Journal Of Energy Conversion
Volume: 7, Issue: 3, 1399

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹

بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال پایه روغن-AL2O3 در لوله مارپیچ و مشاهده تأثیر آشفته ساز بر عملکرد مبدل حرارتی پوسته و لوله

سید محمود کیا[۱]، محمدحسن نوبختی [۲و*] و مرتضی خیاط [۳]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات ,mahmood.kia@srbiau.ac.ir
*۲- استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، m.nobakhti@srbiau.ac.ir
۳- استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات،mkhayat@srbiau.ac.ir

دریافت: اردیبهشت ۹۹، بازنگری: مهر ۹۹، پذیرش: آبان ۹۹

چکیده

امروزه با توجه به اهمیت مبحث انرژی، محدودیت‌های منابع طبیعی و گرمایش زمین، کارایی سیستم‌های انتقال حرارت بیش‌ازپیش موردتحقیق قرارگرفته است. در این مقاله به بررسی تجربی تأثیر استفاده از نانوسیال و آشفته ساز بر انتقال حرارت و افت فشار پرداخته شده است. از نانوسیال روغن‌پایهSN300 / AL2O3 با درصدهای وزنی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ استفاده گردیده و از آشفته ساز فلزی نوع مارپیچ جهت بررسی انتقال حرارت مبدل حرارتی پوسته و لوله استفاده‌شده است. آزمایش‌ها تحت دو شار حرارتی ثابت 3950 w/m2 و5280 w/m2 و در دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام‌گرفته است. رژیم جریان از نوع آرام بوده و مقادیر عدد رینولدز در محدوده ۳۰۰ تا ۹۵۰ قرار داشته و آزمایش‌ها برای ۸ دبی مختلف انجام‌گرفته است. از نتایج مشاهده شد ضریب انتقال حرارت نانوسیال به‌مراتب بیشتر از سیال پایه می‌باشد و با افزایش درصد وزنی نانوسیالات ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد ولی از سوی دیگر موجب افزایش اختلاف فشار می‌شود. همچنین مشاهده شد ضریب انتقال حرارت با عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد و استفاده از آشفته ساز تأثیر چشمگیری برافزایش انتقال حرارت مبدل حرارتی دارد. نتایج در تطابق خوبی با نتایج تئوری بوده و خطا کمتر از ۱۰ درصد اندازه‌گیری شد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** m.nobakhti@srbiau.ac.ir

کلمات کلیدی: نانوسیال پایه روغن، آشفته ساز، ضریب انتقال حرارت، افت فشار

۱- مقدمه

بهینه‌سازی و افزایش بازده سیستم‌های انتقال حرارت، یکی از اساسی‌ترین چالش‌های مهندسان و طراحان طی سالیان اخیر بوده است. از همین رو استفاده از نانوذرات در سیالات پایه، به‌عنوان روشی غیرفعال در جهت بهبود انتقال حرارت و کوچک‌سازی سیستم‌های گرمایشی شناخته‌شده است و پژوهشگران متعددی در مطالعات خود به‌پیش بینی رفتار و قابلیت‌های کاربردی آن‌ها با انواع روش‌های نظری، عددی و آزمایشگاهی پرداخته‌اند.

محققان سال‌ها بر روی استفاده از مخلوط ذرات جامد معلق بسیار کوچک در ابعاد میکرو در سیال برای بهبود انتقال حرارت کارکردند. اما این سیالات مشکلات فراوانی مانند رسوب‌گذاری، ناخالصی، خوردگی و افزایش افت فشار داشته‌اند تا اینکه در سال

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

۱۸۸۱ ایده استفاده از ذرات در ابعاد نانو برای اولین بار توسط ماکسول [۱] مطرح شد و انقلاب بزرگی در زمینه انتقال حرارت در سیالات پدید آمد. درواقع او دیدگاه تازه‌ای را در مورد سوسپانسیون سیال با ذراتی جامد در ابعاد نانو مطرح کرد. اولین بار ماسودا و همکاران [۲] این سیال حاوی ذرات معلق را با نام نانوسیال معرفی کردند و بعد از آن‌ها چوی [۳] در آزمایشگاه آرگون آمریکا این مفهوم را به‌طور گسترده‌ای توسعه داد؛ نانوسیال عبارت است از ذرات بسیار ریز جامد در ابعاد بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر معلق در یک سیال پایه. به‌طورمعمول نانوذرات از جنس فلزاتی مانند مس، آلومینیوم، پتاسیم، آهن و اکسیدهای آن‌ها و همچنین نانولوله‌های کربن و سیالات پایه نیز عمدتاً از سیالات با رسانایی نسبتاً پایین‌تر مانند آب، اتیلن گلیکول و سیالاتی از این دسته که در صنعت به‌عنوان هادی انتقال حرارت مورداستفاده قرار می‌گیرند، هستند. نانوذرات نسبت به ذرات بزرگ‌تر مانند میکرو ذرات، بسیار پایدارتر بوده و سطح تماس بیشتری با ناحیه سیال دارند.

اگرچه افزایش هدایت حرارتی در بهبود عملکرد حرارتی سیالات مهم است، اما متغیرهای دیگری نیز وجود دارد که نقش مهمی ایفا می‌کنند. به‌طور مثال، ضریب انتقال حرارت جابجایی به خصوصیات فیزیکی سیال و خصوصیات هندسی مسئله وابسته است. این کمیت‌ها شامل خواص ذاتی سیال مانند هدایت حرارتی، گرمای ویژه و چگالی ویسکوزیته به همراه خصوصیات سیستم مانند قطر، طول، زاویه لوله و سرعت جریان می‌باشد. بنابراین اندازه‌گیری عملکرد حرارتی نانوسیال دقیقاً تحت شرایط جریان بسیار مهم است. آزمایش‌ها نشان دادند که نانوسیالات نه‌تنها هدایت حرارتی بهتری دارند، بلکه قابلیت انتقال حرارت جابجایی آن‌ها نیز بیشتر از سیالات پایه است. در دهه گذشته تحقیقات بسیاری در مورد انتقال حرارت چندین نانوسیال به‌صورت تجربی صورت گرفته است. ژوان و لی [۴] اولین کسانی بودند که افزایش زیاد را ضریب انتقال حرارت جریان مغشوش گزارش کردند. آن‌ها دریافتند که ضریب انتقال حرارت در یک سرعت یکسان برای نانوسیال آب-مس با دو درصد حجمی نانوذرات، حدود ۴۰٪ بیشتر از آب خالی است. نیوالکار و همکاران [۵] در پژوهش خود به مطالعه تجربی انتقال حرارت نانوسیال اکسید سیلیسیم با سیال پایه آب در مبدل پوسته و لوله با لوله مارپیچ پرداختند. نانوسیال ها در ۴ غلظت ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد وزنی ساخته شد. از نتایج مشاهده می‌شود با افزایش دبی جریان و غلظت نانوسیالات، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده گردید نانوسیال در مقایسه با سیال پایه مقدار ضریب انتقال حرارت به میزان ۲۸/۷۱٪ افزایش‌یافته است. فالکنر و همکاران [۶]، انتقال حرارت جابجایی جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته را با نانوسیالات نانولوله کربنی-آب بررسی و افزایش قابل‌توجهی را در انتقال حرارت مشاهده کردند. آن‌ها ابتدا بیان کردند که ضریب انتقال حرارت نانوسیالات با عدد رینولدز افزایش می‌یابد. همچنین بیان کردند که ضریب انتقال حرارت حدود دو برابر آب خالص در بالاترین محدوده عدد رینولدز اتفاق می‌افتد. سپس اشاره کردند که اگرچه در تمامی حالات نانوسیال بهتر از سیال پایه بود، اما نانوسیالات با غلظت حجمی کمتر (۱/۱٪) عملکرد بهتری از نانوسیالات با غلظت بیشتر (۲/۲٪ و ۴/۴٪) داشتند. این نتیجه ممکن است به علت افزایش تراکنش بین نانوذرات باشد. یو و همکاران [۷] اولین کسانی بودند که جریان ورودی آرام نانوسیالات را بررسی کردند و نشان دادند که نانوسیالات آب-اکسید آلومینیوم در ناحیه ورودی باعث افزایش چشمگیری در ضریب انتقال حرارت می‌گردد. همچنین بیان کردند که طول ورودی برای نانوسیال بیشتر از آب خالص است. کورپیز و همکاران [۸] به مطالعه تجربی و عددی انتقال حرارت نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید مس پرداخته‌اند. در شبیه‌سازی خود نانوسیال را تک فاز در نظر گرفته شد و نتایج تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه شدند. مشاهده شد استفاده از نانوسیال موجب افزایش عدد ناسلت به میزان ۱۸ تا ۳۵ درصد نسبت به سیال پایه می‌شود. قراسیم و همکارن [۹] به بررسی انتقال حرارت جابجایی آرام نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در جریان شعاعی پرداختند. آن‌ها برای ایجاد جریان شعاعی از دو دیسک هم‌محور که بافاصله‌ی مشخصی از هم قرارگرفته بودند، استفاده کردند. تزریق سیال از مرکز این دو دیسک انجام‌گرفته است. نتایج نشان داد که عدد ناسلت با افزایش غلظت و افزایش رینولدز افزایش می‌یابد. وفایی و ون [۱۰] در یک کار جدید انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آب-آلومینا را در میکرو کانال تحت بررسی قراردادند. آن‌ها مقداری کاهش انتقال حرارت را در ناحیه ورودی مشاهده کردند اما عمده‌ی افزایش انتقال حرارت را در ناحیه کاملاً توسعه‌یافته بیان نمودند. اخوان و سعدی نیا [۱۱] انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار نانوسیال روغن‌پایه-اکسید مس را در لوله فنردار تحت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

شرایط شار ثابت موردبررسی قراردادند آن‌ها برای غلظت ۲ درصد وزنی ۴۳/۵ درصد افزایش انتقال حرارت را در بزرگ‌ترین قطر فنر مشاهده کردند.

