

# بررسی عددی عملکرد حرارتی گردآورنده خورشیدی سهموی با بکارگیری نانوسیال و مغشوش کننده

شقایق ابراز

دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران،  
shaqayeq.ebrazeh@gmail.com

محسن شیخ الاسلامی\*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران،  
mohsen.sheikholeslami@nit.ac.ir

## چکیده

انرژی خورشیدی، یکی از انواع انرژی تجدیدپذیر است. برای استفاده از تابش خورشیدی از گردآورنده‌های خورشیدی سهموی که یکی از متداول‌ترین گردآورنده‌هاست، استفاده می‌شود. در این مقاله عملکرد حرارتی نانوسیال با بکارگیری نوار تابنده در گردآورنده خورشیدی سهموی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نانو سیال سیلترم-۸۰۰ و آلومینیوم اکسید با کسر حجمی ۴ درصد به عنوان سیال کاری استفاده شد. نانوسیال در بازه عدد رینولدز ۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ بررسی گردید. جریان سیال در گردآورنده خورشیدی سهموی آشفته می‌باشد که برای مدل کردن آن روش k-ε RNG انتخاب گردیده است و به لوله جاذب شار غیر یکنواخت اعمال شده و در سه زاویه لبه مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف، بررسی تاثیر دو پارامتر هندسی مختلف تعداد دور ( $n_r=4$  و  $n_r=8$ ) و زاویه بال ( $\xi=60^\circ$ ،  $\xi=75^\circ$  و  $\xi=90^\circ$ ) بر ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و ضریب کارایی حرارتی می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد کاهش زاویه بال موجب افزایش ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و ضریب کارایی حرارتی می‌شود و همچنین افزایش تعداد دور موجب افزایش آشفتنگی جریان شده و به تبع انتقال گرما و عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: گردآورنده خورشیدی سهموی، نانوسیال، مغشوش کننده، شار غیر یکنواخت، ضریب کارایی حرارتی.

## Numerical investigation of thermal performance of nanofluid inside a parabolic-trough solar collector by using turbulator

**Sh. Ebrazeh**  
**M. Sheikholeslami**

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

### Abstract

Solar energy is one of the types of renewable energy. To use solar radiation, parabolic solar collectors, which are one of the most common collectors, are used. In this paper, the thermal performance of nanofluid is investigated by using a banded strip in a parabolic solar collector. Syltherm -800 nanofluid and aluminum oxide with a volume fraction of 4% were used as working fluid. Nanofluids were studied in the Reynolds number range from 5000 to 25000. The fluid flow in the parabolic solar collector is turbulent, for which the k-ε RNG method has been selected, and non-uniform heat flux is applied to the absorber tube and examined at three different Rim angles. Objective; To investigate the effect of two different geometric parameters of number of revolutions ( $n_r = 4$ ,  $n_r = 8$ ) and wing angle ( $\xi = 60^\circ$ ,  $\xi = 75^\circ$ ,  $\xi = 90^\circ$ ). on the friction coefficient, Nusselt number and thermal efficiency coefficient. The results show that decreasing the wing angle increase the friction coefficient, Nusselt number and thermal efficiency coefficient. Also, increasing the number of revolutions, increases the current turbulence and consequently increases the heat transfer and the Nusselt number.

**Keywords:** Parabolic solar collector, Nanofluid, Turbulator, Non-uniform heat flux, Thermal efficiency coefficient.

### ۱-مقدمه

بسیار مهمی هستند که می‌توانند بر افت فشار و انتقال گرما تأثیر بگذارند. بلوس و تزوانیدیس [۱] در سال ۲۰۱۹ تأثیر استفاده از بازتابنده جبران کننده را بر عملکرد جمع کننده خورشیدی سهموی تحلیل کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از بازتابنده جبران کننده باعث افزایش راندمان نوری و حرارتی می‌شود. ژو و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۹ عملکرد انتقال گرما یک جمع کننده خورشیدی سهموی با استفاده از روش مونت کارلو مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که اختلال مایع، جریان چرخشی و گرداب‌های طولی ناشی از دنده‌های مارپیچی ناپیوسته، سه دلیل اصلی افزایش انتقال گرما در جمع کننده خورشیدی می‌باشند. وانگ و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۶ تأثیر استفاده از نانو سیال آلومینیوم اکسید در جمع کننده‌های خورشیدی سهموی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانوذرات، گردایان دما و حداکثر دمای لوله جاذب کاهش

با توجه به نیاز روز افزون جهان به مصرف انرژی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر توصیه می‌شود. کشور ما با توجه به موقعیت جغرافیایی آن، به عنوان یکی از منابع مهم انرژی‌های تجدیدپذیر، مکان مناسبی برای استفاده از انرژی خورشیدی است. انرژی خورشیدی برای تولید برق و گرمایش استفاده می‌گردد و همچنین برای عملکرد بهتر سیستم‌های گرمایش خورشیدی و تولید برق در محدوده وسیع، روش‌های متعددی برای افزایش انتقال گرما پیشنهاد می‌شود. از جمله این روش‌ها استفاده از نانو سیال و آشفته ساز است. نانوسیالات حاوی نانوذرات جامد در ابعاد (۱-۱۰۰ نانومتر) در مایعات معمولی می‌باشند که موجب افزایش انتقال گرما شده و همچنین آشفته سازها یکی از عوامل مهم برای بهبود انتقال گرما می‌باشند. در نوارهای پیچ خورد، نسبت پیچش و فاصله بین دیواره لوله و نوار از جمله پارامترهای

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mohsen.sheikholeslami@nit.ac.ir

