



## بهبود عملکرد مبدل حرارتی پیچشی کنگره‌دار دوسیاله حاوی نانوسیالات هیبریدی

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

در این پژوهش به صورت عددی و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی اثر کنگره درون مبدل حرارتی پیچشی دوسیاله حاوی نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی پرداخته می‌شود. هندسه مبدل حرارتی پیچشی با استفاده از نرم افزار دیزاین مدلر آماده می‌گردد. همچنین به منظور تحلیل سیالاتی از روش حجم محدود و نرم افزار انسیس فلونت استفاده می‌شود. جریان نانوسیال هیبریدی در توربولنت بوده و به منظور مدل سازی آن از مدل توربولانسی کا امگا استفاده می‌شود. هندسه مبدل حرارتی پیچشی ساده با مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج خروجی به صورت نمودارهای عدد ناسلت متوسط، افت فشار و شاخص PEC ارائه می‌گردد. مطالعه برای اعداد رینولدز ۶۰۰۰ تا ۲۴۰۰۰، کسر حجمی ۱ تا ۵ درصد و سه ارتفاع مختلف ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر از کنگره انجام می‌شود. نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانو لوله کربنی نسبت به سیال پایه آب باعث عملکرد حرارتی بیشتری می‌شود. همچنین افزودن کنگره به مبدل حرارتی پیچشی باعث افزایش عدد ناسلت متوسط و افت فشار می‌شود. در حالت ۴ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ mm می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵٪، عدد ناسلت متوسط ۱۵۳/۲۹٪ افزایش می‌یابد. بعلاوه در حالت ۴ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ mm می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵ درصد، افت فشار ۱۹۴،۲۱ درصد افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج به دست آمده از معیار ارزیابی هیدرولیکی حرارتی در کسر حجمی ۵٪ و عدد رینولدز ۲۴۰۰۰ با افزایش ارتفاع کنگره از ۱ به ۳ میلی متر میزان PEC، ۲۸/۳۵٪ افزایش می‌یابد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۱ مهر ۱۳۹۹

پذیرش: ۲۵ بهمن ۱۳۹۹

ارائه در سایت: ۲۵ بهمن ۱۳۹۹

### کلیدواژگان

نانوسیال هیبریدی

مبدل حرارتی پیچشی

کنگره‌های کروی

معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی

حرارتی (PEC)

نرم افزار فلونت

## performance enhancement of a two-fluid corrugated torsional heat exchanger containing hybrid nanofluids

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

### ABSTRACT

In this research, the effect of the corrugate inside a two-fluid torsional heat

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mojtaba Jamiati, Hossein Pourmohamadian, performance enhancement of a two-fluid corrugated torsional heat exchanger containing hybrid nanofluids, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 11, No. 4, pp. 37-48, 2020-2021 (In Persian)

Received 2 October 2020  
Accepted 13 February 2021  
Available Online 13 February 2021

### Keywords

Hybrid Nanofluid  
Torsional Heat Exchanger  
Spherical corrugate  
Thermal Hydraulic  
Performance Evaluation  
Criteria (PEC)  
Fluent Software

exchanger containing a hybrid water-copper-carbon nanotube nanofluid is investigated numerically using computational fluid dynamics. The geometry of the torsion heat exchanger is prepared using Design Modler software. Also, in order to analyze the fluids, the finite volume method and Ensys Fluent software are used. The hybrid nanofluid stream is in the turbulent and the K Omega turbulence model is used to model it. The geometry of the simple torsional heat exchanger is compared with the torsional heat exchanger with the corrugate and the output results are presented in the form of graphs of mean Nusselt number, pressure drop and PEC index. The study is performed for Reynolds numbers 6000 to 24000, volume fraction of 1 to 5% and three different heights of 1, 2 and 3 mm from the congress. The results obtained from numerical simulation show that the use of water-copper-carbon nanotube hybrid nanofluid causes higher thermal performance than water-based fluid. Adding congress to the torsional heat exchanger also increases the average Nusselt number and decreases the pressure. In case 4, which is a torsional heat exchanger with a congress with a height of 1 mm, by increasing the Reynolds number from 6000 to 24000 in a volume fraction of 5%, the average Nusselt number increases by 153.29%. In addition, in case 4, where the torsional heat exchanger with the corrugate is 1 mm high, by increasing the Reynolds number from 6000 to 24000 in a volume fraction of 5%, the pressure drop increases by 194.21%. According to the results obtained from the thermal hydraulic evaluation criterion in volume fraction 5 and Reynolds number 24000 with increasing the height of the corrugate from 1 to 3 mm, the amount of PEC increases by 28.35%.

### ۱- مقدمه

بی‌شک مبدل‌های حرارتی اجزای جدایی ناپذیر و یکی از پرکاربردترین تجهیزات در صنایع مختلف به شمار می‌آیند. این تجهیزات در صنایع تهویه مطبوع، صنایع غذایی، الکترونیک، خودرو، نفت و گاز، فرایندهای شیمیایی و بسیاری از صنایع دیگر استفاده می‌شوند. بنابراین می‌توان مبدل‌ها را از اصلی‌ترین ارکان صنعت دانست. در مبدل‌های حرارتی هر چه انتقال حرارت بهتر صورت پذیرد مبدل بازده بالاتری خواهد داشت و در نتیجه باعث کاهش مصرف انرژی و از طرفی کاهش هزینه‌های اقتصادی می‌گردد. تاکنون تحقیقات وسیعی در زمینه راههای افزایش بازدهی این تجهیزات انجام شده است. نسل جدیدی از این مبدل‌ها به بازار صنعتی وارد شده‌اند که متأسفانه بخش کارایی آن‌چندان برای مهندسان روشن نیست. کاربرد لوله‌های پیچشی در ساخت مبدل‌های حرارتی از جدیدترین روشهای بکار گرفته شده برای افزایش عملکرد حرارتی مبدل، کاهش رسوب‌گذاری و نیز بهبود صرفه اقتصادی و بالا بردن طول عمر آن است [۱-۲].