ماکش کومار و چندراسکار [۱۲] بررسی عددی انتقال حرارت نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی در مقطع دولوله ای حلقه‌ای شکل انجام دادند. رژیم جریان از نوع آرام بوده و عدد رینولدز در محدوده ۱۳۰۰-۲۲۰۰ قرار دارد. نانوسیال ها در ۳ غلظت ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد وزنی ساخته‌شده‌اند. مطالعه نشان داد ضریب انتقال حرارت و افت فشار با افزایش غلظت نانوسیال افزایش می‌یابد. با مقایسه نتایج تجربی و عددی مشاهده شد افت فشار و عدد ناسلت به ترتیب دارای حداکثر خطای ۸/۷۵٪ و ۷/۲۵٪ نسبت به داده‌های تجربی می‌باشند که دارای تطابق خوبی می‌باشد. خدنگی و همکاران [۱۳] به بررسی انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید تیتانیوم در شرایط دما ثابت پرداختند. مشاهدات آن‌ها نشان داد که با افزایش غلظت اکسید آلومینیوم عدد ناسلت پیوسته افزایش می‌یابد اما برای نانوسیال حاوی اکسید تیتانیوم بیشترین عدد ناسلت مربوط به غلظت ۰/۲ درصد حجمی می‌باشد و با افزایش غلظت بعد از ۰/۲ درصد حجمی، عدد ناسلت رو به کاهش می‌گذارد. اخوان و هاشمی [۱۴] بر روی جریان آرام نانوسیال روغن‌پایه-اکسید مس در لوله مارپیچ تحت شرایط شار ثابت کارکردند. مشاهدات آن‌ها نشان می‌دهد حداکثر افزایش انتقال حرارت ۱۰۶/۲درصد برای نانوسیال ۲ درصد جرمی به‌دست‌آمده است. اسدی و همکاران [۱۵] به بررسی تجربی و عددی رفتار نانوسیال هیبریدی پایه روغن نانولوله کربنی و اکسید آلومینیوم در کاربردهای خنک کاری پرداختند. آزمایش‌ها در دماهای ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های مختلف از ۰/۱۲۵ تا ۱/۵ درصد وزنی انجام گرفت. از نتایج مشاهده شد ویسکوزیته دینامیکی با افزایش غلظت افزایش‌یافته و هدایت حرارتی نانوسیال نیز با افزایش دما و غلظت افزایش می‌یابد. نبیل و همکاران [۱۶] به بررسی تجربی انتقال و افت فشار نانوسیال ترکیبی پایه آب-اکسید تیتانیوم و سیلیسیم تحت شار حرارتی ثابت و در دماهای ورودی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درجه پرداختند. از نتایج مشاهده شد با افزایش غلظت نانوسیال و دما ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد و همچنین افت فشار با غلظت نانوسیال رابطه مستقیم دارد و با افزایش غلظت نانوسیال، افت فشار نیز بیشتر می‌شود. لی و ژوان [۱۷] بررسی عددی جابجایی اجباری نانوسیال در یک لوله صاف افقی انجام دادند. آن‌ها محاسبات خود را برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم انجام دادند و نتایج نشان می‌داد که افزایش انتقال حرارت حتی برای مقادیر پایین نانوذرات قابل‌ملاحظه است. فیول و همکاران [۱۸] بررسی تجربی انتقال حرارت نانوسیال در لوله مارپیچ انجام دادند. نانوسیالات ساخته‌شده پایه آب بوده و حاوی نانوذرات اکسید مس با غلظت‌های مختلف ۰ تا ۰/۵ درصد می‌باشد. رژیم جریان از نوع آرام بوده و عدد رینولدز در محدوده ۸۱۲ تا ۱۸۹۵ قرار دارد. از نتایج مشاهده می‌شود اضافه شدن نانوذرات در سیال پایه موجب افزایش چشمگیری در ضریب انتقال حرارت شده و با افزایش غلظت نانوسیال مقدار افزایش آن زیاد می‌شود. تیسنگ و وو [۱۹]انتقال حرارت نانوسیال را در یک کانال مربعی به‌صورت عددی موردمطالعه قراردادند. نانوسیال آن‌ها آب-اکسید آلومینیوم بوده و نتیجه‌ی کار آن‌ها نشان داد که افت فشار برای نانوسیال بزرگ‌تر از افت فشار سیال پایه نیست درصورتی‌که انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

کو و همکاران [۲۰] یک تحقیق تجربی برای بررسی افت فشار نانوسیال نانولوله‌های کربنی در لوله افقی را فراهم آوردند. آن‌ها مقادیر مختلف ویسکوزیته برحسب نرخ برش را به دست آوردند و مشاهده کردند که با افزایش نرخ برش ویسکوزیته کاهش می‌یابد. بنابراین، آن‌ها گزارش کردند که افت فشار برای این نانوسیالات به‌طور قابل‌توجهی در جریان آرام افزایش می‌یابد. به‌هرحال زمانی که دبی جریان افزایش یابد افت فشار نانوسیال به سیال پایه نزدیک‌تر می‌شود.

از میان انواع مبدل‌های حرارتی، مبدل حرارتی پوسته و لوله در طبقه‌بندی مبدل‌های حرارتی لوله‌ای قرارگرفته و رایج‌ترین مبدل حرارتی در صنایع مختلف هستند. ازجمله دلایل مهمی که باعث شده‌اند تا این نوع مبدل خاص از مبدل‌های پرکاربردترین مبدل در صنعت شود می‌توان به محدوده عملیاتی گسترده فشاری، بازه وسیع عملیاتی دمایی، قابلیت استفاده در سرویس‌های مختلف فرآیندی، بازه گسترده سطح حرارتی آن اشاره نمود[۲۱]. بررسی جریان سیال حول استوانه و دسته استوانه‌ها کاربرد فراوانی در مهندسی دارد که ازجمله آن می‌توان به افزایش آشفتگی جریان و درنتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت در جریان حول دسته لوله‌ها در مبدل‌های حرارتی به‌واسطه آشفته شدن جریان و کم شدن ضخامت لایه‌مرزی حرارتی اشاره کرد[۲۲]. یانگ و

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

همکاران [۲۳] به بهینه‌سازی هندسی مبدل حرارتی از نوع پوسته ولوله و تأثیر نصب نوار مارپیچ به‌عنوان آشفته ساز در ناحیه پوسته پرداختند. از مدل آشفتگی k-ε برای شبیه‌سازی عددی مبدل حرارتی استفاده شد و از آشفته ساز مارپیچ با ۳ حالت عرض و نسبت پیچش مختلف بر رفتار ترموهیدرولیکی مبدل بررسی شد. نتایج نشان داد با کاهش نسبت پیچش، ضریب انتقال حرارت افزایش‌یافته و افت فشار کلی در ناحیه پوسته بیشتر تحت تأثیر نسبت فاصله و چینش لوله‌هاست و تأثیر عرض آشفته ساز بسیار ناچیز است. آکورک و همکاران [۲۴] بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در لوله مبدل حرارتی دو لوله‌ای در شرایط حضور و عدم حضور آشفته ساز انجام دادند. نانوسیال ها در ۴ غلظت مختلف ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۶ درصد وزنی ساخته شد و عدد رینولدز در محدوده ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ قرار دارد. از نتایج حاکی از آن است عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوسیال افزایش‌یافته و افت فشار نانوسیال ها با غلظت پایین بسیار ناچیز بوده و همچنین استفاده از آشفته ساز موجب افزایش افت فشار و نیز ضریب انتقال حرارت می‌شود.

کومار و همکاران [۲۵] تأثیر نانو سیال‌های آب با نانوذرات اکسید آهن و آلومینیوم در مبدل پوسته و لوله از جریان آرام تا آشفته را موردمطالعه تجربی قراردادند. در این مطالعه نانوسیال با غلظت‌های ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ درصد استفاده‌شده است. اثرات عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات و سیالات پایه مختلف بر انتقال حرارت بررسی‌شده است. نتایج نشان داد با افزایش غلظت نانوذرات، به علت تداخل و اصطکاک نانوذرات افزایش چشمگیری در هدایت حرارتی و انتقال حرارت کلی رخ می‌دهد. فوتوکیان و اصفهانی [۲۶] تحلیل آزمایشگاهی رفتار انتقال حرارت جریان آشفته و بررسی افت فشار نانو سیال آب - اکسید مس در لوله افقی استوانه‌ای انجام دادند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که اضافه کردن میزان کمی از نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش چشمگیری در میزان انتقال حرارت می‌شود. همچنین مشاهده شد در افزایش انتقال حرارت به میزان ۲۵ درصد در اثر اضافه کردن نانوذرات، شاهد افت فشار به میزان ۲ درصد بودند. کومار نایک و وینود [۲۷] انتقال حرارت نانوسیال غیر نیوتنی را در لوله مارپیچ مبدل پوسته و لوله بررسی کردند. از نانوذرات اکسید مس، اکسید آهن و اکسید آلومینیوم برای ساخت نانوسیالات استفاده شد. نتایج نشان داد عدد ناسلت با افزایش غلظت نانوسیالات افزایش می‌یابد و مشخص شد نانوسیال حاوی اکسید مس انتقال حرارت بیشتری نسبت به نانوسیالات حاوی اکسید آهن و آلومینیوم دارد. فرج الهی و همکاران [۲۸] به تحلیل آزمایشگاهی انتقال حرارت نانو سیالات آب-اکسید آلومینیوم(گاما) و آب -اکسید تیتانیوم در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله پرداخته‌اند. اثرات عدد پکلت، غلظت حجمی ذرات معلق و نو ذرات بر انتقال حرارت بررسی‌شده است. بر اساس نتایج مشاهده شد با اضافه کردن نانوذرات میزان انتقال حرارت به شکل قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. مقایسه دو نانوذره نشان می‌دهد که در بعضی از عددهای پکلت رفتار انتقال حرارت نانو سیال حاوی اکسید تیتانیوم در غلظت مساوی در مقایسه با نانو سیال حاوی اکسید آلومینیوم(گاما) بسیار بهتر بوده درحالی‌که در غلظت‌های بالاتر در نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم(گاما) رفتار انتقال حرارت بهتری دارد.

