



بررسی تاثیر آشفته ساز، نانو سیال و هندسه بر عملکرد حرارتی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله

احمد رضا رحمتی^{۱*}، محمد رنجبار^۲^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴

چکیده

در کار حاضر عملکرد استفاده از آشفته‌ساز نوار تابیده و میکروفین، استفاده از نانوسیال و تغییر هندسه در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور مبدل حرارتی پوسته و لوله با درصد برش بافل و تعداد گذر لوله مختلف در چهار حالت متفاوت با استفاده از نرم افزار HTRI مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت سمت پوسته مربوط به حالتی است که برش بافل ۳۰ درصد باشد. از طرفی با افزایش غلظت نانو سیال افت فشار سمت پوسته ۴/۴۸ تا ۵/۶۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آشفته ساز میکروفین مناسب تر از نوار تابیده بوده و استفاده از آشفته ساز میکروفین ضریب انتقال حرارت سمت پوسته را ۵/۷۶ تا ۱۲/۷۷ درصد نسبت به استفاده از آشفته‌ساز نوار تابیده افزایش می‌دهد. همچنین ضریب انتقال حرارت سمت لوله را به ترتیب به طور میانگین ۶۲ و ۷۸ درصد نسبت به حالت بدون آشفته‌ساز افزایش می‌دهد. اضافه براین، بیشینه ضریب انتقال حرارت سمت پوسته در تعداد گذر لوله ۳ اتفاق می‌افتد و در تعداد گذر لوله بیشتر از ۳، عملکرد حرارتی مبدل کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: مبدل حرارتی پوسته و لوله؛ آشفته ساز نوار تابیده؛ آشفته ساز میکروفین؛ نانوسیال؛ HTRI.

Investigating the effect of turbulator, nanofluid and geometry on the thermal performance of shell and tube heat exchangers

Ahmad Reza Rahmati^{1,*}, Mohammad Ranjbar²

¹ Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

² MSc Student, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract

In the present work, the performance of using twisted tape and microfin turbulators, using nanofluid and changing geometry in a shell and tube heat exchanger has been evaluated. For this purpose, the shell and tube heat exchanger with the percentage of baffle cutting and the number of different tube passes in four different modes are studied using HTRI software. The results show that the highest value of the heat transfer coefficient on the shell side corresponds to the case where the baffle cut is 30%. On the other hand, with the increase in nanofluid concentration, the pressure drop on the shell side increases from 4.48 to 5.66%. Also, the results show that the use of a microfin turbulator is more suitable than a twisted tape turbulator and the use of a microfin turbulator increases the heat transfer coefficient on the shell side by 5.76 to 12.77% compared to the use of a twisted tape turbulator. Also, it increases the heat transfer coefficient of the pipe side by 62 and 78% on average, respectively, compared to the case without the turbulator. In addition, the maximum heat transfer coefficient on the shell side occurs at the number of tube passes of 3, and the thermal performance of the heat exchanger decreases when the number of tube passes is greater than 3.

Keywords: shell and tube heat exchanger, Twisted tape & microfin turbulator; nanofluids; HTRI.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به گران شدن انرژی، اتفاقات سیاسی و جنگ بر سر منابع انرژی که به صورت فوق العاده زیاد در سطح جهانی بر روی انرژی تأثیر می‌گذارند، اهمیت مصرف بهینه سوخت و انرژی بیش از پیش احساس می‌شود و دانشمندان همواره در صدد تحقیقات جدید جهت بهینه‌سازی دستگاه‌های حرارتی صنعتی هستند. یکی از پر کاربردترین دستگاه‌های تبادل حرارتی که بیشترین کاربرد را در میان تجهیزات انرژی در صنایع مختلف به خصوص نفت، گاز و پتروشیمی را دارا می‌باشند، مبدل‌های حرارتی از نوع پوسته و لوله هستند که در تمامی پالایشگاه‌ها و نیروگاه‌ها بلا استثنا از آنها استفاده می‌شود و با استفاده از روش‌های فعال و غیر فعال اقدام به بهینه‌سازی حرارتی هرچه بیشتر آنها می‌شود.

روش‌های غیر فعال بیشتر مورد توجه محققین بوده بدلیل آنکه این روش‌ها نسبت به روش‌های فعال بسیار کم هزینه تر بوده و لذا استفاده از آشفته ساز و نانوسیالات و لوله‌های پرده‌دار و غیره در مقابل بازده حرارتی که دارد، بسیار مورد توجه است.

کاربرد آشفته ساز و نانو سیال به عنوان یک روش غیر فعال در مبدل‌های حرارتی است که با ایجاد حرکات گردابی و گردیان شدیدتر روی مرزها باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی شده و کمک شایانی به راندمان حرارتی مبدل حرارتی پوسته و لوله از پیش طراحی شده می‌شود.

آنتنوپولو و همکاران [۱] با استفاده از نرم افزار Aspen EDR به بررسی مبدل حرارتی پوسته و لوله و کولر هوایی در یک چرخه فلاش سه جانبه^۱ با سیالات کاری متفاوت از جمله هیدروفلوئورو کربن‌ها و هیدرو فلوئورو اسیدها پرداختند. در این تحقیق نشان داده شد با افزایش دمای ورودی هوا، در حین حالی که ضریب انتقال حرارت کلی برای هر سیال کاری افزایش می‌یابد، مساحت سطح مبدل حرارتی نیز افزایش پیدا می‌کند.

رزاکی و همکاران [۲] عملکرد ترمو هیدرولیکی لوله‌های مارپیچ بر انتقال حرارت جریان مغشوش آب در محدوده اعداد رینولدز ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ را با استفاده از نرم افزار فلونتت مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که استفاده از لوله‌های مارپیچ، راندمان را در مقایسه با لوله‌های صاف با سطح یکسان،

حدود ۷۰ درصد افزایش داده است؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که با تغییر گام مارپیچی لوله و تغییر هندسه سطح لوله هنگام نزدیک شدن به سطح مقطع بیضوی شکل، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

سایفن و همکاران [۳] به بررسی اثر نرخ دبی جرمی بر بهینه‌سازی ضریب انتقال حرارت و افت فشار مبدل حرارتی مارپیچی دو لوله‌ای با استفاده از آشفته سازهایی به شکل مثلثی، مستطیلی و ترکیبی پرداختند. نتایج نشان دادند که استفاده از آشفته‌ساز به شکل مثلثی در وجه بیرونی لوله داخلی بهترین نتیجه را ارائه می‌دهد؛ همچنین نشان داده شد که زاویه چرخش گام ۲۳ درجه در هندسه مبدل حرارتی کمینه افت فشار و بیشینه ضریب انتقال حرارت جابجایی را به دنبال داشته است.

سانسروال و همکاران [۴] در مطالعه‌ای تجربی و آزمایشگاهی در رابطه با افزایش عملکرد حرارتی مبدل حرارتی دو لوله‌ای هم مرکز در شرایط جریان آشفته در محدوده اعداد رینولدز ۹۰۰۰ تا ۳۸۰۰۰ با استفاده از آشفته ساز فبری تخت^۲ به بررسی پارامترهای تأثیرگذار اصطکاک، ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت پرداختند. این آشفته‌ساز یک طراحی جدید متشکل از حلقه‌های دایره‌ای، فبرها و نوار مارپیچ تخت است تا توزیع بهتر جریان سیال با تلفات اصطکاک کمتر را ارائه دهد. در این تحقیق به منظور ایجاد بیشینه عملکرد ترمو هیدرولیکی، چندین نوع از این آشفته‌ساز با اندازه گام‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج کار نشان می‌دهد که با کاهش اندازه گام، نرخ انتقال حرارت و ضریب اصطکاک بصورت همزمان افزایش پیدا می‌کند؛ لذا از این پژوهش یک مقدار گام بهینه برای آشفته ساز پیشنهاد می‌گردد تا با استفاده از آن علاوه بر افزایش نرخ انتقال حرارت، میزان افت فشار به میزان قابل توجهی افزایش پیدا نکند.

