



## تأثیر استفاده از دو نوار تابیده متقاطع به منظور تقویت دریافت انرژی تشعشی در یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی

مجتبی جمعیتی<sup>۱\*</sup>، حسین پورمحمدیان<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه فیزیک، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران

\* نراق، صندوق پستی ۳۷۹۶۱/۵۸۷۱۹، drmjamiati@iau-naragh.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این مطالعه به صورت عددی به بررسی اثر نوار تابیده بر عملکرد هیدرولیکی حرارتی نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم درون کلکتور خورشیدی سهموی خطی پرداخته شده است. مطالعه در رژیم جریان آشفته بوده و به منظور مدل سازی آن از مدل توربولانسی <math>k-\epsilon</math> استفاده شده است. به منظور حل معادلات بقا از روش حجم محدود و الگوریتم SIMPLE C استفاده شده است. مطالعه برای بررسی عملکرد هیدرولیکی (ضریب اصطکاک) و حرارتی کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به ۱، ۲ و ۳ نوار تابیده انجام شده است. همچنین نتایج به دست آمده از شبیه سازی کلکتور خورشیدی سهموی خطی به همراه نوار تابیده با زمانی که کلکتور خورشیدی ساده (بدون نوار تابیده) است، مقایسه می گردد. غلظت های گوناگون نانوذرات (۱ تا ۳ درصد در حجم) برای اعداد رینولدز ۳۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ استفاده گردید. اندازه گیری ها نشان داد که با افزایش درصد نانو ذرات در سیال عامل پایه، خواص حرارتی سیستم به صورت قابل توجهی بهبود می یابد در صورتی که ضریب اصطکاک متوسط و در نتیجه آن میزان افت فشار نیز افزایش می یابد. همچنین افزودن نوار تابیده به کلکتور خورشیدی سهموی خطی باعث افزایش عدد ناسلت متوسط و افت فشار می شود. در کسر حجمی ۳٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰، عدد ناسلت متوسط ۱۱۰/۹۵٪ افزایش می یابد. همچنین در کسر حجمی ۲٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ افت فشار، ۲۱۷/۱۰٪ افزایش می یابد.</p>	<p>مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۲۵ مهر ۱۳۹۹ پذیرش: ۲۵ بهمن ۱۳۹۹ ارائه در سایت: ۲۵ بهمن ۱۳۹۹</p> <p><b>کلیدواژگان</b> : نانوسیال هیبریدی کلکتور خورشیدی سهموی خطی نوار تابیده الگوریتم سیمپل سی معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حرارتی</p>

## The effects of using two compound twisted tapes to enhance the performance of a parabolic trough solar collector

Mojtaba Jamiati<sup>1\*</sup>, Hossein Pourmohamadian<sup>2</sup>

1- Department of Physics, Naragh Branch, **Islamic Azad University**, Naragh, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Naragh Branch, **Islamic Azad University**, Naragh, Iran.

\* P.O.B. 58719/37961 naragh, Iran, drmjamiati@iau-naragh.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 16 October 2020

### ABSTRACT

In this study, the effect of spinning tape on the thermal hydraulic performance of water-hybrid water-hybrid carbon nanotubes-aluminum

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mojtaba Jamiati, Hossein Pourmohamadian, The effects of using two compound twisted tapes to enhance the performance of a parabolic trough solar collector, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 11, No. 4, pp59-70, 2020-2021 (In Persian)

Accepted 13 February 2021  
Available Online 13 February 2021

### Keywords

Hybrid Nanofluid  
Linear Parabolic Solar  
Collector  
Spinning Band  
Simple C Algorithm  
Criteria Thermal Hydraulic  
Performance (PEC)

oxide inside a linear parabolic solar collector has been investigated numerically. The study is in turbulent flow regime and in order to model it, the k epsilon turbulence model has been used. In order to solve the survival equations, the finite volume method and the SIMPLE C algorithm have been used. The study was performed to investigate the hydraulic and thermal performance of the parabolic solar collector equipped with 1, 2 and 3 twisted strips. Also, the results obtained from the simulation of a linear parabolic solar collector with a radiant strip are compared with when the solar collector is simple (without a radiant strip). Different concentrations of nanoparticles (1 to 3% by volume) were used for Reynolds numbers from 3000 to 18000. The obtained results are presented in the form of Nusselt dimensionless number diagrams, pressure drop and thermal hydraulic performance evaluation criteria (PEC). Also, adding a radiant strip to the linear parabolic solar collector increases the average Nusselt number and decreases the pressure. At a volume fraction of 3% and a linear parabolic solar collector with a twisted strip, the average Reynolds number increases from 3,000 to 18,000 Nusselt numbers, increasing by an average of 110.95%. Also, in the volume fraction of 2% and in the case where the solar collector is a linear parabolic strip with a twisted strip, the pressure drop increases by 217.10% by increasing the Reynolds number from 3000 to 18000.

### ۱- مقدمه

برخی محققین تأثیر مکانیزمای انتقال حرارت در اثر انتقال جرم را در نانوسیال‌ها مهم می‌دانند. در سال‌های اخیر، مشخصه‌های انتقال حرارت در دستگاه‌های حرارتی توجه زیادی رو به خود اختصاص داده است. در طول این سال‌ها به‌منظور داشتن مبدل‌های حرارتی کارآمدتر و مقرون به صرفه‌تر، روش‌های متعددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از کاربردهای این تحقیقات می‌توان به جریان‌سنج‌ها، کاربردهای کشاورزی، سرمایه‌ش قطعات الکترونیکی، برج‌های خنک‌کننده، خطوط انتقال مواد نفتی، رسوب‌سازی، فرایند ذوب، احتراق، تبخیر و مبدل‌های حرارتی اشاره کرد. در بسیاری از کاربردهایی که اشاره شد افزایش انتقال حرارت از چالش‌های اصلی محققان به حساب می‌آید. در دهه اخیر با پیشرفت‌های به وجود آمده در ساخت نانوذرات جامد، نانوذرات جدیدی، که ترکیبی از نانوذرات مختلف هستند، با عنوان نانوذرات هیبریدی معروف شدند.

