



بررسی عددی انتقال حرارت و جریان نانو سیال در مبدل لوله‌ای با جداکننده V شکل و باله

میانی

میلاد محمودزاده^۱، اشکان غفوری^{۲*}

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: a.ghafouri@iauhvaz.ac.ir

چکیده

امروزه با رشد و توسعه تکنولوژی‌های نوین انتقال حرارت، کاهش زمان انتقال حرارت، کوچک‌سازی اندازه تجهیزات حرارتی و در نهایت افزایش راندمان حرارتی مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این پژوهش، به منظور بررسی خواص انتقال حرارت نانوسیال‌های آب-آلومینا و آب-دی‌اکسید تیتانیوم در مبدلی با جداکننده V شکل و باله میانی شبیه‌سازی عددی انجام شده است. طراحی به وسیله نرم افزار سولیدورک انجام شده و در انسیس شبکه‌بندی انجام شده است. ورودی سیستم از نوع سرعت ثابت ورودی و خروجی از نوع فشار ثابت انتخاب گردید. بعد از طراحی در نرم افزار تأثیر سرعت ورودی نانوسیال بر روی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت پارامتری است که مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با در نظر گرفتن نسبت حجمی و قطر ذرات نانو، معادله پیوستگی و معادله 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 مقایسه‌ی ضریب انتقال حرارت بین نانوسیال آلومینا و نانوسیال آب-دی‌اکسید تیتانیوم مشاهده می‌شود که متوسط مقدار این ضریب برای نانوسیال آب-آلومینا ۱۴ درصد بیشتر است. از طرفی حساسیت ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب-دی‌اکسید تیتانیوم نسبت به نانوسیال آب-آلومینا نسبت به تغییرات عدد رینولدز شدیدتر است. همچنین با افزایش قطر از ۴۰ به ۶۰ میلیمتر در محدوده عدد رینولدز از ۳۰۰۰ تا ۸۰۰۰ افزایش عدد ناسلت مشاهده شد. با بررسی شاخص ارزیابی عملکرد مشاهده می‌شود که با افزایش قطر بطور میانگین افزایش ۱۹,۳ درصدی در شاخص ارزیابی عملکرد دیده می‌شود. همچنین با وجود باله‌ی میانی میزان عدد ناسلت در رینولدزهای برابر بیشتر است.

کلمات کلیدی: نانوسیال، باله‌ی میانی، عدد ناسلت، انتقال حرارت، جداکننده V شکل

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 اندازه کوچکتر از میکرون، در سال ۱۹۹۳ توسط ماسودا و همکاران [۱] گزارش شد. عنوان نانوسیال نخستین بار توسط بونجیورنو [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 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 اندازه‌گیری‌های تجربی در نظر گرفته می‌شوند [۳ و ۴].



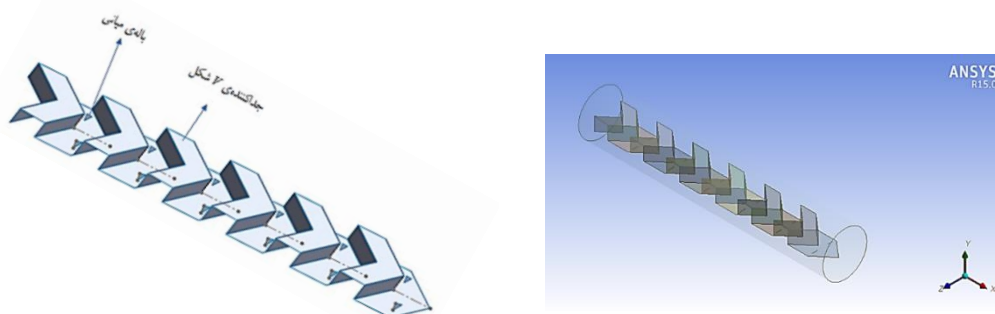
پاک و چو [۵] انتقال حرارت نانوسیالات در لوله‌ای به قطر ۲۷ میلی‌متر را مطالعه نمودند. آنها از ذرات با ابعاد ۱۳ تا ۲۷ نانومتر استفاده کردند و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جابجائی نانوسیال نسبت به آب در جریان آشفته و رینولدز یکسان، افزایش یافته و در سرعت متوسط یکسان، کاهش یافته است. آنها همچنین شاهد افزایش ویسکوزیته نانوسیال همراه با افزایش غلظت ذرات بودند. با افزایش ضریب انتقال حرارت جابجائی، افت فشار هم افزایش می‌یابد. داس و همکاران [۶] دریافتند که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها در مبدل‌ها به دما وابستگی دارد و با افزایش دما، افزایش چشمگیر می‌یابد. هی و همکاران [۷] 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 افقی عبور دادند. مشخص شد که نتایج مدل مخلوط دقیق‌تر 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 و همکاران [۱۰] در پژوهش خود با استفاده از نانوسیال در نسبت‌های حجمی ۰/۱ و ۰/۲ درصد، مشاهده نمودند که عدد ناسلت به ترتیب برابر ۳۷٪ و ۴۹٪ افزایش می‌یابد. مینگای ژو 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 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 منطقه 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 او و همکاران [۱۲] با استفاده از نانو سیال آب-دی اکسید آلومینیوم در مبدل مشاهده نمودند که هدایت حرارتی و همچنین خواص حرارتی به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرد. همچنین دریافتند که نانو سیال آب- دی اکسید آلومینیوم می‌تواند مقاومت حرارتی را کاهش دهد و یکنواختی توزیع دما را بر سطح پایه آب بهبود دهند. رویه جین وانگ 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 لایه 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 می‌تواند تا ۸,۵٪ باعث کاهش ضریب اصطکاک شود. آرایش خطی فرورفتگی‌ها 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.