امینی فر و همکاران [۵] عملکرد هیدرو ترمودینامیکی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله را با استفاده از نانو سیال‌ها و آشفته سازهای نوار مارپیچ با شیار مثلثی و لوله‌های شیاردار روی سطح خارجی در اعداد رینولدز ۳۵۰۰ تا ۱۶۰۰۰ بصورت تجربی و آزمایشگاهی مورد بررسی داده‌اند و تأثیر آنها را روی مقادیر ضریب انتقال حرارت، ضریب اصطکاک و معیار ارزیابی عملکرد بررسی نمودند. در این کار از نانوسیال آب - اکسید

^۲ Flat spring turbulator^۱ Trilateral Flash Cycle

انتخاب شده که سیال سرد غیرهمسو در آن جریان داشته تا کویل‌های مارپیچ ساده و میکرو فین را خنک کرده و نتایج با یکدیگر مقایسه شوند. نتایج کار تجربی ایشان نشان دادند، میکروفین کردن لوله‌های مارپیچ و افزایش زاویه آن و نیز استفاده از نانو سیالات باعث بهبود فرایند انتقال حرارت و افزایش افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابجایی خواهد شد. سینگ و سرکار [۸]، طی پژوهشی تجربی سه نوع آشفته ساز سیم پیچ مخروطی شکل با هندسه‌های مختلف جهت بررسی انتقال حرارت مبدل حرارتی دو لوله‌ای با استفاده از نانو سیال اکسید آلومینیوم و اکسید منیزیم در سیال پایه آب برای جریان آشفته را به کار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که آشفته ساز سیم پیچ مخروطی در جهت جریان بیشترین عدد ناسلت و ضریب عملکرد حرارتی را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین نشان دادند که استفاده از نانو سیالات و ترکیب نوار تابیده و سیم پیچ بسیار مناسب برای افزایش راندمان حرارتی مبدل‌های دو لوله‌ای است.

فارت و همکاران [۹] اثر نانو سیال آب - گرافن را بر روی عملکرد حرارتی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله عمودی بصورت تجربی بررسی نمودند. در این تحقیق نانو سیال آب - گرافن در سمت لوله مبدل حرارتی استفاده شد و تاثیر پارامترهای مختلف نظیر غلظت نانو سیال، سرعت جریان و ورودی دما بر روی ضریب انتقال حرارت و راندمان حرارتی مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانو سیال آب - گرافن باعث افزایش عملکرد حرارتی مبدل حرارتی پوسته و لوله عمودی می‌شود. حداکثر افزایش ضریب انتقال حرارت ۲۹ درصد با استفاده از غلظت وزنی ۰/۲ درصد نانو سیال آب - گرافن به دست آمد. علاوه بر این، میانگین راندمان حرارتی مبدل حرارتی با استفاده از نانو سیال آب - گرافن، ۱۳/۷ درصد افزایش یافت؛ همچنین استفاده از نانو سیال با غلظت وزنی ۰/۲ درصد، راندمان حرارتی طرف گرم (سمت لوله) و سرد (سمت پوسته) را به ترتیب ۲۴/۴ و ۷/۳ درصد افزایش داده است.

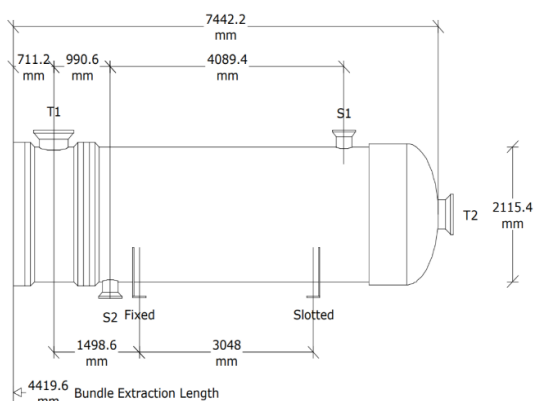
ایلماز و همکاران [۱۰] به بررسی افزایش انتقال حرارت در یک کلکتور خورشیدی سهموی با استفاده از آشفته‌ساز سیم پیچ پرداخته‌اند و نشان دادند که استفاده از آشفته‌ساز باعث افزایش انتقال حرارت و راندمان ترمودینامیکی شده، در حالی که راندمان انتقال حرارت ۱/۴ درصد و عملکرد آن ۱۸۳ درصد

منیزیم با غلظت ۰/۷ و ۱ درصد استفاده شد و نتایج کاربرد همزمان نانو سیال آب - اکسید منیزیم، لوله‌های شیار دار و نوارهای مارپیچ با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد، استفاده همزمان نانو سیال آب - اکسید منیزیم با غلظت ۰/۷ درصد، لوله‌های شیار دار و نوارهای پیچ خورده برش مثلثی در سطح داخلی لوله‌های مبدل حرارتی پوسته و لوله باعث افزایش ۴۸ درصدی عملکرد حرارتی، افزایش جزئی ۶/۳ درصدی در ضریب اصطکاک و همچنین افزایش ۴۶ درصدی در معیار ارزیابی عملکرد می‌شود؛ همچنین نتایج حاکی از آن است که استفاده همزمان نانو سیال آب - اکسید منیزیم با غلظت یک درصد، لوله‌های شیار دار و نوارهای پیچ خورده با شیار مثلثی در سطح داخلی لوله‌های مبدل حرارتی باعث افزایش ۷۲ درصدی عملکرد حرارتی، افزایش جزئی ۶/۹ درصدی در ضریب اصطکاک و همچنین افزایش ۷۰ درصدی در معیار ارزیابی عملکرد می‌شود.

کیا و همکاران [۶] طی پژوهشی تجربی و آزمایشگاهی با استفاده از نانو سیال اکسید آلومینیوم در سیال پایه روغن به همراه لوله مارپیچ همراه با آشفته ساز در مبدل حرارتی پوسته و لوله در رژیم جریان آرام در محدوده اعداد رینولدز ۳۰۰ تا ۹۵۰ و برای دو شار حرارتی ۳۹۵۰ و ۵۲۸۰ وات بر متر مربع به بررسی انتقال حرارت و افت فشار نانو سیال پرداختند. هر کدام از شار حرارتی برای چهار حالت روغن در دماهای ۶۰، ۵۰، ۴۰ و ۳۰ درجه سانتی گراد به کار برده شده است. لازم به ذکر است، آزمایش‌ها برای هشت دبی مختلف ۲۵، ۲۲/۵، ۲۰، ۱۷/۵، ۱۵، ۱۲/۵، ۱۰، ۷/۵ لیتر بر دقیقه انجام شده است. غلظت نانو ذره نیز در چهار درصد وزنی متفاوت (۰/۵، ۰/۳، ۰/۱، ۰/۰۵ درصد) استفاده شده است. در ادامه با بررسی اثر آشفته ساز در مبدل حرارتی پوسته و لوله نشان داده شد که استفاده از آشفته‌ساز تاثیر فوق العاده‌ای روی ضریب کلی انتقال حرارت داشته و باعث افزایش ۵۲/۸۶ درصدی آن شده است.

دستمالچی و همکاران [۷] در تحقیقی تجربی و آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم با اعداد کسر حجمی ۰، ۰/۵، ۱۰ در لوله‌های مارپیچ میکرو فین دار با زوایای متفاوت ۱۸ و ۲۵ درجه و نیز دو قطر متفاوت در مبدل حرارتی پوسته و لوله در محدوده اعداد رینولدز ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ پرداختند. پوسته این مبدل استوانه‌ای دو جداره از جنس پلکسی گلاس شفاف

ساز نوار تابیده و میکروفین است که تو سط نرم افزار HTRI طراحی شده و از نظر مشخصات هندسی مشابه طرح کرمانی [۱۴] و طرح لئونگ و همکاران [۱۵] است. مبدل حرارتی مورد استفاده در کار حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. شرایط کاری و مشخصات آشفته سازها به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آمده است؛ همچنین هندسه آشفته ساز نوار تابیده در شکل ۲ ارائه گردیده است.



شکل ۱- مبدل حرارتی مورد استفاده در کار حاضر [۱۴ و ۱۵]

جدول ۱- شرایط کاری مبدل حرارتی پوسته و لوله [۱۵]

دمای ورودی پوسته (°C)	دمای خروجی پوسته (°C)	دمای جرمی پوسته (kg/s)	دمای ورودی لوله (°C)	دمای خروجی لوله (°C)	دمای جرمی لوله (kg/s)
۳۰	۴۱	۱۱۱/۶	۱۵۰	۵۲	۲۶/۳

جدول ۲- مشخصات ابعادی آشفته سازها [۱۴]

آشفته ساز نوار تابیده	آشفته ساز میکروفین
۷۰	تعداد فین ها
۰/۴	ارتفاع فین (mm)
۰/۴	ضخامت فین (mm)
۲۲/۸	قطر داخلی لوله (mm)
۲۰°	زاویه مارپیچ فین
۵۳°	زاویه نوک فین
۱۸	width(mm)
۳	L/D for 360 degree twist
۳	Thickness (mm)

برای دبی جریان پایین تر از ۱۳ متر مکعب بر ساعت افزایش پیدا کرده است؛ لذا نتیجه گرفتند، استفاده از آشفته ساز سیم پیچ داخل کلکتور باعث اختلاط هرچه بهتر لایه مرزی شده، در نتیجه باعث کاهش دمای لوله جاذب می شود.