در پژوهشی که امین الساداتی و قاسمی [۱] به صورت عددی به مطالعه جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید مس در اعداد گراشوف و کسر حجمی‌های مختلف در محفظه مربعی با گرمایش موضعی پرداختند. شاهد افزایش عدد رایلی، کسر حجمی نانوذرات و عدد ناسلت متوسط بودند. محمودی و هاشمی [۲] به صورت عددی به مطالعه جریان سیال و انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-مس در یک محفظه C شکل در نسبت‌های منظری و اعداد رایلی مختلف پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رایلی و

از 20 سال پیش تاکنون کاربرد های نانوسیالات در صنایع مختلف گسترش یافته است. نانو سیال ها از تعلیق ذرات بسیار ریز با مقیاس نانو در سیال پایه تهیه می‌شوند و قادر به افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت در مقایسه با سیالات خالص می باشند. به طور معمول نانوذرات از جنس فلزاتی مانند مس، آلومینیم، پتاسیم، سیلیسیم و اکسیدهای آنها و همچنین نانولوله‌های کربن و سیالات پایه نیز عمدتاً از سیالات با رسانایی نسبتاً پایین‌تر مانند آب، اتیلن گلیکول و سیالاتی از این دسته که در صنعت به عنوان هادی انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌باشند. نانوذرات نسبت به ذرات بزرگتر مانند میکروذرات، بسیار پایدار بوده و سطح تماس بیشتری با ناحیه سیال دارند. انتقال حرارت در نانوسیال‌ها تاکنون از دو دیدگاه کلی مورد بررسی قرار گرفته است. در یک دیدگاه سیال پایه و نانوذرات، یک سیال همگن فرض شده و نانوذرات اجازه حرکت نسبت به سیال پایه را ندارند. در این دیدگاه، تأثیر تغییر خواص ترموفیزیکی در اثر وجود نانوذرات بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت معادلات حاکم بر یک سیال معمولی برای نانوسیال نیز کاربرد دارد. در دیدگاه دوم، نانوسیال به عنوان یک سیال دوفازی (مایع و جامد) فرض شده و در این حالت نانوذرات در اثر نیروهای وارد بر آنها امکان لغزش نسبت به سیال پایه را دارند. در انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال‌ها افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مشاهده شده است.

دادند. آن‌ها این مطالعه را برای درصد وزنی نانوسیال ۰/۷۵ - ۰/۱ درصد مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعه عددی آن‌ها حداکثر ضریب انتقال حرارت جابجایی ۱۶۰٪ و حداکثر ضریب عملکرد حرارتی ۱،۷۷ می‌باشد.

صدیقی نژاد و همکاران [۷] به صورت عددی و تجربی بهبود انتقال حرارت در یک لوله دایره‌ای با شرط مرزی شار حرارتی ثابت در حضور جریان سیال آب-گرافن در جریان مغشوش پرداختند. نتایج به دست آمده از مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مطالعات تجربی و عددی با یکدیگر همپوشانی قابل قبولی داشته‌اند. همچنین با توجه به مقادیر مختلف کسر وزنی، عدد ناسلت تغییرات مثبتی را در محدوده ۳٪ تا ۸۳٪ نشان داد. بعلاوه افزایش ۰/۴ تا ۱۴/۶ درصد در افت فشار در نتیجه حضور نانوذرات در مطالعه آن‌ها گزارش شده است.

پارسایی مهر و همکاران [۸] جریان سیال و انتقال حرارت را درون یک کانال مستطیلی دو بعدی به صورت عددی و روش حجم محدود بررسی کردند. آن‌ها از نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم به عنوان سیال کاری استفاده نموده و با قرار دادن مانع‌های مستطیلی در کف کانال و بررسی مانع‌ها برای زاویه‌های صفر تا ۱۸۰° به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز، ماکزیمم انتقال حرارت مربوط به وقتی است که مانع‌ها زاویه ۶۰° دارند و افزایش مانع و استفاده از نانو سیال باعث عملکرد بهتری در انتقال حرارت خواهد داشت. خانجیان و همکاران [۹] در یک مطالعه عددی اثر مولد گردابه را بر روی انتقال حرارت جابجایی و جریان سیال در یک کانال مستطیلی سه بعدی به روش حجم محدود، در جریان آرام برای اعداد رینولدز ۴۵۶ تا ۹۱۱ در حالتی که زاویه مولدهای گردابه ۹۰° - ۲۰ بود بررسی کردند. نتایج ایشان شامل بدست آوردن مقادیر زاویه بهینه برای مولدهای گردابه بود.

کریم پور و همکاران [۱۰] اثر دندان‌ها بر روی پارامترهای جریان سیال و انتقال حرارت درون یک میکروکانال دو بعدی با روش حجم محدود بررسی کردند. آن‌ها از نانوسیال آب-نقره به عنوان سیال کاری استفاده کردند. مطالعه آن‌ها برای رینولدزهای ۱۰ تا ۱۰۰ صورت گرفت. نتایج ایشان نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، کسر حجمی و تعداد دندان‌ها، انتقال حرارت به طور چشم‌گیری افزایش پیدا خواهد کرد. بهیندر و همکاران [۱۱] دینامیک سیالات و انتقال حرارت اجباری برای مقاطع شبه دایره‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان داده‌اند که انحنای خطوط جریان با افزایش زاویه برخورد زیاد خواهد شد.

کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها گزارش کردند که در یک نسبت منظری ثابت با افزایش عدد رایلی نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

قاسمی و امین الساداتی [۳] به صورت عددی به مطالعه جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید مس در یک محفظه مثلی پرداختند. وتر محفظه در دمای سرد و دیگر اضلاع آن به جز وسط ضلع قائم مثلث، عایق فرض شده بودند. آن‌ها نشان دادند زمانی که حرکت براونی در نظر گرفته می‌شود درصد حجمی جامد دارای اثرات متفاوت در نرخ انتقال حرارت برای اعداد رایلی مختلف دارد. در رایلی‌های پایین با در نظر گرفتن حرکت براونی، با افزایش کسر حجمی نانوذرات عدد ناسلت به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. البته این افزایش در حالت در نظر گرفتن حرکت براونی، کمی رخ می‌دهد. در رایلی‌های بالا با در نظر گرفتن حرکت براونی افزایش عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی کمتر است. بر اساس نتایج آن‌ها در اعداد رایلی بالا نقطه بهینه‌ای برای کسر حجمی نانوذره وجود دارد که به ازای آن نرخ انتقال حرارت بیشینه می‌باشد.