نانوسیالات توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیال معمولی حاصل می‌شود که نسل جدیدی از سیال با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی می‌باشند. نانوذرات از جنس ذرات فلزی نظیر ذرات اکسید مس (CuO)، ذرات اکسید آلومینیم ( $Al_2O_3$ )، ذرات

اکسید فلزاتی مانند نقره و غیره هستند. نانوذرات به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا با توزیع در سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر سیال می‌گردد، که یکی از پارامترهای اساسی در انتقال حرارت محسوب می‌شود. انتقال حرارت در نانوسیالات 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 جابجایی نانوسیالات افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت جابجایی مشاهده شده است. برخی محققین تأثیر مکانیزمای انتقال حرارت در اثر انتقال جرم را در نانوسیالات مهم می‌دانند. در این راستا، نلد و کوزستو انتقال حرارت نانوسیالات را در لایه مرزی بررسی نمودند. آنها گزارش نمودند که نانوذرات در اثر مهاجرت خود انرژی را در سیال منتقل می‌نمایند و اثر این نوع انتقال انرژی را در لایه مرزی بسیار تأثیر گذار دانستند. در پژوهش جدیدی که اخیراً

احمد و همکاران [5] به صورت عددی به بررسی اثر لایه مرزی حرارتی بر روی تولید آنتروپی و انتقال گرما در جابه‌جایی ترکیبی بر روی یک سیلندر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که حداقل مقادیر مربوط به تولید آنتروپی در حالت تزریق اتفاق می‌افتد.

شکلا و همکاران [6] به صورت تحلیلی به مطالعه تولید آنتروپی در جابه‌جایی ترکیبی تحت اثر هیدرودینامیک مغناطیسی در جریان نانوسیال بر روی یک استوانه عمودی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سرعت نانوسیال با پارامتر مغناطیسی کاهش، و با پارامتر انحنای افزایش می‌یابد. افزایش دو پارامتر مغناطیسی و لغزش سرعت مرتبه دوم، ضریب اصطکاک پوستی را کاهش می‌دهد.

شیخ‌السلامی [7] به صورت عددی به مطالعه اثر حرکت نانوسیال  $Al_2O_3$ -آب از طریق میدان مغناطیسی رسانای نفوذپذیر پر شده از مواد متخلخل پرداخت. نتایج نامبرده نشان می‌دهد که اثرات جابه‌جایی با افزایش نیروی مغناطیسی کاهش می‌یابد. همچنین گرادیان دما می‌تواند باعث کاهش تابش شود. خانافر و همکاران [8] به صورت عددی به بررسی اثر نانوسیال بر انتقال حرارت درون مبدل حرارتی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه برای محاسبه خواص نانوسیال از مدل‌های مختلفی استفاده کردند. بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعه آن با افزایش کسر حجمی نانوذرات در هر عدد گراشوفی انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

بهره مند و همکاران [9] جریان متلاطم نانوسیال در مبدل حرارتی مارپیچ را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آزمایشات تجربی برای اندازه‌گیری مقادیر افت فشار و متوسط ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی انجام شده است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل تک فاز همگن و رویکرد دوفازی اولر-لاگرانژ صورت گرفته است. در مقایسه با داده‌های تجربی، نتایج شبیه‌سازی مدل دوفازی از دقت بالاتری نسبت به مدل تک فاز برخوردار است.

کومار و همکاران [10] به صورت عددی به بررسی اثر نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بر میدان جریان و انتقال حرارت در جریان آشفته درون لوله‌های مارپیچ پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده، استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه آب، باعث عملکرد حرارتی بهتری می‌گردد.

پناهی و زمانیان [11] به صورت تجربی به بررسی اثر توربولاتور مارپیچ بر میدان جریان و انتقال حرارت در مبدل

توسط بهسرشت، نقره‌آبادی و قلم باز انجام شد، اثر مهاجرت نانوذرات که توسط نلد و کوزنستو و دیگر محققین پیشین مطرح شده بود مورد بحث قرار گرفت و نشان داده شد که در مطالعه‌های پیشین محدوده اعداد بی بعد به درستی انتخاب نشده است. با در نظر گرفتن محدوده صحیح اعداد بی بعد، انتقال حرارت در اثر مهاجرت نانوذرات ناچیز است. نقره‌آبادی، قلمباز و قنبرزاده در پژوهشی دیگر نشان دادند که اگرچه انتقال حرارت منتقل شده در اثر مهاجرت نانوذرات ناچیز است، ولی لغزش نانوذرات در سیال پایه باعث ایجاد ناهمگونی در نانوسیال می‌گردد. ناهمگونی ایجاد شده باعث تغییر موضعی خواص نانوسیال شده و از این طریق انتقال حرارت جابه‌جایی در نانوسیالات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بحث در این زمینه ادامه دارد [3].

## ۲- بیان مساله

هدف اصلی کار حاضر، بررسی عددی و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی اثر کنگره درون مبدل حرارتی پیچشی دوسبانه حاوی نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی پرداخته می‌شود. هندسه مبدل حرارتی پیچشی با استفاده از نرم افزار دیزاین مدلر آماده می‌گردد. همچنین به منظور تحلیل سیالاتی از روش حجم محدود و نرم افزار انسیس فلونت استفاده می‌شود. جریان نانوسیال هیبریدی در توربولنت بوده و به منظور مدل سازی آن از مدل توربولانسی کا امگا استفاده می‌شود. هندسه مبدل حرارتی پیچشی ساده با مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج خروجی به صورت نمودارهای عدد ناسلت متوسط، افت فشار و شاخص PEC ارائه می‌گردد. مطالعه برای اعداد رینولدز ۶۰۰ تا ۲۴۰۰، کسر حجمی ۱ تا ۵ درصد و سه ارتفاع مختلف ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر از کنگره انجام می‌شود.

## ۳- پیشینه تحقیق

ایجاز خان و همکاران [4] به صورت تئوری به بررسی اثر دیسک دوار نفوذپذیر بر تولید آنتروپی در جریان هیدرومغناطیس لزج پرداختند. آن‌ها در این مطالعه پدیده لغزش نسبی را مورد بررسی قرار داده و فرمولاسیون مبتنی بر انتقال مختلط و تابش را به صورت غیر خطی در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تأثیر تابش گرمایی و پارامترهای دمای نسبی بر تولید آنتروپی مشابه است و حضور میدان مغناطیسی باعث افزایش تولید آنتروپی می‌شود.