کایاباسی و همکاران [۱۱] به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی از جمله فاصله بافل، برش بافل، نوارهای آب بندی، طول لوله، تعداد لوله‌ها و تعداد گذر لوله مبدل بر انتقال حرارت و افت فشار در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله پرداختند. در این تحقیق نشان داده شد که چیدمان بافل‌ها بالاترین تاثیر را بر روی ضریب انتقال حرارت داشت.

اندامی و همکاران [۱۲] عملکرد حرارتی مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از نانو سیال آب - اتیلن گلیکول - اکسید آهن در کسر حجمی ۰/۰۳، ۰/۰۶ و ۰/۱ درصد با قطر نانو ذره ۲۶ نانومتر استفاده شده است؛ همچنین در این آزمایش غلظت‌های متفاوت سیال پایه آب - اتیلن گلیکول و دبی‌های مختلف جریان استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانو ذره اکسید آهن با کسر حجمی ۰/۱ درصد، ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان سیال را ۶۵ درصد افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش دبی جریان در سمت لوله، عدد ناسلت تا ۱۶۰ درصد افزایش می‌یابد.

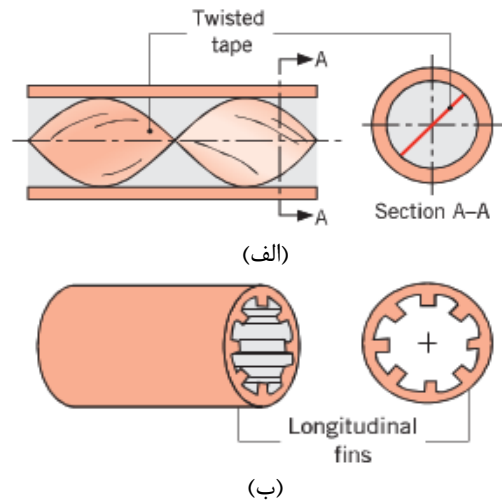
استفاده از جدیدترین پارامترهای مربوط به محاسبات خواص ترموفیزیکی نانو سیالات که در آن خواص تابعی از قطر نانوذرات و دمای نانو سیال می‌باشند و استفاده از سیال دی اکسید کربن فوق بحرانی در درون لوله‌های حاوی دو نوع آشفته ساز و مقایسه عملکرد حرارتی نانو سیال با غلظت‌های مختلف در سمت پوسته و همچنین بررسی تاثیر رسوب در مبدل حرارتی پوسته و لوله به روش حل عددی از جمله کارهایی است که تابحال مورد توجه قرار نگرفته است. در ادامه برای محاسبه خواص نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم استفاده شده در کار حاضر از روابط خواص متغیر خنافر و وفایی [۱۳] استفاده می‌شود.

۲- توصیف مسئله

کار حاضر یک مبدل حرارتی پوسته و لوله نوع AES حاوی نانو سیال اکسید آلومینیوم در سیال پایه آب سمت پوسته و گاز دی اکسید کربن فوق بحرانی در سمت لوله حاوی آشفته



شکل ۳- الگوریتم و روش حل نرم افزار HTRI [۱۷]



شکل ۲- هندسه آشفته ساز نوار تابیده (الف) و میکرو فین (ب) [۱۶]

۳- الگوریتم حل

معادلات حاکم برای طراحی مبدل حرارتی قانون بقای انرژی و قانون سرمایه‌ش نیوتن است که جزئیات دقیق آن در مرجع [۱۷] ذکر شده است. با توجه به اینکه در کار حاضر از نرم افزار HTRI استفاده می‌شود، الگوریتم و روش حل این نرم افزار در شکل ۳ ارائه شده است.

۴- روابط مربوط به محاسبه خواص نانوسیال

در این تحقیق، خواص ترموفیزیکی نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم از معادلات (۱) تا (۶) محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$\rho_{nf} = ((1-\phi) \rho_f) + (\phi \rho_p) \quad (1)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = ((1-\phi) (\rho c_p)_f) + (\phi (\rho c_p)_p) \quad (2)$$

$$K_{nf} = K_f (0.9843 + 0.398\phi^{0.7383} \left(\frac{1}{dp}\right)^{0.2246} \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}\right)^{0.0235} - 3.9517 \frac{\phi}{T} + 34.034 \frac{\phi^2}{T^3} + 32.509 \frac{\phi}{T^2}) \quad (3)$$

$$\mu_{nf} = -0.4491 + \frac{28.837}{T} + 0.574\phi - 0.1634\phi^2 \quad (4)$$

برای تاثیر پارامترهای هندسی آشفته‌ساز داخلی میکروفین از سیال اتیلن گلیکول سمت پوسته و سیال دود (گاز) سمت لوله در مبدل حرارتی پوسته و لوله کمک گرفته است. شکل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ به ترتیب مشخصات ابعادی مبدل مورد مطالعه، ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته و سمت لوله و افت فشار سمت لوله را براساس دبی جریان گاز در تحقیق ایشان و مقایسه با نتایج بدست آمده از کار حاضر نشان می‌دهد. بیشترین درصد خطای نتایج کار ایشان و کار حاضر ۸ تا ۱۰ درصد است.

همچنین اعتبار سنجی با یک کار تجربی توسط امینی فر و همکاران [۵] در مورد تاثیر آشفته‌ساز نوارتابیده بر روی مبدل حرارتی پوسته و لوله نیز انجام گرفت که در شکل ۷ ارائه شده است. حداکثر خطای نتایج کار ایشان و کار حاضر ۱۲ درصد است.

$$+23.053 \frac{\Phi^2}{T^2} + 0.0132 \Phi^3 - 2354.735 \frac{\Phi}{T^3} + 23.498 \frac{\Phi^2}{dp^2} - 3.0185 \frac{\Phi^3}{dp^2}$$

$$\mu_f = 2.414 \times 10^{-5} \times (10)^{\frac{247.8}{T-140}} \quad (5)$$

$$\varphi = \Phi \times 100 \quad (6)$$

در روابط فوق اندیس nf نشان‌دهنده نانو سیال، اندیس P نانو ذره و اندیس f مربوط به سیال پایه است. مشخصات نانو ذرات اکسید آلومینیوم و سیال پایه آب اعم از قطر ذرات، ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه از تحقیق خنافر و وفایی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- خصوصیات نانو سیال اکسید آلومینیوم به همراه

سیال پایه [۱۳]

خواص	سیال پایه (آب)	اکسید آلومینیوم
Cp (J/kgK)	۴۱۹۷	۳۹۷۰
ρ (kg/m ³)	۹۹۷/۱	۷۶۵
k (J/mK)	۰/۶۱۳	۲۵
μ (N s/m ²)	۱۰/۰۳×۱۰ ^{-۴}	-
dp (n m)	۰/۳۸۴	۴۷

از آنجا که سیال سمت پوسته حاوی نانو سیال اکسید آلومینیوم است، متوسط دمای ورودی و خروجی سیال سمت پوسته در روابط مربوطه لحاظ شده است و خصوصیات نانو سیال در در صداهای مختلف غلظت نانو ذره محاسبه گردیده است و از آن در نرم افزار استفاده شده است.

