

## مدل سازی انتقال حرارت و جریان نانو سیال آب-آلومینا و آب-تیتانیا در مبدل حرارتی با آشفته ساز

میلاذ محمودزاده<sup>۱</sup>، اشکان غفوری<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

### Modeling heat transfer and flow of water-alumina nanofluid and titania water in heat exchanger with agitator

Milad Mahmoodzadeh<sup>1</sup>, Ashkan Ghafouri<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad university, Ahvaz, Iran.

#### Abstract

Currently, with the growth and development of new heat transfer technologies, it has been used to reduce the time of heat transfer, reduce the size of heating equipment and finally increase the thermal efficiency. In this research, the validity of the organizations of alumina water and titania water converter with separator, shape and middle fin is done in this field. An international solidwork design has been done and a grid has been made in the Ansys network. The input for this purpose is from the input external union and to get out of the external pressure compliance. Out of compliance in software. In the following, taking into account the volume ratio and diameter of nano particles, a continuity equation and an incompressible Navier-Stokes equation for a coordinate system corresponding to the object have been solved using the control volume method. The results indicate the reduction of the friction coefficient with the increase of the Reynolds number. By comparing the heat transfer coefficient between water-alumina nanofluid and water-titanium dioxide nanofluid, it can be seen that the average value of this coefficient is 14% higher for water-alumina nanofluid. On the other hand, the transformation of the heat transfer coefficient of water-dioxatium nanofluid compared to water-Al nanofluid is more intense than the changes of Reynolds number. Also, with the increase in diameter from 40 to 60 mm in the range of Reynolds number from 3000 to 8000, an increase in Nusselt number was observed. By examining the performance index, it is evaluated that with the increase in the average diameter, a 19.3% increase in the performance index is observed.

**Keywords:** Nanofluid, intermediate fin, Nusselt number, heat transfer, V-shaped separator.

Received: 13/10/2022

Accepted: 14/12/2022

#### چکیده

در حال حاضر با رشد و توسعه تکنولوژی های نوین انتقال حرارت، کاهش زمان انتقال حرارت، کوچک سازی اندازه ی تجهیزات حرارتی و در نهایت افزایش راندمان حرارتی مورد توجه مهندسیین بوده است. در این پژوهش، به منظور بررسی خواص انتقال حرارت نانو سیال های آب-آلومینا و آب-تیتانیا در مبدلی با جداکننده ی V شکل و باله میانی شبیه سازی عددی انجام شده است. طراحی با نرم افزار سالیدورکس انجام شده و در انسیس شبکه بندی انجام شده است. ورودی سیستم از نوع سرعت ورودی و خروجی از نوع فشار ثابت انتخاب گردید. بعد از طراحی در نرم افزار، تأثیر سرعت ورودی نانو سیال بر روی ضریب انتقال حرارت جابه جایی و عدد ناسلت پارامترهایی هستند که مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با در نظر گرفتن نسبت حجمی و قطر ذرات نانو، معادله ی پیوستگی و معادله ی ناویر استوکس تراکم ناپذیر برای یک سیستم مختصات منطبق بر جسم با استفاده از روش حجم کنترلی حل شده است. نتایج به کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز اشاره دارد. با مقایسه ی ضریب انتقال حرارت بین نانو سیال آب-آلومینا و نانو سیال آب-دی اکسید تیتانیوم مشاهده می شود که متوسط مقدار این ضریب برای نانو سیال آب-آلومینا ۱۴ درصد بیشتر است. از طرفی حساسیت ضریب انتقال حرارت نانو سیال آب-دی اکسید تیتانیوم نسبت به نانو سیال آب-آلومینا نسبت به تغییرات عدد رینولدز شدیدتر است. همچنین با افزایش قطر از ۴۰ به ۶۰ میلی متر در محدوده عدد رینولدز از ۳۰۰۰ تا ۸۰۰۰ افزایش عدد ناسلت مشاهده شد. با بررسی شاخص ارزیابی عملکرد مشاهده می شود که با افزایش قطر به طور میانگین افزایش ۱۹/۳ درصدی در شاخص ارزیابی عملکرد دیده می شود.

واژه های کلیدی: نانو سیال، باله ی میانی، عدد ناسلت، انتقال حرارت، جداکننده ی V شکل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳

\* نویسنده مسئول: اشکان غفوری

نشانی: اهواز، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی

پست الکترونیکی: a.ghafouri@iauahvaz.ac.ir

## ۱. مقدمه

سیال‌ها نقش بسیار حیاتی در سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی در صنعت امروز ایفا می‌کنند. سیال‌های متداول از جمله آب، اتیلن گلیکول و روغن موتور، ضریب هدایت محدودی دارند. لذا استفاده از آنها به تنهایی در سیستم‌های صنعتی امروزی که حرارت تولیدی در واحد سطح تجهیزات بسیار افزایش یافته، انتقال حرارت را با مشکل مواجه می‌کند. نانوسیالات متشکل از ذرات بسیار ریزی (معمولاً کمتر از ۱۰۰ نانومتر) هستند که در سیال پایه پراکنده شده‌اند. اولین مشاهدات از افزایش هدایت حرارتی سیالات حاوی ذرات جامد با اندازه‌ی کوچکتر از میکرون، در سال ۱۹۹۳ توسط ماسودا و همکاران گزارش شد [۱]. عنوان نانوسیال نخستین بار توسط بونجیورنو<sup>۱</sup> [۲] جهت مشخص کردن مخلوطی متشکل از نانو ذرات که درون سیال پایه پخش شده‌اند، پیشنهاد گردید. پایداری نانوسیالات به همراه افت فشار نسبتاً اندک در عبور از درون میکرو کانال‌ها، از جمله مشخصات و ویژگی نانوسیال‌ها می‌باشد. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که به دلیل بالاتر بودن هدایت حرارتی نانوسیال‌ها نسبت به سیال‌های متداول (آب، اتیلن گلیکول<sup>۲</sup> و روغن)، امکان استفاده از این سیال‌ها در کاربردهای حرارتی وجود دارد. انتقال حرارت جابجایی با نانوسیال‌ها را می‌توان به کمک روش‌های تک فازی و دو فازی مدل‌سازی کرد. در مدل تک فازی فرض بر این است که نانو ذرات و فاز سیال در تعادل حرارتی و هیدرودینامیکی هستند. این مدل‌سازی نسبت به مدل‌سازی دو فازی ساده‌تر و زمان محاسبات در آن کمتر است. در این مدل‌سازی نانوسیال همانند یک سیال معمولی در نظر گرفته شده و معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در مورد آنها به کار گرفته می‌شود. تنها اثر نانو ذرات در ضریب هدایت حرارتی و لزجت می‌باشد که به کمک مدل‌های تئوری یا اندازه گیری‌های تجربی در نظر گرفته می‌شوند [۳، ۴]. پاک<sup>۳</sup> و چو<sup>۴</sup> [۵] انتقال حرارت