تولید آنتروپی می‌شود. همچنین با افزایش عدد هارتمن، آنتروپی تولیدی افزایش می‌یابد.

#### ۴- روش اجرای تحقیق

شماتیک هندسه مبدل حرارتی پیچشی ساده و مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره، در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود طول ناحیه تست ۲۰۰ میلی‌متر که همراه با ارتفاع کنگره‌های ۱، ۲، و ۳ میلی‌متر شبیه‌سازی شده است. نانوسیال هیبریدی گرم با دمای  $65^{\circ}\text{C}$  و نانوسیال هیبریدی سرد با دمای  $25^{\circ}\text{C}$  وارد مبدل حرارتی پیچشی می‌شوند. قطر لوله داخلی در مبدل حرارتی پیچشی ۳۶ mm و قطر لوله خارجی به ترتیب ۶۶ و ۷۰ میلی‌متر می‌باشد.

معادله پیوستگی حاکم بر میدان جریان و انتقال حرارت را می‌توان در سیستم تانسوری دکارتی بصورت زیر نوشت [۱۶]:

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

در معادله فوق  $\rho$  چگالی سیال و  $u_i$  سرعت محوری است. معادله مومنتوم نیز بصورت زیر نوشته می‌شود:

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

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:

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

برای مدل سازی آشفتگی لازم است که تنش‌های رینولدز  $(\rho \overline{u_i u_j}')$  در معادله (۲) مدل سازی شوند. به منظور مدل سازی آشفتگی از مدل k-ε استاندارد استفاده شده است. لزجت آشفتگی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

معادله بقای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آن از روابط زیر محاسبه می‌شود:

حرارتی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد هنگام استفاده از توربولاتور هلیکال میزان انتقال حرارت نسبت به زمانی که مبدل حرارتی ساده است به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

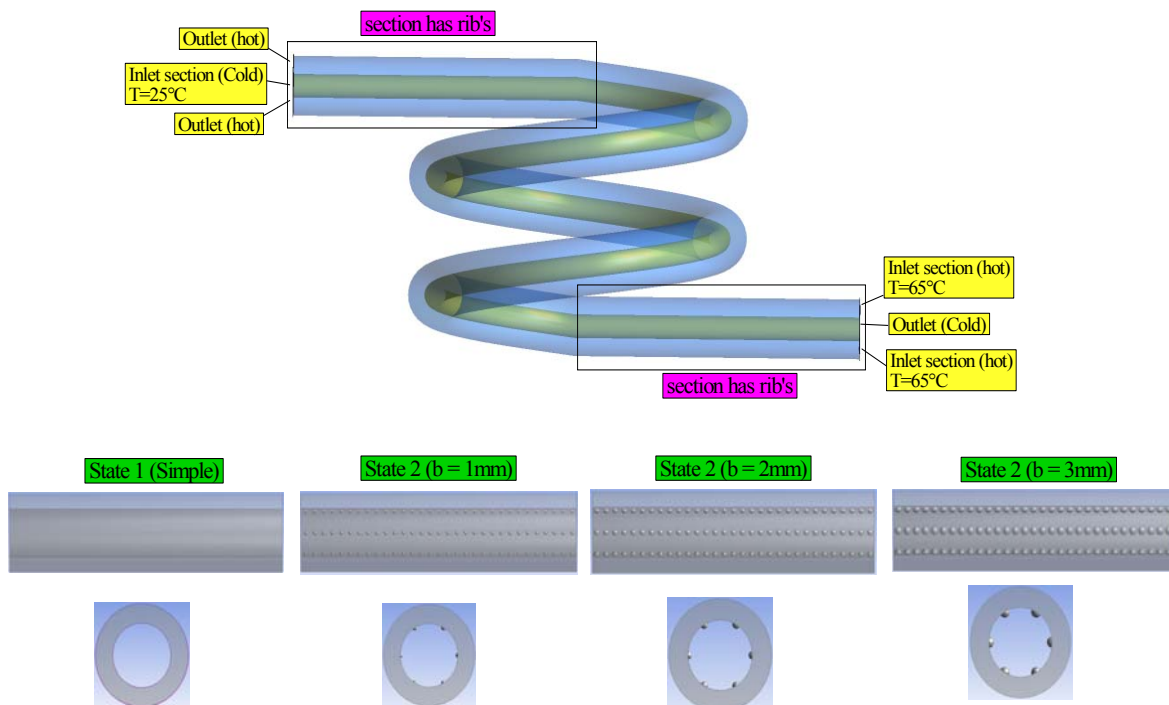
سایه [۱۲] به صورت تجربی به مطالعه جریان آرام در یک کانال دایره‌ای با خوردگی محوری و مجهز به نوارهای مارپیچ مرکزی پرداختند. بر اساس نتایج تجربی به دست آمده از این مطالعه، استفاده از نوار مارپیچ تاثیر چشم‌گیری در میزان افزایش انتقال حرارت نسبت به زمانی که کانال ساده می‌باشد دارد.

خدابنده و همکاران [۱۳] به صورت عددی به بررسی اثر نانوسیال آب-نقره بر میدان جریان و انتقال حرارت در مبدل حرارتی مارپیچ به صورت دوفازی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدز و تعداد چرخش در مبدل حرارتی مارپیچ، ضریب انتقال حرارت کلی و افت فشار به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند.

وی هی و همکاران [۱۴] به صورت عددی به بررسی اثر توبولاتور بر میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید مس درون کانال به صورت تک فاز و دوفاز پرداختند. نتایج نشان می‌دهند هنگام استفاده از یک توبولاتور مارپیچ، حداکثر ضریب عملکرد هیدرولیکی حرارتی در عدد رینولدز ۳۶۰۰ و کسر حجمی ۴ درصد می‌باشد که مقدار آن ۱۸/۲ درصد نسبت به سیال پایه افزایش پیدا کرده است. همچنین هنگام استفاده از دو توبولاتور مارپیچ، حداکثر ضریب عملکرد حرارتی در همان رینولدز و کسر حجمی به مقدار ۲/۰۴ درصد نسبت به پایه افزایش پیدا کرده است.