سیاوشی و جمالی [۴] به صورت عددی به مطالعه انتقال حرارت و تولید آنتروپی در جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم در یک مجرای دایره‌ای تحت شار حرارتی ثابت پرداختند. آن‌ها از مدل  $k-\varepsilon$  برای شبیه سازی عددی آشفته‌گی جریان استفاده نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط زیاد می‌شود. همچنین آن‌ها گزارش کردند با افزایش عدد رینولدز در کسرهای حجمی مختلف آنتروپی تولیدی کاهش می‌یابد.

چوداری و سابودی [۵] به صورت تجربی به مطالعه انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب اکسید آلومینیوم در یک محفظه مستطیلی پرداختند. آن‌ها نسبت منظری محفظه (نسبت ارتفاع به عرض محفظه)، عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات را بر عدد ناسلت متوسط بررسی کردند. آن‌ها نتایج خود را به صورت روابطی برای تخمین عدد ناسلت بر حسب عدد رایلی در کسر حجمی‌های مختلف ارائه دادند. طبق این روابط با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رایلی، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.

صدیقی نژاد و همکاران [۶] به صورت عددی انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال آب-گرافن در یک مبدل حرارتی دو لوله ای با شرط مرزی شار حرارتی ثابت را مورد بررسی قرار

<sup>1</sup> . k epsilon turbulence model

می‌دهد بالاترین میزان انرژی در کسر حجمی ۰/۱ رخ می‌دهد.

گلدانلو و همکاران [۱۶] به صورت عددی به اثر نانوسیال هیبریدی مغناطیسی درون کلکتور خورشیدی سهموی پرداختند. آن‌ها از روش حجم محدود و الگوریتم **SIMPLE** به منظور حل معادلات پایداری استفاده نمودند. مطالعه ایشان برای کسر حجمی ۰/۱ تا ۱/۳۵ درصد از نانوذرات و اعداد رینولدز ۶۰۰۰ تا ۸۰۰۰ در جریان آشفته صورت گرفت. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز، عملکرد هیدرولیکی و حرارتی کلکتور خورشیدی افزایش پیدا می‌کند. همچنین بیشترین عملکرد هیدرولیکی و حرارتی در عدد رینولدز ۸۰۰۰ و کسر حجمی ۱٪ از نانوذرات رخ می‌دهد.

افزودن ذرات نانو به سیال پایه طرحی بدیع است که نه تنها موجب افزایش عملکرد حرارتی و قابلیت‌های ترمودینامیکی سیستم می‌گردد، بلکه به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی در نانوسیال بازده کلی سیستم نیز افزایش می‌یابد. لذا در این تحقیق هدف بر آن است تا از نانو سیل به جای سیال پایه، به منظور افزایش انتقال حرارت در شبیه سازی عددی کلکتور خورشیدی سهموی با نرم افزار فلونت<sup>۱</sup> و گمبیت<sup>۲</sup> استفاده شود و در پایان تاثیر استفاده از نانوسیال بر عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی کلکتور در مقایسه با سیال پایه حرارتی مورد بررسی و مطالعه قرار بگیرد.

به منظور شبکه بندی هندسه لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی خطی از شبکه غیریکنواخت سازمان یافته استفاده شد. برای مش<sup>۳</sup> زدن هندسه از المان چهاروجهی<sup>۴</sup> با نوع کوپر<sup>۵</sup> استفاده گردید. از شبکه‌ای به صورت  $30 \times 20 \times 78$  به ترتیب در جهت محیطی (NC)، شعاعی (Nr) و محوری (Nz) سه بعدی استفاده شده است.

در این مطالعه به صورت عددی به بررسی اثر نوار تابیده بر عملکرد هیدرولیکی و حرارتی نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم درون کلکتور خورشیدی

زیرین قلم و همکاران [۱۲] در یک مطالعه تجربی اثر کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز را بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار درون، یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای جریان مخالف در جریان متلاطم و در اعداد رینولدز ۲۹۰۰ تا ۱۸۵۰۰ آزمایش کردند. آن‌ها از نانوسیال آب-اکسید مس به عنوان سیال کاری استفاده نمودند. نتایج ایشان نشان داد که، با جایگزینی نانوسیال به جای سیال پایه، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، عدد ناسلت متوسط و افت فشار با افزایش کسر حجمی زیاد می‌شود. همچنین آن‌ها گزارش کردند که شرایط بهینه برای ضریب عملکرد حرارتی در کسر حجمی ۰/۰۲ و رینولدز ۳۶۷۷ است.

صمدی فر و طغریایی [۱۳] به صورت عددی به بررسی اثر مولدهای گردابه بر میدان جریان و انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی با مقطع مثلثی پرداختند. مطالعه آنها با استفاده از روش حجم محدود و برای اثر شش حالت مختلف از شکل هندسی مولدهای گردابه صورت گرفت. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از مولدهای گردابه مستطیلی شکل باعث افزایش انتقال حرارت بیشتری نسبت به مولدهای گردابه دیگر می‌شود. همچنین افزایش ارتفاع مولدهای گردابه باعث بیشتر شدن انتقال حرارت شده، و بهترین زاویه برای نصب مولدهای گردابه ۴۵ درجه می‌باشد.

