  $\Delta T_2 = T_B - T_{B'}$  است. با توجه به شکل ۳ بیشترین مقدار اختلاف دما برای لوله‌ای با قطر ۶ میلی متر برابر با

گردآور در ساعت ۱۰ صبح یکم تیر یا  $Ra = 0.689 \times 10^8$  نشان می‌دهد. با افزایش در کسر حجمی نانو ذرات گردابه های ایجاد شده بیشتر به صورت عمود می‌چرخند که علت آن افزایش سرعت  $y^+$  گردابه ها و کاهش سرعت  $x$  آنها است. ریز گردابه های ایجاد شده در کنار لوله‌های آب گذرنده از محفظه با افزایش در کسر حجمی کوچک‌تر می‌شوند. این گردابه ها مانعی برای انتقال گرما محسوب می‌شوند که کوچک‌تر شدن آن‌ها علت مهمی برای افزایش انتقال گرما است.

#### ۲-۵- بررسی تغییرات انتقال گرمای درصدهای حجمی مختلف

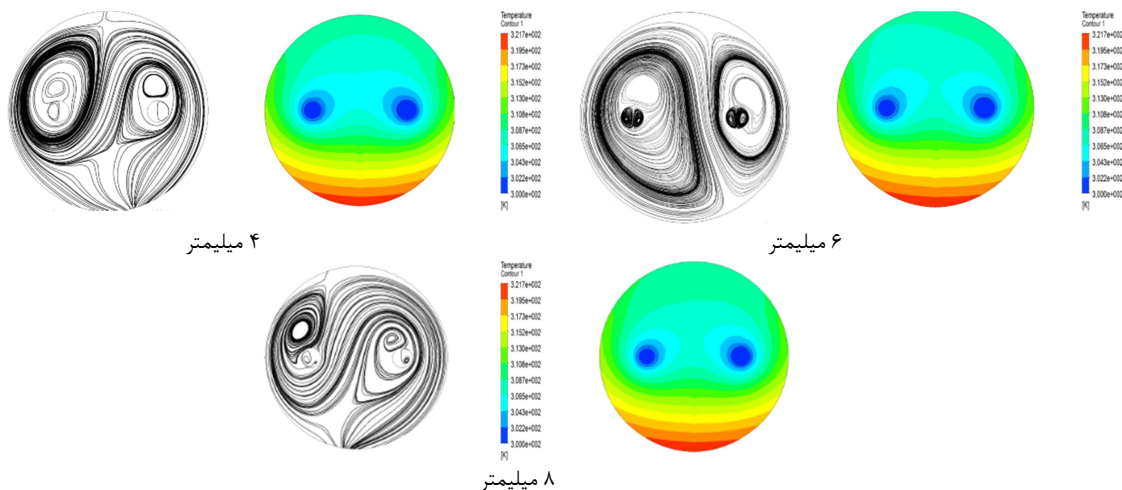
مسئله برای ساعت ۱۰ صبح روز یکم تیر و با کسر حجمی‌های مختلف نانو سیال  $Al_2O_3$ -Water (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد) حل شده است. اثر کسر حجمی نانو ذره در انتقال گرما یا افزایش دمای آب لوله گذرنده مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات روی کسر حجم‌های صفر، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد از نانوسیال  $Al_2O_3$  با قطر ذره 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 نانو ذرات اکسید آلومینیوم در سیال میانی است. همانطور که از شکل ۶ مشخص است با افزایش درصد نانو ذرات ریزگردابه های اطراف لوله ها با کاهش اندازه روبرو خواهند شد. این کاهش اندازه تا ۸٪ کسر حجمی ادامه پیدا می‌کند و با افزایش کسر حجبی به ۱۰٪ این اندازه افزایش پیدا میکند و در مواردی به دو ریز گردابه تبدیل می‌گردد.