بارنون و همکاران [۱۵] به صورت عددی به بررسی اثر میدان مغناطیسی بر تولید آنتروپی نانوسیال‌های آب-اکسید آلومینیوم  $Al_2O_3$ ، آب-اکسید سیلیسیم  $SiO_2$ ، آب-اکسید تیتانیوم  $TiO_2$  و آب-اکسید روی  $ZnO$  در یک مبدل حرارتی به صورت تک فاز و دوفاز پرداختند. هدف اصلی آن‌ها بررسی اثر میدان مغناطیسی و نانوسیالات مختلف بر تولید آنتروپی و بررسی تاثیر قطر نانوذرات اکسید آلومینیوم، بر تولید آنتروپی می‌باشد. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که عدد ناسلت متوسط برای تمامی حالات در مدل دوفازی نسبت به مدل تک فاز دو برابر می‌گردد. همچنین حداکثر افت فشار برای مدل‌های تک فاز و دو فاز در بیشترین کسر حجمی و عدد هارتمن اتفاق می‌افتد. نتایج ایشان نشان می‌دهد که افزایش قطر نانوذرات، باعث افزایش دمای دیواره و

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [\rho \epsilon u_i] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k + C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7) \quad \frac{\partial}{\partial x_i} [\rho k u_i] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (6)$$



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

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات مس و نانولوله کربنی چند جداره در دمای  $T = 300 K$  [۱۷-۱۹].

	$\rho \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$	$c_p \left( \frac{J}{Kg.K} \right)$	$k \left( \frac{W}{m.K} \right)$	$\mu \left( \frac{Ns}{m^2} \right)$
Water	۹۹۸/۲	۴۱۸۲	۰/۶	۰/۰۰۱۰۰۳
Cu	۸۹۵۴	۳۸۵	401	-
MWCNT	۲۱۰۰	۵۱۹	۳۰۰۰	

در این رابطه  $G_k$  نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی و  $\rho \epsilon$  نرخ اتلاف آن می‌باشد. از رابطه زیر به دست می‌آید:

مقادیر مرزی برای مقادیر آشفتگی در نزدیکی دیواره با استفاده از روش افزایشی دیواره<sup>۱</sup> مشخص شده‌اند. ضرایب  $C_\mu = 0/09$ ،  $C_{2\epsilon} = 1/92$ ،  $C_{1\epsilon} = 1/44$  و  $\sigma_k = 1/0$ ،  $\sigma_\epsilon = 1/3$

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

به عنوان ثابت‌های تجربی در معادلات انتقال آشفتگی انتخاب شده‌اند [۱۶]. عدد ناسلت، عدد رینولدز، ضریب اصطکاک و شاخص معیار عملکرد پارامترهای بدون بعدی هستند که به ترتیب این چنین محاسبه می‌شوند [۱۱]:

$$Nu_{av} = \frac{h \cdot H}{k} \quad (9)$$

در معادله فوق  $k$  و  $h$  به ترتیب ضریب انتقال حرارت هدایتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی هستند. عدد رینولدز چنین تعریف می‌گردد:

<sup>1</sup> Enhanced wall treatment

گره‌های مختلف برای مبدل حرارتی پیچشی کنگره‌دار در نظر گرفته شده است. با مقایسه هشت حالت فوق، شبکه‌بندی با تعداد گره ۲۰۳۲۰۴۴ به عنوان 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.

اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری بر اساس هندسه و شرایط شیخ‌السلامی و همکاران [۱۹] انجام شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. آن‌ها به صورت عددی عملکرد انتقال حرارت و جابجایی اجباری جریان نانوسیال را در داخل یک مبدل حرارتی با مورد بررسی قرار دارند. با مقایسه نتایج منبع [۱۹] 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 منبع [۱۹]، ۳/۹۱٪ 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، مومنتوم و انرژی، نرم افزار تجاری فلوئنت 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 مومنتوم و انرژی با استفاده از روش تفاضل مرکزی مرتبه اول که یک راه حل پایدار است منفصل می‌شوند.

همچنین برای انفعال ترم جابجایی روش تفاضل پسر و مرتبه اول انتخاب شده است. مدل عددی در دامنه حل فیزیکی توسعه می‌یابد و پارامترهای بی‌بعد از توزیع سرعت و دمای محاسبه شده، محاسبه می‌شوند. میدان جریان با استفاده از روش نیمه‌ضمنی و معادلات وابسته به فشار توسط الگوریتم سیمپل<sup>۳</sup> حل می‌شود [14]. این اساساً یک روش حدس و تصحیح برای حل میدان فشار است. به طور کلی در این الگوریتم به منظور مشخص کردن مؤلفه‌های سرعت، انفعال معادلات مومنتوم برای دامنه ورودی تحت توزیع فشار انجام می‌گیرد. فشار با استفاده از

$$Re = \frac{V \cdot H}{\nu} \quad (10)$$

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:

$$PEC = \left( \frac{Nu_{av}}{Nu_{av,s}} \right) \cdot \left( \frac{f}{f_s} \right)^{-1/3} \quad (11)$$

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.

خواص ترموفیزیکی آب و دی‌اکسید سیلیسیوم در جدول (۱) نشان داده شده است.

روشی که نرم‌افزار فلوئنت برای حل معادلات بقا در نظر گرفته است، روش حجم محدود می‌باشد. در این روش میدان محاسباتی به تعدادی حجم کنترل که هر کدام یک گره را احاطه می‌نمایند تقسیم می‌شود. ابعاد حجم‌های کنترل می‌تواند متفاوت باشد که این روش تأکیدی بر یکسان بودن آن‌ها ندارد. قدم کلیدی در روش حجم کنترل انتگرال‌گیری از معادلات دیفرانسیل بر روی هر یک از حجم‌های کنترل است.

بدیهی است که برای شبیه‌سازی یک جریان به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی ابتدا باید دامنه محاسباتی تولید گردد. از آنجا که نرم‌افزار فلوئنت<sup>۱</sup> تنها یک نرم‌افزار محاسباتی می‌باشد، لازم است از نرم‌افزارهای پشتیبانی کننده آن استفاده کرد. نرم‌افزار گمبیت<sup>۲</sup> بهترین انتخاب برای ساختن فایل‌های ورودی فلوئنت می‌باشد. هندسه و شبکه را می‌توان توسط نرم‌افزار پیش‌پردازنده گمبیت تولید کرد. نرم‌افزار گمبیت قادر به تولید انواع شبکه‌بندی (مش‌های چهار ضلعی، مثلثی، مش‌های حجمی چهار وجهی و شش وجهی) بوده و در آن می‌توان شرایط مرزی را نیز مشخص نمود.