زو و همکاران [۱۴] به صورت عددی به بررسی اثر مولدهای گردابه بر میدان جریان و انتقال حرارت درون یک لوله دایره‌ای با شار حرارتی ثابت پرداختند. مطالعه ایشان برای سیال هوا در اعداد رینولدز ۶۰۰۰ تا ۳۳۰۰۰ و اثر زوایای مختلف مولد گردابه با روش حجم محدود صورت گرفت. آنها نتایج خود را به صورت نمودار عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک برای دو حالت لوله دایره‌ای و لوله دایره‌ای به همراه مولدهای گردابه ارائه کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که بیشترین انتقال حرارت در زاویه حمله ۴۵ درجه و نسبت انسداد ۰/۳ می‌باشد. همچنین با افزایش میزان ناپایداری‌ها، انتقال حرارت و ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.

رستمی و همکاران [۱۵] به صورت عددی به بهینه سازی انرژی کلکتور خورشیدی صفحه تخت مجهز به لوله‌های بیضوی به همراه نانوسیال پرداختند. ایشان به منظور شبیه سازی عددی از روش حجم محدود و نرم افزار فلونت استفاده نمودند. مطالعه ایشان برای کسر حجمی صفر تا ۰/۱ از نانوذرات و محدوده رینولدز ۵۰ تا ۱۲۰۰ صورت گرفت. نتایج آن‌ها نشان

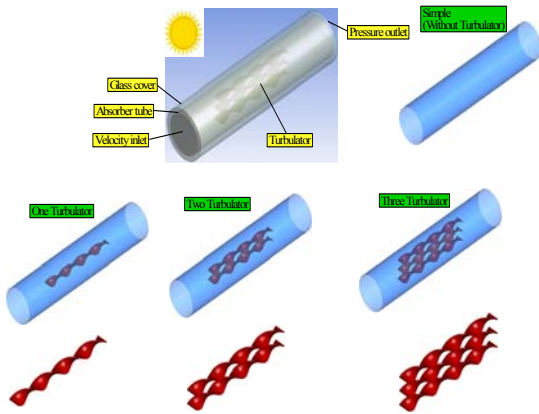
<sup>1</sup> . fluent

<sup>2</sup> . Gambit

<sup>3</sup> . Mesh

<sup>4</sup> . Element Quad

<sup>5</sup> . Cooper



شکل ۱ شماتیک هندسه شماتیک فضای بین دو استوانه هم مرکز الپتیک تابیده

جدول (۲)، نیز مشخصات هندسی، ترموفیزیکی و اپتیکی کلکتور خورشیدی مدل سازی شده را نشان می دهد. همچنین برخی اطلاعات هندسی کلکتور خورشیدی در شکل (۱) نشان داده شده است.

معادلات حاکم بر میدان جریان و انتقال حرارت را می توان در سیستم تانسوری دکارتی نوشت [۸]:

معادله پیوستگی:

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

در معادله فوق  $\rho$  چگالی سیال و  $u_i$  سرعت محوری است.

جدول ۲ مشخصات هندسی، ترموفیزیکی و اپتیکی کلکتور خورشیدی سهموی

مشخصات	مورد
سهموی خطی مجهز به سینک حرارتی	نوع کلکتور
آلومینیوم	جنس صفحه
رنگ سیاه مات	جنس پوشش صفحه
۰/۰۰۱ mm	ضخامت صفحه
۰/۹	ضریب صدور صفحه ( $\epsilon_p$ )
۲۱۱ W / m · K	ضریب هدایت حرارتی صفحه ( $k_p$ )

سهموی خطی پرداخته شده است. مطالعه در جریان آشفته بوده و به منظور مدل سازی جریان متلاطم از مدل توربولانسی  $k-\epsilon$  و برای حل معادلات بقا از یک کد کامپیوتری به زبان MATLAB که بر اساس روش حجم محدود و الگوریتم SIMPLE C می باشد، استفاده شده است. مطالعه برای بررسی عملکرد هیدرولیکی حرارتی کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به ۱، ۲ و ۳ نوار تابیده انجام شده است. ابتدا خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال با افزایش غلظت نانوذرات بررسی شده است. سپس تأثیر عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات بر نرخ انتقال حرارت و بازده میدل در دو حالت سیال پایه و نانوسیال بررسی شده است. همچنین نتایج به دست آمده از شبیه سازی کلکتور خورشیدی سهموی خطی به همراه نوار تابیده با زمانی که کلکتور خورشیدی ساده (بدون نوار تابیده) است، مقایسه می گردد. مطالعه برای اعداد رینولدز ۳۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ و کسر حجمی ۱ تا ۳ از نانوذرات در نانوسیال هیبریدی آب-نانو لوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم صورت می گیرد. نتایج به دست آمده به صورت نمودارهای عددی بی بعد ناسلت، افت فشار و ضریب عملکرد هیدرولیکی و حرارتی (PEC) ارائه می گردد. خواص ترموفیزیکی آب خالص (سیال پایه) و نانو ذرات آلومینیوم در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذره جامد

	$\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$	$C_p \left( \frac{j}{kg \cdot k} \right)$	$K \left( \frac{W}{m \cdot k} \right)$
آب خالص	997.1	4179	0,613
آلومینیوم	3970	765	40

## ۲- مدل سازی

شماتیک هندسه کلکتور خورشیدی سهموی خطی به همراه نوار تابیده در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود هندسه کلکتور خورشیدی سهموی خطی در چهار حالت ساده (بدون نوار تابیده)، به همراه یک نوار تابیده، دو نوار تابیده و سه نوار تابیده شبیه سازی می شود.

1. SIMPLE Consistent Algorithm

در معادله فوق، مقادیر  $Nu$  و  $Nu_s$  به ترتیب عدد ناسلت متوسط در داخل کانال کنگره‌دار و عدد ناسلت متوسط در داخل کانال صاف می‌باشند. از طرفی  $f$  و  $f_s$  نیز به ترتیب ضریب اصطکاک در داخل کانال کنگره‌دار و ضریب اصطکاک در داخل کانال صاف می‌باشند.