فانیندرا و همکاران [۲۹] به مطالعه تجربی انتقال حرارت جابجایی و مشخصات جریان نانوسیال هیبریدی پایه روغن در مبدل حرارتی تک لوله پرداختند. از نانوذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم برای ساخت نانوسیال هیبریدی استفاده شد. رژیم جریان از نوع آرام بوده و نانوسیال تحت شار حرارتی ثابت قرارگرفته است. از نتایج مشاهده می‌شود انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی به‌مراتب بیشتر از سیال پایه بوده و با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می‌یابد و بیشترین عدد ناسلت برای عدد رینولدز ۱۸۲۰ ثبت گردید. راوی کومار و همکاران [۳۰] به مطالعه تجربی اثر اضافه‌شده آشفته ساز در مبدل حرارتی پوسته و لوله پرداختند. از نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم با کسرهای حجمی ۰/۵و ۱ استفاده کرده‌اند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که اضافه کردن میزان کمی از نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش چشمگیری در میزان انتقال حرارت می‌شود. پونگاوامن و همکاران [۳۱] به تحلیل آزمایشگاهی جریان نانوسیال در مبدل حرارتی لوله‌ای پرداخته‌اند. از نانوسیال اتیلن گلیکل-نانو کربن با غلظت‌های ۰/۶، ۰/۲ و ۰/۴ درصد استفاده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش غلظت مقدار ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد و افت فشار نیز با افزایش دبی جریان و کسر حجمی افزایش می‌یابد. توسار و همکاران [۳۲] رفتار انتقال حرارت و مشخصه‌های جریان در شرایط استفاده از نوار مارپیچ به‌عنوان آشفته ساز به‌صورت عددی موردمطالعه قراردادند. رژیم جریان از

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

نوع آرام بوده و عدد رینولدز در محدوده ۲۰۰ تا ۲۳۰۰ قرار دارد. از نتایج مشاهده می‌شود عدد ناسلت و افت فشار با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و همچنین در شرایط حضور آشفته ساز موجب کاهش دمای دیواره لوله در مقایسه با شرایط عدم حضور آن می‌گردد که این نشان‌دهنده افزایش انتقال حرارت و ذخیره انرژی می‌باشد.

راوی کومار و همکاران [۳۳] به مطالعه تجربی اثر اضافه‌شده نوارهای طولی به‌عنوان آشفته ساز با مقطع توپر با درجات نسبت‌های مختلف در مبدل حرارتی پوسته و لوله پرداختند. از نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم با کسرهای حجمی ۰/۰۰۵، ۰/۰۱ ، ۰/۰۳ و۰/۰۶ استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد عدد ناسلت نانوذرات با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوذرات افزایش‌یافته و با درجات نسبت‌های مختلف نوارهای طولی نسبت عکس‌دارند. واعظی و همکاران [۳۴] تأثیر آشفته ساز های مارپیچ پیوسته و ناپیوسته سوراخ‌دار با اشکال مختلف را در مبدل حرارتی دو لوله بررسی کردند. از نتایج مشاهده می‌شود آشفته ساز ناپیوسته افزایش بیشتری در انتقال حرارت و افت فشار نسبت به آشفته ساز پیوسته دارد. همچنین آشفته ساز ناپیوسته با سوراخ‌های دایره بهترین تأثیر را از بین بقیه سوراخ‌ها با شکل‌های لوزی، مثلثی، مربع و مستطیلی دارد.

با توجه به مطالعات انجام‌شده دیده می‌شود که کارهای کمتری بر روی انتقال حرارت جابجایی توأم در لوله مارپیچ همراه با نانوسیال پایه روغن و همچنین تأثیر آشفته ساز در عملکرد مبدل حرارتی صورت گرفته است. لذا در این مطالعه با توجه به بررسی جدیدترین تحقیقات انجام‌شده بر روی این موضوع مشاهده شد مقطع آزمایش لوله مارپیچ بسیار مهم و پرکاربرد در صنعت و مطالعات آزمایشگاهی می‌باشد، لذا در این مقاله به بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال روغن‌پایه SN300 $-AL_2O_3$ در لوله مسی مارپیچ پرداخته‌شده و تأثیر درصدهای وزنی مختلف نانوسیال و تغییرات دبی جریان موردمطالعه قرارگرفته است. همچنین تأثیر وجود آشفته ساز بر عملکرد انتقال حرارت مبدل حرارتی پوسته و لوله تجزیه‌وتحلیل شده است. آزمایش‌ها تحت دو شار حرارتی ثابت w/m2 3950 وw/m2 5280 و در دماهای۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام‌گرفته است. رژیم جریان از نوع آرام بوده و مقادیر عدد رینولدز در محدوده ۳۰۰ تا ۹۵۰ قرار داشته و آزمایش‌ها برای ۸ دبی مختلف انجام‌گرفته است.

۲- مراحل آزمایش-بخش تجربی

۲-۱-تهیه نانوسیال

اولین قدم در اجرای مطالعه تجربی حاضر، آماده‌سازی نانوسیال و تعلیق پایدار نانوذرات درون سیال پایه می‌باشد. تهیه نانوسیال را که از طریق افزودن نانوذرات به سیال پایه صورت می‌گیرد، نباید مانند یک اختلاط ساده جامد-مایع در نظر گرفت.زیرا تهیه نانوسیال مستلزم ایجاد شرایط خاص و ویژه‌ای است. برخی از این شرایط خاص عبارت است از: یکنواخت بودن سوسپانسیون، پایدار بودن سوسپانسیون، توده‌ای شدن کم ذرات و عدم‌تغییر ماهیت شیمیایی سیال. در این مطالعه برای تهیه نانوسیال روغن‌پایه-Al_2O_3 از روش دومرحله‌ای استفاده شد. برای تهیه نانوسیال از نانوذرات اکسید آلومینیوم-آلفا با قطر ۵۰nm و خلوص ۹۹٪+ ساخت شرکت US Research Nanomaterials, Inc آمریکا استفاده‌شده است. در روش دومرحله‌ای ابتدا نانوذرات توسط همزن مغناطیسی (ساخت شرکت آلمانی Heidolph) در سیال پایه پخش می‌شود. به‌منظور پایداری و از بین بردن نانوذرات به هم چسبیده و کلوخه شده از دستگاه پراب آلتراسونیک UP۴۰۰s (ساخت شرکت آلمانی Hielscher) استفاده گردیده است. در انتها نیز جهت پایدارسازی نهایی و یکنواخت شدن نانوسیال از حمام آلتراسونیک (ساخت شرکت کره‌ای Wisd مدل WUC-D10H) استفاده شد. نانوسیالات در ۴ درصد وزنی مختلف ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ ساخته‌شده است. در شکل (۱) تا (۳) به ترتیب همزن مغناطیسی، دستگاه پراب آلتراسونیک و حمام مغناطیسی استفاده‌شده قابل‌مشاهده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

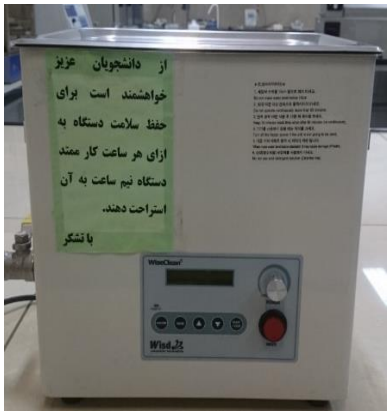
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]



شکل ۱: همزن مغناطیسی



شکل ۲: دستگاه پراب آلتراسونیک



شکل ۳: حمام مغناطیسی

۲-۲-دستگاه آزمایش

به‌منظور تحلیل و بررسی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیال در مقطع مارپیچ تحت شار حرارتی ثابت و تأثیر آشفته ساز بر عملکرد مبدل حرارتی، دستگاه آزمایش مطابق شکل (۴) طراحی و ساخته‌شده است. سیکل جریان سیال شامل چندین بخش می‌شود: مقطع آزمایش، مبدل حرارتی پوسته و لوله (خنک کاری)، دبی سنج، مخزن(پیش گرم‌کن)، پمپ گیربکس، ترموکوپل‌ها، ترمومتر، دیمر، سیستم کنترل جریان.



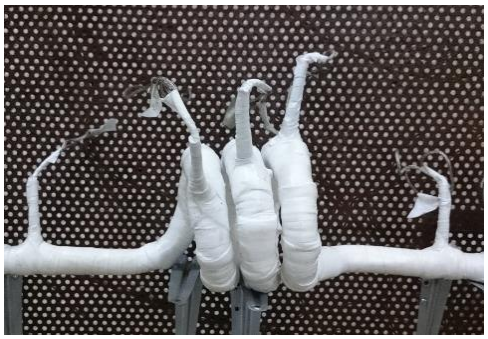
شکل ۴: دستگاه تست نانوسیال

مقطع آزمایش لوله‌ای مسی به طول ۱۵۰ سانتی‌متر، قطر استاندارد خارجی ۱۲/۷میلی‌متر و ضخامت ۱/۱میلی‌متر می‌باشد. این مقطع شامل ۲ ناحیه صاف ورودی و خروجی و ناحیه مارپیچ میانی می‌باشد. ناحیه میانی به‌صورت ۳ حلقه با قطر مساوی و فاصله کاملاً یکسان از یکدیگر از طریق فرآیند خم‌کاری با دقت بالا ساخته‌شده است. دمای سطح لوله و سیال در ۵ نقطه‌ی ورودی، خروجی و سه قله‌ی مقطع آزمایش و همچنین اختلاف فشار ورودی و خروجی آن اندازه‌گیری می‌شود. تمام طول لوله مقطع آزمایش به‌منظور تولید شار حرارتی ثابت توسط سیم المنت کروم-نیکل ۳/۶۹۴ اهم بر متر با گام صفر و ایمن شده توسط دانه تسبیح سرامیکی پوشانده شده است. همچنین به‌منظور به حداقل کردن افت حرارت از لوله به محیط تمامی مقطع آزمایش مطابق شکل(۵) به‌وسیله عایق حرارتی سرامیکی پوشانده شده است. به‌منظور اندازه‌گیری دماهای سطح لوله و سیال در ۵ نقطه‌ی ورودی و خروجی و قله‌های مقطع آزمایش از ۱۰ عدد سنسور دمای PT100 کالیبره شده به فواصل مساوی استفاده‌شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

جهت نمایش و کنترل دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای PT۱۰۰ از ترمومتر های هانیانگ ساخت کشور کره با دقت ۰/۱ استفاده‌شده است.