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 سرمایه‌ی است. در این پژوهش به کمک روش عددی، اثر تغییر خصوصیات ترموفیزیکی سیال، نظیر ضریب هدایت و لزجت دینامیکی و همچنین اثر هندسه جریان بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مورد الگوی جریان و انتقال حرارت در نانوسیالات درون مبدل با جداکننده V شکل اطلاعات ناچیزی در دسترس است. هدف در این پژوهش بررسی جریان و انتقال حرارت نانو سیال حاوی ذرات دی اکسید آلومینیوم و دی اکسید تیتانیوم در مبدلی با جداکننده V شکل و دارای باله میانی می‌باشد. چگالی، ظرفیت، 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 V شکل بر تغییر ضخامت لایه مرزی و نرخ انتقال حرارت بررسی می‌شود.



توصیف مساله

در شکل‌های (۱) و (۲) شماتیکی از طراحی مبدل لوله ای با جدا کننده V شکل و باله میانی نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می گردد این مبدل با اضافه کردن یک جدا کننده V شکل و باله میانی در یک مبدل لوله‌ای به صورت عددی شبیه‌سازی و انتقال حرارت بررسی شده است.



شکل (۱): طراحی مبدل لوله ای با جدا کننده V شکل و باله ی میانی

در یک مبدل لوله‌ای با جداکننده V شکل، وجود المان‌های تولید گردابه و آشفتگی جریان و همچنین وجود نانوسیالات می‌تواند منجر به بروز جریان‌های چندفازی گردد. در این تحقیق به منظور ساده‌سازی استخراج نتایج، از ناهمگنی امکان پذیر در جریان نانوسیال صرف نظر شده و جریان تک‌فازی در نظر گرفته شده است. با معرفی مدل‌های مختلف شبیه‌سازی جریان تک‌فازی 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 شبیه‌سازی جریان در مبدل لوله‌ای با جداکننده V شکل، شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلونت برای چند هندسه مختلف انجام شده و نتایج با روابط و نتایج موجود در مراجع معتبر اعتبارسنجی شد. جریان داخلی، جریانی است که در آن سیال توسط یک سطح محصور می‌شود (مانند جریان در لوله و مبدل). لذا لایه مرزی نمی‌تواند بدون محدودیت گسترش یابد. هنگام بررسی جریان خارجی، فقط این سوال مطرح است که جریان آرام است یا آشفته، ولی برای جریان داخلی باید وجود ناحیه ورودی و یا ناحیه کاملاً توسعه یافته مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق سیال عامل داخل مبدل نانوسیال با خواص ترموفیزیکی ثابت می‌باشد. مطابق با مرجع [۱۵]، برای مقادیر عدد رینولدز کمتر از ۲۳۰۰ جریان به صورت لایه‌ای و برای مقادیر بیشتر از ۴۰۰۰ جریان می‌تواند به صورت جریان آشفته در نظر گرفته شود. برای بدست آوردن معادلات حاکم و سپس حل مسئله، فرضیاتی در نظر گرفته شد که از جمله آن جریان پایا و تراکم ناپذیر است. همچنین خواص سیال (لزجت، ضریب هدایت گرمایی و گرمای ویژه) ثابت در نظر گرفته می‌شوند. برای یک المان جزئی از سیال، سه معادله پایستگی انرژی، پایستگی مومنتوم و پیوستگی را نوشته و با ساده‌سازی، معادلات نهایی حاکم بر جریان به دست خواهد آمد. در وضعیتی که لزجت کم سرعت جریان زیاد طول مشخصه زیاد (مثلاً قطر لوله) باشد، جریان پایداری خودش را حفظ نکرده و به جریان آشفته تبدیل می‌شود. در این جریان ذرات سیال به علت انرژی جنبشی بالا مسیرهای نامنظمی را طی می‌کنند و با برخورد به یکدیگر سبب انتقال انرژی می‌شوند. با افزایش سرعت جریان و متعاقباً افزایش عدد بی‌بعد رینولدز، رژیم جریان تغییر کرده و جریان تحت تاثیر حرکات نامنظم شدیدتری قرار می‌گیرد. این رژیم جریان که مشخصه‌های اصلی آن بی‌نظمی شدید، تصادفی بودن و حرکات نوسانی است، رژیم جریان مغشوش نامیده می‌شود. در جریان داخلی، عدد رینولدز ۲۳۰۰ به عنوان مبنای شروع آشفتگی جریان در نظر گرفته می‌شود و به دلیل اینکه اغلب سیالات صنعتی لزجت پایینی دارند، مطالعه بیشتر جریان‌ها شامل آشفتگی می‌باشد. بنابراین لزوماً ارائه مدل‌هایی برای پیش‌بینی آشفتگی جریان امری ضروری است. نرم‌افزار فلونت که اساس محاسبات و شبیه‌سازی مبتنی بر نتایج آن حاصل شده است، انواع مختلف مدل‌های آشفتگی را برای شبیه‌سازی سیال استفاده می‌کند. در مقایسه با جریان تک فاز، تعداد ترم‌هایی که در جریان‌های چند فاز باید تحلیل شوند، افزایش می‌یابد. انتخاب مدل آشفتگی در جریان تابع عوامل مختلفی است که متغیرهایی نظیر فیزیک جریان، نحوه کارکرد و نتایج، مشخصات پایداری و میزان عملکرد مدل روی شبکه محاسباتی، میزان دقت مدل نسبت به تست