آزمون استقلال نتایج از شبکه‌بندی برای کلکتور خورشیدی سهموی خطی مجهز به سه نوار تابیده حاوی نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چندجداره در کسرحمی ۳ درصد و عدد رینولدز ۱۸۰۰۰ برای تجزیه و تحلیل اثرات ابعاد شبکه‌بندی بر نتایج انجام گرفته است. مطابق شکل ۲، ۸ حالت شبکه‌بندی دارای تعداد گره‌های مختلف برای کلکتور خورشیدی سهموی خطی مجهز به نوار تابیده حاوی نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چندجداره در نظر گرفته شده است. با مقایسه شش حالت فوق، شبکه‌بندی با تعداد گره ۱۵۶۹۳۲۷ به‌عنوان شبکه‌بندی قابل قبول هم از نظر دقت و هم از نظر صرفه جویی در زمان حل انتخاب شد. همچنین می‌توان بیان نمود از این تعداد شبکه به بعد تغییر محسوسی در جواب‌های خروجی مشاهده نمی‌شود [۱۷ و ۹].

اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری بر اساس هندسه و شرایط شیخ‌السلامی و همکاران [۱۸] انجام شده و در شکل ۳ و جدول ۳ نشان داده شده است. آن‌ها به صورت عددی عملکرد انتقال حرارت و جابجایی اجباری جریان نانوسیال را در داخل یک مجرا مجهز به توربولاتور مورد بررسی قرار دادند. با مقایسه نتایج شیخ‌السلامی و همکاران [۱۸] در مورد عدد ناسلت متوسط، با نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر می‌توان مشاهده نمود که نتایج با دقت قابل قبولی به دست آمده است. بعلاوه حداکثر خطا بین نتایج مطالعه حاضر با نتایج شیخ‌السلامی و همکاران [۱۸]، ۲/۲۷۶٪ می‌باشد.

برای حل و بررسی مدل ترکیبی میدان جریان و انتقال حرارت یک شبیه‌سازی عددی پایا از میدان جریان در طول یک کانال موج‌دار دو بعدی در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور حل معادلات حاکم پیوستگی، مومنوم و انرژی، نرم افزار تجاری فلونت مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور حل سیستم کلاسیک تک فاز معادلات حاکم و تبدیل آن‌ها به معادلات جبری که می‌تواند به صورت خطی حل شود، از روش حجم کنترل استفاده می‌شود. با استفاده از روش حجم محدود (FVM) با حل معادلات حاکم همراه با شرایط مرزی محاسبات عددی انجام می‌گیرند. ترم نفوذ در معادلات مومنوم و انرژی با استفاده از روش تفاضل مرکزی مرتبه اول که یک راه حل پایدار است منفصل می‌شوند.

طول کلکتور عرض دهانه کلکتور	$2\ m$ $4/85\ m$
شیب قرارگیری کلکتور ( $\beta$ )	۳۵ درجه
تعداد پوشش شیشه‌ای	یک
ضریب صدور پوشش شیشه‌ای	۰/۸۵
قطر هیدرولیکی لوله	$5\ cm$
بازده اپتیکی ( $\eta_0$ )	۰/۶۸
ضریب هدایت حرارتی عایق‌ها ( $k_i$ )	$0.05\ W / m \cdot K$
ظرفیت گرمایی ویژه ( $C_p$ ) سیال عامل (آب)	$4200\ J / kg \cdot K$

معادله مومنوم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

در معادله فوق،  $\mu$  لزجت سیال،  $\mathbf{u}'$  سرعت نوسانی و  $\mathbf{u}_j$  سرعت محوری می‌باشند. عبارت  $\rho \overline{u_i' u_j'}$  نشان‌گر تنش برشی آشفتگی است.

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\Gamma + \Gamma_t) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

در این معادله  $\Gamma$  و  $\Gamma_t$  به ترتیب نفوذ حرارت مولکولی و نفوذ حرارت آشفتگی هستند و به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} \quad \text{and} \quad \Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (4)$$

به منظور ارزیابی افزایش انتقال حرارت در کانال موج‌دار شاخص ضریب عملکرد (PEC) با استفاده از اعداد ناسلت پیش‌بینی شده و ضریب اصطکاک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$PEC = \left( \frac{Nu_{av}}{Nu_{av,s}} \right) \cdot \left( \frac{f}{f_s} \right)^{-1/3} \quad (5)$$

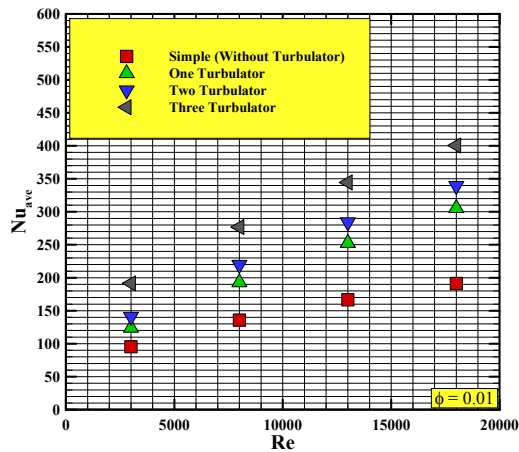


دمای جریان ورودی معادل با  $k = 555^\circ$  است. با افزودن ذرات نانو به سیال پایه، ویسکوزیته و چگالی سیال پایه افزایش می‌یابد. این امر سبب افزایش اختلاف فشار در دو سر لوله کلکتور می‌گردد. با افزایش ۵٪ غلظت حجمی، اختلاف فشار به اندازه ۵۵ Pa که معادل با ۲.۵٪ است، افزایش می‌یابد. شرط مرزی در خروجی، جریان خروجی در نظر گرفته شده است. به این معنا که گرادیان سرعت و فشار در خروجی صفر است.

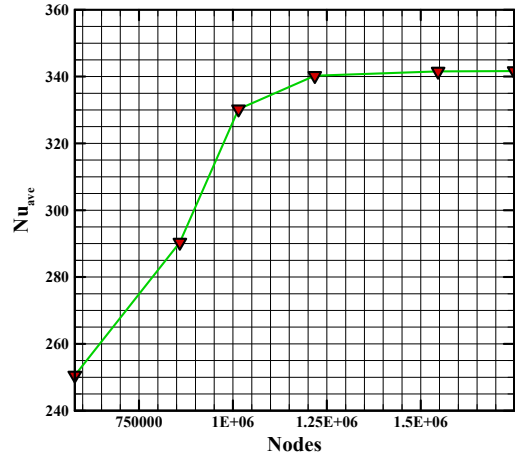
### ۳- تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی کلکتور خورشیدی سهموی خطی مجهز به نوار تابیده پر شده از نانوسیال آب-نانو لوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم ارائه می‌گردد.