آزمون استقلال نتایج از شبکه‌بندی برای مبدل حرارتی پیچشی کنگره دار دو سیال حاوی نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چندجداره در کسر حجمی ۳ درصد و عدد رینولدز ۲۴۰۰۰ برای تجزیه و تحلیل اثرات ابعاد شبکه‌بندی بر نتایج انجام گرفته است. مطابق شکل ۲ حالت شبکه‌بندی دارای تعداد

<sup>1</sup> fluent

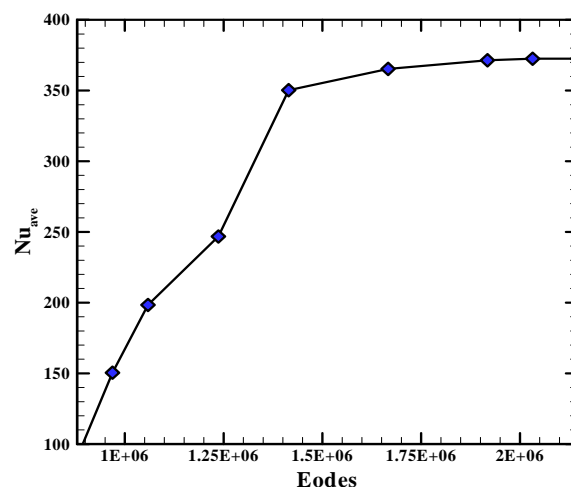
<sup>2</sup> Gambit

<sup>3</sup> SIMPLE algorithm

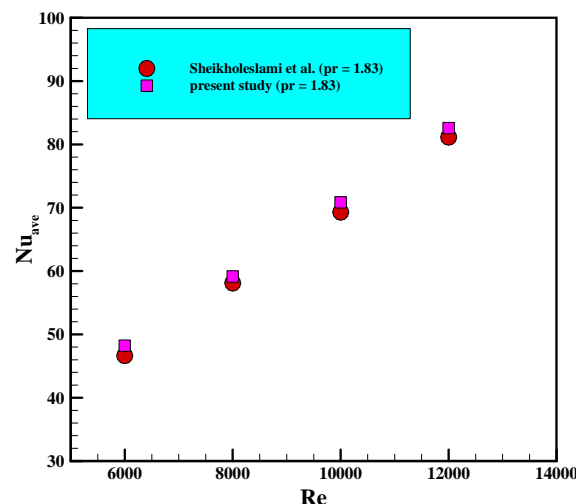
عدد ناسلت متوسط افزایش پیدا می‌کند. همچنین افزودن کنگره‌ها به لوله داخلی مبدل حرارتی پیچشی و افزایش ارتفاع آن‌ها، باعث تاثیر چشم‌گیری در عملکرد حرارتی مبدل حرارتی پیچشی می‌گردد. در واقع افزودن کنگره‌های باعث اختلاط و آشفتگی بیشتر شده و همچنین افزایش ارتفاع آن‌ها باعث می‌شود جریان نانوسیالات بین کنگره‌های شروع به چرخش کند. به وجود آمده گردابه‌های و چرخش آن‌ها یکی از عوامل مهم در افزایش انتقال حرارت می‌باشد. با افزایش ارتفاع کنگره‌های خطوط جریان بیشتری بین آن‌ها شروع به چرخش می‌کند. لذا این عامل باعث می‌شود که با افزایش ارتفاع کنگره‌ها، انتقال حرارت نیز افزایش بیابد. در حالت ۱ که مبدل حرارتی پیچشی ساده می‌باشد (بدون کنگره) با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۱٪، عدد ناسلت متوسط  $80/63$ ٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۲ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۱٪، عدد ناسلت متوسط  $146/23$ ٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۳ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۱٪، عدد ناسلت متوسط  $148/75$ ٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۴ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۱٪، عدد ناسلت متوسط  $149/62$ ٪ افزایش می‌یابد.

تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیالات هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۳٪، در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با بیشتر شدن عدد رینولدز و ارتفاع کنگره در مبدل حرارتی پیچشی، عدد ناسلت متوسط روندی صعودی پیدا می‌کند. در حالت ۱ که مبدل حرارتی پیچشی ساده می‌باشد (بدون کنگره) با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۳٪، عدد ناسلت متوسط  $81/23$ ٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۲ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۳٪، عدد ناسلت متوسط  $147/11$ ٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۳ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۳٪، عدد ناسلت متوسط  $150/81$ ٪ افزایش می‌یابد.

معادله پیوستگی محاسبه می‌شود. اگرچه معادله پیوستگی هیچ فشاری را شامل نمی‌شود، اما می‌تواند به سادگی به یک معادله تصحیح فشار تبدیل شود [15]. به منظور همگرایی تمام متغیرها مقدار خطای  $10^{-5}$  در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲ آزمون استقلال نتایج از شبکه‌بندی برای دو استوانه هم مرکز پر شده از نانوسیالات دوفازی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره



شکل ۳ مقایسه نتایج به دست آمده از عدد ناسلت متوسط با مطالعه دیگران [۱۹]

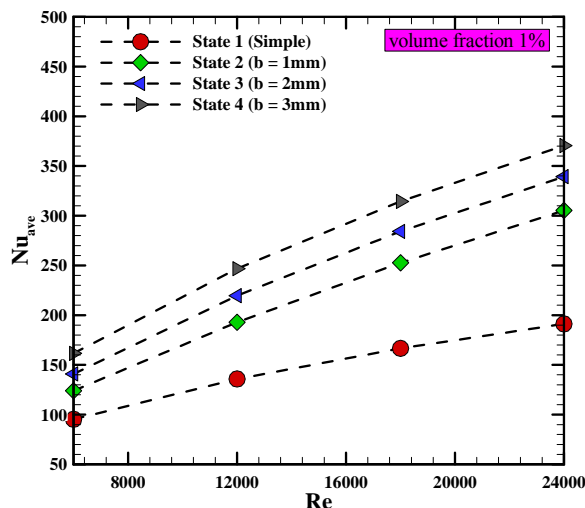
## ۵- تجزیه و تحلیل نتایج

در شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیالات هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۱ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز،