نانوسیالات در لوله‌ای به قطر ۲۷ میلیمتر را مطالعه نمودند. آنها از ذرات با ابعاد ۱۳ تا ۲۷ نانومتر استفاده کردند و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال نسبت به آب در جریان آشفته و رینولدز یکسان، افزایش یافته و در سرعت متوسط یکسان، کاهش یافته است. آنها همچنین شاهد افزایش ویسکوزیته‌ی نانوسیال همراه با افزایش غلظت ذرات بودند. با افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی، افت فشار هم افزایش می‌یابد. داس<sup>۵</sup> و همکاران [۶] دریافتند که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها در مبدل‌ها به دما وابستگی دارد و با افزایش دما، افزایش چشمگیر می‌یابد. هی<sup>۶</sup> و همکاران [۷]، آنها دریافتند که انتقال حرارت، نانوسیال با افزایش عدد رینولدز و یا کسر حجمی نانوسیال تا نزدیک ۴۱٪ افزایش می‌یابد. لطفی و همکاران [۸] به صورت عددی به بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در جریان آرام و مغشوش پرداختند. نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را داخل یک لوله ی افقی عبور دادند. مشخص شد که نتایج مدل مخلوط دقیق تر است و عدد ناسلت کم تخمین زده شده و نرخ بهبود حرارت با افزایش غلظت حجمی نانو ذرات کاهش می‌یابد. فرج الهی و همکاران [۹] طی مطالعه آزمایشگاهی به بررسی دو نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم با قطر متوسط ۲۹ نانومتر و آب اکسید تیتانیوم با قطر متوسط ۱۱ نانومتر در یک مبدل پوسته - لوله در جریان مغشوش پرداختند. افزایش ۲۴ درصدی در ضریب انتقال حرارت، جابجایی با استفاده از نانوسیال آب- اکسید تیتانیوم با کسر حجمی ۱/۳٪ بدست آمد که این افزایش در کسر حجمی ۱/۰۹٪ حدود ۱۳٪ است. کاناداسان<sup>۷</sup> و همکاران [۱۰] در پژوهش خود با استفاده از نانوسیال در نسبت‌های حجمی ۱/۰۱ و ۰/۲ درصد مشاهده نمودند که عدد ناسلت به ترتیب برابر ۳۷٪ و ۴۹٪ افزایش می‌یابد. مینگای<sup>۸</sup> و همکاران [۱۱] ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت در مبدل با ناهمواری‌های سطح را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای هندسی ناهمواری سطح

<sup>5</sup> Das<sup>6</sup> He<sup>7</sup> Kannadasan<sup>8</sup> Minghai<sup>1</sup> Buongiorno<sup>2</sup> Ethylene glycol<sup>3</sup> pak<sup>4</sup> Cho

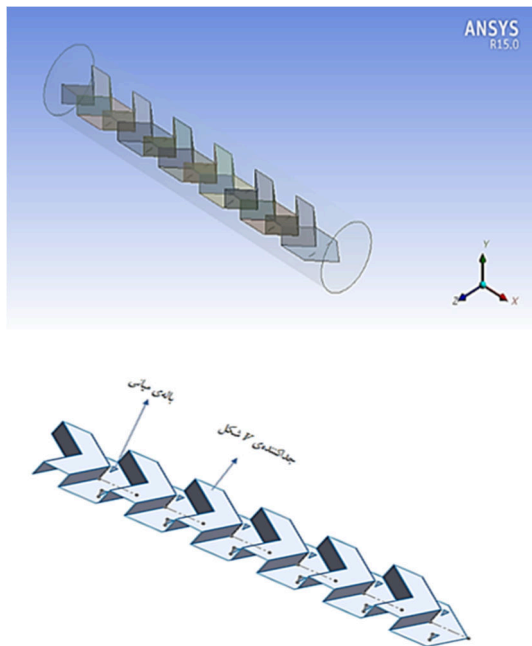
کانال، از جمله نسبت عرض، عمق ناهمواری و فاصله‌ی ناهمواری‌ها از هم به طور مستقل تحت رینولدز ثابت ۵۰۰ مورد مطالعه قرار دادند. شار حرارت ثابت ۱ وات بر میلی‌متر مربع در منطقه‌ی مرکزی در انتهای مبدل برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. در مقایسه با کانال‌های مستقیم، سطح خم شده باعث کاهش مقاومت جریان محلی و بهبود عملکرد حرارتی گرمای خنک کننده می‌شود. در مقایسه با کانال صاف، دارای کاهش ۳/۲ کلونی دما، افزایش ۱۵ درصد تعداد ناسلت و کاهش ۲ درصد فشار است. جانمی و<sup>۱</sup> و همکاران [۱۲] با استفاده از نانو سیال آب-دی اکسید آلومینوم در مبدل مشاهده نمودند که هدایت حرارتی و همچنین خواص حرارتی به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرد. همچنین دریافتند که نانو سیال آب، دی‌اکسید آلومینوم می‌تواند مقاومت حرارتی را کاهش دهد و یکنواختی توزیع دما را بر سطح پایه آب بهبود دهند. رویه جین وانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۱۳] دریافتند که دنده‌های مستطیلی کج قرار داده شده در یک مبدل می‌تواند راندمان انتقال حرارت را به دلیل اختلال جریان، قطع شدن لایه‌ی مرزی و افزایش سطح انتقال حرارت افزایش دهد و شبیه‌سازی عددی در رینولدز در بازه ۶۲/۵ تا ۶۲۵ انجام شد و تاثیر تغییر پارامترهای هندسی مورد ارزیابی قرار گرفت. فریدی و همکاران [۱۴] به بررسی انتقال حرارت در لوله‌های با صفحات میانی مارپیچ که دارای فرورفتگی و برآمدگی می‌باشند پرداختند و تاثیر تغییرات هندسه مانند آرایش فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌ها، همچنین عملکرد نانو سیال در دماهای متفاوت با درصدهای حجمی و قطرهای متفاوت، آنالیز انتقال حرارت، افت فشار و تغییرات آنتروپی را بررسی کردند، همچنین از نانو سیال‌های آلومینا، اکسید مس و اکسید تیتانیوم استفاده کردند و با افزایش درصد حجمی نانو سیال، افزایش ضریب انتقال حرارت و کاهش افت فشار مشاهده کردند، استفاده از نانو سیال اکسید مس در مقایسه با اکسید تیتانیوم توانستند تا ۸/۵٪ باعث کاهش ضریب اصطکاک شود و آرایش خطی فرو رفتگی‌ها و برآمدگی‌ها، در بهبود ضریب انتقال حرارت و