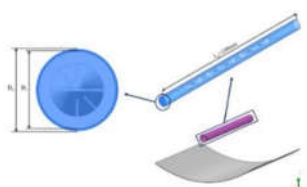
می‌یابد. خاکراه و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۷ به بررسی عددی عوامل موثر بر عملکرد جمع‌کننده خورشیدی سهموی پرداختند. آن‌ها دریافتند که چرخش بازتابنده در جهت مختلف و استفاده از نانوسیال بر عملکرد گردآور تأثیر می‌گذارد. سالازار و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۸ تأثیر استفاده از آلومینیوم اکسید بر روی عملکرد سیستم گردآورنده خورشیدی سهموی را بررسی کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که استفاده از نانوذرات باعث افزایش کارایی سیستم می‌شود. دهقان و همکاران [۶] تأثیر همزمان نانو ذره آلومینیوم اکسید در آب همراه با مجراهای جریان همگرا بر ضریب انتقال گرما همرفت اجباری در یک مخزن گرمای میکرو کانال را بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از نانو ذره و جریان های همگرا باعث افزایش موثر در ضریب انتقال گرما همرفت تا ۲,۳۵ برابر بیشتر از ضریب انتقال گرما یک آب خالص از طریق یک کانال مستقیم و بدون همگرایی جریان شده است. مشهدیان و همکاران [۷] تأثیر نانوسیال های ترکیبی یعنی مخلوطی از نانولوله های کربنی چند جداره و آلومینیوم اکسید که در آب پراکنده شده اند، بر روی عملکرد محیطی یک گردآورنده سهموی بررسی کردند. نتایج نشان می دهد که نانوسیال های ترکیبی از ویژگی های نوری بهتری نسبت به مایع نانوسیال و سیال پایه برخوردارند. سیاوشی و همکاران [۸] به بررسی تأثیرات قرار دادن لایه متخلخل و افزودن ذرات نانو بر راندمان گردآورنده پرداختند. نتایج نشان می‌دهد افزودن نانوذره برای گردآورهای دارای لوله گیرنده نیمه متخلخل و کاملا متخلخل موجب افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک می‌شود.

هنگ و همکاران [۹] به بررسی خصوصیات حرارتی و جریان یک گردآورنده خورشیدی سهموی را در حالی که یک شار حرارتی غلیظ غیر یکنواخت بر روی لوله جاذب اعمال شده و در آن از نانوسیال مس-آب به عنوان سیال انتقال گرما استفاده شده است، پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش غلظت نانو ذرات مس منجر به افزایش عدد ناسلت شده زیرا افزودن نانوذرات عمدتاً انتقال گرما از طریق رسانش را بهبود می‌بخشد. جعفر و سیاورامان [۱۰] نشان دادند که استفاده از نوارهای پیچ خورده باعث افزایش انتقال گرما می‌شوند. آن‌ها در طی یک مطالعه تجربی دست یافتند، نوارهای پیچ خورده عملکرد بهتری در جریان لایه‌ای دارند. وجود نوار پیچ‌خورده موجب به جدایی جریان سیال و افزایش انتقال گرما می‌شود. در مقالات انجام شده در زمینه جمع‌کننده خورشیدی سهموی در رابطه با اضافه کردن پره داخلی و همچنین مجهز کردن لوله به مغشوش‌کننده بوده است. برخی مقالات نیز به افزودن نانوذره جهت افزایش انتقال گرما پرداخته‌اند. هر کدام از این روش‌ها باعث افزایش انتقال گرما شده است. در این مقاله از شار گرمایی بصورت متغیر استفاده می‌گردد. همچنین از نانوسیال سیلترم-۸۰۰ با ذرات نانو آلومینیوم اکسید با کسر حجمی ۴ درصد استفاده می‌شود. زاویه‌های لبه در مقادیر مختلف بررسی شده و بهترین آن انتخاب می‌گردد. هدف بررسی تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و عدد رینولدز بر ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و ضریب کارایی حرارتی می‌باشد. برخی کانتورهای مهم از جمله سرعت، دما نیز برای درک بهتر انتقال گرما و ساختار جریان گزارش خواهد شد.

## ۲- فیزیک مسئله و شرایط حل

### ۱-۲- شرح مسئله

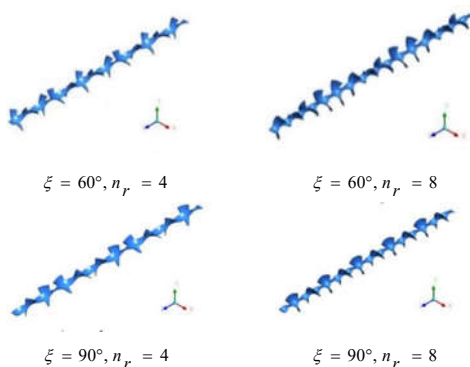
اجزا گردآورنده سهموی عبارت‌اند از یک صفحه سهموی شکل و یک لوله که سیال کاری در آن قرار دارد. در این مقاله لوله جاذب گردآورنده خورشیدی سهموی به صورت عددی تحلیل می‌گردد. از یک لوله به طول ۱/۲ متر استفاده شده است.  $D_1$  نشان دهنده قطر داخلی و  $D_0$  بیانگر قطر خارجی لوله است. قطر داخلی لوله برابر با ۶۶ میلی‌متر و قطر خارجی آن ۷۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نوار تابنده به طول ۸۰۰ میلی‌متر داخل لوله قرار داده شده است. این نوار تابنده با سه زاویه بال ( $\xi$ ) متفاوت (۷۵, ۶۰ و ۹۰ درجه) و در تعداد دور ۴ و ۸ ( $n_r$ ) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل مسئله به همراه نوار پیچشی در شکل‌های ۱-۱، ۱-۲ و ۱-۳ رسم گردیده است.



شکل ۱-۱- گردآورنده خورشیدی سهمی



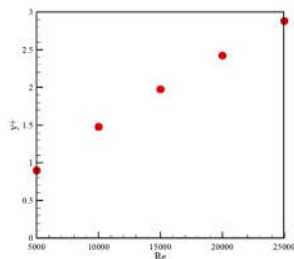
شکل ۱-۲- ابعاد نوار قبل از پیچش و نمایش زاویه بال



شکل ۱-۳- هندسه مسئله

### ۲-۲- شبکه بندی و شرایط مرزی

برای حل مسئله مذکور، از نرم افزار تجاری Ansys-Fluent استفاده می‌گردد. Fluent بر پایه حجم محدود مسائل را حل می‌کند. همان‌طور که پیشتر گفته شد، مدل‌سازی برای جریان آشفتنه از مدل  $k-\epsilon$  RNG و تابع دیوار بهبودیافته بهره‌گرفته می‌شود. جریان نانوسیال با توجه به میزان شار بالا، به صورت خواص متغیر حل می‌گردد. کوپلینگ فشار و سرعت با الگوریتم SIMPLE انجام می‌گردد. گسسته‌سازی برای گرادیان از روش حداقل مربعات بهره