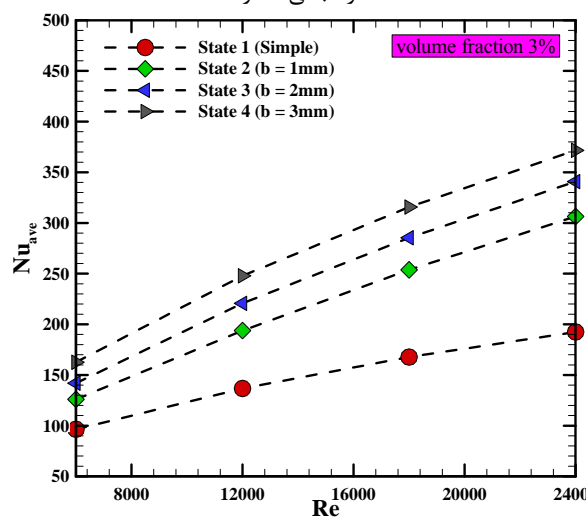
کنگره در مبدل حرارتی پیچشی دقیقاً مشابه دو شکل قبل (شکل ۴ و ۵) می‌باشد. در حالت ۱ که مبدل حرارتی پیچشی ساده می‌باشد (بدون کنگره) با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵٪، عدد ناسلت متوسط ۸۰/۰۳٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۲ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵٪، عدد ناسلت متوسط ۱۴۹/۷۱٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۳ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵٪، عدد ناسلت متوسط ۱۵۲/۳۱٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۴ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵٪، عدد ناسلت متوسط ۱۵۳/۲۹٪ افزایش می‌یابد.

در شکل ۷ تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانو سیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۱٪ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افت فشار با افزایش ارتفاع کنگره و عدد رینولدز به دلیل بیشتر شدن سکون جریان نانو سیال هیبریدی هنگام برخورد اولیه با کنگره‌ها افزایش می‌یابد. در حالت ۱ که مبدل حرارتی پیچشی ساده می‌باشد (بدون کنگره) با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۱٪، افت فشار ۱۱۰/۶۹٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۲ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۱٪، افت فشار ۱۷۶/۹۸٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۳ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۱٪، افت فشار ۱۸۵/۷۵٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۴ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۱٪، افت فشار ۱۹۱/۱۰٪ افزایش می‌یابد.

در حالت ۴ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۳٪، عدد ناسلت متوسط ۱۵۱/۰۱٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانو سیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۱ درصد

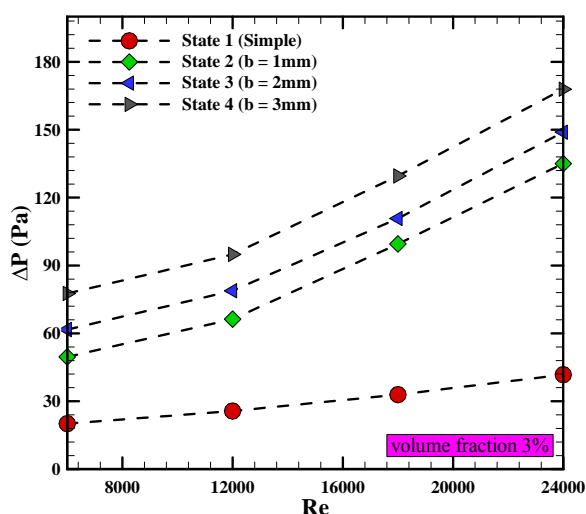


شکل ۵ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانو سیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۳ درصد

تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانو سیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۵٪ در شکل ۶ نشان داده شده است. روند تغییرات عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز و ارتفاع

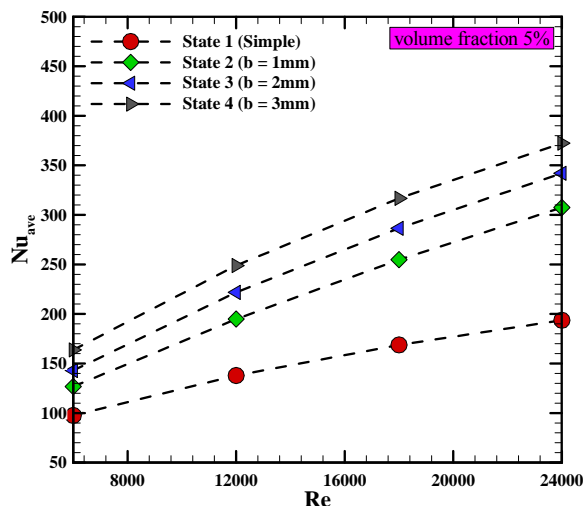


۱۱۱/۷۲٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۲ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۳٪، افت فشار ۱۷۸/۹۸٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۳ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۳٪، افت فشار ۱۸۶/۲۵٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۴ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۳٪، افت فشار ۱۹۱/۷۹٪ افزایش می‌یابد.

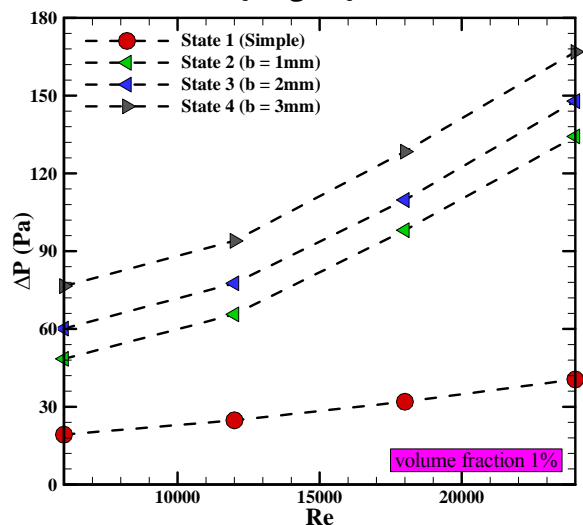


شکل ۸ تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۳ درصد

تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۵ درصد در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات افت با افزایش عدد رینولدز و ارتفاع کنگره در مبدل حرارتی پیچشی دقیقاً مشابه دو شکل قبل (شکل ۷ و ۸) می‌باشد. در حالت ۱ که مبدل حرارتی پیچشی ساده می‌باشد (بدون کنگره) با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵٪، افت فشار ۱۱۴/۴۳٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۲ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵٪، افت فشار ۱۷۹/۱۲٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۳ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه



شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۵ درصد



شکل ۷ تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۱ درصد

تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۳٪، در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با بیشتر شدن عدد رینولدز و ارتفاع کنگره در مبدل حرارتی پیچشی، افت فشار زیاد می‌شود. در حالت ۱ که مبدل حرارتی پیچشی ساده می‌باشد (بدون کنگره) با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۳٪، افت فشار

کسر حجمی ۵٪ و عدد رینولدز ۲۴۰۰۰ با افزایش ارتفاع کنگره از ۱ به ۳ میلی متر میزان PEC، ۲۸/۳۵٪ افزایش می‌یابد.

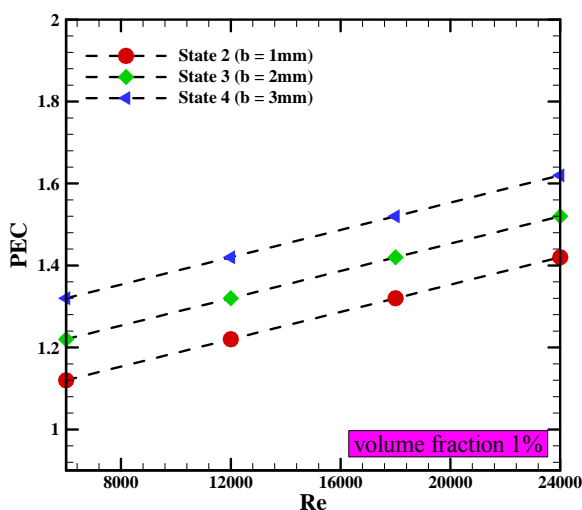
### ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به صورت عددی و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی اثر کنگره درون مبدل حرارتی پیچشی دوسایاله حاوی نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی پرداخته شد. به منظور تحلیل سیالاتی از روش حجم محدود و نرم افزار انسیس فلونت استفاده گردید. نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی نشان می‌دهد:

استفاده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانو لوله کربنی نسبت به سیال پایه آب باعث عملکرد حرارتی بیشتری می‌شود. افزودن کنگره به مبدل حرارتی پیچشی باعث افزایش عدد ناسلت متوسط و افت فشار می‌شود.

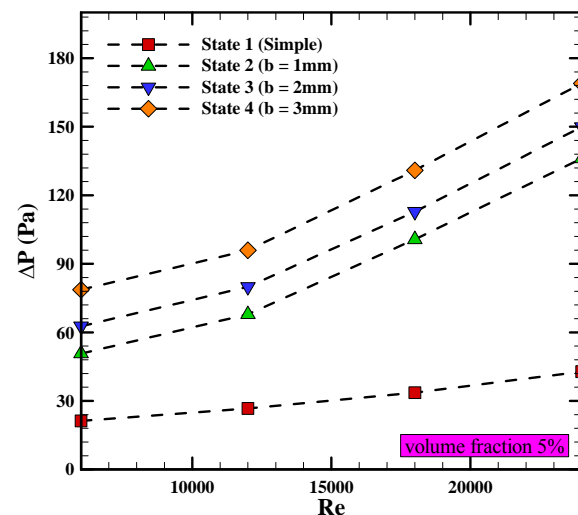
در حالت ۴ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵٪، عدد ناسلت متوسط ۱۵۳/۲۹٪ افزایش می‌یابد.

بر اساس نتایج به دست آمده از معیار ارزیابی هیدرولیکی حرارتی در کسر حجمی ۵٪ و عدد رینولدز ۲۴۰۰۰ با افزایش ارتفاع کنگره از ۱ به ۳ میلی متر میزان PEC، ۲۸/۳۵٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰ تغییرات PEC بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۱ درصد

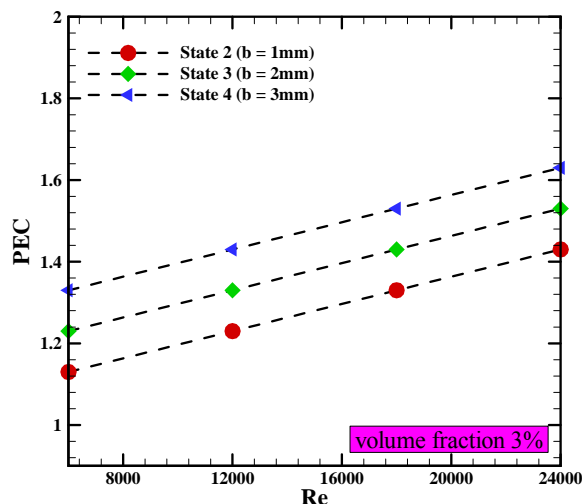
کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵٪، افت فشار ۱۸۹/۰۳٪ افزایش می‌یابد. در حالت ۴ که مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره با ارتفاع ۱ میلی‌متر می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز ۶۰۰۰ به ۲۴۰۰۰ در کسر حجمی ۵٪، افت فشار ۱۹۴/۲۱٪ افزایش می‌یابد.