کاهش افت فشار، اثر بیشتری نسبت به آرایش زیگزاکی در این هندسه داشته است، همچنین بهبود ضریب انتقال حرارت هندسه آرایش خطی فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌ها به مقدار ۲۰/۷٪ نسبت به هندسه ساده با استفاده از سیال پایه می‌باشند. همچنین آنها [۱۵] تاثیر خواص نانو سیال آب-آلومینا به عنوان مایع خنک کننده و تاثیر پارامترهای هندسی و خواص نانو سیال بر انتقال حرارت و افت فشار در لوله مارپیچ را بصورت عددی بررسی کردند، نتایج نشان می‌دهد با بکارگیری لوله‌های مارپیچ به جای لوله‌های صاف و استفاده از نانو سیال به جای سیال پایه مشاهده شد که راندمان مبدل حرارتی بطور چشمگیری بهبود می‌یابد و علاوه بر این افزایش گام پیچ لوله و نسبت انحنا باعث افزایش انتقال حرارت و کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. همچنین آنها [۱۶] برای تجزیه و تحلیل ضرایب انتقال حرارت همرفتی، ویژگی‌های نانوسیال مانند ویسکوزیته، هدایت حرارتی، گرمای ویژه و چگالی نیاز داشتند ضریب انتقال حرارت و ویسکوزیته پیچیده‌ترین پارامترهایی هستند که به شدت به دمای نانو سیال و قطر نانو ذرات بستگی دارند نانو سیال‌ها در این کار به عنوان محیط همگن در نظر گرفته شدند به دلیل تجزیه و تحلیل خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها، معادلات توسعه یافته‌اند. به عنوان تابع پارامترها وابستگی شدید افزایش هدایت حرارتی و کاهش ویسکوزیته با دما تغییر دامنه کاربرد نانوسیال‌ها برای استفاده از انتقال حرارت پیشنهادی با سایر مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که آنها قادر به محاسبه ضریب حرارتی و ویسکوزیته هستند و در دمای ۵ تا ۷۰ درجه سانتیگراد و قطر ذرات در بازه‌ی ۵ تا ۱۵۰ نانومتر و غلظت ۱ تا ۵ درصد حجمی بهترین عملکرد را دارند. محققین در رابطه با افزایش هدایت حرارتی سیالات و افزایش انتقال حرارت، درصدد تهیه و پایدارسازی نانوسیالات با انواع نانو ذرات و نانولوله‌ها با توزیع اندازه‌های مختلف هستند که از دیدگاه فنی هدف بهبود عملکرد سرمایشی است. در این پژوهش به کمک روش عددی، اثر تغییر خصوصیات ترموفیزیکی سیال،

<sup>2</sup> Rui-jin Wang

<sup>1</sup> Minghai

معتبر اعتبارسنجی شد. در این مقاله سیال عامل داخل مبدل نانوسیال با خواص ترموفیزیکی ثابت می باشد.



شکل ۱- طراحی مبدل لوله ای با جدا کننده V شکل و باله ی میانی

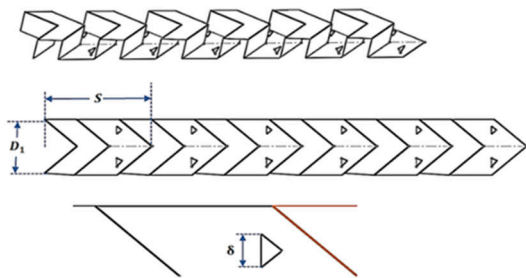
مطابق با مرجع [۱۷]، برای مقادیر عدد رینولدز کمتر از ۲۳۰۰ جریان بصورت لایه ای و برای مقادیر بیشتر از ۴۰۰۰ جریان می تواند بصورت جریان آشفته در نظر گرفته شود. برای بدست آوردن معادلات حاکم و سپس حل مسئله، فرضیاتی در نظر گرفته شد که از جمله جریان پایا و تراکم ناپذیر است. همچنین خواص سیال (لزجت، ضریب هدایت گرمایی و گرمای ویژه) ثابت در نظر گرفته می شوند. برای یک المان جزئی از سیال، سه معادله ی پایستگی انرژی، پایستگی مومنتوم و پیوستگی را نوشته و با ساده سازی، معادلات نهایی حاکم بر جریان به دست خواهد آمد. در وضعیتی که لزجت کم، سرعت جریان زیاد، طول مشخصه زیاد (مثلا قطر لوله) باشد، جریان پایداری خودش را حفظ نکرده و به جریان آشفته تبدیل می شود. در این جریان ذرات سیال به علت انرژی جنبشی بالا مسیرهای نامنظمی را طی می کنند و با برخورد به یکدیگر سبب انتقال انرژی می شوند. با افزایش سرعت جریان و متعاقبا افزایش عدد بی بعد رینولدز، رژیم جریان تغییر کرده و جریان تحت تاثیر حرکات نامنظم شدیدتری قرار می گیرد. این رژیم جریان که

نظیر ضریب هدایت و لزجت دینامیکی و همچنین اثر هندسه جریان بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار می گیرد. در مورد الگوی جریان و انتقال حرارت با دو نانو سیال دی اکسید آلومینوم و دی اکسید تیتانیوم در درون مبدل با جداکننده ی V شکل و باله ی میانی اطلاعات ناچیزی در دسترس است. هدف در این پژوهش بررسی جریان و انتقال حرارت دو نانو سیال حاوی ذرات دی اکسید آلومینوم و دی اکسید تیتانیوم در مبدلی با جداکننده ی V شکل و دارای باله ی میانی که به آن آشفته ساز می گوئیم می باشد. چگالی، ظرفیت گرمایی، لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانو سیال تابعی از کسر حجمی نانو ذرات در نظر گرفته شده و اثرات افزایش کسر حجمی نانو ذرات بر بهبود خواص انتقال حرارتی و وجود هندسه ی V شکل که همان آشفته ساز است بر تغییر ضخامت لایه ی مرزی و نرخ انتقال حرارت بررسی شده است.