۵- اعتبار سنجی

نتایج این بررسی با نتایج بدست آمده از یک نمونه مبدل پوسته و لوله مدل AES (شکل ۴) توسط کرمانی [۱۴] به عنوان اعتبار سنجی استفاده شده است. برای اعتبار سنجی نتایج و روش های بدست آمده از طرح ایشان استفاده می‌شود که از HTRI

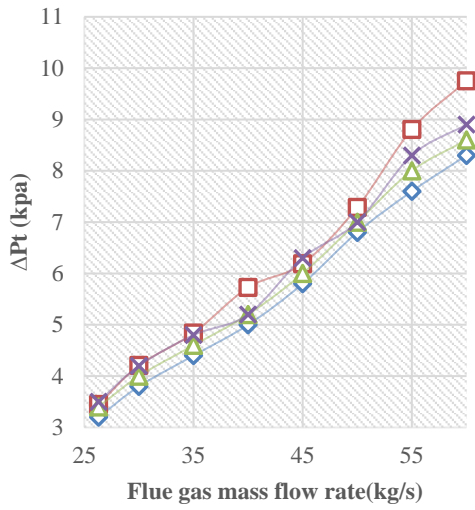
TEMA type	AES
Shell diameter	2090.00 mm
Outer tube limit	2027.38 mm
Height under inlet nozzle	42.226 mm
Height under outlet nozzle	42.227 mm
Tube type	Plain
Tube diameter	25.400 mm
Tube pitch	44.450 mm
Tube layout angle	45
Number of tubes (specified)	1024
Number of tubes (calculated)	1584
Number of tie rods	12
Number of seal strip pairs	6
Number of passes	1
Baffle cut % diameter	25

TUBEPASS DETAILS			
Pass	Rows	Tubes	Plugged
1	64	1596	0

SYMBOL LEGEND

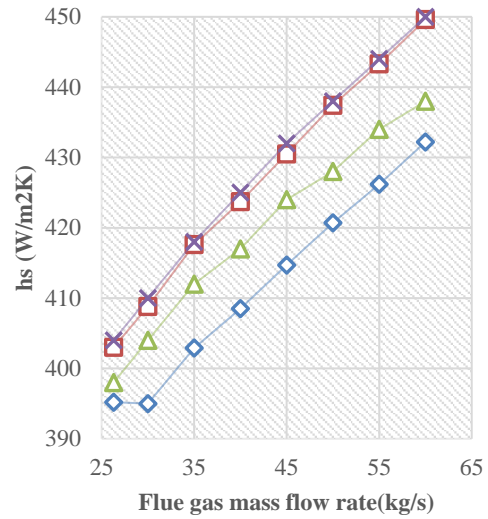
- Tube
- ⊗ Plugged tube
- Tie rod
- ⊙ Impingement rod
- ⊕ Dummy tube
- Seal rod
- Seal strip/Skid bar

شکل ۴- مبدل مورد مطالعه و مشخصات ابعادی طرح کرمانی [۱۴]



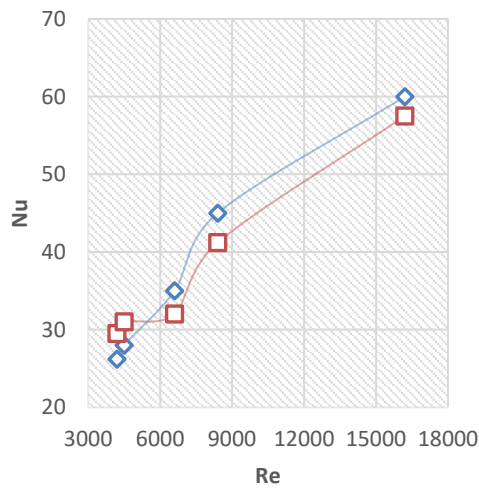
◆ Present Work: Without Turbulator
 ■ Present Work: Microfin Tube
 ▲ Kermani Work: Without Turbulator [14]
 ✕ Kermani Work: Microfin Tube [14]

شکل ۷- تاثیر جریان داغ گاز بر افت فشار سمت لوله



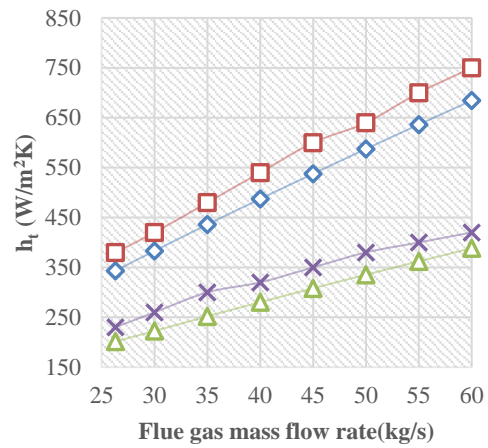
◆ Present Work: Without Turbulator
 ■ Present Work: Microfin Tube
 ▲ Kermani Work: Without Turbulator [14]
 ✕ Kermani Work: Microfin Tube [14]

شکل ۵- تاثیر جریان داغ گاز بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته



◆ Aminifar et al [5] ■ Present Work

شکل ۸- بررسی عدد ناسلت در سیال آب به همراه دسته لوله ساده و آشفته ساز نوار تابیده



◆ Present Work: Microfin Tube
 ▲ Present Work: without Turbulator
 ✕ Kermani Work: Without Turbulator [14]
 ■ kermani Work: Microfin Tube [14]

شکل ۶- تاثیر جریان داغ گاز بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت لوله

تاثیر نانو سیال در سمت پوسته بررسی می‌شود، بایستی پارامتر هندسی مرتبط با سمت پوسته که در این تحقیق درصد برش بافل است، متغیر باشد تا انتقال حرارت و افت فشار سمت پوسته تعیین شود. همچنین زمانی که تاثیر رسوب و آشفته سازها در سمت لوله بررسی می‌شود، بایستی پارامتر هندسی مرتبط با سمت لوله که در کار حاضر تعداد دسته لوله‌ها است، متغیر باشد تا انتقال حرارت و افت فشار سمت لوله مقایسه شود و نیز انتقال حرارت سمت پوسته در حالت ایجاد رسوب نیز بررسی می‌شود.

جدول ۵- تاثیر نانو سیال سمت پوسته با لوله‌های حاوی آشفته ساز نوار تابیده

Φ (%)	Baffle Cut (%)	h_s (W/m ² K)	h_t (W/m ² K)	ΔP_s (kPa)	ΔP_t (kPa)
۰		۱۷۲۰/۸		۵/۷۶	
۰/۱		۱۷۳۴/۵		۶/۰۱۸	
۰/۲	۲۰	۱۷۵۳/۷		۶/۰۳۴	
۰/۳		۱۷۶۸/۲		۶/۰۵۱	
۰/۴		۱۷۸۰/۲		۶/۰۶۸	
۰/۵		۱۷۹۰/۴		۶/۰۸۶	
۰		۱۸۱۲/۱		۵/۷۰۷	
۰/۱		۱۸۲۶/۷		۵/۹۶۲	
۰/۲	۲۵	۱۸۴۶/۸		۵/۹۷۹	
۰/۳		۱۸۶۲/۲		۵/۹۹۶	
۰/۴		۱۸۷۴/۸		۶/۰۱۳	
۰/۵		۱۸۸۵/۶		۶/۰۲۹	
۰		۱۸۵۱		۵/۶۶۵	
۰/۱		۱۸۶۶/۱		۵/۹۱۸	
۰/۲		۱۸۸۶/۶	۲۸۴/۲	۵/۹۳۴	۱۸/۱۷
۰/۳	۳۰	۱۹۰۲/۳		۵/۹۵۱	
۰/۴		۱۹۱۵/۱		۵/۹۶۸	
۰/۵		۱۹۲۶		۵/۹۸۵	
۰		۱۷۳۵/۸		۵/۶	
۰/۱		۱۷۶۸		۵/۸۵	
۰/۲	۳۵	۱۷۸۷/۵		۵/۸۶۶	
۰/۳		۱۸۰۲/۴		۵/۸۸۳	
۰/۴		۱۸۱۴/۶		۵/۹	
۰/۵		۱۸۲۴/۹		۵/۹۱۶	
۰		۱۵۸۳/۴		۵/۵۸۳	
۰/۱		۱۵۹۵/۹		۵/۸۳۲	
۰/۲	۴۰	۱۶۱۳/۶		۵/۸۴۸	
۰/۳		۱۶۲۷/۱		۵/۸۶۵	
۰/۴		۱۶۳۸/۲		۵/۸۸۱	
۰/۵		۱۶۴۷/۶		۵/۸۹۸	

۶- شبیه سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله

تمامی شرایط و هندسه مبدل حرارتی پوسته و لوله به مانند مبدل حرارتی مورد استفاده در مطالعه کرمانی [۱۴] است، با این تفاوت که سیال سمت پوسته حاوی نانو سیال بوده و از سیال دی‌اکسیدکربن در سمت لوله به همراه آشفته ساز نوار تابیده و میکروفین استفاده شده است (جدول ۴). مشخصات سیال دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی با استفاده از نرم افزار Refprop 9 [۱۸] به نرم‌افزار HTRI 7 [۱۷] معرفی شده است و از معادله حالت Peng-Robinson برای این منظور انتخاب گردید؛ همچنین مشخصات فیزیکی نانو سیال اکسید آلومینیوم نیز با استفاده از روابط بخش ۴ برای هر حالت مختلف از مسئله محاسبه و بصورت دستی در نرم افزار وارد می‌شود.