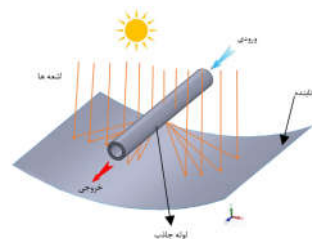


شکل ۳- بررسی فاصله بی بعد دیواره



شکل ۴- شبکه بندی مسئله

می‌گیرد. برای فشار از مرتبه دوم استفاده می‌شود. برای ممنوم، انرژی جنبشی آشفته‌گی و نرخ اضمحلال و همچنین معادله انرژی از طرح بالادست مرتبه دوم استفاده می‌شود. معیار همگرایی برای معادله پیوستگی کمتر از  $10^{-4}$ ،  $\epsilon$ ،  $k$ ،  $10^{-4}$  و سرعت در هر سه راستا کمتر از  $10^{-5}$  و برای انرژی کمتر از  $10^{-7}$  می‌باشد. در بخش ورودی مسئله شرط مرزی سرعت ورودی داده می‌شود. مقدار سرعت بنا بر عدد رینولدز ورودی تعیین می‌گردد. بازه عدد رینولدز برای مسئله از ۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است. دمای ورودی مسئله ۳۰۰ کلوین به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود. برای خروجی لوله از شرط مرزی فشار خروجی استفاده می‌شود و فشار نسبی برابر صفر است. سطوح مربوط به نوار تابیده کوپل در نظر گرفته می‌شود و همچنین جنس نوار تابیده و لوله از فولاد زنگ نزن می‌باشد که خواص آن از نرم افزار فراخوانی می‌گردد. به اطراف لوله شار گرمایی غیر یکنواخت اعمال می‌شود که شرط مرزی‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- طرحواره‌ای از اعمال شرایط مرزی

به منظور شبکه بندی از نرم افزار مشینگ که شرکت انسیس آن را ارائه کرده استفاده شده است. برای ضخامت لوله از مش سازمان یافته استفاده گردید. با توجه به استفاده از تابع دیواره بهبودیافته، در اطراف دیواره‌ها باید از مش لایه مرزی استفاده کرد. فاصله اولین لایه از دیواره باید به نحوی باشد تا فاصله بی بعد دیواره، در ناحیه مربوط به تابع مورد نظر قرارگیرد. زمانی می‌توان از تابع دیواره بهبودیافته استفاده کرد که در تمام حالت‌ها مقدار  $Y^+$  کمتر از ۵ باشد. برای تمامی هندسه‌های حل شده باید این پارامتر بررسی شود. در شکل ۳ مقدار فاصله بی بعد برای هندسه نوار تابیده با تعداد دور ۴، زاویه بال  $\theta = 90^\circ$  برای اعداد مختلف رینولدز گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی حالات این مقدار کوچکتر از ۵ می‌باشد. برای نوار تابیده از مش سازمان یافته استفاده شده است. در ناحیه‌هایی که جریان نانوسیال در آن قرار دارد به دلیل شکل هندسی و همچنین قرارگیری نوار تابیده بر سر راه نانوسیال، از مش بی سازمان بهره گرفته شده است. شبکه بندی مسئله در شکل ۴ رسم شده است. حداکثر انحراف سلول‌ها باید کمتر از ۰.۹۹ باشد که تعداد کمتر از ۱۰۰ سلول مقدار بیشینه ۰.۸۹ را داشته و بقیه سلول‌ها کمتر بوده و مقدار متوسط آن برابر ۰.۳۱۵۶ شده است بنابراین مش کیفیت خوبی خواهد داشت.

### ۳- معادلات حاکم

#### ۳-۱- معادلات حاکم برسیال و آشفته‌گی

جریان سیال سه بعدی، پایا است. معادله پیوستگی، ممنوم و انرژی هنگامی که از جابه‌جایی آزاد صرف نظر گردد به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۱]:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_{nf} u_i u_j) = \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho_{nf} \overline{u_i' u_j'}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_{nf} u_j C_{nf} \bar{T}) = \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{nf} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{\sigma_{h,t}} \frac{\partial (C_{nf} \bar{T})}{\partial x_j} \right) + u_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} - \rho_{nf} \overline{u_i' u_j'} \right] \times \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

که  $\mu_t = -\rho_{nf} \overline{u_j' u_i'}$  و  $\mu_t$

از نانوسیال آلومینیوم اکسید با کسر حجمی ۴ درصد برای حل استفاده می‌گردد. در جدول ۱ خواص مربوط به نانوذره آورده شده است.

جدول ۱- خواص نانوذره  $Al_2O_3$  [۱۷]

غلظت	چگالی ( $kg/m^3$ )	رسانایی گرمایی ( $W/mK$ )	گرمایی ویژه ( $J/kgK$ )
۴درصد	۴۰۰۰	۴۰	۷۷۳

### ۳-۳- پارامترهای شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی این مسئله، میزان انتقال گرما، ضریب اصطکاک و ضریب کارایی حرارتی باید تعیین شوند. همچنین یکی از متغیرهای مورد بررسی عدد رینولدز می‌باشد. برای تعیین عدد رینولدز از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$Re = \frac{\rho u D_i}{\mu} \quad (۱۴)$$

که  $D_i$  برابر با قطر داخلی لوله،  $u$  برابر با سرعت سیال،  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب برابر با لزجت دینامیکی و چگالی سیال است. عدد ناسلت به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۸]:

$$Nu = \frac{h D_i}{k} \quad (۱۵)$$

که  $h$  بیانگر ضریب انتقال گرما و  $k$  رسانایی گرمایی است. ضریب انتقال گرما به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_b)} \quad (۱۶)$$

که  $T_w$  دمای دیواره لوله و  $T_b$  دمای توده‌ای سیال است. ضریب اصطکاک برابر است با [۱۹]:

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho \cdot u_m^2 \cdot \frac{L}{D_i}} \quad (۱۷)$$

که  $u_m$  سرعت متوسط سیال و  $\Delta p$  بیانگر افت فشار بین ورودی و خروجی لوله است. به منظور بررسی همزمان افزایش انتقال گرما یا به عبارتی عدد ناسلت و افت فشار، می‌توان از ضریب کارایی حرارتی استفاده کرد. هرچقدر این مقدار بیشتر باشد بهتر است و برای مواردی که بیشتر از یک بوده از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است. ضریب کارایی حرارتی به صورت زیر تعیین می‌گردد [۱۸]:

$$\eta = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (۱۸)$$

اندیس ۰ مربوط به حالتی است که نوارتابیده در درون لوله نباشد.