۱/۹۴۷ درجه سلسیوس می‌باشد. در قطر های کوچکتر از ۶ میلی متر شار خارجی وارد شده بر گردآور کمتر بر لوله های آب اثر گذاشته و مانع افزایش دما در لوله های آب می‌شود. همچنین برای لوله هایی با قطر بیشتر از ۶ میلی متر عملا اثر حجم نانو ذره کم رنگ تر شده و رفته رفته شبیه لوله آب ساده عمل می‌کند. لذا قطر ۶ میلی متر بهینه ترین نقطه برای حداکثر گرمای دریافتی محسوب 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 آنجا که با قرار گرفتن یک سطح سرد در یک محیط گرم مواجه هستیم لذا از رابطه  $\bar{Nu}_L = 0.15 Ra^{1/3}$  برای محاسبه ناسلت متوسط استفاده شده است. با توجه به شکل در قطر لوله ۶ میلی متر نسبت به قطرهای ۴ و ۸ دارای عدد ناسلت میانگین بیشتری حاصل می‌شود.

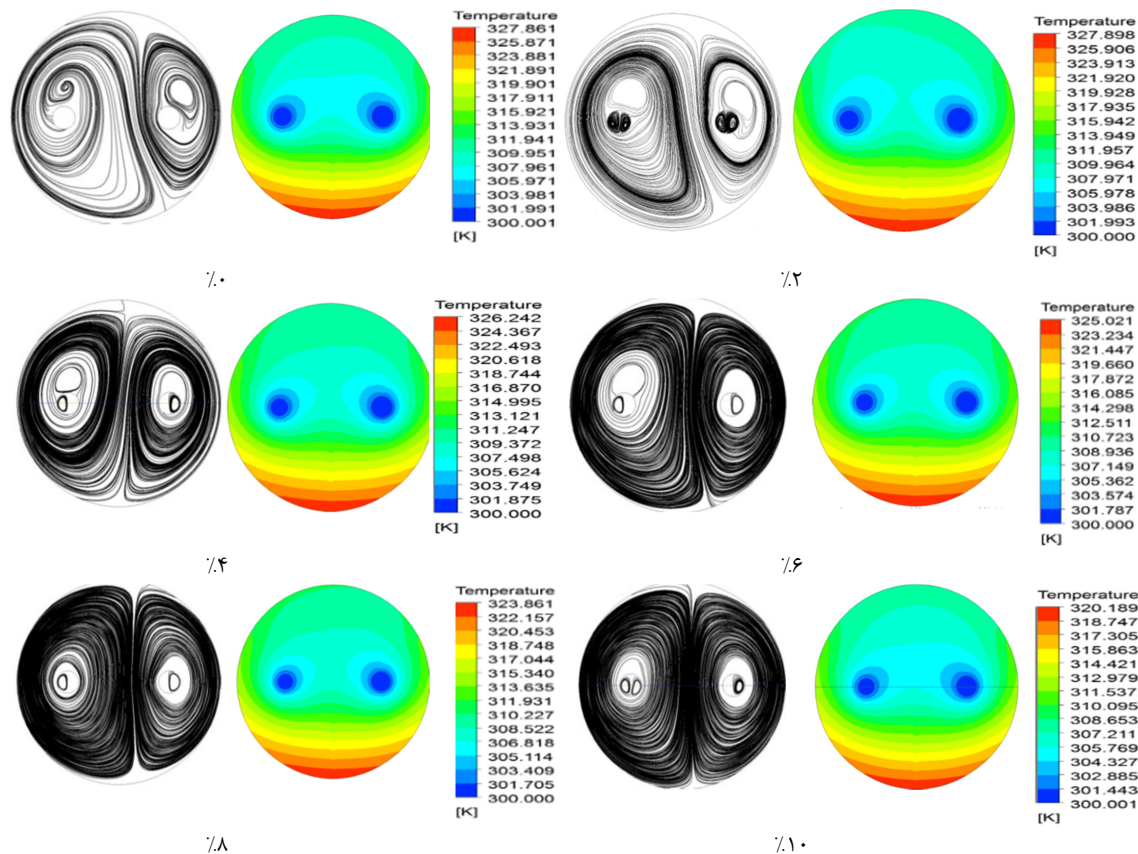


شکل ۴- نمودار تغییرات عدد نوسلت میانگین در دو لوله آب برای کسر حجمی ۲٪ نانو سیال برای لوله های مختلف