جدول ۴- مقایسه کار حاضر با نتایج کار کرمانی [۱۴]

طرح کرمانی	کار حاضر
سیال سرد: اتیلن گلیکول	نانو سیال سرد: اکسید آلومینیوم در سیال پایه آب
فاصله بافل: ۱۷۷۶ mm	
همراه آشفته ساز میکروفین	همراه آشفته ساز نوار تابیده و میکروفین
تعداد لوله: ۱۰۲۴	تعداد لوله: ۱۰۲۴
جنس لوله: کربن استیل ساده	سیال سمت لوله
سیال گرم: دود (گاز)	سیال گرم: دی اکسید کربن فوق بحرانی

۷- نتایج کار حاضر برای مبدل حرارتی

با توجه به شرایط و بررسی‌های انجام شده در قسمت‌های قبل در این قسمت نتایج برای مبدل حرارتی عنوان می‌شود. در جداول شماره ۵، ۶ و ۷ نتایج برای آشفته ساز نوار تابیده بررسی شده است که به ترتیب تاثیر نانو سیال روی انتقال حرارت و افت فشار در سمت پوسته بر اساس درصد برش بافل‌های متفاوت مبدل، تاثیر آشفته ساز نوار تابیده در انتقال حرارت و افت فشار سمت لوله و تاثیر رسوب گاز دی اکسید کربن فوق بحرانی سمت لوله مشخص شده است. در جداول شماره ۸، ۹ و ۱۰ نیز موارد ذکر شده برای آشفته ساز میکروفین صورت گرفته است. لازم به ذکر است، در زمانی که

۰	۱۷۵۵/۲	۵/۶
۰/۱	۱۷۶۹/۴	۵/۸۵
۰/۲	۱۷۸۸/۹	۵/۸۶۶
۰/۳	۱۸۰۳/۸	۵/۸۸۳
۰/۴	۱۸۲۶/۳	۵/۹
۰/۵	۱۸۲۴/۹	۵/۹۱۶
۰	۱۵۸۴/۶	۵/۵۸۳
۰/۱	۱۵۹۷	۵/۸۳۲
۰/۲	۱۶۱۴/۷	۵/۸۴۸
۰/۳	۱۶۲۸/۲	۵/۸۶۵
۰/۴	۱۶۳۹/۳	۵/۸۸۱
۰/۵	۱۶۴۸/۷	۵/۸۹۸

جدول ۹- تاثیر نانوسیال سمت پوسته با لوله‌های حاوی آشفته ساز میکروفین

حاوی آشفته ساز میکروفین		بدون آشفته ساز		
Tube Pass	h_t (W/m ² K)	ΔP_t (kPa)	h_t (W/m ² K)	ΔP_t (kPa)
۱	۳۰۰/۵۸	۱۷/۷۳	۱۷۵/۲	۱۷/۷۲
۲	۵۲۶/۴	۲۱/۰۳۳	۲۹۹/۳۴	۲۰/۹۸۵
۳	۷۳۳/۹۹	۲۰/۳۵۴	۴۱۴/۴۱	۲۰/۱۸۲
۴	۹۲۸/۹۶	۲۶/۵۷۳	۵۱۵/۴۰	۲۶/۰۹۹
۶	۱۲۹۶/۴	۴۰/۸۵۱	۷۰۹	۳۸/۸۴

جدول ۱۰- بررسی تاثیر رسوب به همراه آشفته ساز میکروفین $\Phi = 0$

حاوی آشفته ساز میکروفین $\Phi = 0$		بدون آشفته ساز		
Tube Pass	h_{sc} (W/m ² K)	ΔP_{if} (kPa)	h_{sf} (W/m ² K)	ΔP_{if} (kPa)
۱	۱۷۲۲/۷	۱۷/۷۸	۱۷۲۶/۳	۱۷/۷۷
۲	۱۷۶۶/۲	۲۱/۴۷	۱۷۷۱/۴	۲۱/۴
۳	۱۸۱۴/۶	۲۱/۷۸۶	۱۸۲۱	۲۱/۵۶۵
۴	۱۸۰۶	۲۹/۹	۱۸۱۲/۶	۲۹/۲۴۱
۶	۱۸۱۹/۵	۵۱/۶۷	۱۸۲۶/۴	۴۸/۶۲۷

در ادامه به بررسی ضرایب انتقال حرارت سمت پوسته با استفاده از دو نوع آشفته میکروفین و نوارتابیده و تاثیر غلظت نانوسیال در سمت پوسته پرداخته می‌شود.

شکل های ۹ و ۱۰ تاثیر غلظت نانو سیال و برش بافل بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته در آشفته ساز میکروفین و نوارتابیده را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ تاثیر غلظت نانو سیال و برش بافل بر ضریب انتقال حرارت

جدول ۶- بررسی تاثیر آشفته ساز نوارتابیده

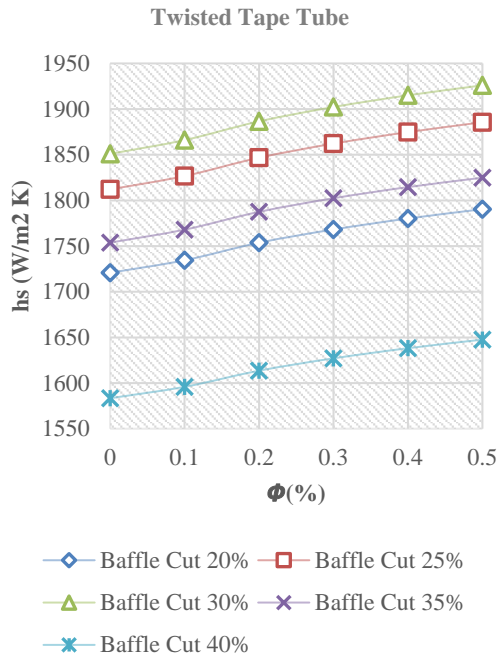
حاوی آشفته ساز نوارتابیده		بدون آشفته ساز		
Tube Pass	h_t (W/m ² K)	ΔP_t (kPa)	h_t (W/m ² K)	ΔP_t (kPa)
۱	۲۸۴/۲	۱۸/۱۶۹	۱۷۵/۲	۱۷/۷۲
۲	۴۸۵/۵۲	۲۳/۶۴۷	۲۹۹/۳۴	۲۱/۰۳۳
۳	۶۶۷/۳۲	۲۸/۳۳۲	۴۱۴/۴۱	۲۰/۳۵۴
۴	۸۳۵/۸۶	۴۴/۰۸۷	۵۱۵/۴۰	۲۶/۵۷۳
۶	۱۱۴۹/۶	۹۳/۹۴۷	۷۰۹	۴۰/۸۵۱

جدول ۷- بررسی تاثیر رسوب به همراه آشفته ساز نوارتابیده $\Phi = 0$

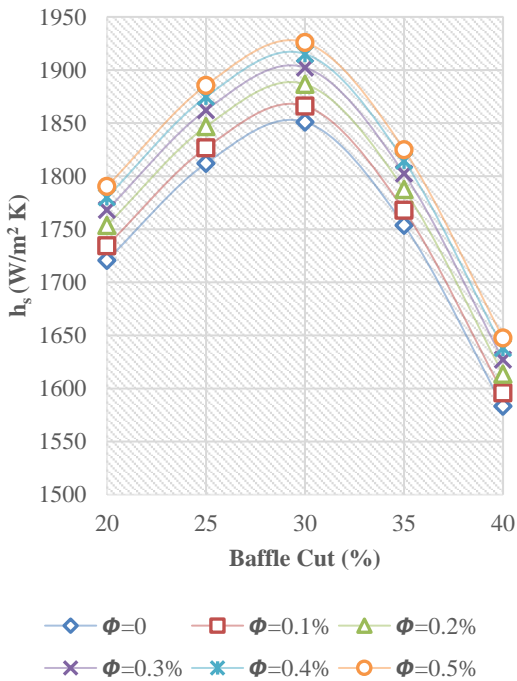
حاوی آشفته ساز نوارتابیده $\Phi = 0$		بدون آشفته ساز		
Tube Pass	h_{sc} (W/m ² K)	ΔP_{if} (kPa)	h_{sf} (W/m ² K)	h_{sf} (W/m ² K)
۱	۱۷۲۰/۸	۱۸/۴۷	۱۷۲۴/۹	۱۷۰۷/۹
۲	۱۷۶۲/۱	۲۶/۰۷۹	۱۷۶۸	۱۷۴۲/۸
۳	۱۸۰۸/۸	۳۶/۲۳	۱۸۱۶	۱۷۸۴/۶
۴	۱۷۹۹	۶۱/۸۱۲	۱۸۰۶/۷	۱۷۷۳/۵
۶	۱۸۱۱/۳	۱۴۸/۸۶	۱۸۱۹/۲	۱۷۸۳/۱