### ۴- بحث و نتایج

#### ۴-۱- استقلال از شبکه

به منظور استقلال از شبکه محاسباتی به نوار تابیده با زاویه بال ۹۰°، تعداد دور ۴ و در عدد رینولدز ۲۵۰۰۰ جهت بررسی قرار گرفت. در جدول ۲ نتایج استقلال از شبکه محاسباتی آورده شده است با بررسی این مقادیر بهترین شبکه از لحاظ دقت و زمان حل، برای هندسه

$$-\rho_{nf} \overline{u_i' u_j'} = \quad (۴)$$

$$\mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho_{nf} k + \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

$$\mu_t = C_\mu \rho K^2 / \varepsilon \quad (۵)$$

برای حل جریان سیال و مدلسازی جریان آشفته، از مدل k-epsilon RNG استفاده می‌شود. در این مدل که یک مدل دو معادله‌ای می‌باشد معادله انرژی جنبشی آشفته‌گی به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۱]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_{nf} k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_{nf} + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (۶)$$

و همچنین به صورت مشابه نرخ اضمحلال در ادامه بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{nf} \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۷)$$

که در آن  $G_k$  نرخ تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی می‌باشد و به صورت زیر در می‌آید:

$$G_k = -\rho_{nf} u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (۸)$$

و ثابت برای مدل RNG به شرح زیر است:

$$C_\mu = 0.0845, C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68 \quad (۹)$$

#### ۳-۲- مدل‌سازی نانوسیال به صورت تک فاز

افزودن نانوذره به سیال پایه باعث افزایش رسانایی گرمایی و سبب افزایش عملکرد سیال کاری می‌شود. به دلیل شار گرمایی بالا، دمای سیال به شدت متغیر بوده و وابسته به دما است، بنابراین باید خواص نانوسیال را متغیر در نظر گرفت. به این منظور خواص پس از محاسبه به صورت یک چند جمله‌ای به نرم افزار وارد می‌شود. خواص نانوسیال از روابطی که در ادامه بیان شده محاسبه می‌گردد. اندیس bf مربوط به سیال پایه و اندیس np مرتبط با نانوذره است. چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال از روابط زیر بدست می‌آیند [۱۲ و ۱۳]:

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} (1 - \Phi) + \rho_{np} \Phi \quad (۱۰)$$

$$C_{p,nf} = \frac{\rho_{bf} (1 - \Phi)}{\rho_{nf}} \cdot C_{p,bf} + \frac{\rho_{np} \Phi}{\rho_{nf}} \cdot C_{p,np} \quad (۱۱)$$

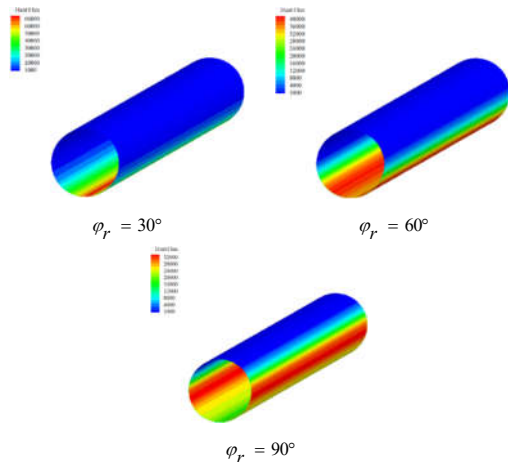
با توجه به رابطه ماکسول رسانایی گرمایی برای نانوسیال از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۴ و ۱۵]:

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{k_{np} + 2k_{bf} - 2\Phi(k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + 2k_{bf} + \Phi(k_{bf} - k_{np})} \quad (۱۲)$$

و در انتها لزجت مرتبط با نانوسیال به دست می‌آید [۱۶]:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2.5\Phi + 6.5\Phi^2) \quad (۱۳)$$

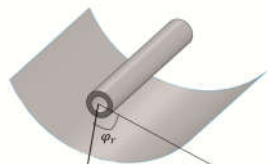
در یک ناحیه خاص به لوله کمتر می‌شود. در نتیجه مقدار بیشینه مقدار شار کمتر است و حدوداً برابر با ۴۰۰۰۰ وات بر متر مربع می‌باشد. بیشترین مقادیر نیز در قسمت پایینی لوله کمی مایل به سمت راست و چپ اتفاق می‌افتد. در حالت سوم زاویه لوله ۹۰ درجه، مقدار بیشینه شار در حدود ۳۲۰۰۰ وات بر متر مربع است. این مقدار بیشینه سمت چپ و راست لوله مایل به پایین رخ می‌دهد. بنابراین هرچه مقدار زاویه لوله بیشتر باشد مقدار بیشینه شار کمتر و تمرکز پرتو به طرفین لوله می‌رود. از طرفی با میانگین گرفتن از تابش رسیده به لوله، مقدار میانگین شار رسیده به لوله در زاویه ۹۰ درجه بیشتر است. توزیع شار خورشیدی در لوله برای زاویه لوله ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه در شکل ۷ رسم شده است.



شکل ۷- توزیع شار خورشیدی در طول لوله برای زاویه‌های لوله مختلف

#### ۴-۴- بررسی کانتورهای سرعت و مسیر جریان

جریان چرخشی تولید شده توسط نوار تابیده سبب منتقل شدن نانوسیال به نواحی نزدیک دیواره می‌شود و در نتیجه سبب تخریب لایه مرزی می‌گردد. جریان نانوسیال در ابتدای لوله مسیر یکنواخت در راستای لوله بدون چرخش را می‌پیماید. در هنگامی که نوار تابیده تعداد دور بیشتری داشته باشد رژیم نانوسیال مغشوش‌تر و تنش بیشتر می‌شود. از طرفی دیگر با کم شدن زاویه بال، همین نتایج ذکر شده بدست می‌آید. با افزایش عدد رینولدز نیز بخش‌های بیشتری از مقاطع سرعتشان بیشتر است. در قسمت‌های بسیار نزدیک به دیواره لوله و نوار تابیده شرط عدم لغزش در نظر گرفته می‌شود که سرعت در آن نواحی برابر صفر خواهد بود. کانتور سرعت برای نوار تابیده در زاویه بال ۹۰ در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۶- مدل ۳ بعدی از گردآورنده سهموی خورشیدی

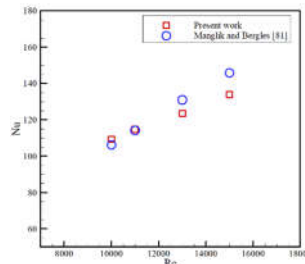
مذکور تعداد شبکه ۵۰۰ هزار است که درصد اختلاف برابر با ۰/۲۱ است.