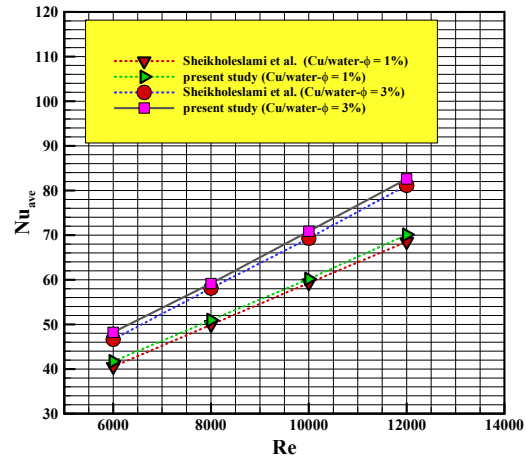
در شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۱ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت متوسط افزایش پیدا می‌کند. همچنین افزودن نوارهای تابیده به کلکتور خورشیدی سهموی خطی و افزودن تعداد آن باعث تأثیر چشم‌گیری در عملکرد حرارتی می‌گردد.



شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۱٪. تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۲٪ در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۲ آزمون استقلال نتایج از شبکه‌بندی برای کلکتور خورشیدی سهموی خطی مجهز به سه نوار تابیده در کسر حجمی ۳ درصد و عدد رینولدز ۱۸۰۰۰

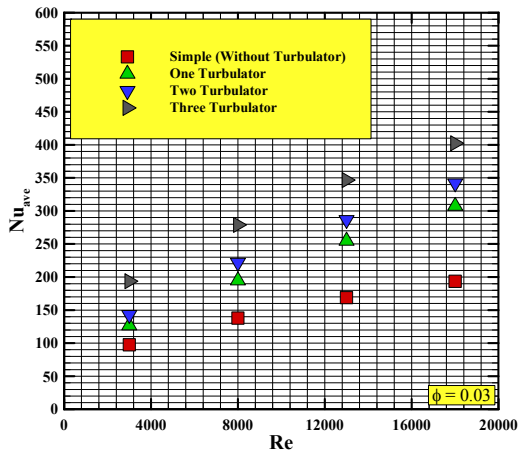


شکل ۳ مقایسه نتایج به دست آمده از عدد ناسلت متوسط با شیخ السلامی و همکاران [۱۸]

جدول ۳ مقایسه نتایج به دست آمده از عدد ناسلت متوسط با شیخ السلامی و همکاران در کسر حجمی ۱ درصد [۱۸]

عدد رینولدز	۶۰۰۰	۸۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۲۰۰۰
عدد ناسلت متوسط کار حاضر	۴۱/۹	۵۱/۳	۶۰/۲	۶۹/۹
عدد ناسلت متوسط [۱۹]	۴۱	۵۰/۲	۵۸/۶	۶۸/۵

شار حرارتی اعمال شده به لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی خطی بر اساس نتایج بدست آمده از کد مونت-کارلو است. سرعت ورودی جریان، معادل با  $0.2169 \text{ m/s}$  است.



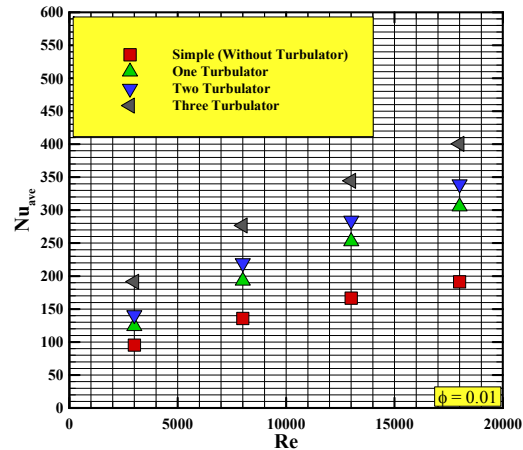
شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۳٪ روند تغییرات عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز و تعداد نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی دقیقاً مشابه دو شکل قبل (شکل ۴ و شکل ۵) می‌باشد. در کسر حجمی ۳٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی ساده (بدون نوار تابیده) می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ عدد ناسلت متوسط ۸۸/۹۷٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۳٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ عدد ناسلت متوسط ۱۴۹/۲۳٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۳٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با دو نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ عدد ناسلت متوسط ۱۴۲/۷۱٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۳٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ عدد ناسلت متوسط ۱۱۰/۹۵٪ افزایش می‌یابد.

در شکل ۷ تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۱ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افت فشار با افزایش تعداد نوار تابیده و عدد رینولدز به دلیل بیشتر شدن سکون جریان نانوسیال هیبریدی هنگام برخورد اولیه با نوار تابیده افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۱٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی ساده (بدون نوار تابیده) می‌باشد، با افزایش عدد

همان‌طور که مشاهده می‌شود با بیشتر شدن عدد رینولدز و تعداد نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی، عدد ناسلت متوسط روندی صعودی پیدا می‌کند. در کسر حجمی ۲٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی ساده (بدون نوار تابیده) می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ عدد ناسلت متوسط ۸۷/۴۴٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۲ درصد و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ عدد ناسلت متوسط ۱۴۸/۳۲٪ افزایش می‌یابد.

در کسر حجمی ۲٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با دو نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ عدد ناسلت متوسط ۱۴۱/۹۴٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۲٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ عدد ناسلت متوسط ۱۱۰/۰۹٪ افزایش می‌یابد.

تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۳٪ در شکل ۶ نشان داده شده است.