## ۲. توصیف مساله

در شکل های ۱ و ۲ شماتیکی از طراحی مبدل لوله ای با جدا کننده V شکل و باله ی میانی (آشفته ساز) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می گردد این مبدل با یک جدا کننده V شکل و باله ی میانی در یک مبدل لوله ای بصورت عددی شبیه سازی و انتقال حرارت برای دو نانو سیال دی اکسید آلومینوم و دی اکسید تیتانیوم بررسی شده است. در یک مبدل لوله ای با جداکننده ی V شکل، وجود المان های تولید گردابه و آشفستگی جریان و همچنین وجود نانوسیالات می تواند منجر به بروز جریان های چندفازی گردد. در این تحقیق به منظور ساده سازی استخراج نتایج، از ناهمگنی امکان پذیر در جریان نانوسیال صرف نظر شده و جریان تک فازی در نظر گرفته شده است. با معرفی مدل های مختلف شبیه سازی جریان تک فازی و با شناخت معادلات حاکم بر آنها، افت فشار در جریان سیال نیز بررسی خواهد شد. با استفاده از اطلاعات بدست آمده از مباحث تئوری و ملاحظات شبیه سازی جریان در مبدل لوله ای با جداکننده V شکل، شبیه سازی در نرم افزار فلونت برای چند هندسه ی مختلف انجام شده و نتایج با روابط و نتایج موجود در مراجع

شکل ۲ ترسیم شماتیکی از مبدل حامل جریان نانوسیال های آلومینا و دی اکسید تیتانیوم است. تحلیل دمای مبدل حامل جریان نانوسیال بر ضریب عملکرد سیستم های مختلف تاثیر دارد. کاهش دمای خروجی سیال  $T_c$  که در واقع مقارن با افزایش عدد ناسلت مبدل  $NU_c$  می باشد به عنوان هدف اولیه طراحی انتخاب شده است. هئدسه در نرم افزار سولیدورک ترسیم و طبق روال تحلیل معادلات که در بخش قبل توضیح داده شد، در نرم افزار انسیس فلونت شبیه سازی شده است.



شکل ۲- متغیرهای هندسی مبدل لوله ای با جدا کننده V شکل و باله ی میانی

میزان کاهش ضریب اصطکاک و افزایش عدد ناسلت مبدل  $NU_c$  به عنوان دو هدف شبیه سازی به صورت پارامتریک انتخاب شده و محدوده مطالعه  $\delta=20\text{mm}$ ،  $40\text{mm} \leq D_1 \leq 60\text{mm}$  برای تحلیل مورد نظر بوده و در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در ورودی جریان هوا با سرعت یکنواخت و دمای ۳۲۸ درجه کلون (۵۵ درجه سانتیگراد) وارد مبدل می شود. افت فشار درون لوله ها در حالت تک فاز  $\Delta p_{tp}$ ، ناشی از افت فشار مومنتوم (ناشی از تغییرات انرژی جنبشی سیال)  $\Delta p_{mom}$  و افت فشار اصطکاکی درون مبدل  $\Delta p_{frict}$  و از رابطه زیر حساب می شود [۱۸]:

$$\Delta p_{tp} = \Delta p_{mom} + \Delta p_{frict-TP} \quad (3)$$

که در این رابطه، افت فشار ناشی از اصطکاک مبدل بصورت زیر بیان می شود [۱۸]:

$$\Delta p_{frict-TP} = 2f_{TP} \frac{L}{D_{in}} \frac{G_f^2}{\rho_h} \quad (4)$$

مشخصه های اصلی آن بی نظمی شدید، تصادفی بودن و حرکات نوسانی است، رژیم جریان مغشوش نامیده می شود. در جریان داخلی، عدد رینولدز ۲۳۰۰ به عنوان مبنای شروع آشفستگی جریان در نظر گرفته می شود و به دلیل اینکه اغلب سیالات صنعتی لزجت پایینی دارند، مطالعه ی بیشتر جریان ها شامل آشفستگی می باشد. بنابراین لزوما ارائه ی مدل هایی برای پیش بینی آشفستگی جریان امری ضروری است. نرم افزار فلونت که اساس محاسبات و شبیه سازی مبتنی بر نتایج آن حاصل شده است، انواع مختلف مدل های آشفستگی را برای شبیه سازی سیال استفاده می کند. در مقایسه با جریان تک فاز، تعداد ترم هایی که در جریانهای چند فاز باید تحلیل شوند، افزایش می یابد. انتخاب مدل آشفستگی در جریان تابع عوامل مختلفی است که متغیرهایی نظیر فیزیک جریان، نحوه ی کارکرد و نتایج، مشخصات پایداری و میزان عملکرد مدل روی شبکه ی محاسباتی، میزان دقت مدل نسبت به تست آزمایشگاهی، امکانات سخت افزاری و پردازش داده ها، میزان زمان قابل قبول برای همگرایی نتایج از جمله مواردی است که می توان از آنها نام برد. تحلیل و شبیه سازی مبدل لوله ای با جداکننده V شکل و باله میانی بر مبنای دینامیکی سیالات محاسباتی سه بعدی به منظور بررسی تاثیر هر یک از پارامترهای هندسی مبدل با استفاده از دو سیال اکسید آلومینوم و اکسید تیتانیوم بر رفتار سیالاتی و انتقال حرارت اجرا شده است. اساسا مدل  $k-\omega$  توانایی بیشتری در پیش بینی جریان لایه های نزدیک دیواره دارد و معادلات ناویر استوکس مستقل از زمان با بکارگیری مدل آشفستگی  $k-\omega$  حل شده است. درمجرای ورودی مبدل، پروفیل سرعت یکنواخت در نظر گرفته می شود. دو پارامتر مهم یعنی مقدار افت فشار و عدد ناسلت به عنوان پارامترهای هدف در این تحقیق انتخاب شده اند. ضریب اصطکاک مبدل  $f$  از طریق افت فشار  $\Delta P$  در طول مقطع  $L$  با قطر هیدرولیکی  $D_h$  از رابطه ی زیر قابل حصول است [۱۸]:

$$f = \frac{\Delta p}{0.5 \rho u^2} \frac{L}{D_h} \quad (1)$$

$$NU = \frac{h D_h}{K_f} \quad (2)$$

که در آن، افت فشار استاتیکی برابر با  $\Delta p_{ftp}$ ،  $\Delta p_{htp}$  افت فشار هیدرواستاتیکی و افت فشار ناشی از شتاب جریان  $\Delta p_{atp}$  می باشد بنابراین [۱۹]:

$$\Delta p_{tp} = \Delta p_{ftp} + \Delta p_{htp} \quad (۱۲)$$

در مبدل، جریان موازی همسو، اختلاف دما، ابتدا زیاد است، اما با افزایش فاصله سریعاً کاهش می یابد و به طور مجانبی به صفر نزدیک می شود. باید توجه داشت که در چنین مبدلی دمای خروجی سیال سرد (نانوسیال)، هیچ وقت از دمای ورودی گرم بیشتر نمی شود. برای موازنه های انرژی و تحلیل پیرو آن، فرض هایی نظیر ناچیز بودن رسانش محوری در امتداد مبدل و ناچیز بودن تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی، ثابت بودن ضریب کلی انتقال گرما در نظر می گیریم. همچنین عدد رینولدز بصورت زیر تعریف می گردد [۱۹]:

$$Re = \frac{D \rho U}{\mu} \quad (۱۳)$$

ضریب انتقال حرارت متوسط رابطه زیر تعریف می گردد [۱۹]:

$$h = \frac{q}{\Delta t} \quad (۱۴)$$

که در آن  $q$ ، فلاکس حرارتی بوده و  $\Delta t$  توسط رابطه زیر محاسبه می شود که در آن  $T_w$  نشان دهنده دمای متوسط دیواره و  $T_f$  دمای متوسط سیال می باشد [۱۹]:

$$\Delta p = T_w - T_f \quad (۱۵)$$

به منظور اعتبارسنجی نتایج مبدل، نتایج شبیه سازی با سیال عامل آب برای مبدل با نتایج عددی موجود [۲۰] در رینولدزهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. قرابت مناسب بین نتایج عددی بدست آمده و نتایج عددی مرجع [۲۰]، اطمینان از حصول نتایج منطقی از تحلیل حرارتی مبدل را نشان می دهد (جدول ۱).

که در این رابطه،  $G_r$  شار جرمی نانو سیال،  $L$  طول مبدل،  $\rho_H$  و  $f_{tp}$  نیز به ترتیب چگالی همگن و ضریب اصطکاک مبدل است [۱۸].

$$f_{tp} = [0.79 \ln(Re_{D_{in}}) - 1.64]^{-2} \quad (۵)$$

$$G_r = \frac{4\dot{m}_r}{\pi D_{in}^2} \quad (۶)$$

عدد بی بعد رینولدز در رابطه ی مرتبط با اصطکاک به صورت زیر حاصل می شود [۱۸]:

$$Re_{D_{in}} = \frac{G_r D_{in}}{\mu_{tp}} \quad (۷)$$

چون سیال تک فاز در نظر گرفته شده است، برای حصول چگالی موثر، باید از فرمول مرتبط با کسرهای حجمی استفاده گردد. چگالی  $\rho_H$  باید بر اساس کسر حجمی  $x$  برای فازهای جامد نانو ذرات  $s$  و مایع  $l$  به صورت زیر تعریف شوند [۱۹]:

$$\rho_H = \varepsilon_H \rho_s + (1 - \varepsilon_H) \rho_l \quad (۸)$$

در رابطه ی مرتبط با چگالی،  $\varepsilon_H$  کمیتی به نام کسر حجمی همگن بوده و بصورت زیر تعریف می شود [۱۹]:

$$\varepsilon_H = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \frac{\rho_s}{\rho_l}} \quad (۹)$$

با تعریف کمیت های لازم در این بخش، افت فشار ناشی از ممتوم را می توان با رابطه ی زیر بیان کرد [۱۹]:

$$\Delta p_{mom} = G_r^2 \left\{ \left[ \frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H)\rho_l} + \frac{x^2}{\varepsilon_H\rho_s} \right]_{out} - \left[ \frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H)\rho_l} + \frac{x^2}{\varepsilon_H\rho_g} \right]_{in} \right\} \quad (۱۰)$$

رابطه ی (۱۰) بیان کننده ی اختلاف انرژی جنبشی بین ورودی و خروجی نانو سیال می باشد. افت فشار کل در یک لوله می تواند بصورت زیر بیان شود [۱۹]:

$$\Delta p_{tp} = \Delta p_{ftp} + \Delta p_{htp} + \Delta p_{atp} \quad (۱۱)$$

جدول ۱- مقایسه‌ی ضریب اصطکاک و عدد ناسلت مبدل با نتایج عددی [۲۰]

ضریب اصطکاک $f$ در رینولدز $Re$				عدد ناسلت $Nu$		
$Re$	مطالعه حاضر	مرجع [۲۰]	درصد اختلاف	مطالعه حاضر	مرجع [۲۰]	درصد اختلاف
۳۰۰۰	۰/۰۳۸	۰/۰۴۳۶	۱۲/۸	۰/۷	۰/۶۶۵	۵/۲۶
۴۰۰۰	۰/۰۳۸	۰/۰۴۶	۱۷/۳	۰/۸۲	۰/۷۷	۶/۴
۵۰۰۰	۰/۰۳۵	۰/۰۳۳۳	۵/۱	۰/۸۸	۰/۸۱	۸/۶
۶۰۰۰	۰/۰۲۸	۰/۰۲۶۴	۶/۰۶	۱	۰/۹	۱۱/۱
۷۰۰۰	۰/۰۲۴	۰/۰۲۲۴	۷/۱	۱/۰۲	۰/۹۲۵	۱۰/۲

ناسلت حاصل شده در مقطعی از کانال برای سلول‌هایی با تعداد مختلف در جدول ۲ آمده است. نتایج از قرابت بسیار زیاد نتایج با یکدیگر حکایت دارد و بدلیل کاهش هزینه‌ی محاسباتی که در عملیات تحلیل پارامتریک به آن پرداخته خواهد شد، تعداد  $4/000/000$  سلول به عنوان تعداد مناسب شبکه بندی در شبیه‌سازی عددی مد نظر قرار خواهد گرفت.