جدول ۲- مقادیر عدد ناسلت و درصد خطا برای استقلال از شبکه

تعداد شبکه	عدد ناسلت	درصد خطا
۵۳۲۵۸	۵۳۲/۱۷۸	۱۸/۹۲
۱۲۸۳۲۹	۴۸۹/۱۴۷	۹/۳۰
۲۴۷۱۸۲	۴۶۸/۶۷۴	۴/۷۳
۳۹۴۹۸۷	۴۵۴/۷۴۸	۱/۶۲
۵۳۶۲۷۳	۴۴۸/۴۸۳	۰/۲۱
۸۷۵۶۴۴	۴۴۷/۵۸۱	۰/۰۱۷
۱۳۱۴۶۹۷	۴۴۷/۵۰۱	-

#### ۴-۲- اعتبارسنجی

به منظور اعتبار سنجی برای جریان آشفته با آشفته‌کننده، برای لوله مجهز به نوار تابیده ساده نیز انجام می‌شود. از نوار پیچشی ساده که در کار آزمایشگاهی مانگلیک و برگلس [۲۰] در سال ۱۹۹۳ انجام شد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله برای نسبت‌های مختلفی از نوار تابیده و دو سیال آب و هوا نتایج گزارش گردید. طول لوله ۲ متر و سیال مورد بررسی آب در نظر گرفته شده است. نوار تابیده به کار رفته ساده است و برشی ندارد. لوله به صورت دما ثابت در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود اختلاف قابل قبولی بین حل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. میزان خطا در جدول ۳ آورده شده است.



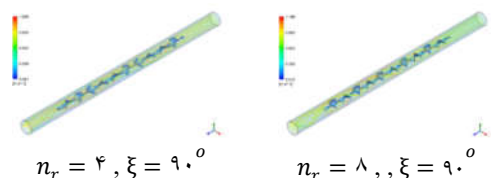
شکل ۵- اعتبارسنجی لوله مجهز به نوار تابیده ساده

جدول ۳- درصد خطا مقادیر عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف

بامرجع موردنظر	۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰	۱۳۰۰۰	۱۵۰۰۰
عدد رینولدز	۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰	۱۳۰۰۰	۱۵۰۰۰
درصد خطا	۲/۸	۰/۴۳	۵	۸

#### ۴-۳- بررسی توزیع شار

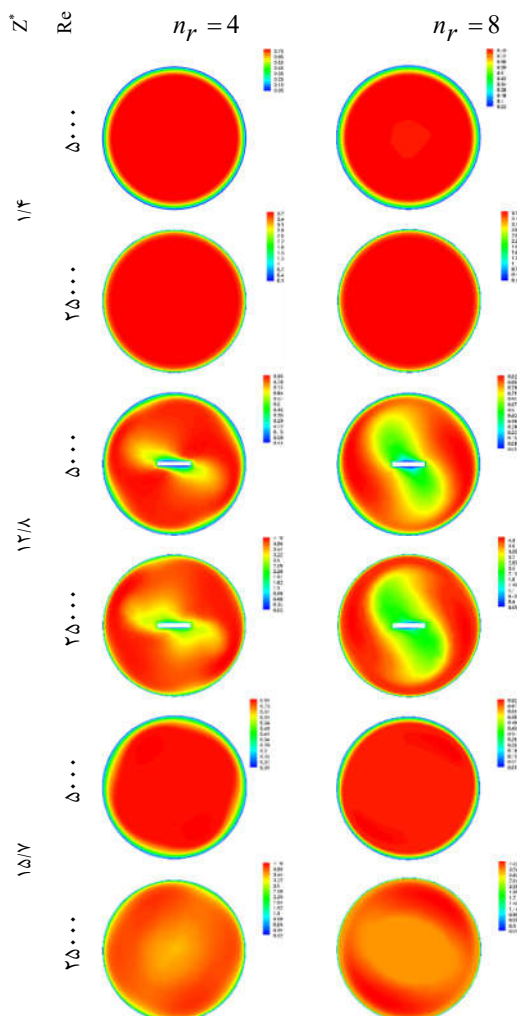
زاویه لوله در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار شار برای زاویه لوله ۳۰ درجه حدوداً برابر با ۶۶۰۰۰ وات بر متر مربع می‌باشد. این بیشترین مقدار در قسمت پایینی لوله رخ می‌دهد. در زاویه لوله ۶۰ درجه، شار رسیده به خورشید حالت پخش شده‌تری نسبت به ۳۰ درجه دارد و تمرکز پرتوهای رسیده



شکل ۹- مسیر جریان برای حالت‌های مختلف هندسی در عدد رینولدز ۵۰۰۰

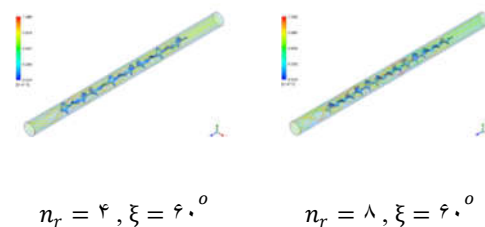
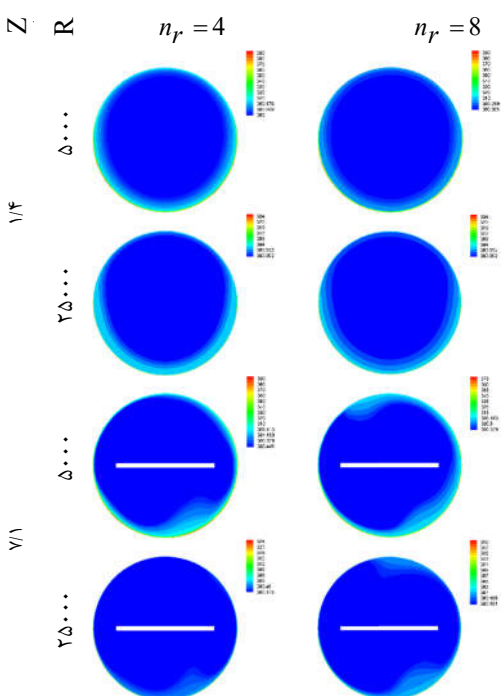
#### ۴-۵- بررسی کانتورهای دما