شکل ۵: مقطع آزمایش

نیروی لازم برای به حرکت درآوردن نانوسیال پایه روغن در سیکل از پمپ دنده‌ای مدل capron A ۳۳x ساخت کشور بلغارستان که به الکتروموتور برق تک فاز با توان ۱ اسب بخار کوپل شده است تأمین می‌شود. مطابق شکل (۶) به‌منظور ایجاد سیکل خنک‌کن و کنترل دمای نانوسیال مبدل حرارتی پوسته و لوله به طول ۱۰۰ سانتی‌متر که شامل لوله آهنی خارجی به قطر ۲ اینچ و لوله مسی داخلی با قطر ۳/۴ اینچ می‌باشد، طراحی و ساخته‌شده است. سیال خنک کار در این مبدل آب شهر بوده و دماهای ورودی و خروجی آب و نانوسیال توسط ۴ سنسور دمای PT100 کالیبره شده اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۶: مبدل حرارتی پوسته و لوله

جهت مشاهده تأثیر آشفته ساز بر عملکرد مبدل حرارتی، آشفته ساز مارپیچ از جنس تسمه فنر فلزی به طول ۱۰۰ cm با پهنای ۱۳ mm و ضخامت ۱ mm طراحی و ساخته‌شده است. فرآیند ساخت آشفته ساز کاملاً دقیق و به‌وسیله دستگاه انجام‌شده است. آشفته ساز به‌گونه‌ای ساخته‌شده است که دارای ۶ گام بافاصله‌های کاملاً یکسان می‌باشد و داخل لوله مبدل حرارتی پوسته و لوله نصب می‌گردد. به‌منظور ذخیره‌سازی، پیش‌گرمایش و کنترل دمای نانوسیال و پمپاژ مجدد آن به سیکل از یک مخزن آهنی با حجم ۸ لیتر استفاده‌شده که انتهای آن یک المنت که به‌وسیله دیمر کنترل می‌شود نصب‌شده است.

۳- روابط حاکم

۳-۱- محاسبه ضریب انتقال حرارتی

با توجه به جنس مس مقطع آزمایش و کاملاً عایق بودن آن حرارت اعمال‌شده بر لوله و گرمای جذب‌شده توسط سیال دارای اختلاف کمتر از ۳ درصد بوده و اتلاف حرارت به محیط بسیار ناچیز می‌باشد. لذا حرارت اعمال‌شده با گرمای جذب‌شده Q با یکدیگر برابر فرض شده و داریم:

$$Q = \dot{m}\, C_p\, (T_o - T_i) \qquad (۱)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

که در رابطه (۱)، $\dot{m}$، C_p، T_i و T_o به ترتیب دبی جرمی، ظرفیت گرمایی ویژه، دمای ورودی و خروجی سیال می‌باشد. شار حرارتی جذب‌شده بر واحد سطح برابر است با:

$$Q'' = \frac{Q}{A_s} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، Q'' و A_s به ترتیب شار حرارتی جذب‌شده توسط سیال و مساحت سطح مقطع آزمایش می‌باشد. ضریب انتقال حرارت جابجایی h و عدد ناسلت Nu از طریق رابطه (۳) و (۴) محاسبه می‌گردد:

$$Q'' = h\,(T_s - T_b) \qquad (۳)$$

$$Nu = \frac{hd}{k} \qquad (۴)$$

که در روابط (۳) و (۴)، T_s دمای متوسط سطح دیواره لوله، T_b دمای متوسط بالک سیال، h ضریب انتقال حرارت جابجایی، Q'' شار حرارتی، Nu عدد ناسلت، d قطر هیدرولیکی و k ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. در این رابطه مقادیر T_s، T_b و Q'' از اطلاعات آزمایش و توسط روابط (۵) و (۶) به دست می‌آیند و داریم:

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^{5} T_{s,i}}{5} \qquad (۵)$$

$$T_b = \frac{\sum_{i=1}^{5} T_{b,i}}{5} \qquad (۶)$$

با توجه به اینکه در سطح مقطع آزمایش ۵ عدد سنسور دما سطحی و ۵ عدد سنسور دمای غوطه‌ور در سیال نصب‌شده است لذا دمای T_s و T_b از میانگین ۵ دمای سطحی اندازه‌گیری شده به دست می‌آید. برای بررسی صحت و دقت دستگاه می‌بایست نتایج داده‌های تجربی با نتایج حاصل از روابط تئوری مقایسه گردد تا اعتبارسنجی به‌درستی انجام گیرد. بدین منظور عدد ناسلت به‌دست‌آمده از داده‌های تجربی با مقادیر محاسبه‌شده از روابط مربوطه محاسبه می‌گردد. در این پژوهش با توجه به خصوصیات هندسی مسئله و رینولدز پایین، جریان کاملاً فراگیر($\frac{x}{D} \geq ۰/۰۵$) می‌باشد. کایز و همکاران [۳۵] برای جریان کاملاً توسعه‌یافته درون لوله دایروی رابطه (۷) را برای محاسبه عدد ناسلت معرفی کردند. در این رابطه با توجه به داشتن دمای سطح و دمای سیال در نقاط مختلف مقطع آزمایش مقدار عدد ناسلت موضعی در نقاط مختلف محاسبه می‌گردد و سپس عدد ناسلت میانگین محاسبه می‌شود و با عدد ناسلت میانگین تجربی به‌دست‌آمده مقایسه می‌گردد.

$$Nu_x = \left[\frac{1}{Nu_\infty} - \frac{1}{2}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{exp\left(-\gamma_m^2 x^+\right)}{A_m \gamma_m^4}\right]^{-1} \left(\frac{\mu_s}{\mu_m}\right)^{-0.14} \qquad (۷)$$

در رابطه(۷) $Nu_\infty = □/□□$، $x^+ = [(\frac{۲x}{d})/Re.Pr]$ و μ_s و μ_m به ترتیب ویسکوزیته سیال در دمای سطح و بالک سیال می‌باشد. مقادیر γ_m و A_m در جدول (۱) آورده شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

جدول ۱: حل سری‌های بی‌نهایت برای لوله دایروی، شار حرارتی ثابت و طول ورودی[۳۵]

M	γ_m^2	A_m
۱	۲۵/۶۸	۷/۶۳۹×۱۰$^{-۳}$
۲	۸۳/۸۶	۲/۰۵۳×۱۰$^{-۳}$
۳	۱۷۴/۲	۰/۹۰۳×۱۰$^{-۳}$
۴	۲۹۶/۵	۰/۴۹۱×۱۰$^{-۳}$
۵	۴۵۰/۹	۰/۳۹۱×۱۰$^{-۳}$

برای مقادیر بزرگ‌تر m: $\gamma_m=۴\,m+\frac{۴}{۳}$, $A_m=۴۱۶۵/۰\gamma_m^{-۷/۳}$

۲-۳- محاسبه ضریب انتقال حرارت کلی مبدل حرارتی

در مبدل حرارتی سیال کاری نانوسیال در لوله و سیال خنک کار آب در ناحیه پوسته جریان دارد. به‌منظور بررسی اثر آشفته ساز بر عملکرد مبدل حرارتی پوسته و لوله، ضریب انتقال حرارت کلی از روش LMTD محاسبه‌شده است و داریم:

$$Q_t=\dot{m}_t C_{p,t}(T_{t,i}-T_{t,o}) \quad (۸)$$

$$Q_{an}=\dot{m}_{an} C_{p,an}(T_{an,i}-T_{an,o}) \quad (۹)$$

$$Q_{ave}=\frac{|Q_t|+|Q_{an}|}{2} \quad (۱۰)$$

که در روابط (۸) تا (۱۰)، Q_t ، Q_{an} و Q_{ave} به ترتیب نرخ انتقال حرارت ناحیه لوله،نرخ انتقال حرارت ناحیه پوسته و نرخ انتقال متوسط می‌باشد که در آن‌ها $\dot{m}_t$ ،$\dot{m}_{an}$ ،$C_{p,t}$ ،$C_{p,an}$ ،$T_{t,i}$ ، $T_{t,o}$ ، $T_{an,i}$ و $T_{an,o}$ به ترتیب دبی جریان ناحیه لوله، دبی جریان ناحیه پوسته، ظرفیت گرمایی ویژه سیال داخل لوله(نانوسیال)، ظرفیت گرمایی ویژه ناحیه پوسته(آب)، دمای سیال در ورودی لوله، دمای سیال در خروجی لوله، دمای سیال در ورودی پوسته و دمای سیال در خروجی پوسته می‌باشد.

به‌منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت کلی می‌بایست اختلاف دمای لگاریتمی توسط رابطه (۱۰) محاسبه گردد که داریم:

$$\Delta T_{LMTD}=\frac{\Delta T_i-\Delta T_o}{ln\left[\frac{\Delta T_i}{\Delta T_o}\right]}=\frac{(T_{t,i}-T_{an,o})-(T_{t,o}-T_{an,i})}{ln\left[\frac{(T_{t,i}-T_{an,o})}{(T_{t,o}-T_{an,i})}\right]} \quad (۱۱)$$

و درنهایت ضریب انتقال حرارت کلی از طریق رابطه (۱۲) محاسبه‌شده است:

$$UA=\frac{Q_{ave}}{\Delta T_{LMTD}} \quad (۱۲)$$

۳-۳-محاسبه افت فشار

برای بررسی صحت و دقت دستگاه می‌بایست نتایج داده‌های تجربی با نتایج حاصل از روابط تئوری مقایسه گردد تا اعتبارسنجی به‌درستی انجام گیرد. بدین منظور با توجه به آرام بودن جریان در این آزمایش، از رابطه (۱۳) برای محاسبه افت فشار جریان در لوله که برای شرایط جریان آرام و توسعه‌یافته می‌باشد؛ استفاده می‌گردد[۳۵] :

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

$$\Delta P = \left[\frac{128Q\mu L}{\pi D^4} + 2\gamma f \frac{L_e}{D}\frac{V^2}{2g}\right]\left(\frac{\mu_s}{\mu_m}\right)^{-0.58} \quad (۱۳)$$

که قسمت اول آن مربوط به افت فشار اصلی جریان سیال به‌واسطه اصطکاک با سطح داخلی لوله و قسمت دوم آن مربوط به افت فشار موضعی می‌باشد. در رابطه فوق Q دبی حجمی سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، L طول لوله، D قطر داخلی لوله، L_e طول معادل لوله، V سرعت متوسط جریان در لوله، γ وزن مخصوص سیال، g شتاب جاذبه و f ضریب اصطکاک بوده که برای جریان آرام توسعه‌یافته هیدرودینامیکی درون لوله مقدار آن برابر است با $f = \frac{\square\square}{\mathrm{Re}}$.