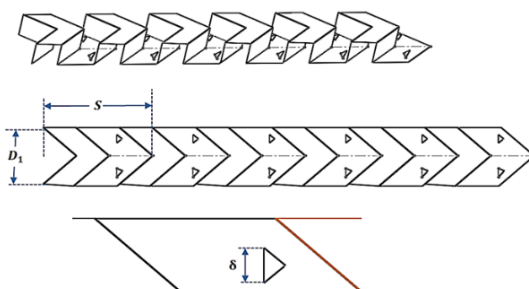


آزمایشگاهی، امکانات سخت‌افزاری و پردازش داده‌ها، میزان زمان قابل قبول برای همگرایی نتایج از جمله مواردی است که می‌توان از آن‌ها نام برد. تحلیل و شبیه‌سازی مبدل لوله‌ای با جداکننده V شکل و باله میانی بر مبنای دینامیکی سیالات محاسباتی سه بعدی به منظور بررسی تاثیر هر یک از پارامترهای هندسی مبدل بر رفتار سیالاتی و انتقال حرارت اجرا شده است. معادلات ناویر استوکس مستقل از زمان با بکارگیری مدل آشفتگی $k-\omega$ حل شده است. درمجرای ورودی مبدل، پروفیل سرعت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. دو پارامتر مهم یعنی مقدار افت فشار و عدد ناسلت به عنوان پارامترهای هدف در این تحقیق انتخاب شده‌اند. ضریب اصطکاک مبدل f از طریق افت فشار ΔP در طول مقطع L ، با قطر هیدرولیکی D_h از رابطه زیر قابل حصول است:

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

$$Nu = \frac{hD_h}{k_f} \quad (2)$$

شکل (۲) ترسیم شماتیکی از مبدل حامل جریان نانوسیال آلومینا است. تحلیل دمای مبدل حامل جریان نانوسیال بر ضریب عملکرد سیستم‌های مختلف تاثیر دارد. کاهش دمای خروجی سیال T_c که در واقع مقارن با افزایش عدد ناسلت مبدل NU_c می‌باشد به عنوان هدف اولیه طراحی انتخاب شده است. هندسه در نرم افزار سالیدورکس ترسیم و طبق روال تحلیل معادلات که در بخش قبل توضیح داده شد، در نرم افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی شده است. میزان کاهش ضریب اصطکاک و افزایش عدد ناسلت مبدل NU_c به عنوان دو هدف شبیه‌سازی به صورت پارامتریک در محدوده های $40mm \leq D_1 \leq 60mm$ ، $\delta = 20mm$ برای تحلیل مطابق با شکل (۲) انتخاب شدند.



شکل (۲): متغیرهای هندسی مبدل لوله ای با جدا کننده V شکل و باله ی میانی.

در ورودی جریان هوا با سرعت یکنواخت و دمای ۳۲۸ درجه کلوین (۵۵ درجه سانتیگراد) وارد مبدل می‌شود. افت فشار درون لوله‌ها در حالت تک‌فازی ΔP_{tp} ناشی از افت فشار مومنتوم (ناشی از تغییرات انرژی جنبشی سیال) ΔP_{mom} و افت فشار اصطکاکی درون مبدل ΔP_{frict} و از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

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

که در این رابطه، افت فشار ناشی از اصطکاک مبدل به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود [۱۶]:

$$\Delta P_{frict-TP} = 2f_{tp} \frac{L}{D_{in}} \frac{G_r^2}{\rho_H} \quad (4)$$

که در این رابطه، G_r شار جرمی نانو سیال، L طول مبدل، ρ_H و f_{tp} نیز به ترتیب چگالی همگن و ضریب اصطکاک مبدل است.

$$f_{tp} = [0.79 \ln(Re_{D_{in}}) - 1.64]^{-2} \quad (5)$$

$$G_r = \frac{4\dot{m}_r}{\pi D_{in}^2} \quad (6)$$

عدد بی بعد رینولدز در رابطه مرتبط با اصطکاک به صورت زیر حاصل می‌شود:



$$Re_{D_{in}} = \frac{G_r D_{in}}{\mu_{tp}} \quad (7)$$

چون سیال تک فاز در نظر گرفته شده است، برای حصول چگالی موثر، باید از فرمول مرتبط با کسرهای حجمی استفاده گردد. چگالی ρ_H باید بر اساس کسر حجمی x برای فازهای جامد نانو ذرات S و مایع l به صورت رابطه (۸) تعریف شوند:

$$\rho_H = \varepsilon_H \rho_S + (1 - \varepsilon_H) \rho_l \quad (8)$$

در رابطه مرتبط با چگالی، ε_H کمیتی به نام کسر حجمی همگن بوده و به صورت زیر تعریف می شود [۱۷]:

$$\varepsilon_H = \frac{1}{1 + \frac{(1-x)\rho_S}{x\rho_l}} \quad (9)$$

با تعریف کمیت‌های لازم در این بخش، افت فشار ناشی از ممنوم را می‌توان با رابطه (۱۰) بیان کرد:

$$\Delta p_{mom} = G_r^2 \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H)\rho_l} + \frac{x^2}{\varepsilon_H \rho_S} \right]_{out} - \left[\frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H)\rho_l} + \frac{x^2}{\varepsilon_H \rho_g} \right]_{in} \right\} \quad (10)$$

رابطه (۱۰) بیان کننده اختلاف انرژی جنبشی بین ورودی و خروجی نانوسیال می‌باشد. افت فشار کل در یک لوله می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\Delta p_{tp} = \Delta p_{ftp} + \Delta p_{htp} + \Delta p_{atp} \quad (11)$$