جدول ۸- تاثیر نانوسیال سمت پوسته با لوله‌های حاوی آشفته ساز میکروفین

Φ (%)	Baffle Cut (%)	h_s (W/m ² K)	h_t (W/m ² K)	ΔP_s (kPa)	ΔP_t (kPa)
۰		۱۷۲۲/۷		۵/۷۶	
۰/۱		۱۷۳۶/۳		۶/۰۱۸	
۰/۲		۱۷۵۵/۴		۶/۰۲۴	
۰/۳	۲۰	۱۷۷۰	۳۰۰/۶	۶/۰۵۱	
۰/۴		۱۷۸۱/۹		۶/۰۶۸	
۰/۵		۱۷۹۲/۱		۶/۰۸۶	
۰		۱۸۱۳/۹		۵/۷۰۷	
۰/۱		۱۸۲۸/۴		۵/۹۶۲	
۰/۲		۱۸۴۸/۶		۵/۹۷۹	۱۷/۷۲
۰/۳	۲۵	۱۸۶۳/۹		۵/۹۹۶	
۰/۴		۱۸۷۶/۶		۶/۰۱۳	
۰/۵		۱۸۸۷/۳		۶/۰۲۹	
۰		۱۸۵۲/۷	۳۰۰/۶	۵/۶۶۵	
۰/۱		۱۸۶۷/۷		۵/۹۱۸	
۰/۲		۱۸۸۸/۲		۵/۹۳۴	
۰/۳	۳۰	۱۹۰۳/۹		۵/۹۵۱	
۰/۴		۱۹۱۶/۷		۵/۹۶۸	
۰/۵		۱۹۲۷/۶		۵/۹۸۵	

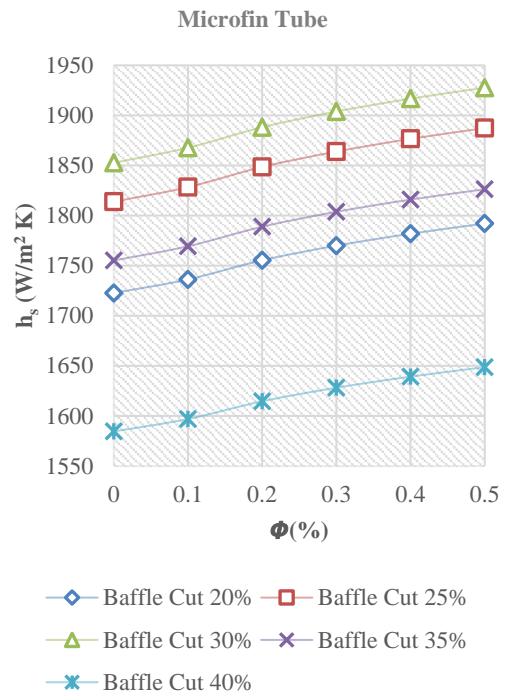


شکل ۱۰- تاثیر غلظت نانوسیال و برش بافل بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته در آشفته ساز نوار تابیده



شکل ۱۱- تاثیر غلظت نانو سیال و برش بافل بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته

جابجایی سمت پوسته را نشان می‌دهد. از شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ می‌توان دریافت با افزایش غلظت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته تا ۴ درصد افزایش پیدا می‌کند؛ همچنین بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت سمت پوسته و در نتیجه راندمان حرارتی مناسب برای زمانی است که برش بافل حدود ۳۰ درصد است؛ همچنین نوع آشفته‌ساز تاثیری روی ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته ندارد.



شکل ۹- تاثیر غلظت نانو سیال و برش بافل بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته در آشفته ساز میکروفین

شکل ۱۷ تاثیر تعداد گذر لوله و استفاده از آشفته ساز بر افت فشار سمت لوله را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، آشفته‌ساز میکروفین با تقریب بسیار نزدیکی افت فشاری نزدیک به حالت بدون آشفته ساز را دارد، در حالی که استفاده از آشفته‌ساز نوارتابیده افت فشار بالاتری را در تعداد برابر گذر لوله نتیجه می‌دهد. این حالت نشان‌دهنده مناسب بودن آشفته‌ساز میکروفین از نظر افت فشار پایین تر و نزدیک به افت فشارحالت بدون آشفته‌ساز نسبت به نوارتابیده است.

شکل ۱۸ تاثیر تعداد گذر لوله و نوع آشفته ساز بر ضریب انتقال حرارت سمت لوله را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که آشفته‌ساز میکروفین با تقریب نزدیکی ضریب انتقال حرارت بیشتری نزدیک به حالت آشفته ساز نوارتابیده را دارد و استفاده از آشفته‌ساز میکروفین ضریب انتقال حرارت را از ۵/۷۶ تا ۱۲/۷۷ درصد نسبت به استفاده از آشفته ساز نوارتابیده افزایش می‌دهد. این در حالی است که استفاده از آشفته ساز نوارتابیده افت فشار بالاتری را در تعداد برابر گذر لوله ایجاد می‌کند. این حالت نشان‌دهنده مناسب بودن آشفته ساز میکروفین از نظر افت فشار پایین تر و ضریب انتقال حرارت بالاتر نسبت به نوارتابیده است. درضمن استفاده از آشفته‌ساز نوارتابیده و میکروفین ضریب انتقال حرارت سمت لوله را به ترتیب به طور میانگین ۶۲/۱۹ و ۷۷/۷۸ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از آشفته‌ساز افزایش می‌دهد.

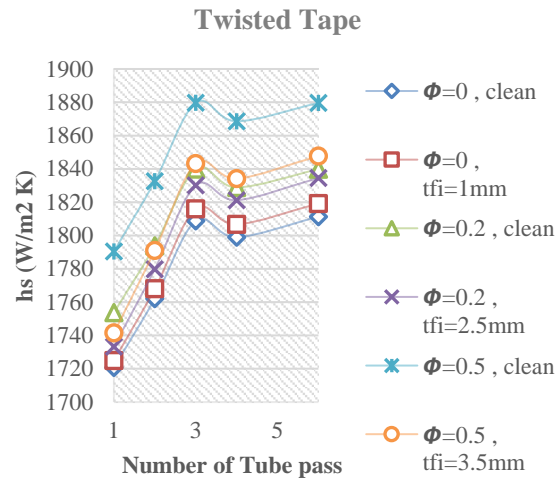
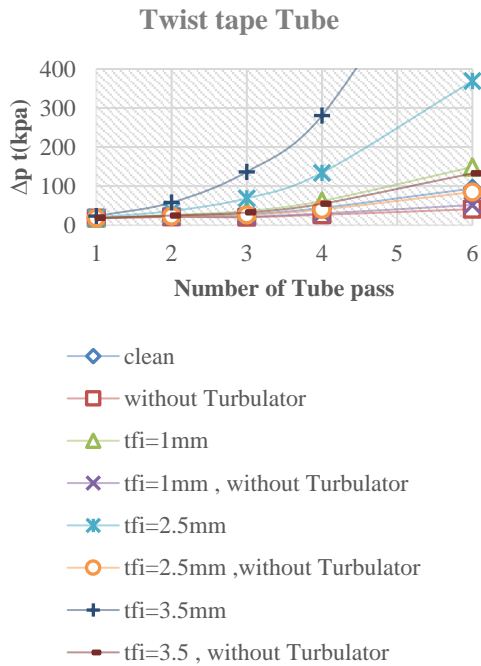
شکل ۱۹ تاثیر تغییر دبی جرمی و نوع آشفته ساز روی عدد ناسلت سمت پوسته را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو نوع آشفته‌ساز، با افزایش دبی جرمی، عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

در ادامه به بررسی ضرایب انتقال حرارت سمت پوسته و تاثیر استفاده از دو نوع آشفته‌ساز میکروفین و نوارتابیده داخل دسته لوله‌های متفاوت با درصد غلظت‌های مختلف نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در سمت پوسته و همچنین افت فشار سمت پوسته و سمت لوله پرداخته می‌شود.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تاثیر تغییر ضخامت رسوب و غلظت نانوسیال سمت پوسته به‌همراه تغییر تعداد گذر لوله را روی ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته برای آشفته‌ساز نوارتابیده و میکروفین نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت رسوب ضریب انتقال حرارت به طور جزئی افزایش پیدا می‌کند؛ همچنین می‌توان دریافت که با افزایش غلظت نانوسیال، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. اضافه بر این می‌توان مشاهده نمود که بیشینه ضریب انتقال حرارت سمت پوسته در تعداد گذر لوله ۳ اتفاق می‌افتد. شکل ۱۴ تاثیر تغییر ضخامت رسوب و تعداد گذر لوله و استفاده از آشفته‌ساز را روی افت فشار نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت رسوب و تعداد گذر و همچنین استفاده از آشفته‌ساز، مقدار افت فشار افزایش پیدا می‌کند.