شکل ۵ کانتورهای دما و خطوط جریان را برای مقطع میانی

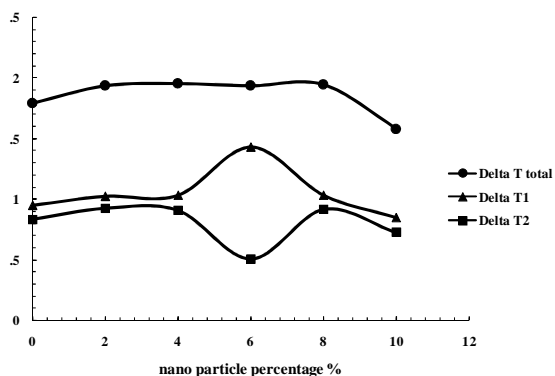


شکل ۵- خطوط جریان برای سطح مقطع میانی لوله در  $Z=0/25$  برای کسر حجمی ۲٪ نانوسیال در ساعت ۱۰ روز یکم تیر برای قطرهای مختلف



شکل ۶- خطوط جریان برای سطح مقطع میانی لوله در  $z=0/25$  برای کسر های حجمی مختلف نانوسیال 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 AA' و BB' و AB را به ترتیب به صورت  $\Delta T_1 = T_A - T_{A'}$  و  $\Delta T_2 = T_B - T_{B'}$  و  $\Delta T_t = T_B - T_{A'}$  نشان می دهد

شکل ۷ مقدار اختلاف دمای دو طرف لوله  $\Delta T_1 = T_{A'} - T_A$  و  $\Delta T_2 = T_B - T_{B'}$  و  $\Delta T_t = T_B - T_{A'}$  نشان می دهد. با توجه به نمودار افزایش درکسر حجمی نانوسیال تا کسر ۸٪ باعث افزایش اختلاف دمای می شود. ولی در حالت ۱۰٪ انتقال گرما کاهش پیدا کرده و به میزان کمتر از آب خالص نیز برمی 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 گذارند.

برای کسر حجمی ۶٪ مشاهده می شود که  $\Delta T_2 \ll \Delta T_1$  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 ۸٪ عدد ناسلت میانگین افزایش پیدا می کند ولی این افزایش بین نانوسیال صفر درصد و ۱۰٪ بیشتر به نظر می رسد. بررسی برای ساعات مختلف از یکم تیر انجام شده است که نتایج بیشترین انتقال گرما یا 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 ۸٪ است 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<sub>2</sub> – 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 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 Therminol-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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.

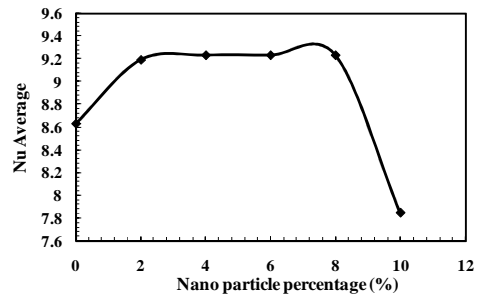
[18] Angstrom A., Report to The International Commission for Research on Actinometric Investigations of Solar and Atmospheric Radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 50, No. 210, pp. 121–126, 1924.

[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. L., 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 ناسلت میانگین برای درصدهای مختلف نانو ذرات

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی اثر استفاده از درصدهای 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 منجر به عمودی شدن گردابه ها یا توزیع یکنواخت دما و سرعت می شود که نتیجه آن افزایش در انتقال گرما است.
- ۲) ریز گردابه های ایجاد شده در کنار لوله های آب مانعی برای انتقال گرما محسوب می شوند و اندیشیدن تدابیری برای جلوگیری از ایجاد آن ها می تواند به افزایش انتقال گرما کمک کند.
- ۳) با افزایش کسر حجمی نانو ذرات ریز گردابه ها کوچک تر شده که نتیجه آن افزایش در انتقال گرما است.
- ۴) نمودار اختلاف دما نشان می دهد که با افزایش کسر حجمی نانو ذرات تا ۸٪ افزایش دما در خروج لوله ها نسبت به ورودی لوله آب رخ می دهد.
- ۵) با افزایش کسر حجمی از ۸٪ به ۱۰٪ انتقال گرما 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 قرار داد.
- ۸) کسر حجمی ۶٪ 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 ناسلت نشان می دهد که بیشترین انتقال گرما در کسر حجمی ۸٪ رخ داده 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*