که در آن، افت فشار استاتیکی برابر با Δp_{ftp} ، Δp_{htp} افت فشار هیدرواستاتیکی و افت فشار ناشی از شتاب جریان Δp_{atp} می‌باشد. بنابراین:

$$\Delta p_{tp} = \Delta p_{ftp} + \Delta p_{htp} \quad (12)$$

در مبدل، جریان موازی همسو، اختلاف دما، ابتدا زیاد است. اما با افزایش فاصله سریعاً کاهش می‌یابد و به طور مجانبی به صفر نزدیک می‌شود. باید توجه داشت که در چنین تبدلی دمای خروجی سیال سرد (نانوسیال)، هیچ وقت از دمای ورودی گرم بیشتر نمی‌شود. برای موازنه‌های انرژی و تحلیل پیرو آن، فرض‌هایی نظیر ناچیز بودن رسانش محوری در امتداد مبدل و ناچیز بودن تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی، ثابت بودن ضریب کلی انتقال گرما در نظر می‌گیریم. همچنین عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Re = \frac{DPu}{\mu} \quad (13)$$

ضریب انتقال حرارت متوسط رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$h = \frac{q}{\Delta T} \quad (14)$$

که در آن q ، فلاکس حرارتی بوده و ΔT توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن T_W نشان دهنده دمای متوسط دیواره و T_f دمای متوسط سیال می‌باشد:

$$\Delta p = T_W - T_f \quad (15)$$

به منظور اعتبارسنجی نتایج مبدل، نتایج شبیه‌سازی با سیال عامل آب برای مبدل با نتایج عددی مرجع [۱۸] در رینولدزهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. قرابت مناسب بین نتایج عددی بدست آمده و نتایج عددی مرجع [۱۸]، اطمینان از حصول نتایج منطقی از تحلیل حرارتی مبدل را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه‌ی ضریب اصطکاک و عدد ناسلت مبدل با نتایج عددی [۱۸].

عدد ناسلت Nu	ضریب اصطکاک f در رینولدز Re
----------------	---------------------------------



Re	مطالعه حاضر	مرجع [۱۸]	درصد اختلاف	مطالعه حاضر	مرجع [۱۸]	درصد اختلاف
۳۰۰۰	۰/۰۳۸	۰/۰۴۳۶	۱۲/۸	۰/۷	۰/۶۶۵	۵/۲۶
۴۰۰۰	۰/۰۳۸۸	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

در شبیه‌سازی جریان درهم 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 ۳۰۰۰۰۰ سلول به ۳۵۰۰۰۰۰، ۴۰۰۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰۰۰ سلول در رینولدز ۳۰۰۰ تغییر کرد تا حساسیت پاسخ‌ها به ابعاد شبکه بندی مشخص گردد. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر، ضریب اصطکاک، ضریب افت فشار و عدد ناسلت حاصل شده در مقاطعی 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 هزینه محاسباتی که در عملیات تحلیل پارامتریک به آن پرداخته خواهد شد، تعداد ۴۰۰۰۰۰ سلول به عنوان تعداد مناسب شبکه بندی در شبیه‌سازی عددی مد نظر قرار خواهد گرفت.

جدول (۲): ارزیابی عدد ناسلت، ضریب افت فشار و ضریب اصطکاک در مقاطعی از کانال با تعداد مختلف سلول

متغیر	۳۰۰۰۰۰۰ سلول	۳۵۰۰۰۰۰ سلول	۴۰۰۰۰۰۰ سلول	۵۰۰۰۰۰۰ 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

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 دی اکسید تیتانیوم با درصدهای حجمی مختلف به منظور تحلیل اثر نوع نانوسیال بر عدد ناسلت استفاده شده است. خواص ترموفیزیکی آب، نانوذرات اکسید آلومینیوم و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این تحقیق مطابق با جداول (۳)، (۴) و (۵) می‌باشد [۱۹-۲۱].

جدول (۳): خواص ترموفیزیکی آب (سیال پایه) [۱۹].

متغیر	واحد	مقدار
ضریب هدایت حرارتی	$w/m^2 \cdot ^\circ K$	۰/۶
ظرفیت گرمایی ویژه	$J/kg \cdot ^\circ K$	۴/۱۸۴
چگالی	kg/m^3	۱۰۰۰
لزجت	$mPa \cdot s$	۰/۰۰۱

جدول (۴): خواص نانوذرات دی اکسید آلومینیوم [۲۰].



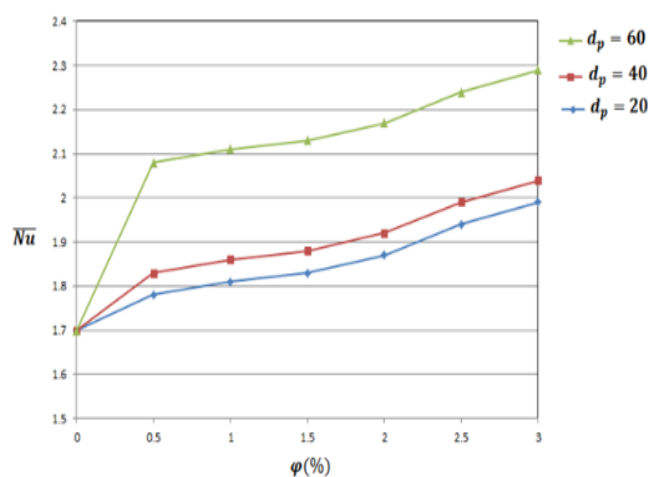
مقدار	واحد	متغیر
۴۰	$w/m^2 \text{ } ^\circ K$	ضریب هدایت حرارتی
۷۶۵	$J/kg \cdot ^\circ K$	ظرفیت گرمایی ویژه
۳۹۷۰	kg/m^3	چگالی

جدول (۵): خواص نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم [۲۱].