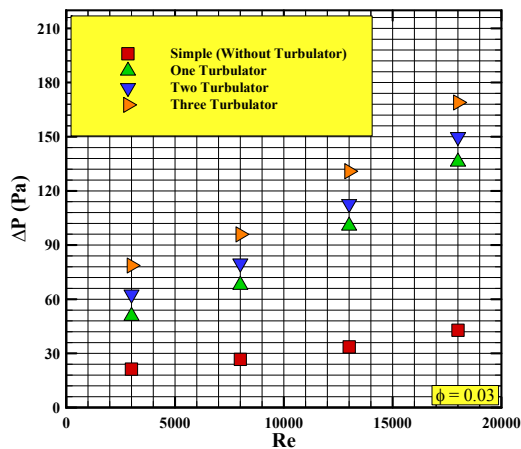


شکل ۵ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۲٪



به ۱۸۰۰۰ افت فشار ۱۸۵/۰۹٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۲٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ افت فشار ۲۱۷/۱۰٪ افزایش می‌یابد.

در شکل ۹ تا ۱۱ تغییرات PEC بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۱، ۲ و ۳ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب عملکرد هیدرولیکی حرارتی درون کلکتور خورشیدی سهموی خطی مجهز به نوار تابیده با تعداد مختلف پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در تمامی حالاتها بیشتر از ۱ می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نوارهای تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی به لحاظ انتقال حرارت و افت فشار مطلوب می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده از PEC نشان می‌دهد استفاده از نوارهای تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی مطلوب است.

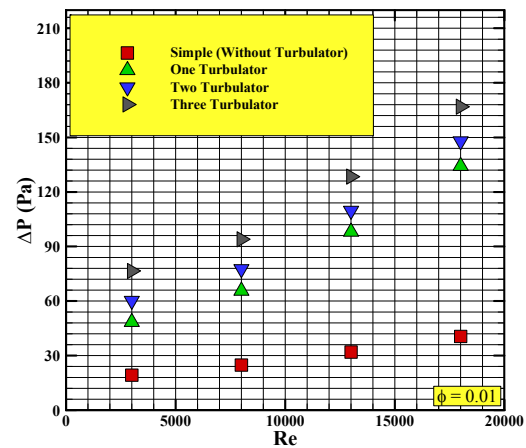


شکل ۸ تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۳٪

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به صورت عددی به بررسی اثر نوار تابیده بر عملکرد هیدرولیکی حرارتی نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم درون کلکتور خورشیدی سهموی خطی پرداخته شده است. مطالعه در رژیم جریان آشفته بوده و به منظور مدل سازی آن از مدل توربولانسی k-ε استفاده شده است. به منظور حل معادلات بقا از روش حجم

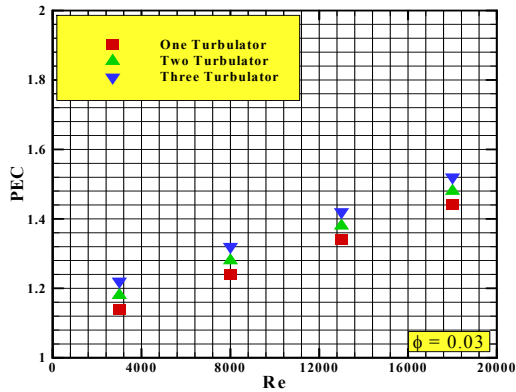
رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ افت فشار ۴۶/۳۱٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۱ درصد و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ افت فشار ۱۷۶/۹۸٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۱٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با دو نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ افت فشار ۱۸۳/۴۵٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۱٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ افت فشار ۲۱۵/۶۳٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۷ تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۱٪

تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۳ درصد در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات افت با افزایش عدد رینولدز و تعداد نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی دقیقاً مشابه دو شکل قبل (شکل ۶ و شکل ۷) می‌باشد. در کسر حجمی ۲٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی ساده (بدون نوار تابیده) می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ افت فشار ۴۷/۰۳٪ افزایش می‌یابد.

در کسر حجمی ۲ درصد و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ افت فشار ۱۷۹/۲۴٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۲ درصد و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با دو نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰



شکل ۱۱ تغییرات PEC بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب- نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۳٪

همچنین نتایج به دست از شبیه‌سازی کلکتور خورشیدی سهموی خطی به همراه نوار تابیده با زمانی که کلکتور خورشیدی ساده (بدون نوار تابیده) است، مقایسه می‌گردد. مطالعه برای اعداد رینولدز ۳۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ و کسر حجمی ۱ تا ۳ درصد از نانوذرات در نانوسیال هیبریدی آب-نانو لوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم صورت می‌گیرد. نتایج به دست آمده به صورت نمودارهای عدد بی بعد ناسلت، افت فشار و ضریب عملکرد هیدرولیکی حرارتی (PEC) ارائه می‌گردد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد:

- استفاده از نانوسیال هیبریدی آب-نانو لوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم باعث عملکرد حرارتی بیشتری می‌شود.
- افزودن نوار تابیده به کلکتور خورشیدی سهموی خطی باعث افزایش عدد ناسلت متوسط و افت فشار می‌شود.

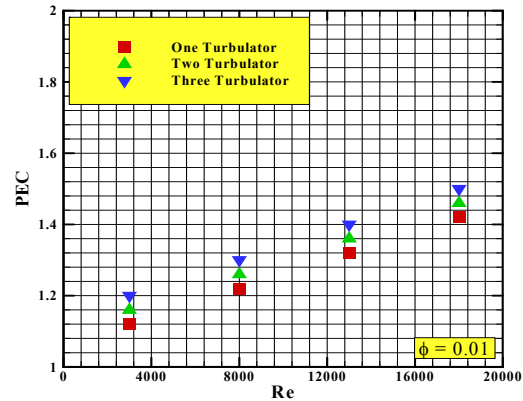
• در کسر حجمی ۳٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ عدد ناسلت متوسط ۱۱۰/۹۵٪ افزایش می‌یابد.

• در کسر حجمی ۲٪ و حالتی که کلکتور خورشیدی سهموی خطی با یک نوار تابیده می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰ افت فشار ۲۱۷/۱۰٪ افزایش می‌یابد.