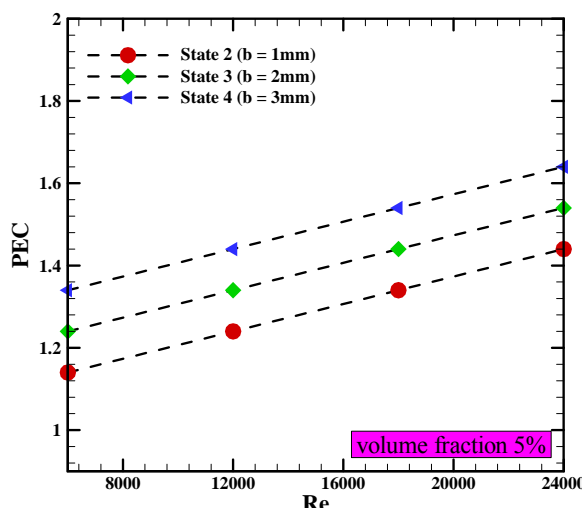
شکل ۹ تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۵ درصد

در شکل ۱۰ تا ۱۲، تغییرات PEC بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره به ترتیب در کسر حجمی‌های ۱، ۲ و ۳ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب عملکرد هیدرولیکی حرارتی درون مبدل حرارتی پیچشی به همراه کنگره در ارتفاع‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در تمامی حالات‌ها بیشتر می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از کنگره‌ها در مبدل پیچشی به لحاظ انتقال حرارت و افت فشار مطلوب می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده از PEC نشان می‌دهد استفاده از کنگره در مبدل حرارتی پیچشی مطلوب است. در کسر حجمی ۱٪ و عدد رینولدز ۲۴۰۰۰ با افزایش ارتفاع کنگره از ۱ به ۳ میلی متر میزان PEC، ۲۶/۷۹٪ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ۳٪ و عدد رینولدز ۲۴۰۰۰ با افزایش ارتفاع کنگره از ۱ به ۳ میلی متر میزان PEC، ۲۷/۴۶٪ افزایش می‌یابد. در

- [3] M, Jamiati, Effects of rotational flow on energy efficiency of a novel parabolic through solar collector equipped with elliptical ribbed absorber tube filled with non-Newtonian two-phase nanofluid, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, (acceptance).
- [4] M. IjazKhan, T.Hayat, M. ImranKhan, M.Waqas, A. Alsaedi, Numerical simulation of hydromagnetic mixed convective radiative slip flow with variable fluid properties: A mathematical model for entropy generation, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Volume 125, pp. 153-164, 2019.
- [5] S. E. Ahmed, Z. A. S. Raizah, A. M. Aly, Entropy generation due to mixed convection over vertical permeable cylinders using nanofluids, *Journal of King Saud University - Science*, Volume 31, No. 3, pp. 352-361, 2019.
- [6] N. Shukla, P. Rana, O. A. Bég, B. Singh, A. Kadir, Homotopy study of magnetohydrodynamic mixed convection nanofluid multiple slip flow and heat transfer from a vertical cylinder with entropy generation, *Propulsion and Power Research*, Volume 8, No. 2, pp. 147-162, 2019.
- [7] M. Sheikholeslami, Numerical approach for MHD Al2O3-water nanofluid transportation inside a permeable medium using innovative computer method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 344, pp. 306-318, 2019.
- [8] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 46, No. 19, pp. 3639-3653, 2003.
- [9] H. Bahremand, A. Abbassi, M. Saffar-Avval, Experimental and numerical investigation of turbulent nanofluid flow in helically coiled tubes under constant wall heat flux using Eulerian-Lagrangian approach, *Powder Technology*, Vol. 269, pp. 93-100, 2015.
- [10] p. c. Mukesh Kumar, j. Kumar, s. Suresh, Heat transfer and friction factor studies in helically coiled tube using Al2O3 /water Nanofluid, *European Journal of Scientific Research*, Volume 82, pp. 161-172, 2012.
- [11] D. Panahi, k. Zamzaman, Heat transfer enhancement of shell-and-coiled tube heat exchanger utilizing helical wire turbulator, *Applied Thermal Engineering*, Volume 115, pp. 607-615, 2017.
- [12] s. k. Saha, Thermohydraulics of laminar flow of viscous oil through a circular tube having axial corrugations and fitted with centre-cleared twisted-tape. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 38, pp. 201-209, 2012.
- [13] E. Khodabandeh, R. Boushehri, O. Ali Akbari, S. Akbari, D. Toghraie, Numerical investigation of heat and mass transfer of water-silver nanofluid in a spiral heat exchanger using a two phase mixture method, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Volume 144, pp. 1003-1012, 2021.
- [14] W. Hea, D. Toghraie, A. Lotfipourb, F. Pourfattahc, A. Karimipourd, M. Afrand, Effect of twisted-tape inserts and nanofluid on flow field and heat transfer characteristics in a tube, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 110, Article 104440, 2020.
- [15] P. Barnoon, D. Toghraie, F. Eslami, B. Mehandoust. Entropy generation analysis of different nanofluid flows



شکل ۱۱ تغییرات PEC بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۳ درصد



شکل ۱۲ تغییرات PEC بر حسب عدد رینولدز برای حالت مختلف از ارتفاع کنگره‌ها درون مبدل حرارتی پیچشی پر شده از نانوسیال هیبریدی آب-مس-نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۵ درصد

## ۷- مراجع

- [1] M. Jafari Nasr, M. Shafighi, Computational fluid dynamics analysis in heat exchangers with helical tubes, *Iranian Chemical Engineering Journal*, Volume 17 No. 100, pp. 23-31, 2019. (In Persian)
- [2] P. Murugesan, K. Mayilsamy, S. Suresh, Heat transfer and friction factor studies in a circular tube fitted with twisted tape consisting of wire-nails, *Chinese J. Chemical Engineering*, Volume 18 No. 6, pp. 1038-1042, 2010.

- in the space between two concentric horizontal pipes in the presence of magnetic field: Single-phase and two-phase approaches, *Computers and Mathematics with Applications*, Volume 77, pp. 662-692, 2019.
- [16] M. Abdollahzadeh, A. A. Sedighi, M. Esmailpour, "Stagnation Point Flow of Nanofluids Towards Stretching Sheet Through a Porous Medium with Heat Generation", *Journal of Nanofluids*, Volume 7, pp. 1-7, 2018.
- [17] A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, G. A. Sheikhzadeh, "A numerical study of the effect of the magnetic field on turbulent fluid flow, heat transfer and entropy generation of hybrid nanofluid in a trapezoidal enclosure", *THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL*, Volume 134, Article 310, 2019.
- [18] M. Jamiati, "Numerical investigation in comparing the influence of water-silver-magnesium oxide hybrid nanofluid and water-silver normal nanofluid on fluid flow", *The European Physical Journal Plus*, Volume 134(405), 2019.
- [19] 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*, Volume 118, 15 June 2016, Pages 75-87,