کانتور دما در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در مقطع عرضی  $Z^* = 1/4$  توزیع دما بدون تغییر (چرخشی شدن) در این نواحی است. با این حال همان‌طور که از کانتور دما در دیگر مقاطع عرضی  $Z^* = 7/1$ ،  $Z^* = 12/8$ ، و  $Z^* = 15/7$  (در محل قرارگیری نوارتابیده و بعد از آن) مشخص است، نانو سیال حرکتی چرخشی دارد. با تغییر تعداد دور از ۴ به ۸ در نوارتابیده، به دلیل چرخشی‌تر شدن جریان نانو سیال و همچنین آشفتگی بیشتر نسبت به قبل، ضخامت لایه مرزی کمتر می‌شود. بنابراین اختلاط در نانو سیال بهتر صورت می‌گیرد. از طرفی دیگر بیشتر شدن مقدار عدد رینولدز، سبب افزایش انتقال گرمای همرفتی و عدد ناسلت می‌گردد. علاوه بر این با تغییر  $\xi = 90^\circ$  به  $\xi = 75^\circ$  و  $\xi = 60^\circ$  مشاهده می‌شود که با مغشوش شدن جریان نانو سیال، انتقال گرما بیشتر خواهد شد. صفحه سهموی پرتوهای خورشید را در قسمت پایینی لوله متمرکز می‌کنند و بخش‌های بالایی لوله شار ثابت خورشید را دریافت می‌کند بنابراین قسمت بالایی لوله تحت تاثیر شار کمتری نسبت به قسمت پایین لوله قرار دارد، در نتیجه دمای سیال در قسمت‌های بالایی لوله کمتر از دمای مربوط به قسمت‌های پایینی لوله خواهد بود.

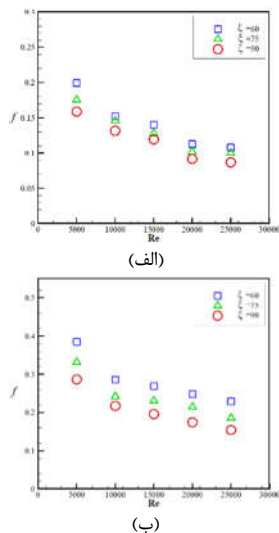


شکل ۸- کانتور سرعت برای نوارتابیده در  $\xi = 90^\circ$

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، جریان سیال قبل از رسیدن به نوار تابیده مسیر مستقیمی طی می‌کند، بعد از برخورد آن به نوار تابیده جریان سیال دچار اغتشاش می‌شود. با افزایش زاویه بال، میزان اغتشاش جریان کاسته می‌شود و همچنین بیشتر شدن دور، اغتشاش و چرخش را بیشتر می‌کند. برخی از مسیر جریان نیز از سطوح اطراف دیواره بدون تغییر عبور می‌کنند. این شکل‌ها برای عدد رینولدز ۵۰۰۰ رسم شده است. مقدار سرعت برای هر مسیر در هر شکل نشان داده شده است. این مقادیر مسیرها به صورت محلی رسم شده هستند. در شکل ۹ مسیر جریان نانو سیال برای حالت‌های مختلف به نمایش در آمده است.



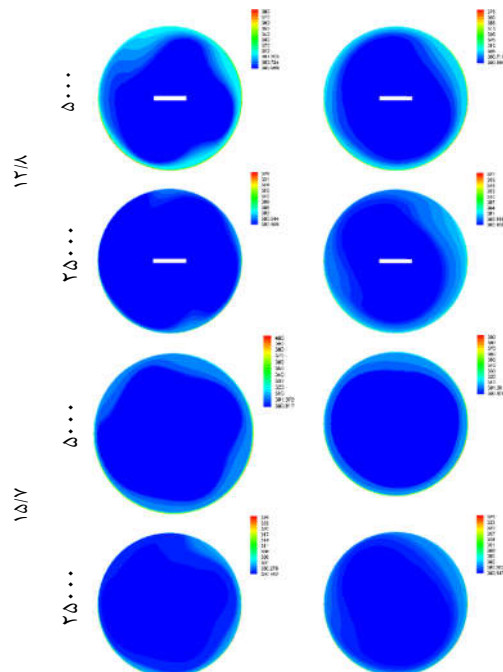
$n_r = 4, \xi = 60^\circ$        $n_r = 8, \xi = 60^\circ$



شکل ۱۱- ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز مختلف برای نوار تابیده در الف)  $n_r = 4$  و ب)  $n_r = 8$

#### ۷-۴- بررسی تاثیر افزودن ذرات نانو به سیال پایه بر عدد ناسلت

نانوسیال‌ها نقش بسزایی جهت افزایش انتقال گرما و بهبود عملکرد جمع‌کننده‌های خورشیدی سهموی دارند. در نتیجه افزودن ذرات نانو بر رسانایی گرمایی سیال پایه می‌افزاید و سبب بهبود انتقال گرما می‌شود. در شکل ۱۲ اثر افزودن نانو ذره به سیال پایه بر انتقال گرما به نمایش در آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود در لوله خالی و لوله مجهز به نوار تابیده با افزودن نانوذره مقدار عدد ناسلت بیشتر می‌شود. در عدد رینولدز ۵۰۰۰ برای لوله خالی به میزان کمی به عدد ناسلت افزوده می‌شود (در حدود ۵ واحد). همچنین برای همین عدد رینولدز در حالت با نوار تابیده به میزان ۱۴ واحد بر عدد ناسلت افزوده می‌شود. با بررسی سایر حالت‌ها درمی‌یابیم که افزودن نانو به سیال پایه بر عدد ناسلت می‌افزاید. در اعداد رینولدز بالاتر این تاثیر اندکی بیشتر است. در عدد رینولدز ۲۵۰۰۰ برای نوار تابیده با زاویه بال ۶۰ و تعداد دور ۴ در حدود ۳۵ واحد به عدد ناسلت اضافه می‌شود اما همین حالت برای لوله خالی ۲۴ واحد بر عدد ناسلت می‌افزاید. این طور می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نانو به همراه نوار تابیده عملکرد بهتری دارد و وجود نوار تابیده سبب اختلاط بهتر نانوسیال می‌گردد.



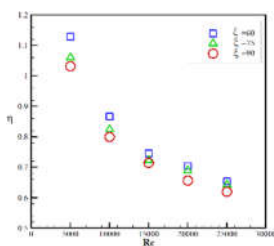
شکل ۱۰- کانتور دما برای نوار تابیده در  $\xi = 90^\circ$ .