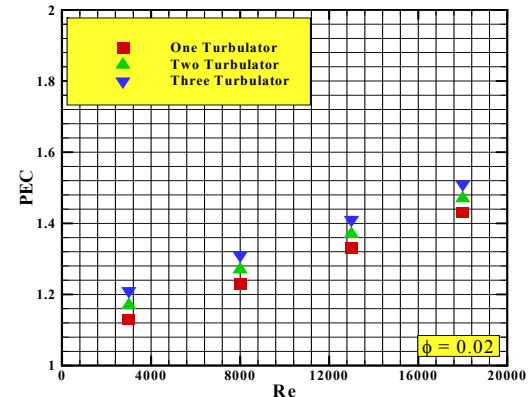
• نتایج بدست آمده از PEC نشان می‌دهد استفاده از نوارهای تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی مطلوب است.

#### فهرست علائم

محدود و الگوریتم SIMPLE C استفاده شده است. مطالعه برای بررسی عملکرد هیدرولیکی حرارتی کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به ۱، ۲ و ۳ نوار تابیده انجام شده است.



شکل ۹ تغییرات PEC بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب- نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۱٪



شکل ۱۰ تغییرات PEC بر حسب عدد رینولدز برای تعداد مختلف نوار تابیده در کلکتور خورشیدی سهموی خطی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۲٪

Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Using Graphene Nanoplatelet Based Nanofluids under Turbulent Flow Conditions, *Ind. Eng. Chem. Res.* 53 (2014) 12455–12465.

[7] E. Sadeghinezhad, H. togun, M. Mehrali, P.S Nejad, S.T Latibari, et al., An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81 (2015) 41-51.

[8] M. Parsaiemehr, F. Pourfattah, O. A. Akbari, D. Toghraie, and G. Sheikhzadeh, Turbulent flow and heat transfer of Water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid inside a rectangular ribbed channel, *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, 96 (2018) 73–84.

[9] A. Khanjian, C. Habchi, S. Russeil, and D. Bougeard, International Journal of Thermal Sciences Effect of rectangular winglet pair roll angle on the heat transfer enhancement in laminar channel flow, *Int. J. Therm. Sci.*, 114 (2017) 1–14.

[10] A. Karimipour, H. Alipour, O. A. Akbari, and D. T. Semiromi, Studying the Effect of Indentation on Flow Parameters and Slow Heat Transfer of Water-Silver Nanofluid with Varying Volume Fraction in a Rectangular Two-Dimensional Micro Channel, *Indian journal of science and technology*, 8 (2015) 1–13.

[11] A. Pal Singh Bhinder, S. Sarkar, and A. Dalal, Flow over and forced convection heat transfer around a semi-circular cylinder at incidence, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 55(19–20) (2012) 5171–5184.

[12] M. Zarringhalam, A. Karimipour, and D. Toghraie, Experimental study of the effect of solid volume fraction and Reynolds number on heat transfer coefficient and pressure drop of CuO-Water nanofluid, *Exp. Therm. FLUID Sci.*, 76 (2016) 342-351.

[13] M. Samadifar, D. Toghraie, Numerical simulation of heat transfer enhancement in a plate-fin heat exchanger using a new type of vortex generators, *Appl. Therm. Eng.* 133 (2018) 671-681.

$\rho$  چگالی سیال،  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$u_i$  سرعت محوری،  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$\mu$  لزجت،  $\left(\frac{NS}{m^2}\right)$

$u'$  سرعت نوسانی،  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$u_j$  سرعت محوری،  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$\Gamma$  نفوذ حرارت مولکولی

$\Gamma_t$  نفوذ حرارت آشفتگی

$Nu$  عدد ناسلت متوسط در داخل کانال کنگره‌دار

$Nu_s$  عدد ناسلت متوسط در داخل کانال صاف

## ۵- مراجع

[1] S.M. Aminossadati, B. Ghasemi, Natural convection of water–CuO nanofluid in a cavity with two pairs of heat source–sink, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(5) (2011) 672-678.

[2] M. Mahmoodi, S. M. Hashemi, Numerical study of natural convection of a nanofluid in C-shaped enclosures, *International Journal of Thermal Sciences*, 55 (2012) 76-89.

[3] B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, Brownian motion of nanoparticles in a triangular enclosure with natural convection, *International Journal of Thermal Sciences*, 49(6) (2010) 931-940.

[4] M. Siavashi, M. Jamali, Heat transfer and entropy generation analysis of turbulent flow of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid inside annuli with different radius ratios using two-phase mixture model, *Applied Thermal Engineering*, 100 (2016) 1149-1160.

[5] R. Choudhary, S. Subudhi, Aspect ratio dependence of turbulent natural convection in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, 108 (2016) 1095-1104..

[6] E. Sadeghinezhad, M. Mehrali, S. T. Latibari, M. Mehrali, S. N. Kazi, C. S. Oon, H. S. C. Metselaar.

- [14] Y. Xu, M. D. Islam, N. Kharoua., International Journal of Thermal Sciences Numerical study of winglets vortex generator effects on thermal performance in a circular pipe, 112 (2017) 304–317.
- [15] S. Rostami, M. Sepehrirad, A. Dezfulizadeh, A. Kadhim Hussein, A. Shahsavar Goldanlou, M. Safdari Shadloo, Exergy Optimization of a Solar Collector in Flat Plate Shape Equipped with Elliptical Pipes Filled with Turbulent Nanofluid Flow: A Study for Thermal Management, Water, 12(8) (2020) 2294.
- [16] A. Shahsavar Goldanlou, M. Sepehrirad, A. Dezfulizadeh, A., Golzar, M. Badri, S. Rostami, Effects of using ferromagnetic hybrid nanofluid in an evacuated sweep-shape solar receiver, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 143 (2021) 1623–1636.
- [17] M. Parsaiemehr, F. Pourfattah, O. A. Akbari, D. Toghraie, G. Sheikhzadeh, Turbulent flow and heat transfer of Water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid inside a rectangular ribbed channel, Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures, 96 (2018) 73–84.
- [18] M. Sheikholeslami, M. Gorji-Bandpy, D. D. Ganji, Effect of discontinuous helical turbulators on heat transfer characteristics of double pipe water to air heat exchanger, Energy Conversion and Management, 118 (2016) 75-87.