۴-۳-محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال

به‌منظور محاسبه خواص نانوسیال از روابط (۱۴) تا (۱۷) استفاده‌شده است. هدایت حرارتی نانوسیال با استفاده از مدل ماکسول [۱] به دست می‌آید:

$$K_{eff,maxwell} = \left[\frac{k_p + 2k_f + 2\varphi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \varphi(k_p - k_f)}\right] \quad (۱۴)$$

که k_p هدایت حرارتی ذره و k_f هدایت حرارتی سیال پایه و φ درصد حجمی سوسپانسیون می‌باشد.

برای محاسبه گرمای ویژه نانوسیال از رابطه پاک و چو [۳۶] محاسبه می‌گردد:

$$C_{p,n} = \varphi\, C_{p,p} + (1-\varphi) C_{p,f} \quad (۱۵)$$

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_p + (1-\varphi)\rho_f \quad (۱۶)$$

طبق رابطه بریکمن [۳۷]، رابطه (۱۳) برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیال استفاده می‌شود:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (۱۷)$$

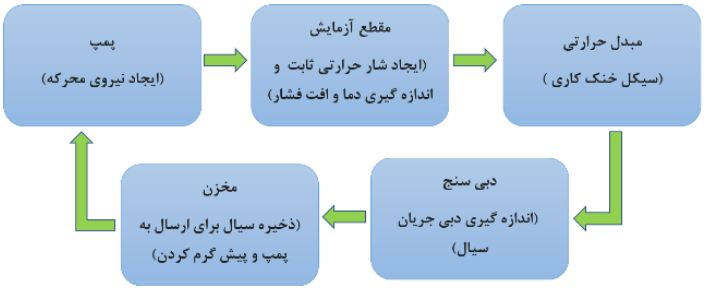
۴- روش انجام آزمایش

در شروع کار مقدار حجم سیال موردنیاز آزمایش که در این پروژه با توجه به سیکل دستگاه ۲/۶ لیتر می‌باشد، درون مخزن ریخته می‌شود. موتورپمپ روغن را جهت به جریان افتادن سیال کاری در سیکل روشن کرده و با استفاده از شیر بای پس، دبی جریان سیال کاری موردنیاز در مدار تنظیم می‌گردد. در مرحله بعد دیمر متصل به المنت روشن گردیده و بر روی شار موردنظر تنظیم می‌شود و سیکل خنک‌کن در مدار قرار می‌گیرد. المنت موجود در مخزن روشن گردیده تا دمای ورودی سیال کاری به ورودی مقطع آزمایش به مقدار موردنظر تنظیم گردد. داده‌ها پس از ۲۵ دقیقه که شرایط پایا برقرار می‌شود، ثبت می‌گردد. نانوسیال جریان یافته در مقطع آزمایش توسط سیم المنت پیچیده شده دور مقطع آزمایش تحت شار حرارتی ثابت قرار می‌گیرد. شار حرارتی اعمال‌شده توسط تنظیم‌کننده ولتاژ بر روی دو شار حرارتی ثابت $۳۹۵۰\mathrm{w/m^2}$ و $۵۲۸۰\mathrm{w/m^2}$ تنظیم می‌گردد. پس از افزایش دمای نانوسیال در مقطع آزمایش به‌منظور کاهش دما وارد مبدل حرارتی می‌شود و پس از کاهش دما به‌منظور پمپاژ مجدد و کنترل دما ورودی به مقطع آزمایش وارد مخزن می‌شود. با تنظیم ولتاژ المنت نصب‌شده در مخزن، نانوسیال پیش گرم شده و در دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم می‌گردد. لازم به ذکر است شارهای حرارتی و دماهای ورودی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

با در نظر داشتن سه عامل مهم انتخاب گردیده است: ۱) شار حرارتی و دمای ورودی می‌بایست متناسب با توان و ظرفیت سیستم خنک کاری مبدل حرارتی باشد تا قابلیت کنترل دمای نانوسیال در ورودی مقطع آزمایش وجود داشته باشد. ۲) شار حرارتی تنظیم‌شده باید متناسب با ظرفیت سیم المنت‌های بکار رفته باشد. ۳) با توجه به اینکه روغن‌پایه SN300 که به‌عنوان سیال پایه استفاده‌شده است پایه نفتی بوده، جهت افزایش ایمنی و جلوگیری از احتمال اشتعال آن، شار حرارتی و دماهای ورودی در مقادیر ذکرشده تنظیم گردید. برای هر نمونه در همه حالت‌های ذکرشده، آزمایش‌ها در تعداد ۸ دبی مختلف ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰، ۲۲/۵ و ۲۵ لیتر بر دقیقه که محدوده رینولدز ۳۰۰ تا ۹۵۰ را شامل می‌شود، انجام‌گرفته است. در شکل۷ سیکل جریان نانوسیال در سیستم قابل‌مشاهده می‌باشد.



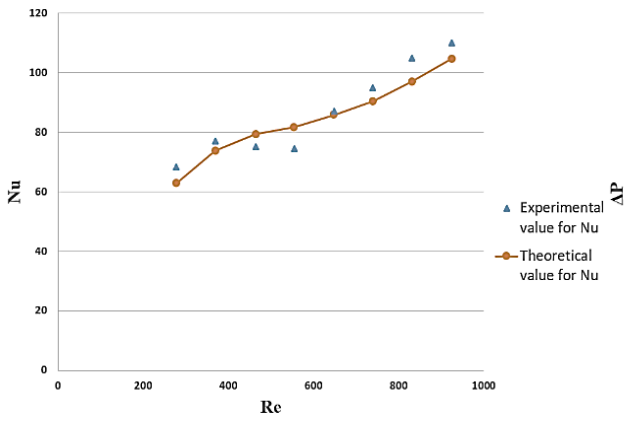
شکل ۷: سیکل جریان نانوسیال

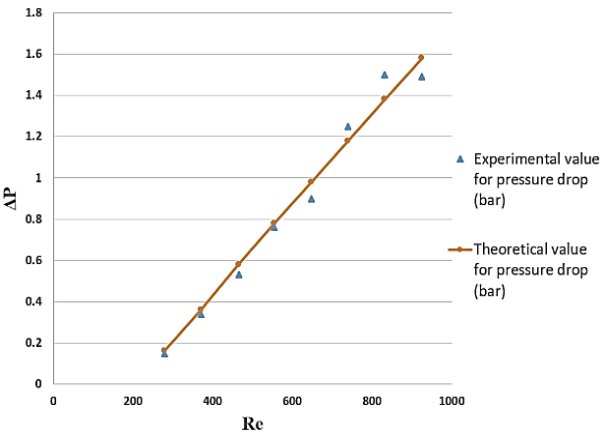
۵

- نتایج

۵-۱- بررسی صحت و دقت دستگاه

در این بخش نتایج حاصل از انتقال حرارت و افت فشار موردبحث و بررسی قرار می‌گیرد. تمامی آزمایش‌ها در دو شار حرارتی ثابت w/m^2 ۳۹۵۰ و w/m^2 ۵۲۸۰ در هر شار حرارتی برای چهار دمای روغن ورودی ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد در ۸ دبی جریان مختلف انجام‌شده است. در ابتدا به‌منظور بررسی صحت و دقت دستگاه آزمایش، قبل از انجام آزمایش بر روی نانوسیالات، روغن‌پایه به‌عنوان سیال کاری در مدار قرارگرفته است. سپس آزمون‌های مربوط در دبی‌های مختلف بر روی روغن‌پایه انجام گردید و داده‌های اختلاف فشار و ترموکوپل‌های نصب‌شده در شرایط مختلف قرائت و ثبت شد. به‌منظور اعتبار سنجی و صحت داده‌های به‌دست‌آمده از روابط (۷) و (۱۳) به ترتیب برای محاسبه تئوری عدد ناسلت و افت فشار استفاده‌شده است. در شکل‌های (۸) و (۹) نمودار حاصل از نتایج تجربی و تئوری رسم گردیده است.