#### ۶-۴- بررسی تاثیر متغیرهای حاکم مختلف بر ضریب اصطکاک

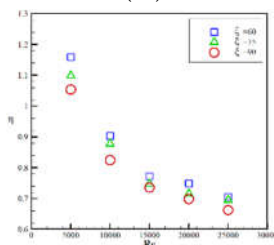
نوار تابیده در مسیر نانوسیال مانند مانع عمل می‌کند و به علت افزایش سطوح تماس دیواره و نانوسیال، افزایش ضریب اصطکاک را به همراه خواهد داشت. با زیاد شدن عدد رینولدز، مومنتوم بر نیروی ویسکوزیته نانوسیال غلبه می‌کند که نتیجه آن کاهش نیروی برشی بین دیواره و نانوسیال است. بنابراین میزان ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. ضریب اصطکاک برای نوار تابیده، کم‌ترین مقدار را در تعداد دور ۴، زاویه بال  $\xi = 90^\circ$  و عدد رینولدز ۲۵۰۰۰ به میزان  $0.087$  و بیش‌ترین مقدار را در تعداد دور ۸، زاویه بال  $\xi = 60^\circ$  و عدد رینولدز ۵۰۰۰ به اندازه  $0.38$  خواهد داشت. به طور خلاصه همان‌طور که گفته شد، افزایش تعداد دور، موجب چرخش بیش‌تر جریان نانوسیال در امتداد لوله می‌شود که باعث زیاد شدن افت فشار در نانوسیال شده و در نهایت افزایش ضریب اصطکاک را به همراه دارد. مقادیر ضریب اصطکاک در نوار تابیده برای متغیرهای حاکم مختلف در شکل ۱۱ به نمایش در آمده است.

#### ۴-۹- بررسی تاثیر متغیرهای حاکم بر ضریب کارایی حرارتی

با زیاد شدن مقدار ضریب کارایی حرارتی مکانیزم‌های هیدروپنایمیکی کاهنده انرژی رانشی در برابر مکانیزم‌های حرارتی بسیار ضعیف می‌شوند. زمانی که ضریب کارایی حرارتی مقداری بیشتر از واحد را نشان دهد می‌توان گفت که مکانیزم انتقال گرما نسبت به اصطکاک قوی‌تر و از نظر اقتصادی به صرفه‌تر می‌باشد. در اعداد رینولدز بالاتر مکانیزم‌های انتقال گرمایی نسبت به اصطکاک ضعیف‌تر عمل می‌کنند. مقادیر ضریب کارایی حرارتی در نوار تابیده برای متغیرهای حاکم مختلف در شکل ۱۴ به نمایش درآمده است.



(الف)



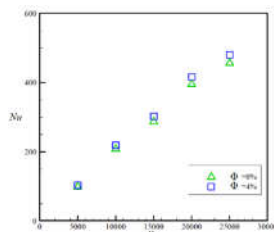
(ب)

شکل ۱۴- ضریب کارایی حرارتی در اعداد رینولدز مختلف

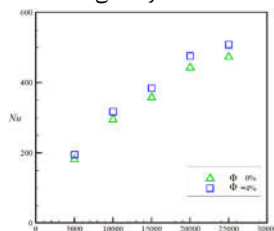
برای نوارتابیده در الف)  $n_r = 4$  و ب)  $n_r = 8$

#### ۵- نتیجه‌گیری

مقادیر عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب کارایی حرارتی برای یک لوله مجهز به نوارتابیده که در آن از سیال سیلترم  $800$  با نانوذرات  $Al_2O_3$  به عنوان سیال کاری استفاده گردید، مورد بررسی قرار گرفته شده است. به سطح خارجی لوله شار گرمایی متغیر اعمال گردید. نوار تابیده با سه زاویه بال مختلف و دو مقدار برای دور در داخل لوله جاذب قرار گرفته شد. اثرات این دو پارامتر بررسی گردید. با بررسی توزیع و میزان شار رسیده به لوله در سه زاویه لبه ( $30^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $90^\circ$ ) بهترین زاویه  $90^\circ$  درجه می‌باشد زیرا میانگین شار رسیده به لوله بیشتر از دو زاویه دیگر است. بهترین کارایی حرارتی در کمترین اعداد رینولدز رخ می‌دهد و بیشترین مقدار ضریب کارایی حرارتی تقریباً  $54\%$  درصد بیشتر از کمترین مقدار است. عدد ناسلت برای نوار تابیده، کمترین مقدار را در تعداد دور ۴، زاویه بال  $90^\circ$  و عدد رینولدز  $5000$  به میزان  $165/32$  و بیشترین مقدار را در تعداد دور ۸، زاویه بال  $60^\circ$  و عدد رینولدز  $25000$  به اندازه  $704/93$  خواهد داشت. کمترین مقدار ضریب کارایی حرارتی، در تعداد دور ۴، زاویه بال  $90^\circ$  و عدد رینولدز



الف) لوله خالی

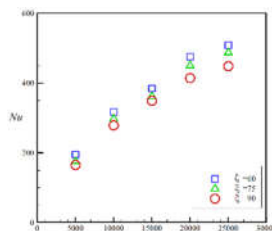


ب) نوار تابیده با زاویه بال  $60^\circ$  درجه با تعداد دور ۴

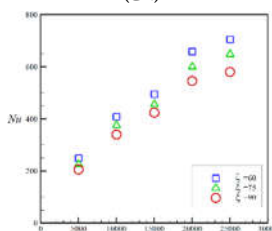
شکل ۱۳- تاثیر افزودن نانوذره برای دو هندسه مختلف در اعداد رینولدز متفاوت

#### ۴-۸- بررسی تاثیر متغیرهای حاکم مختلف بر عدد ناسلت

در تمام حالات بررسی شده با زیاد شدن تعداد دور، عدد رینولدز و کاهش زاویه بال، عدد ناسلت که بیان‌کننده نسبت انتقال گرما همرفتی به رسانش است، زیاد می‌شود. قرار دادن نوار تابیده در درون لوله منجر به تشکیل جریان ثانویه در نانوسیال می‌شود. همچنین چرخشی‌تر شدن جریان نانوسیال و در نهایت بهبود اختلاط نانوسیال منجر به افزایش انتقال گرما شده است. مقادیر عدد ناسلت در نوار تابیده برای متغیرهای حاکم مختلف در شکل ۱۳ به نمایش در آمده است.