در شبیه‌سازی جریان آشفته حل مسئله وابستگی زیادی به شبکه‌بندی دارد که باید به ازای شبکه‌های مختلف تغییری در جواب مسئله ایجاد نکند. برای این هدف تعداد شبکه مسئله از  $3/000/000$  سلول به  $3/500/000$ ،  $4/000/000$  و  $5/000/000$  سلول در رینولدز  $3000$  تغییر کرد تا حساسیت پاسخ‌ها به ابعاد شبکه بندی مشخص گردد. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر، عدد ناسلت، ضریب افت فشار و عدد

جدول ۲- اندازه‌ی ابعاد هندسی در نظر گرفته شده برای مبدل دارای جداکننده‌ی V شکل و باله‌ی میانی

متغیر	$3/000/000$ سلول	$3/500/000$ سلول	$4/000/000$ سلول	$5/000/000$ سلول
عدد ناسلت $Nu$	۰/۶۹	۰/۷	۰/۷	۰/۷۱
ضریب افت فشار $C_p$	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۷
ضریب اصطکاک $f$	۰/۰۳۹	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۰۳۷

مختلف به منظور تحلیل اثر نوع نانوسیال بر عدد ناسلت استفاده شده است. خواص ترموفیزیکی آب، نانوذرات اکسید آلومینیوم و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این تحقیق مطابق با جدول ۳ می‌باشد [۲۱-۲۳].

در این پژوهش به بررسی پارامترهای تاثیرگذار مرتبط با خواص نانوسیال همچون درصد حجمی، قطر نانوذرات و دمای ورودی نانوذرات در رینولدزهای مختلف بر عدد ناسلت برای مبدل پرداخته می‌شود. از دو نوع نانوسیال آب، اکسید آلومینیوم و دی‌اکسید تیتانیوم با درصدهای حجمی

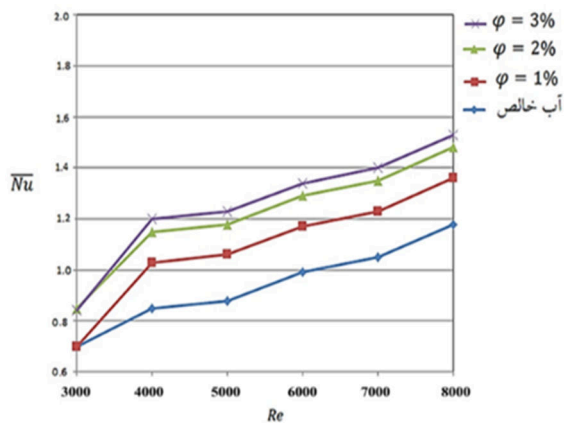
جدول ۳- خواص ترموفیزیکی آب (سیال پایه) نانوذرات اکسید آلومینیوم و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم [۲۱-۲۳]

متغیر	واحد	آب (سیال پایه)	دی اکسید آلومینیوم	دی اکسید تیتانیوم
ضریب هدایت حرارتی	$W/(m^2K)$	۰/۶	۴۰	۸/۹۵
ظرفیت گرمایی ویژه	$J/Kg.k$	۴/۱۸۴	۷۶۵	۶۸۶/۲
چگالی	$Kg/m^3$	۱۰۰۰	۳۹۷۰	۳۲۵۰
لزجت	$mPa.s$	۰/۰۰۱	--	--

باله میانی، قطرهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نانومتری برای ذرات آلومینا در نظر گرفته شده است. شکل ۳ ترسیمی از عدد ناسلت متوسط مبدل در ابعاد مختلف را نشان می‌دهد (نتایج مشابهی برای نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم حاصل شده است که بدلیل

### ۳. نتایج و بحث

به منظور بررسی تاثیر قطرهای مختلف نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجایی مبدل دارای جداکننده‌ی V شکل و



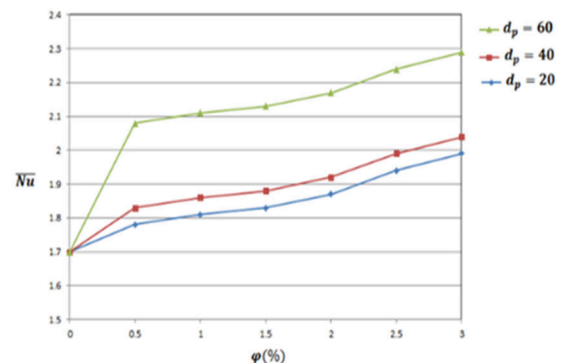
شکل ۵- نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط نانوسیال آلومینا بر حسب عدد رینولدز در درصد های حجمی متفاوت در دمای ورودی ۵۵ درجه ی سانتیگراد و قطر ذرات ۲۰ نانومتر

در این بخش ضریبی به نام شاخص ارزیابی عملکرد به ترتیب زیر تعریف می شود که می تواند به صورت همزمان ضریب اصطکاک و عدد ناسلت را در تحلیل های مقایسه ای لحاظ کند [۲۰]:

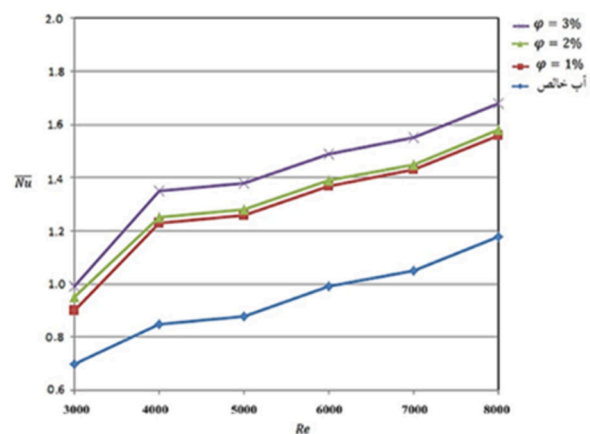
$$PEC = \frac{Nu}{f \left(\frac{1}{d}\right)} = \frac{Nub}{f_b} \quad (16)$$