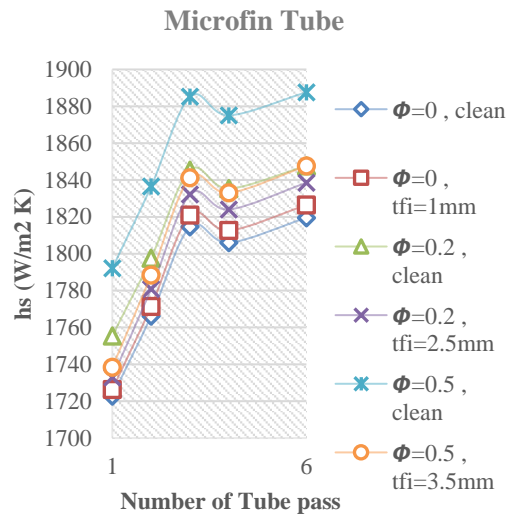
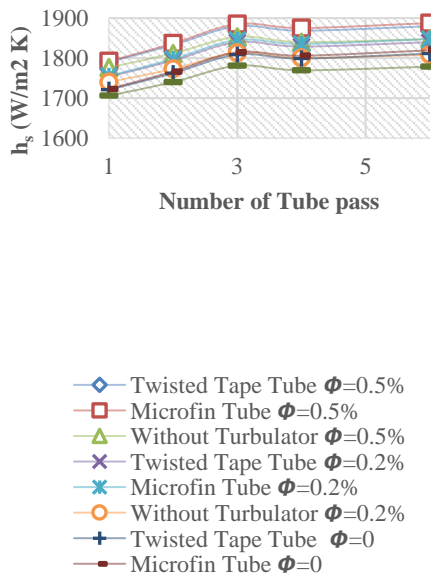
شکل ۱۵ تاثیر غلظت نانو سیال و تعداد گذر لوله بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته برای آشفته‌ساز نوارتابیده و میکروفین نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت تاثیر آشفته‌ساز میکروفین بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته نسبت به آشفته‌ساز نوار تابیده در غلظت‌های مختلف نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم در سمت پوسته بیشتر بوده و همان‌طور که مشخص است، بیشینه ضریب انتقال حرارت سمت پوسته در تعداد گذر لوله ۳ اتفاق می‌افتد. در تعداد گذر لوله بیشتر از ۳، مبدل داری افت عملکرد حرارتی شده و این نشان‌دهنده این است که در تعداد گذر لوله‌های بیشتر، مبدل دارای راندمان کمتری است. همچنین با توجه به این شکل می‌توان دریافت که میزان افزایش نرخ انتقال حرارت با استفاده از آشفته‌ساز نسبت به استفاده از نانو سیال بسیار بیشتر است.

شکل ۱۶ تاثیر غلظت نانوسیال و برش بافل بر افت فشار سمت پوسته برای آشفته‌ساز نوارتابیده و میکروفین نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل می‌توان دید با افزایش غلظت نانوسیال، میزان افت فشار افزایش می‌یابد.



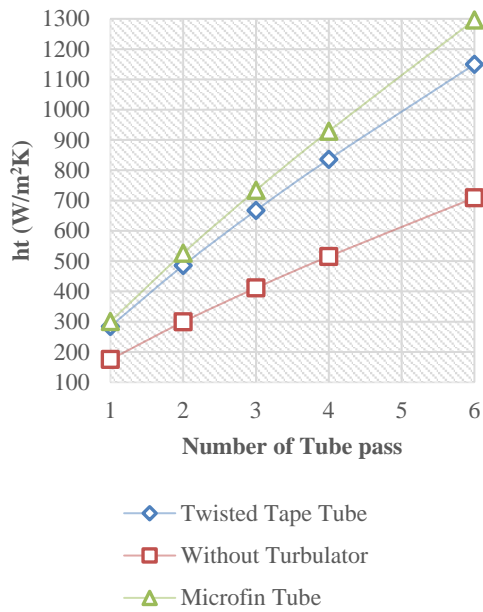
شکل ۱۲- تاثیر غلظت نانو سیال و تعداد گذر لوله به همراه ضخامت رسوب بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته برای آشفته ساز نوار تابیده

شکل ۱۴- تاثیر ضخامت رسوب و تعداد گذر لوله و استفاده از آشفته ساز بر افت فشار سمت لوله

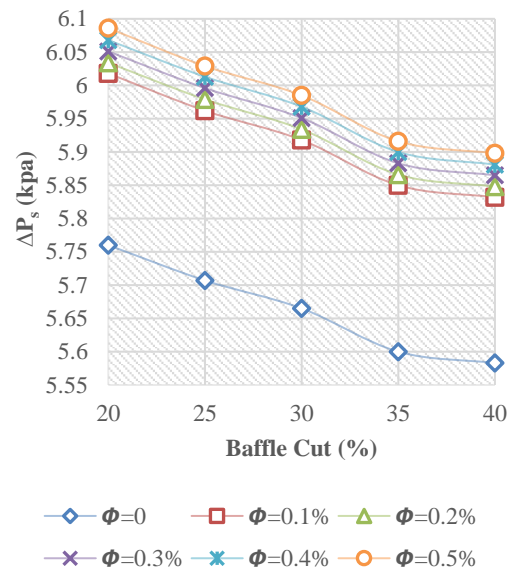


شکل ۱۳- تاثیر غلظت نانو سیال و تعداد گذر لوله به همراه ضخامت رسوب بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته برای آشفته ساز میکروفین

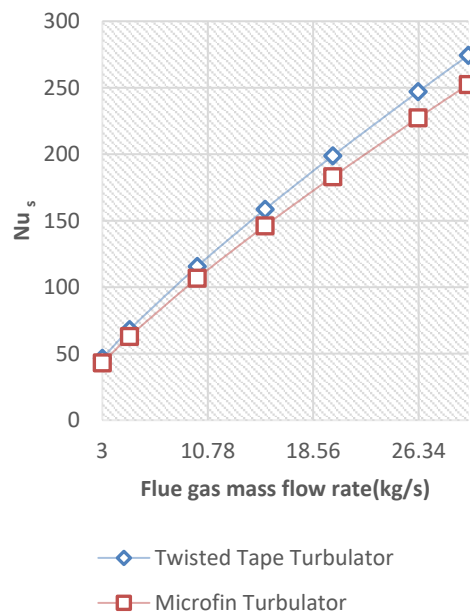
شکل ۱۵- تاثیر غلظت نانو سیال و تعداد گذر لوله بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته برای آشفته ساز نوار تابیده و میکروفین



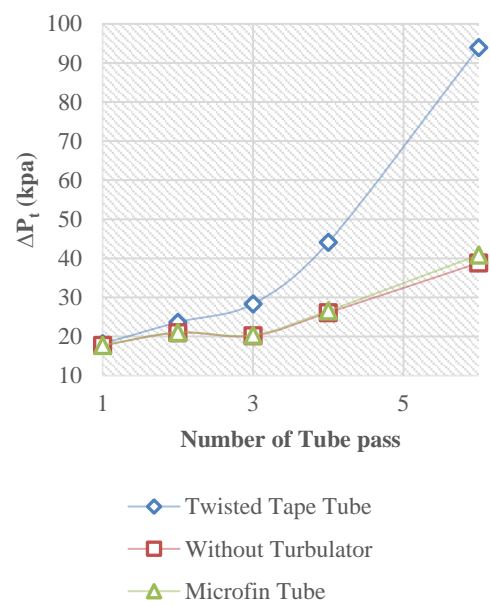
شکل ۱۸- تاثیر تعداد گذر لوله و نوع آشفته ساز بر ضریب انتقال حرارت سمت لوله