الف)



ب)

شکل ۱۳- عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف برای نوارتابیده در

الف)  $n_r = 4$  و ب)  $n_r = 8$



$\sigma_K$	عدد پراختل آشفتگی برای انرژی جنبشی آشفتگی (-)
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )
$\nu$	لزجت استاتیکی ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
<b>زیرنویس</b>	
$b$	توده سیال
$f$	سیال پایه
$i$	ورودی
$k$	انرژی جنبشی
$nf$	نانو سیال
$o$	خروجی
$s$	جامد
$t$	انرژی جنبشی آشفتگی

### ۷- مراجع

- [1] Bellos E, Tzivanidis C. Investigation of a booster secondary reflector for a parabolic trough solar collector. *Solar Energy*. 2019 Feb 1; 179:174-85.
- [2] Zou B, Jiang Y, Yao Y, Yang H. Thermal performance improvement using unilateral spiral ribbed absorber tube for parabolic trough solar collector. *Solar Energy*. 2019 May 1; 183:371-85.
- [3] Wang Y, Xu J, Liu Q, Chen Y, Liu H. Performance analysis of a parabolic trough solar collector using Al2O3/synthetic oil nanofluid. *Applied Thermal Engineering*. 2016 Aug 25; 107:469-78.
- [4] Khakrah H, Shamloo A, Kazemzadeh Hannani S. Determination of parabolic trough solar collector efficiency using nanofluid: a comprehensive numerical study. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2017 Oct 1;139(5).
- [5] Tagle-Salazar PD, Nigam KD, Rivera-Solorio CI. Heat transfer model for thermal performance analysis of parabolic trough solar collectors using nanofluids. *Renewable energy*. 2018 Sep 1; 125:334-43.
- [6] Dehghan, M., Daneshpour, M., & Valipour, M. S. (2018). Nanofluids and converging flow passages: a synergetic conjugate-heat-transfer enhancement of micro heat sinks. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 97, 72-77.
- [7] Mashhadian, A., Heyhat, M. M., & Mahian, O. (2021). Improving environmental performance of a direct absorption parabolic trough collector by using hybrid nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 244, 114450.
- [8] Siavashi, M., Bozorg, M. V., & Toosi, M. H. (2021). A numerical analysis of the effects of nanofluid and porous media utilization on the performance of parabolic trough solar collectors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101179.
- [9] Hong, K., Yang, Y., Rashidi, S., Guan, Y., & Xiong, Q. (2021). Numerical simulations of a Cu-water nanofluid-based parabolic-trough solar collector. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6), 4183-4195.
- [10] Jafar KS, Sivaraman B. Performance characteristics of parabolic solar collector water heater system fitted with nail twisted tapes absorber. *Journal of engineering science and technology*. 2017 Mar 1;12(3):608-21.
- [11] ANSYS® Academic research, release 2020, ANSYS FLUENT, Theory Guide, ANSYS, Inc.
- [12] Kasacian AB. Convection heat transfer modeling of Ag nanofluid using different viscosity theories. *IJUM Engineering Journal*. 2012 Apr 20;13(1).
- [13] Khanafer K, Vafai K. A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *International journal of heat and mass transfer*. 2011 Sep 1;54(19-20):4410-28.
- [14] Yu W, Choi SU. The role of interfacial layers in the

۲۵۰۰۰ رخ می‌دهد که میزان آن برابر با  $0/62$  و بیش‌ترین مقدار آن در تعداد دور ۸، زاویه بال  $\theta = 60^\circ$  و عدد رینولدز ۵۰۰۰ به اندازه  $1/15$  است. ضریب اصطکاک برای نوار تابیده، کم‌ترین مقدار را در تعداد دور ۴، زاویه بال  $\theta = 90^\circ$  و عدد رینولدز ۲۵۰۰۰ به میزان  $0/087$  و بیش‌ترین مقدار را در تعداد دور ۸، زاویه بال  $\theta = 60^\circ$  و عدد رینولدز ۵۰۰۰ به اندازه  $0/38$  خواهد داشت.

### ۶- نمادها

#### علائم انگلیسی

$C_1, C_2$	ثابت های مدل توربولانسی (-)
$C_p$	گرمای ویژه ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
D	قطر (m)
f	ضریب اصطکاک (-)
g	شتاب گرانش زمین. ( $m \cdot s^{-2}$ )
$G_k$	نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از گرادیان سرعت ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$ )
h	ضریب انتقال گرما ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
$I_b$	تابش پرتو ( $w/m^2$ )
$I_g$	تابش جهانی ( $w/m^2$ )
k	رسانایی گرمایی ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$\kappa$	انرژی جنبشی آشفتگی ( $m^2 \cdot s^{-2}$ )
L	طول (m)
$n_r$	تعداد دور (-)
Nu	عدد ناسلت (-)
Pr	عدد پراختل (-)
P	فشار (Pa)
$\Delta P$	افت فشار (pa)
$q''$	شار حرارتی ( $W \cdot m^{-2}$ )
Re	عدد رینولدز (-)
T	دما (K)
u	سرعت ( $m \cdot s^{-1}$ )
V	حجم لوله ( $m^3$ )
w	پهنای (m)
$x_i, x_j$	مختصات مکانی (m)
$y^+$	مختصات بی بعد دیواره
$Z^*$	مقطع عرضی (-)
<b>علائم یونانی</b>	
$\varepsilon$	نرخ اضمحلال ( $m^2 \cdot s^{-3}$ )
$\xi$	زاویه بال (deg)
$\eta$	ضریب عملکرد حرارتی (-)
$\varphi_r$	زاویه لبه گردآورنده (-)
$\Phi$	کسر حجمی (-)
$\rho$	چگالی ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$\sigma_{h,t}$	عدد پراختل آشفتگی برای انرژی (-)
$\sigma_\varepsilon$	عدد پراختل آشفتگی برای میزان اتلاف آشفتگی (-)

- enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Hamilton–Crosser model. *Journal of Nanoparticle Research*. 2004 Aug 1;6(4):355-61.
- [15] Maxwell GC. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, second ed., Clarendon Press, Oxford, UK, 1881.
- [16] Batchelor GK. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of fluid mechanics*. 1977 Nov;83(1):97-117.
- [17] Bellos E, Tzivanidis C. Parametric investigation of nanofluids utilization in parabolic trough collectors. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2017 Jun 1; 2:71-9.
- [18] Çengel YA, Ghajar AJ. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, fourth ed., McGraw-Hill, New York, 2011.
- [19] Mwesigye A, Bello-Ochende T, Meyer JP. Heat transfer and entropy generation in a parabolic trough receiver with wall-detached twisted tape inserts. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016 Jan 1; 99:238-57.
- [20] Manglik RM, Bergles AE, Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Twisted-Tape Inserts in Isothermal Tubes: Part II—Transition and Turbulent Flows, *Journal of Heat Transfer* 115(4) (1993) 890-896.