مقدار	واحد	متغیر
۸/۹۵	$w/m^2 \text{ } ^\circ K$	ضریب هدایت حرارتی
۶۸۶/۲	$J/kg \cdot ^\circ K$	ظرفیت گرمایی ویژه
۳۲۵۰	kg/m^3	چگالی

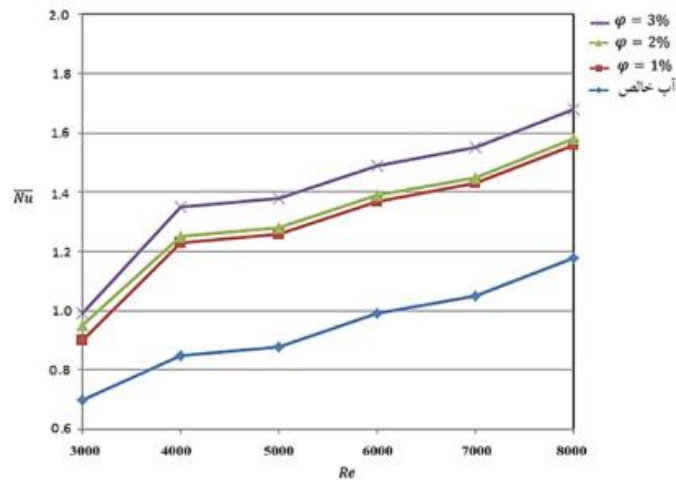
نتایج و بحث

به منظور بررسی تاثیر قطرهای مختلف نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجایی مبدل دارای جداکننده V شکل و 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 عدم تکرار بیان نمی‌شود)، که مشاهده می‌شود، ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در تمام غلظت‌ها روند افزایشی متناسب با قطر داشته است.



شکل (۳): تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در مبدل با جداکننده V شکل و باله میانی در قطرهای مختلف نانوذرات آلومینا.

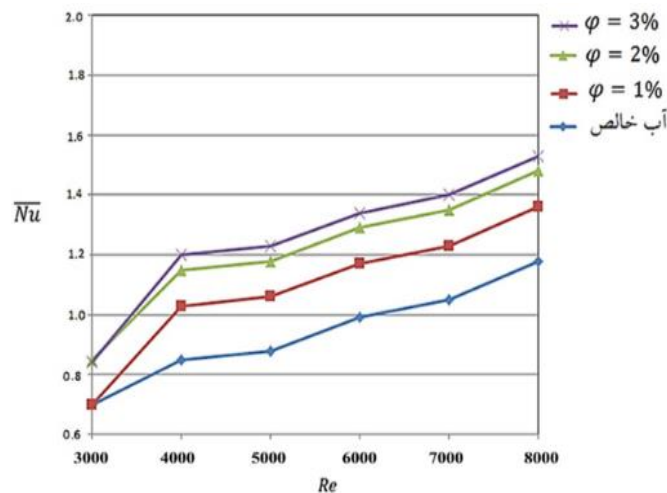
افزایش عدد رینولدز در کلیه درصدهای حجمی، افزایش عدد ناسلت را در پی دارد. همچنین نانوسیال آلومینا نسبت به نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم دارای عدد ناسلت بیشتری خواهد بود. از طرفی در هر دو نانوسیال با فرض ثابت بودن دمای ورودی ۵۵ درجه سانتیگراد و قطر نانوذرات ۲۰ نانومتر، با افزایش درصد حجمی ذرات در رینولدز ثابت، عدد ناسلت نیز افزایش خواهد داشت.



شکل (۴): نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط نانوسیال آلومینا بر حسب عدد رینولدز در درصدهای حجمی متفاوت در دمای ورودی ۵۵ درجه سانتیگراد و قطر ذرات ۲۰ نانومتر.

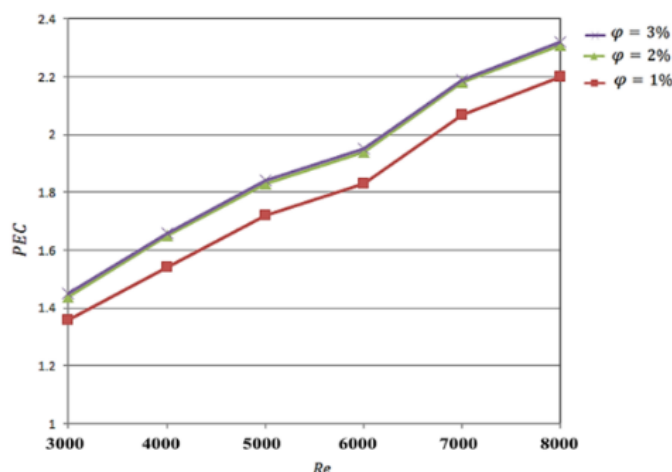
در این بخش ضریبی به نام شاخص ارزیابی عملکرد به ترتیب زیر تعریف می‌شود که می‌تواند به صورت همزمان ضریب اصطکاک و عدد ناسلت را در تحلیل‌های مقایسه‌ای لحاظ کند:

$$PEC = \frac{\frac{Nu}{Nu_b}}{\frac{f}{f_b}} \quad (16)$$

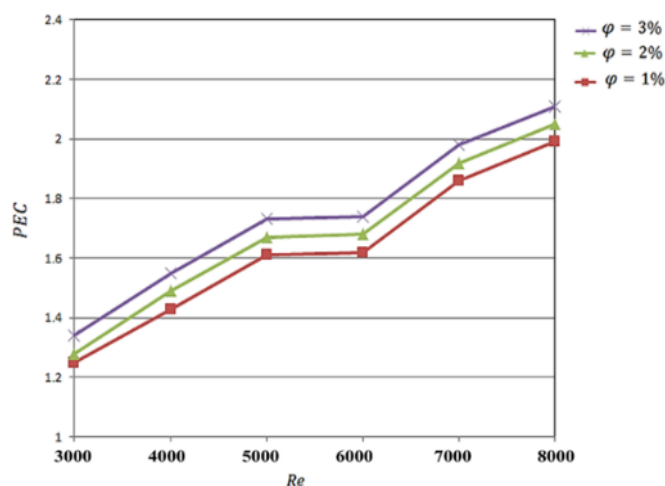


شکل (۵): نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم بر حسب عدد رینولدز در درصدهای حجمی متفاوت متفاوت در دمای ورودی ۵۵ درجه سانتیگراد و قطر ذرات ۲۰ نانومتر.

در شکل‌های (۶) و (۷) نتایج نشان می‌دهد 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 می‌شود، هرچند این افزایش برای درصد حجمی ۳ درصد نسبت به درصد حجمی ۲ درصد برای نانوسیال آلومینا به چشم نمی‌خورد. این نتیجه به این معناست که افزایش درصد نانوذرات آلومینا به بیش از ۳ درصد حجمی، تأثیر چندانی بر ارتقای شاخص ارزیابی عملکرد نخواهد داشت. با مقایسه 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 ارزیابی عملکرد نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم نسبت 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.

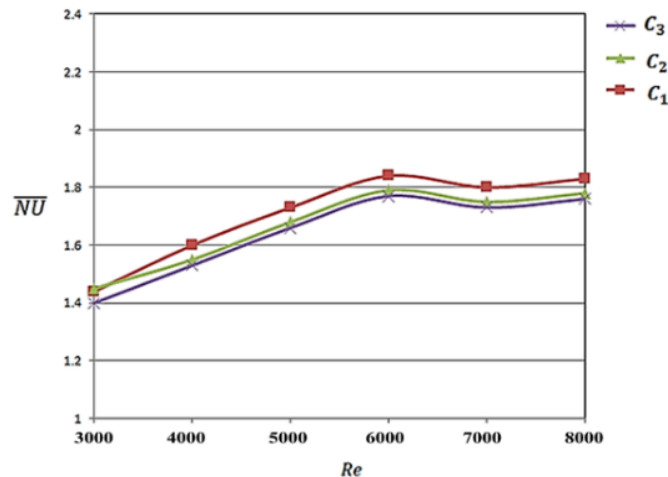
همچنین تاثیر پارامترهای هندسی مبدل حرارتی در دمای ورودی ۵۵ درجه‌ی سانتیگراد و قطر ذرات ۲۰ نانومتر، همچون قطر پره D_1 ، ابعاد باله δ و فاصله مرکز به مرکز جداکننده S مطابق با شکل (۲) مورد بررسی قرار گرفته است. نوع نانوسیال آلومینا با درصد حجمی ۳ درصد به دلیل عملکرد بهتر حرارتی و سیالاتی، به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شد. در جدول (۶)، مقادیر در نظر گرفته شده برای هر یک از پارامترهای هندسی که برای تحلیل حرارتی و سیالاتی در نظر گرفته خواهد شد، فهرست شده است.

جدول (۶): مقادیر متغیرهای هندسی مبدل حرارتی با جداکننده V شکل و باله میانی.

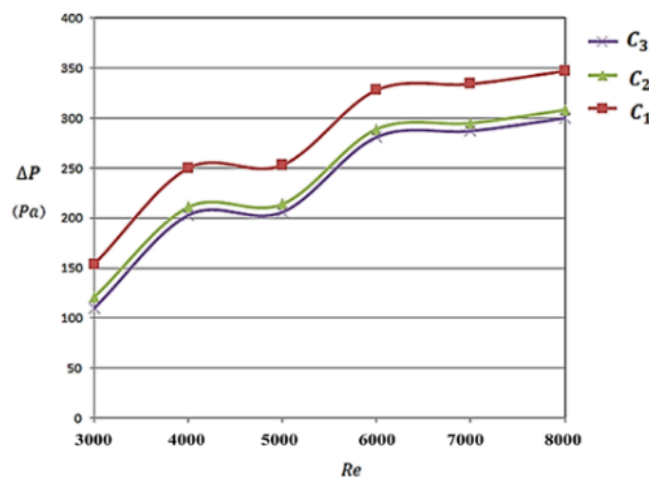
متغیر	C_1	C_2	C_3
$D_1(mm)$	۴۰	۵۰	۶۰
$\delta(mm)$	۲۰	۲۰	۲۰
$S(mm)$	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰



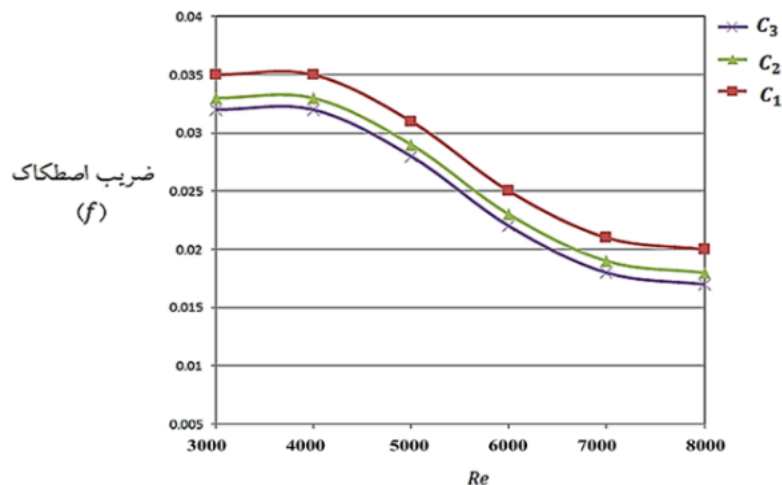
به منظور بسط تحلیل پارامتریک هندسی در مبدل حرارتی در این بخش نتایج مرتبط با تاثیر تغییر قطر D لوله مبدل مورد بحث قرار گرفته است. مطابق با شکل (۸) با افزایش قطر از ۴۰ به ۶۰ میلیمتر در عدد رینولدز از ۳۰۰۰ تا ۸۰۰۰ باعث افزایش عدد ناسلت می شود. اما مطابق با شکل‌های (۹) و (۱۰) با افزایش قطر افت فشار به شدت افزایش یافته است و همچنین ضریب اصطکاک به شدت کاهش یافته است.



شکل (۸): نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز با تاثیر تغییر قطر D لوله ی مبدل با جدا کننده V شکل و باله میانی.



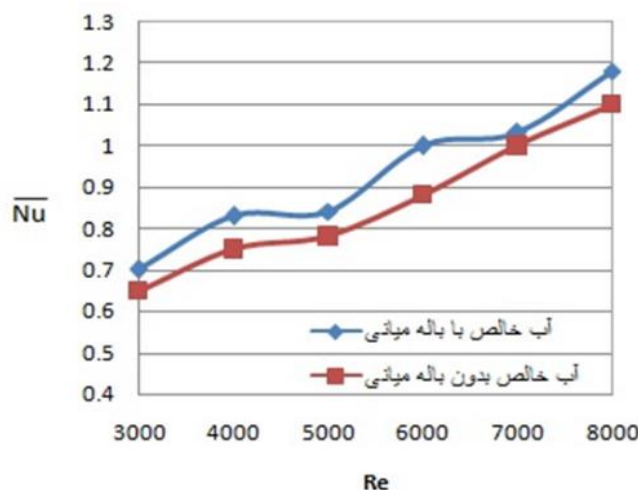
شکل (۹): نمودار تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز با تاثیر تغییر قطر D لوله ی مبدل با جدا کننده V شکل و باله میانی.



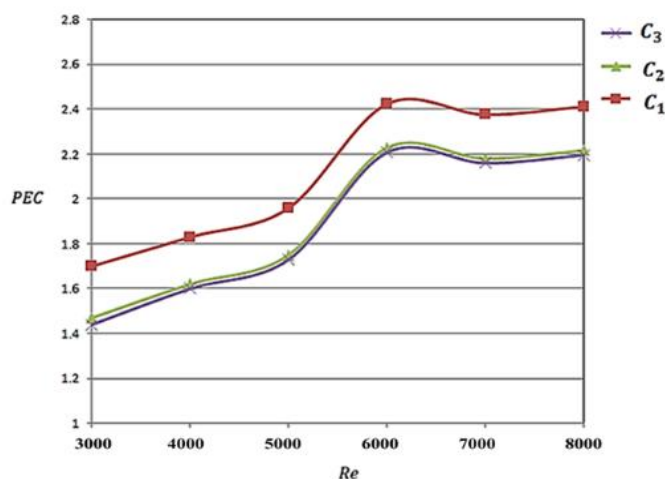
شکل (۱۰): نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز با تاثیر تغییر قطر D لوله مبدل با جدا کننده V شکل و باله میانی.



مطابق با شکل (۱۱) مشاهده شد با وجود باله میانی میزان عدد ناسلت در رینولدزهای برابر بیشتر است. همچنین با بررسی شاخص ارزیابی عملکرد در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که با افزایش قطر از ۴۰ به ۶۰ میلیمتر لوله مبدل با جدا کننده V شکل و ایجاد باله میانی بطور میانگین افزایش ۱۹٫۳ درصدی در شاخص ارزیابی عملکرد دیده می‌شود.



شکل (۱۱): نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز با تاثیر ایجاد باله میانی بین گام‌های جدا کننده V شکل.



شکل (۱۲): نمودار تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد بر حسب عدد رینولدز با تاثیر تغییر قطر D لوله مبدل با جدا کننده V شکل و باله میانی.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از بیان مقدمه‌ای از ویژگی‌های نانوسیالات، انگیزه‌های تحلیل و بررسی در زمینه افزایش مقدار انتقال حرارت در مبدل حرارتی با جدا کننده V شکل و باله میانی بیان شد. با شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس فلونت و اعتبارسنجی با نتایج مقالات موجود، متغیرهای حرارتی و سیالاتی همچون عدد ناسلت، افت فشار و ضریب اصطکاک حاصل شد و مورد تحلیل پارامتریک قرار گرفت. سیال عامل انتخاب شده در این تحقیق، دو نوع نانوسیال آلومینا و دی‌اکسید 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 جدا کننده V شکل و باله میانی، فشار غیرخطی و میدان‌های سرعت مختلف در نرم‌افزار انسیس فلونت، با دقت قابل قبولی به صورت عددی شبیه‌سازی و با نتایج عددی موجود در مقالات معتبر اعتبارسنجی شد. به دلیل کاهش هزینه محاسباتی در عملیات تحلیل پارامتریک به آن پرداخته خواهد شد، تعداد ۴۰۰۰۰۰ 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 حالی است 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 مقایسه 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 ارزیابی عملکرد نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم نسبت به نانوسیال آلومینا نسبت به تغییرات عدد رینولدز شدیدتر است. با افزایش قطر لوله جداکننده V شکل، بدون افت شدید حرارتی، ضرایب اصطکاک را به شدت کاهش و افت فشار را به مقدار زیادی افزایش داد. ایجاد باله میانی باعث افزایش عدد ناسلت شده است.