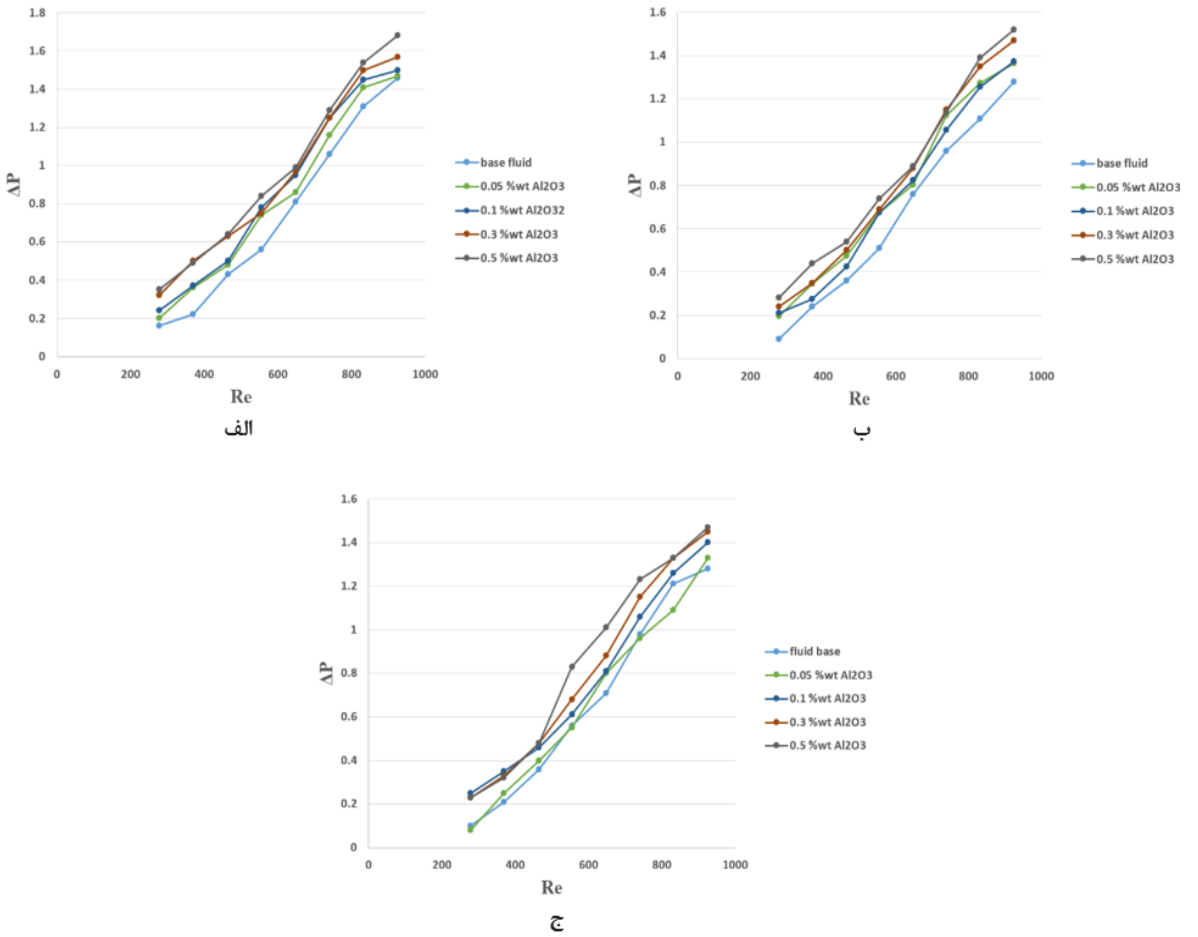




شکل ۸: مقایسه نتایج تئوری و تجربی افت فشار روغن‌پایه **شکل ۹: مقایسه نتایج تئوری و تجربی انتقال حرارت روغن‌پایه**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]



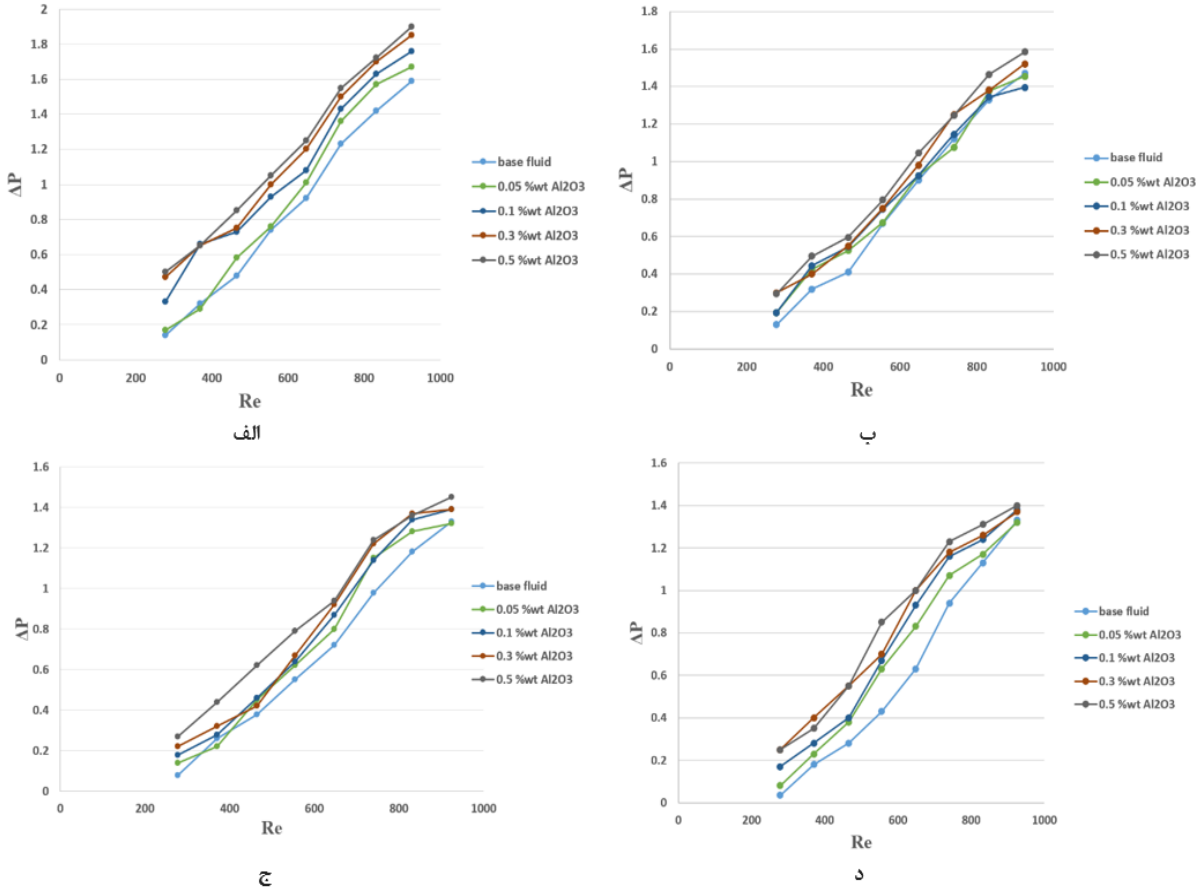
شکل ۱۰: تغییرات افت فشار برحسب عدد رینولدز در شار حرارتی w/m^2 ۵۲۸۰ برای دما های ورودی: الف) ۴۰ °C، ب) ۵۰ °C، ج) ۶۰ °C

با توجه به اینکه در این مطالعه رژیم جریان از نوع آرام می‌باشد، با تغییر دبی از کمترین مقدار تا بیشترین مقدار ممکن قابل‌اندازه‌گیری توسط دبی سنج که ۷/۵ تا ۲۵ لیتر بر دقیقه می‌باشد، مقادیر عدد رینولدز در بازه ۳۰۰ تا ۹۵۰ قرار می‌گیرد. همان‌طور که از شکل (۸) نیز مشاهده می‌شود با افزایش دبی جریان و عدد رینولدز افت فشار نیز افزایش می‌یابد. این روند به این دلیل می‌تواند باشد که هنگامی‌که دبی جریان و یا به‌عبارت‌دیگر عدد رینولدز زیاد می‌شود، اصطکاک جریان با جداره افزایش می‌یابد و انرژی جریان بیشتر تلف می‌شود و موجب کاهش هد کل می‌گردد که این کاهش بیشتر هد به‌واسطه افزایش افت فشار در طول لوله می‌باشد. همچنین این روند با توجه به رابطه (۱۳) نیز قابل توجیه می‌باشد. طبق رابطه (۱۳) دبی جریان با افت فشار رابطه مستقیم دارد و با افزایش دبی جریان، افت فشار نیز افزایش می‌گردد. همان‌طور که از شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. این روند می‌تواند به این دلیل قابل توجیه می‌باشد که ضریب انتقال حرارت با رابطه k/δ_t متناسب می‌باشد. که در این رابطه k و δ_t به ترتیب هدایت حرارتی سیال و ضخامت لایه‌مرزی حرارتی می‌باشند[۳۸]. با افزایش عدد رینولدز جریان متلاطم و آشفته شده که باعث می‌شود ضخامت لایه‌مرزی حرارتی کاهش یابد و درنتیجه موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت می‌شود. از طرفی دیگر نیز با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان افزایش‌یافته و جنب‌وجوش مولکول‌ها و برخورد آن‌ها بیشتر می‌شود و باعث می‌شود سیال گرمای بیشتری را منتقل کند و نرخ انتقال حرارت افزایش یابد و درنتیجه ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت افرایش می‌یابد. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده شد داده‌های تجربی افت فشار دارای حداکثر ۸/۶٪ درصد خطا نسبت به داده‌های تئوری و داده‌های مربوط به انتقال حرارت دارای حداکثر ۹/۵٪ درصد خطا نسبت به داده‌های تجربی هست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با توجه به خطای کمتر از

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

۱۰درصد بین داده‌های تجربی و تئوری، تطابق قابل قبولی بین داده‌های آزمایشگاهی موجود با مقادیر پیش‌بینی‌شده به‌وسیله‌ی رابطه (۷) و رابطه (۱۳) وجود داشته و بدین ترتیب صحت عملکرد و دقت وسایل اندازه‌گیری مورداستفاده را تصدیق می‌نماید.



شکل ۱۱: تغییرات افت فشار برحسب عدد رینولدز در شار حرارتی w/m^2 ۳۹۵۰ برای دما های ورودی: الف) ۳۰ °C، ب) ۴۰ °C، ج) ۵۰ °C، د) ۶۰ °C

۱-۵- نتایج افت فشار

در این بخش نتایج افت فشار جریان روغن‌پایه و نانو سیال‌ها در مقطع آزمایش مارپیچ ارائه گردیده و تأثیر عواملی چون عدد رینولدز، غلظت نانوسیال، دماهای ورودی مختلف و شار حرارتی برافزایش یا کاهش افت فشار بررسی‌شده است. در شکل (۱۰) و (۱۱) به ترتیب نتایج افت فشار برای ۵۲۸۰ w/m2 و ۳۹۵۰ w/m2 ارائه گردیده است. از نتایج مشاهده می‌شود تغییرات پارامترهای افت فشار برای سیال پایه و نانوسیال ها با شیب زیادی با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. از تحلیل نتایج در دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه مشاهده می‌شود با افزایش دما، افت فشار کاهش می‌یابد. بررسی نتایج افت فشار در نانوسیالات مختلف نشان می‌دهد افت فشار نانوسیالات به‌مراتب بیشتر از سیال پایه می‌باشد. افزایش افت فشار در غلظت‌های پایین نانوسیال بسیار کم بوده و با افزایش درصد وزنی نانوسیال ها افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل (۱۰) و (۱۱) بیشترین افزایش افت فشار در نانوسیال با غلظت ۰/۵ درصد وزنی و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. افزایش افت فشار نانوسیال می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی باشد. تعلیق نانوذرات جامد در یک سیال به‌طورکلی ویسکوزیته دینامیکی را نسبت به سیال پایه افزایش می‌دهد. با توجه به رابطه (۱۳) ازآنجایی‌که ویسکوزیته دینامیکی با افت فشار رابطه مستقیم دارد، افزایش ویسکوزیته دینامیکی موجب افزایش افت فشار می‌شود. همچنین با افزایش درصد غلظت نانوسیال به‌مراتب موجب افزایش ویسکوزیته دینامیکی شده و درنهایت منجر به افزایش بیشتر افت فشار می‌شود. علت دیگر افزایش افت فشار نانوسیال ناشی از حرکت بی‌نظم و جابجایی و برخورد نانوذرات در سیال پایه می‌باشد. این دلیل بیان می‌کند

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

که در دبی‌های بالاتر(رینولدزهای بالا) میزان افت فشار بیشتر و در دبی‌های پایین‌تر (رینولدزهای پایین) افت فشار کمتر است. همان‌طور که بیان شد با افزایش دما، افت فشار کاهش می‌یابد و این به آن علت است که با افزایش دما، ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال کاهش می‌یابد و با کاهش ویسکوزیته دینامیکی، طبق رابطه (۱۳) افت فشار کاهش می‌یابد. این مطلب افت فشار بیشتر نانوسیالات با دمای بالاتر را مورد توجیه قرار می‌دهد.