شکل ۱۶- تاثیر غلظت نانوسیال و برش بافل بر افت فشار سمت پوسته برای آشفته ساز نوار تابیده و میکروفین



شکل ۱۹- تاثیر تغییر دبی جرمی و نوع آشفته ساز بر روی عدد ناسلت سمت پوسته



شکل ۱۷- تاثیر تعداد گذر لوله و استفاده از آشفته ساز بر افت فشار سمت لوله

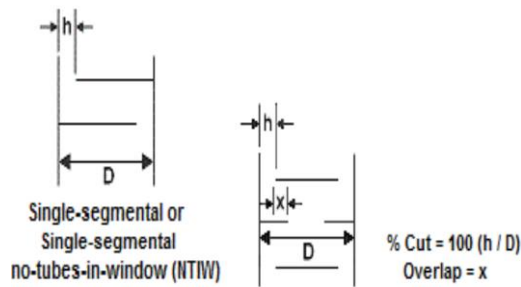
۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق طراحی حرارتی مبدل پوسته و لوله حاوی آشفته ساز نوارتابیده و میکروفین مورد بررسی قرار گرفت و از مبدل نوع AES با نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم در سمت پوسته استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانو سیال در سمت پوسته و استفاده از آشفته ساز نوارتابیده و میکروفین، ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه عملکرد حرارتی مبدل بطور چشم‌گیری بهبود پیدا می‌کند و مشخص گردید، افزایش نرخ انتقال حرارت با استفاده از نانو سیال نسبت به استفاده از آشفته ساز بسیار ناچیز است. همچنین با مقایسه دو نوع آشفته ساز مشخص شد، آشفته ساز میکروفین هم از لحاظ انتقال حرارت و هم افت فشار دارای راندمان بهتری نسبت به آشفته‌ساز نوارتابیده بوده و ضریب انتقال حرارت را ۵/۷۶ تا ۱۲/۷۷ درصد نسبت به آشفته ساز نوارتابیده افزایش می‌دهند. اضافه بر این، اثر تغییر برخی از پارامترهای هندسی مبدل حرارتی مورد بررسی قرار گرفت و بهترین راندمان حرارتی برای ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته برای درصد برش بافل ۳۰ درصد و تعداد گذر لوله ۳ تعیین گردید. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت رسوب، ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت پوسته و افت فشار افزایش می‌یابد.

Nu	عدد ناسلت
t_{fi}	ضخامت رسوب، mm
μ_f	ویسکوزیته سیال پایه، Pa.s
μ_{nf}	ویسکوزیته نانوسیال، Pa.s
Φ	درصد حجمی نانو ذره در نانو سیال، %
ρ_f	چگالی سیال پایه Kg/m^3
ρ_p	چگالی نانو ذره Kg/m^3

۱۰- پیوست:

بافل‌های مورد استفاده در مبدل‌های حرارتی، انواع مختلفی دارند که در این تحقیق از بافل تک قسمتی^۱ استفاده شده است. تعریف درصد برش بافل در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۰- تعریف درصد برش بافل

۹- علایم

Δp	افت فشار، kpa
$c_{p,nf}$	ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال J/Kgk
ρ_{nf}	چگالی نانوسیال Kg/m^3
d_p	قطر نانو ذره، nm
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی، $\text{W/m}^2\text{k}$
h_s	ضریب انتقال حرارت جابجایی پوسته، $\text{W/m}^2\text{k}$
h_t	ضریب انتقال حرارت جابجایی لوله، $\text{W/m}^2\text{k}$
k	ضریب هدایت حرارتی، W/mk
k_f	ضریب هدایت حرارتی سیال پایه، W/mk
k_{nf}	ضریب هدایت حرارتی نانو سیال، W/mk

مراجع

- [1] Antonopoulou, C., Gkoutas, A., Atsonios, K., Bakalis, P., Skiadopoulos, A., Grammelis, P., and Manolakos, D., (2023), Parametric Analysis of Heat Source and Sink and Design of Heat Exchangers for Trilateral Flash Cycle (TFC), 8th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT'23).
- [2] Razzaghi, M. J. P., Daemiashezari, M., Abdulfattah, A. N., Afrouzi, H. H., and Ahmad, H., (2022), Thermo-hydraulic performance evaluation of turbulent flow and heat transfer in a twisted flat tube: A CFD approach. Case Stud. Therm. Eng., 102107.
- [3] Xifeng, W., Xiaoluan, Z., Mahariq, I., Salem, M., Ghalandari, M., Ghadak, F., and Abedini, M., (2022), Performance Optimization of the Helical Heat Exchanger With Turbulator. Front. Energy Res., 9, 789316.

¹ Single segmental

- [11] Kayabasi, E., Alperen, M. A., and Kurt, H., (2019), The effects of component dimensions on heat transfer and pressure loss in shell and tube heat exchangers. *Int. J. Green Energy*, 16(2), 200-210.
- [۱۲] اندامی، ز.، ویسی، ف. و نوروزی، ل.، (۱۳۹۸)، بررسی تجربی کارایی گرمایی مبادله کن های گرمایی پوسته و لوله مارپیچ با استفاده از نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن، *مجله مهندسی مکانیک*، ۱۰، ۴۹(۲)-۱.
- [13] Khanafer, K. and Vafai K., (2011), A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 54, 4410-4428.
- [۱۴] کرمانی، احسان، (۱۳۹۴)، مطالعه اثر بکارگیری لوله میکروفین دار داخلی بر انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب اکسید آلومینیوم در مبدل بازیافت حرارتی پوسته و لوله، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، کاشان.
- [15] Leong, K. Y., Saidur, R., Mahlia, T. M. I., and Yau, Y. H., (2012), Modeling of shell and tube heat recovery exchanger operated with nanofluid based coolants, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 55, 808-816.
- [16] Bergman, T., L., and Lavine, A. S., (2017), *Fundamentals Of Heat and Mass Transfer*, 8th edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [17] Kara, Y. A., and Güraras, Ö., (2004), A computer program for designing of shell-and-tube heat exchangers. *Appl. Therm. Eng.*, 24, 1797-1805.
- [18] Huber, M. L., Lemmon, E. W., Bell, I. H., and McLinden, M. O., (2022), The NIST REFPROP Database for Highly Accurate Properties of Industrially Important Fluids, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 61(42), 15449-15472.
- [4] Sanserwal, M., Yadav, D., Bhardwaj, M., and Singh, G., (2022), Enhancing the thermal performance of a double pipe heat exchanger in turbulent flow conditions. *Int. J. Thermodyn.*, 25(2), 99-111.
- [5] Aminifar, F., Ghafouri, A., and Falavand Jozaei, A., (2020), Experimental Investigation of Hydro-Thermodynamics Performance of Shell and Tube Heat Exchanger Using Nanofluid, Triangular-Cut Twisted Tape and Corrugated Pipes. *Modares Mechanical Engineering*, 20(10), 2593-2603.
- [۶] کیا، س. م.، نوبختی، م. ح. و خیاط، م.، (۱۳۹۹)، بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال پایه روغن-اکسید آلومینیوم در لوله مارپیچ و مشاهده تاثیر توربولاتور بر عملکرد مبدل حرارتی پوسته و لوله، فصلنامه مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، ۲۰۷(۳)-۱.
- [۷] دستمالچی، م.، شیخ زاده، ق. ع. و عارف منش، ع.، (۱۳۹۹)، مطالعه تجربی انتقال حرارت جریان نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در لوله های مارپیچ میکروفین دار، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۵۲(۲)، ۵۲۴-۵۰۹.
- [8] Singh S. K., and Sarkar, J., (2020), Improving hydrothermal performance of hybrid nanofluid in double tube heat exchanger using tapered wire coil turbulator, *Adv. Powder Technol.*, 31(5), 2092-2100.
- [9] Fares, M., Mohammad, A. M., and Mohammed, A. S., (2020), Heat transfer analysis of a shell and tube heat exchanger operated with graphene nanofluids. *Case Stud. Therm. Eng.*, 18, 100584.
- [10] Yılmaz İ. H., Mwesigye A., and Göksu, T. T., (2020), Enhancing the overall thermal performance of a large aperture parabolic trough solar collector using wire coil inserts, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 39, 100696.