تشکر و قدردانی

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.

فهرست علائم

علائم انگلیسی	علائم یونانی
قطر لوله مبدل، m^2	D
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، m^2	L
فاز مایع نانو ذرات	l
عدد ناسلت	NU
عدد ناسلت سیال خروجی	NU_c
شاخص ارزیابی عملکرد	PEC
فلاکس حرارتی	Q
	ρ
	ΔT
	Δp
	Δp_{atp}
	Δp_{ftp}
	Δp_{frict}
	Δp_{htp}
	Δp_{mom}
	Δp_{tp}
	ε_H
	ρ
	\emptyset
طول هر ضلع باله میانی	
اختلاف دما	
افت فشار	
افت فشار ناشی از شتاب جریان	
افت فشار استاتیکی	
افت فشار اصطکاکی مبدل	
افت فشار هیدرواستاتیک	
افت فشار مومنوم	
افت فشار در حالت تک فازی	
بازده کسر حجمی همگن	
چگالی	
غلظت نانو ذرات	

مراجع

- [1] Masuda, H., Ebada, A., Teramae, K., Hishinuma, N., (1993) ., Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersion Ultra-Fine particles ,Netsu Bussei,Scientific Research,7(4), pp 227-233.
- [2] Buongiorno, J., (2006) ., Convective transport in nanofluids ASME Transactions Journal of Heat Transfer, 128 , pp 240-250.
- [3] Jou, R., Tzeng, S., (2006) , Numerical research of nature convective heat transfer enhancement filled with nanofluids in rectangular in enclosure, International Communication Heat and Mass Transfer, 33, pp 727-736.



- [4] Pakravan, H. A., Yaghoubi, M., (2013) ., Analysis of nanoparticles migration on natural convection heat transfer of nanofluids ,International journal of Thermal Science, 68, pp 79-93.
- [5]pak, B., and Cho. Y. I. , (1998) ., “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle, Exp. Heat Transfer”, 11, pp 151–170.
- [6] Das, S. Putra, K., N. Thiesen, P. and Roetzel. W.(2003)., “Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids”, Journal of Heat Transfer, 125, pp 567-574.
- [7] He; Y Jin; Y. Chen; H. Ding; Y. Cang, D. Lu, H. ,(2007) “Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, pp 2272– 2281.
- [8] Lotfi, R., Saboohi, Y., Rashidi, A. M., (2010) "Numerical study of forced convective heat transfer of Nanofluids: Comparison of different approaches", International Communications in Heat and Mass Transfer, 37(1), pp. 74-78.
- [9] Farajollahi; B.. Etemad; S.Gh Hojjat, M. ,(2010) “Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger”, International Journal Heat and Mass Transfer, 53, pp. 12– 17.
- [10]Kannadasan,N,Ramanathan,K,Sureh,S,(2012),Comparison of heat transfer and pressure drop in horizontal and vertical helically coiled heat exchanger with CuO/water based nano fluids,Experimental Thermal and Fluids Science,42, PP 64-70.
- [11]Minghai Xu , Hui Lu , Liang Gong , Chai., John C. , Xinyue Duan(2016) “Parametric numerical study of the flow and heat transfer in microchannel with dimples”, Applied International Communications in Heat and Mass Transfer, 76,PP 348-357.
- [12]Junmei Wu, Jiyun Zhao, Jiang Lei, Bo Liu, (2016) ., “Effectiveness of nanofluid on improving the performance of microchannel heat sink”, Applied Thermal Engineering,101, pp 402–412.
- [13] Rui-jin Wang, Jia-wei Wang, Bei-qi Lijin, Ze-fei Zhu, (2018), “Parameterization Investigation on the Microchannel Heat Sink with Slant Rectangular Ribs by numerical simulation”,Applied Thermal Engineering, 50(50), pp 428-438.
- [14]Faridi Khouzestani,R,Ghafouri,A,(2020) , Numerical study on heat transfer and nanofluid flow in pipes fitted with different dimpled spiral center plate, Journal SN Applied Sciences.2(2), pp 1-19.
- [15]Rahimi Asl,R,Soltani,M,(2003), Computational fluid dynamics with the help of FLUENT software,Tarah, 1, pp1-448.
- [16]Kotas, T. J., (1985), The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Butterworths, London, United Kingdom, 197.
- [17] Fan, L. T. Lin S. T. and Azer, N. Z(1978). Surface renewal model of condensation heat transfer in tubes with in-line static mixers, Int. J. Heat Mass Transfer 21, pp 849-854.
- [18] Jedsadaratanachai W., Boonloi A., (2017), Performance analysis and flow visualization in a round tube heat exchanger inserted with wavy V-ribs, Advances in Mechanical Engineering 9(9), pp 1–16.
- [19] Suriya S. Uma Devis.Anjali Devi, ,S. P(2017) Heat transfer enhancement of Cu-al₂O₃/water hybrid nanofluid flow over a stretching sheet, Journal of the Nigerian Mathematical Society.,36(2), pp 419-433.
- [20] Versteeg H. K. and Malalasekera, W., (1995). “An introduction to computational fluid dynamics,” The Finite Volume Method, Essex, Longman Sci. Tech., pp1-517.
- [21] Abbasian Arani, A.A. , Amani, J. (2012), Experimental study on the effect of TiO₂-water nanofluid on heat transfer and pressure drop, Experimental Thermal and Fluid Science 42, pp 107–115.