۲-۵- نتایج انتقال حرارت

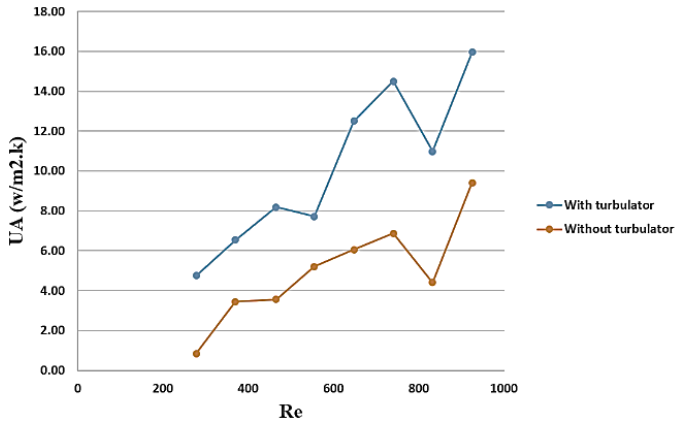
در این بخش نتایج افت فشار جریان روغن‌پایه و نانوسیال‌ها در مقطع آزمایش مارپیچ ارائه گردیده و تأثیر عواملی چون عدد رینولدز، غلظت نانوسیال، دماهای ورودی مختلف و شار حرارتی برافزایش یا کاهش ضریب انتقال حرارت بررسی‌شده است. در شکل (۱۲) و (۱۳) به ترتیب نتایج ضریب انتقال حرارت برای ۵۲۸۰ w/m2 و ۳۹۵۰ w/m2 ارائه گردیده است. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود با افزایش دبی جریان و درنتیجه افزایش عدد رینولدز مقدار ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد که در تمامی حالات آزمایش‌ها این روند برقرار است. میزان افزایش و کاهش ضریب انتقال حرارت تنها به عدد رینولدز وابسته نیست بلکه به غلظت نانوسیال و دمای ورودی و شار حرارتی اعمال‌شده بستگی دارد. همچنین مشاهده شد برای تمامی نانوسیالات در تمام مقادیر عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت بیشتر از سیال پایه می‌باشد. افزایش یا کاهش درصد وزنی نانوسیال تأثیر مستقیمی بر انتقال حرارت دارد و همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود با افزایش درصد وزنی نانوسیالات از ۰/۰۵ تا ۰/۵ درصد وزنی مقدار ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد و بیشترین ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال با ۰/۵ درصد وزنی مشاهده می‌شود. همان‌طور که بیان گردید ضریب انتقال حرارت به دمای نانوسیال نیز بستگی دارد . نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای ورودی نانوسیال از ۳۰ درجه سانتی‌گراد تا ۶۰ درجه سانتی گرا ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد به‌نحوی‌که که بیشترین ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال با غلظت ۰/۵ درصد وزنی و در دمای ورودی ۶۰ درجه سانتی گرد مشاهده می‌شود. افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی باشد. به‌طورکلی ضریب انتقال حرارت جابجایی را می‌توان متناسب با k/δ_t دانست که k و δ_t به ترتیب هدایت حرارتی سیال و ضخامت لایه‌مرزی حرارتی می‌باشند. بنابراین در صورت افزایش هدایت حرارتی و کاهش ضخامت لایه‌مرزی حرارتی، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در مطالعات قبل گزارش‌شده است، افزودن نانوذرات به سیال پایه به‌واسطه بالا بودن هدایت حرارتی نانوذرات باعث افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال می‌شود. از طرفی حرکات بی‌نظم و تصادفی نانوذرات درون جریان سیال، سبب می‌شود توسعه لایه‌مرزی حرارتی به تأخیر افتد و ضخامت لایه‌مرزی کاهش یابد و انتقال حرارت افزایش‌یافته و درنهایت ضریب انتقال حرارت بزرگ‌تری به دست آید. این علت توسط گروه‌های تحقیقاتی مختلفی ازجمله دینگ و همکاران [۳۹] و هی و همکاران [۴۰] به‌منظور توجیه افزایش ضریب انتقال حرارت نیز بیان‌شده است. به‌طورکلی افزودن نانوذرات به سیال، ساختار جریان را به‌گونه‌ای تغییر می‌دهد که علاوه برافزایش هدایت حرارتی، عواملی نظیر حرکات بی‌نظم و اتفاقی نانوذرات، پراکندگی نانوذرات معلق شده و آشفتگی نانوذرات منجر به افزایش نرخ تبادل انرژی و درنتیجه بالا رفتن نرخ انتقال حرارت بین سیال و دیواره می‌شود. افزایش غلظت حجمی نانوذرات برهمکنش و برخورد میان نانوذرات را افزایش می‌دهد. همچنین حرکت نسبی و نفوذ نانوذرات نزدیک دیواره منجر به انتقال حرارت سریع‌تر از دیواره به نانوسیال می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، افزایش غلظت نانوذرات مکانیسم‌های مرتبط با افزایش انتقال حرارت را تشدید می‌کند. همان‌طور که از تمامی حالات شکل (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد که این روند را می‌تواند به‌این‌علت باشد که با افزایش عدد رینولدز جریان متلاطم و آشفته شده که باعث می‌شود ضخامت لایه‌مرزی حرارتی کاهش یابد و درنتیجه موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت می‌شود. از طرفی دیگر نیز با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان افزایش‌یافته و جنب‌وجوش مولکول‌ها و برخورد آن‌ها بیشتر می‌شود و باعث می‌شود سیال گرمای بیشتری را منتقل کند و نرخ انتقال حرارت افزایش یابد و درنتیجه ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

۳-۵- نتایج تأثیر آشفته ساز بر عملکرد مبدل حرارتی

به‌منظور مشاهده تأثیر آشفته ساز بر عملکرد مبدل حرارتی، آشفته ساز نوع مارپیچ طراحی و ساخته‌شده است. دو آزمایش در شرایط کاملاً یکسان برای سیال روغن‌پایه در شار حرارتی ثابت ۵۲۸۰ w/m2 انجام گردید با این تفاوت که در آزمایش اول آشفته ساز در لوله مبدل حرارتی قرار نداشته و در آزمایش دوم آشفته ساز در مبدل حرارتی نصب گردیده است. در شکل (۱۴) نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت کلی برای دو حالت حضور و عدم حضور آشفته ساز ترسیم‌شده است.



شکل ۱۴: نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت کلی در شرایط حضور و عدم حضور آشفته ساز

همان‌طور که از شکل (۱۴) مشاهده می‌شود استفاده از آشفته ساز در مبدل حرارتی تأثیر بسزایی در افزایش ضریب انتقال حرارت کلی مبدل حرارتی پوسته و لوله داشته و باعث افزایش نرخ خنک کاری می‌شود. استفاده از آشفته ساز مارپیچ باعث حرکت جریان سیال به سمت دیواره می‌شود که منجر به ایجاد جریان چرخشی، اختلاط بیشتر سیال از مرکز به مناطق دیواره لوله ، ایجاد اختلال و افزایش تلاطم جریان سیال و کاهش ضخامت لایه‌مرزی حرارتی می‌شود. از طرفی آشفته ساز باعث افزایش مسیر جریان سیال شده و جریان سیال مدت‌زمان بیشتری در تماس با سطح تبادل حرارتی قرار می‌گیرد که منجر به تبادل انرژی بهتر و درنتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود[۳۲]. همچنین با توجه به اینکه ضریب انتقال حرارت متناسب با رابطه k/δ_t می‌باشد با کم شدن ضخامت لایه‌مرزی حرارتی در اثر اغتشاش جریان سیال، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد[۳۸]. همان‌طور که از شکل (۱۴) مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز به دلیل اینکه جریان آشفته‌تر شده و تلاطم و اختلال آن نیز بیشتر می‌شود، ضخامت لایه‌مرزی حرارتی دچار کاهش بیشتری می‌شود که درنهایت منجر به افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت کلی نسبت به رینولدزهای پایین‌تر می‌شود. با تحلیل نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد استفاده از آشفته ساز مارپیچ در مبدل حرارتی پوسته و لوله موجب افزایش ضریب انتقال حرارت کلی مبدل به میزان حداکثر ۵۲/۸۶ ٪ می‌شود که بسیار حائز اهمیت می‌باشد. همچنین در نمودار شکل (۱۴) در محدوده رینولدز ۸۵۰، افت ناگهانی ضریب انتقال حرارت کلی مشاهده می‌گردد که علت آن می‌تواند ناشی از خطای سنسور دما باشد.