در شکل های ۶ و ۷ نتایج نشان می دهد که افزایش عدد رینولدز در هر دو جریان نانوسیال، افزایش شاخص ارزیابی عملکرد را در پی خواهد داشت. از طرفی در یک رینولدز ثابت، افزایش کسر حجمی نانوذرات موجب افزایش ضریب شاخص ارزیابی عملکرد می شود، هر چند این افزایش برای درصد حجمی ۳ درصد نسبت به درصد حجمی ۲ درصد برای نانوسیال آلومینا به چشم نمی خورد. این نتیجه به این معناست که افزایش درصد نانوذرات آلومینا به بیش از ۳ درصد حجمی، تاثیر چندانی بر ارتقای شاخص ارزیابی عملکرد نخواهد داشت. با مقایسه ی ضریب شاخص ارزیابی عملکرد بین نانوسیال آلومینا و نانوسیال دی اکسید تیتانیوم مشاهده می شود که متوسط مقدار این ضریب برای نانوسیال آلومینا ۱۴ درصد بیشتر است. از طرفی حساسیت ضریب شاخص ارزیابی عملکرد نانوسیال دی اکسید تیتانیوم نسبت

عدم تکرار در اینجا بیان نمی شود). که مشاهده می شود، عدد ناسلت در تمام غلظت ها روند افزایشی متناسب با قطر داشته است.



شکل ۳- تغییرات عدد ناسلت در مبدل با جداکننده ۷ شکل و باله ی میانی در قطر های مختلف نانوذرات آلومینا در شکل های ۴ و ۵ تغییرات عدد ناسلت در درصد های حجمی مختلف بر حسب عدد رینولدز در مبدل لوله ای با جداکننده ی ۷ شکل و باله ی میانی ترسیم شده است.



شکل ۴- نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط نانوسیال دی اکسید تیتانیوم بر حسب عدد رینولدز در درصد های حجمی متفاوت در دمای ورودی ۵۵ درجه ی سانتیگراد و قطر ذرات ۲۰ نانومتر

با تحلیل شکل مشاهده می شود که افزایش عدد رینولدز در کلیه ی درصد های حجمی، افزایش عدد ناسلت را در پی دارد. همچنین نانوسیال آلومینا نسبت به نانوسیال دی اکسید تیتانیوم دارای عدد ناسلت بیشتری خواهد بود. از طرفی در هر دو نانوسیال با فرض ثابت بودن دمای ورودی ۵۵ درجه ی سانتیگراد و قطر نانوذرات ۲۰ نانومتر، با افزایش درصد حجمی ذرات در رینولدز ثابت، عدد ناسلت نیز افزایش خواهد داشت.



جداکننده‌ی V شکل و باله‌ی میانی (آشفته ساز)، فشار غیرخطی و میدان‌های سرعت مختلف در نرم‌افزار انسیس فلوئنت، با دقت قابل قبولی بصورت عددی شبیه‌سازی و با نتایج عددی موجود در مقالات معتبر اعتبارسنجی شد. بدلیل کاهش هزینه‌ی محاسباتی در عملیات تحلیل پارامتریک به آن پرداخته خواهد شد، تعداد ۴/۰۰۰/۰۰۰ سلول به عنوان تعداد مناسب شبکه‌بندی در شبیه‌سازی عددی مد نظر قرار خواهد گرفت. نانوسیال آلومینا نسبت به نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم دارای عدد ناسلت بیشتری خواهد بود. افزایش قطر نانو ذرات تاثیر مثبتی بر مقدار عدد ناسلت داشته است، این در حالیست که افزایش غلظت نانوسیال موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی خواهد شد. نتایج از کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز دارد که این تغییرات در رینولدزهای پایین‌تر، شدیدتر خواهد بود که این امر به نسبت معکوس بین ضریب اصطکاک و سرعت جریان سیال نسبت داده می‌شود. با مقایسه‌ی ضریب شاخص ارزیابی عملکرد بین نانوسیال آلومینا و نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم مشاهده می‌شود که متوسط مقدار این ضریب برای نانوسیال آلومینا ۱۴ درصد بیشتر است. از طرفی حساسیت ضریب شاخص عملکرد نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم نسبت به نانوسیال آلومینا نسبت به تغییرات عدد رینولدز شدیدتر است.

### سپاسگزاری

بدینوسیله از مراکز تحقیق و توسعه شرکت‌های شاخص علم و صنعت نخست و تابان صنعت نخست که در انجام این تحقیق ما را حمایت و یاری نمودند صمیمانه تشکر می‌گردد.

### علائم انگلیسی:

قطر لوله مبدل،  $D \text{ m}^2$

قطر هیدرولیکی  $D_h$

ضریب اصطکاک  $f$

ضریب اصطکاک مبدل  $f_{tp}$

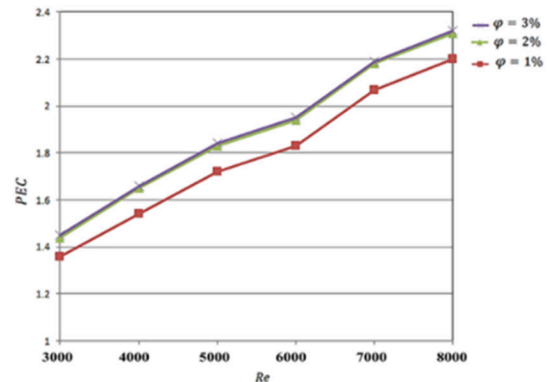
شار جرمی نانو سیال  $G_r$

ضریب انتقال حرارت  $H$

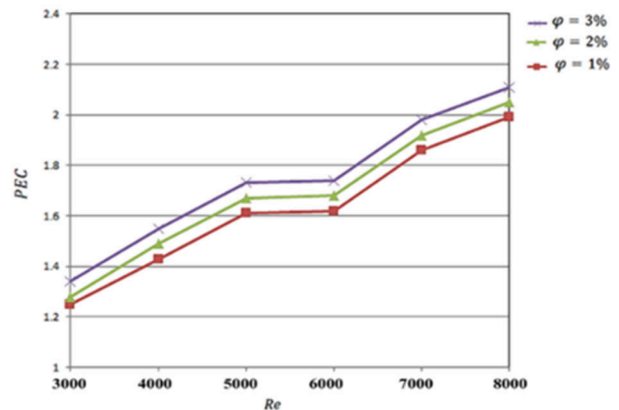
طول مقطع لوله،  $L \text{ m}^2$

فاز مایع نانو ذرات  $I$

به نانوسیال آلومینا نسبت به تغییرات عدد رینولدز شدیدتر است.



شکل ۶- نمودار تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد برای نانوسیال آلومینا بر حسب عدد رینولدز در درصدهای حجمی متفاوت



شکل ۷- نمودار تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد برای نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم بر حسب عدد رینولدز در درصدهای حجمی متفاوت

## ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش پس از بیان مقدمه‌ای از ویژگی‌های نانوسیالات، انگیزه‌های تحلیل و بررسی در زمینه‌ی افزایش مقدار انتقال حرارت در مبدل حرارتی با جداکننده‌ی V شکل و باله‌ی میانی با وجود دو نانو سیال اکسید آلومینوم و دی اکسید تیتانیوم بیان شد. با شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت و اعتبارسنجی با نتایج مقالات موجود، سیال عامل انتخاب شده در این تحقیق، دو نوع نانوسیال آلومینا و دی اکسید تیتانیوم با درصدهای حجمی ۱ درصد، ۲ درصد و ۳ درصد هستند که در هر بخش نتایج مرتبط با آنها تشریح شده است. در نهایت با در نظر گرفتن متغیرهای طراحی مبدل، نتایج مرتبط حاصل شد. با توجه به قابلیت‌ها و مدل‌های موجود برای شبیه‌سازی جریان در مبدل حرارتی با

- approaches.", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **1** (2010) 74.
- [9] B. Farajollahi, SG. Etemad, M. Hojjat, "Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **1-3** (2010) 12.
- [10] N. Kannadasan, K. Ramanathan, S. Suresh, "Comparison of heat transfer and pressure drop in horizontal and vertical helically coiled heat exchanger with CuO/water based nano fluids", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **42** (2012) 64.
- [11] M. Xu, H. Lu, L. Gong, JC. Chai, X. Duan and X. Duan, "Parametric numerical study of the flow and heat transfer in microchannel with dimples.", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **76** (2016) 348.
- [12] J. Wu, J. Zhao, J. Lei, B. Liu, "Effectiveness of nanofluid on improving the performance of microchannel heat sink", *Applied Thermal Engineering*, **101** (2016) 402.
- [13] R. Wang, J. Wang, B. Lijin, Z. Zhu, "Parameterization investigation on the microchannel heat sink with slant rectangular ribs by numerical simulation", *Applied Thermal Engineering*, **133** (2018) 428.
- [14] R. Faridi Khouzestani, A. Ghafouri, "Numerical study on heat transfer and nanofluid flow in pipes fitted with different dimpled spiral center plate." *SN Applied Sciences*, **2** (2020) 1.
- [15] R. Faridi-khouzestani, A. Ghafouri, M. Halalizade. "Numerical study of the effects of geometric parameters and nanofluid properties on heat transfer and pressure drop in helical tubes." *SN Applied Sciences*. **3** (2021) 1.
- [16] H.A. Moghaddam, A. Ghafouri, and R Faridi Khouzestani. "Viscosity and thermal conductivity correlations for various nanofluids based on different temperature and nanoparticle diameter." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. **6** (2021) 303.
- [۱۷] م. سلطانی، ر. رحیمی اصل، دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم افزار FLUENT، انتشارات نشرطراح، تهران، ۱۳۸۹.
- [18] K.Tadeusz J, *The exergy method of thermal plant analysis*. Paragon Publishing (2012).
- [19] LT. Fan, ST. Lin, NZ. Azer, "Surface renewal model of condensation heat transfer in tubes with in-line static mixers.", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **7** (1978) 849.
- [20] W. Jedsadaratanachai, and A. Boonloi, "Performance analysis and flow visualization in a round tube heat exchanger inserted with wavy V-ribs." *Advances in Mechanical Engineering*, **9** (2017) 1.
- [21] S. U. DEVI and S. P. Anjali Devi. " Heat Transfer Enhancement of Cu – / Water Hybrid Nanofluid Flow Over A Stretching Sheet," *Journal of the Nigerian Mathematical Society*, **2** (2017) 419.
- [22] W. Malalasekera, HK .Versteeg, "An introduction to computational fluid dynamics." *The finite volume method*, Harlow: Prentice Hall, 1995.
- [23] A.A.A, Arani, J, Amani. "Experimental study on the effect of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid on heat transfer and pressure drop." *Experimental Thermal and Fluid Science*. **42** (2012) 107.
- عدد ناسلت سیال خروجی  $NU_c$
- شاخص ارزیابی عملکرد PEC
- فلاکس حرارتی Q
- عدد رینولدز Re
- عدد رینولدز ورودی سیال  $RE_{D_{in}}$
- فاز جامد نانو ذرات S
- دمای خروجی سیال  $T_c$
- دمای متوسط سیال  $T_f$
- دمای متوسط دیواره  $T_w$
- کسر حجمی X
- علائم یونانی:
- طول هر ضلع باله میانی  $\delta$
- افت فشار  $\Delta p$
- افت فشار ناشی از شتاب جریان  $\Delta p_{atp}$
- افت فشار استاتیکی  $\Delta p_{ftp}$
- افت فشار اصطکاکی مبدل  $\Delta P_{frict}$
- افت فشار هیدرواستاتیک  $\Delta P_{htp}$
- افت فشار مومنتوم  $\Delta P_{mom}$
- افت فشار در حالت تک فازی  $\Delta p_{tp}$
- بازده کسر حجمی همگن  $\epsilon_H$
- غلظت نانو ذرات  $\phi$
- مرجع ها
- [1] M. Hidetoshi, A. Ebata, and K. Teramae, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles. (1993) 227.
- [2] B.Jacopo, Convective transport in nanofluids. (2006) 240.
- [3] J.Rong-Yuan and S.Ch. Tzeng, Numerical research of nature convective heat transfer enhancement filled with nanofluids in rectangular enclosures, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. **6** (2006) 727.
- [4] P.Hossein Ali and M. Yaghoubi, Analysis of nanoparticles migration on natural convective heat transfer of nanofluids." *International Journal of Thermal Sciences*, **68** (2013) 79.
- [5] P. Bock Choon and Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, **2** (1998) 151.
- [6] D. Sarit Kumar, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids", *J. Heat Transfer* **4** (2003) 567.
- [7] He. Yurong, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang, and H. Lu, "Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe." *International journal of heat and mass transfer*, **11-12** (2007) 2272.
- [8] R. Lotfi, Y. Saboohi, AM. Rashidi. "Numerical study of forced convective heat transfer of nanofluids: comparison of different