۶-نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال پایه روغنAL2O3-SN300 در مقطع آزمایش مارپیچ انجام گردید. همچنین تأثیر آشفته ساز بر عملکرد انتقال حرارت مبدل حرارتی پوسته و لوله موردبررسی قرار گرفت. رژیم جریان از نوع آرام بوده و عدد رینولدز در محدوده ۳۰۰ تا ۹۵۰ قرار می‌گیرد. تمامی آزمایش‌ها در دو شار حرارتی در۳۹۵۰ w/m2 و ۵۲۸۰ w/m2 هر شار حرارتی برای چهار دمای روغن ورودی ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام‌شده است. برای هر نمونه در همه حالت‌های ذکرشده، آزمایش‌ها در تعداد ۸ دبی مختلف ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰، ۲۲/۵ و ۲۵ لیتر بر دقیقه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

انجام‌گرفته است. از روغن‌پایه SN۳۰۰ به‌عنوان سیال پایه استفاده‌شده و به‌منظور مشاهده اثر نانوذرات مختلف با غلظت‌های گوناگون بر رفتار انتقال حرارت و افت فشار، در این پروژه از نانوذره اکسید آلومینیوم با ۴ درصد وزنی مختلف ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد استفاده‌شده است.

با بررسی نتایج انتقال حرارت مشاهده گردید:

- با افزایش دبی جریان و درنتیجه افزایش عدد رینولدز مقدار ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد که در تمامی حالات آزمایش‌ها این روند برقرار است.
- میزان افزایش و کاهش ضریب انتقال حرارت تنها به عدد رینولدز وابسته نیست بلکه به غلظت نانوسیال و دمای ورودی و شار حرارتی اعمال‌شده بستگی دارد.
- همان‌طور که قابل پیش‌بینی هست با توزیع ذرات نانو در سیال پایه به دلیل بالا بودن ضریب هدایت حرارتی‌شان باعث افزایش ضریب انتقال حرارت سیال می‌شود.
- برای تمامی نانوسیالات در تمام مقادیر عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت بیشتر از سیال پایه می‌باشد.
- افزایش یا کاهش درصد وزنی نانوسیال تأثیر مستقیمی بر انتقال حرارت دارد؛ همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود با افزایش درصد وزنی نانوسیالات از ۰/۰۵ تا ۰/۵ درصد وزنی مقدار ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر با تحلیل نتایج حاصل از افت فشار نتایج ذیل مشاهده شد:

- تغییرات افت فشار با عدد رینولدز برای سیال پایه تقریباً یکسان بوده و با افزایش عدد رینولدز افت فشار افزایش می‌یابد.
- افت فشار با عدد رینولدز برای تمامی نانوسیالات تقریباً یکسان بوده و با افزایش عدد رینولدز افت فشار افزایش می‌یابد.
- این مطلب مؤید آن است که افت فشار نانوسیالات به علت افزایش ویسکوزیته بوده و به همان نسبت افزایش می‌یابد.
- افت فشار نانوسیالات به‌مراتب بیشتر از سیال پایه بوده و با افزایش غلظت نانوسیال افت فشار افزایش می‌یابد.
- با افزایش دما ورودی، افت فشار کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه(۱۳) با افزایش دما؛ ویسکوزیته روغن کاهش می‌یابد و با کاهش ویسکوزیته مقدار افت فشار افزایش می‌یابد.

همچنین با بررسی اثر آشفته ساز بر انتقال حرارت مبدل حرارتی پوسته و لوله مشاهده شد استفاده از آشفته ساز در مبدل حرارتی تأثیر بسزایی در افزایش ضریب انتقال حرارت کلی مبدل حرارتی پوسته و لوله داشته و موجب افزایش ضریب انتقال حرارت کلی مبدل به میزان حداکثر ۵۲/۸۶ ٪ می‌شود.

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی

مساحت	A
قطر	d
فشار	p
سرعت	v
ضریب انتقال حرارت	h
ضریب هدایت حرارتی	k
ظرفیت گرمایی ویژه	c_p
دما	T
شار حرارتی	$Q"$
نانوسیال	nf
سیال	f
نانوذره	p

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

علائم یونانی

چگالی	ρ
ویسکوزیته	μ

مراجع

[1] J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, second edition,Clarendon Press (1881).

[2] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of γ-Al_2O_3, SiO_2, and TiO_2 ultra-fine particles), Netsu Bessie, 4 (1993) 27-33.

[3] S. U. S. Choi, Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, 66 (1995) 99-105.

[4] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of Nano fluids, journal of heat transfer, 125 (2003) 151-155.

[5] A. F. Niwalkar, J. M. Kshirsagar, K. Kulkarni, Experimental investigation of heat transfer enhancement in shell and helically coiled tube heat exchanger using SiO2/ water nanofluids, Materials today: proceeding, 18 (2019), 947-962.

[6] D. J. Faulkner, D. R. Rector, J. J. Davidson, R. Shekarriz, Enhanced heat transfer through the use of Nano fluids in forced convection, conference of International Mechanical Engineering Congress and Exposition, (2004).

[7] W. Yu, H. Xie, L. Chen, Y. Li, D. Li, The preparation enhacement of nanofluid containing graphene oxide nanofluids, 14th International Heat Transfer Conference, (2010).

[8] M. Korpys, G. Dzido, M. H.Al-Rashid, J. Wojcik, Experimental and numerical study on heat transfer intensification in turbulent flow of CuO–water nanofluids in horizontal coil, Chemical Engineering and Processing:Process Intensification, 153 (2020) 1-24.

[9] I. Gherasim, G. Roy, C. T. Nguyen, D. Vo-Ngoc, Experimental investigation of nanofluids in confined laminar radial flows, International Journal of Thermal Sciences, 48 (2009) 1486-1493.

[10] S. vafaei, D. Wen, Convective Heat Transfer of Alumina Nanofluids in a Microchannel, 14th International Heat Transfer Conference, (2010) 585-589.

[11] M. A. Akhavan-Behabadi, M. Saeedinia, Effect of Coiled Wire Insert on Heat Transfer and Pressure Drop of CuO-Base Oil Nano fluid Flow in a Horizontal Tube Under Constant Heat Flux, International Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Applications, (2010).

[12] P.C. Mukesh Kumar, M. Chandrasekar, CFD analysis on heat and flow characteristics of double helically coiled tube heat exchanger handling MWCNT/water nanofluids, Heliyon, 5 (2019) 1-11.

[13] M. R. Khadangi, S. G. Etemad, R. Bagheri, Convection Heat Transfer of Nano Fluids under Constant Wall, International Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Application, (2010).

[14] M.A. Akhavan-Behabadi, S.M. Hashemi, Heat Transfer Character Oil Nano Fluid Laminar Flow inside Helically Coiled Tube Under Fluxes, International Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Application, (2010).

[15] A. Asadi, M. Asadi, A. Rezaniakolaei, L. A. A Rosendahl, M. Afrand, S. Wongwises, Heat transfer efficiency of Al2O3-MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: An experimental and theoretical investigation, International Journal of Heat and Mass Transfer, 117 (2018) 474–486.

[16] M. F. Nabil, W.H. Azmi, K. A. Hamid, R. Mamat, Experimental investigation of heat transfer and friction factor of TiO2-SiO2 nanofluids in water:ethylene glycol mixture, International Journal of Heat and Mass Transfer, 124 (2018) 1361-1369.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

[17] Q. Li, Y. Xuan, Convective Heat Transfer and Flow Characteristics of Cu-Water Nano fluid, Science China Technological Sciences, 4 (2002) 408-416.

[18] P.J. Fule, B.A. Bhanvase, S.H. Sonawan, Experimental investigation of heat transfer enhancement in helical coil heat exchangers using water based CuO nanofluid, Advanced Powder Technology, 28 (2017) 2288-2294.

[19] W. Tseng, C.H. Wu, Aggregation, rheology and electrophoretic packing structure of aqueous Al2O3 nanoparticle suspensions, Acta Materialia, 50 (2002) 3757-3766.

[20] G. B. Ko, K. Heo, D. S. Kim, C. Kim, Y. Sohn, M. Choi, An experimental study on the pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in a horizontal tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50 (2007) 4749-4753.

[21] A. mohammadi, A. haghighi, F. hormozi, Heat Transfer Improve in Heat Exchangers using Flow of Nanofluids, Iranian Gas Engineering Journal, 277 (2004) 100-103.

[22] S. M. Kia, F. Talebi, Numerical investigation of unsteady flow around a circular cylinder at different reynolds number, 26th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineers, Semnan, Iran, (2018).

[23] D. Yang, T. Khan, E. Al-Hajri, Z. Ayub, A. Ayub, Geometric optimization of shell and tube heat exchanger with interstitial twisted tapes outside the tubes applying CFD techniques. Applied Thermal Engineering. 32 (2019) 1-64.

[24] E. F. Akyurek, K. Gelis, B. Sahin, E. Manav, Experimental analysis for heat transfer of nanofluid with wire coil turbulators in a concentric tube heat exchanger, Results in Physics, 9 (2018) 376-389.

[25] N. Kumar, S. Sonawane, Experimental study of Fe_2O_3-water and Fe_2O_3-ethylene glycol nanofluid heat transfer enhancement in a shell and tube heat exchanger, Internatinoal communication in heat and mass transfer, 78, (2017) 277-296.

[26] S. Fotukian, M. Esfahani, Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube, International Communications in Heat and Mass Transfer, International Communications in Heat and Mass Transfer, 29, (2018) 225-240.

[27] B. Anil Kumar Naik, A. Venu Vinod, Heat transfer enhancement using non-Newtonian nanofluids in a shell and helical coil heat exchanger, Experimental Thermal and Fluid Science, 90 (2018) 132–142.

[28] B. Farajollahi, S. Etemad, M. Hojjat, Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger, International Journal of Heat and Mass Transfer, 16 (2017) 100-103.

[29] Y. Phanindra, S.D Kumar, S. Pugazhendhi, Experimental Investigation on Al2O3 & Cu/Oil Hybrid Nano fluid using Concentric Tube Heat Exchanger, Materials Today: Proceedings, 5 (2018) 12142–12150.

[30] N.T. Ravi Kumar, P. Bhramara, L. Syam Sundar, K. Singh, C.M. Sousa, Heat transfer, friction factor and effectiveness of Fe_3O_4 nanofluid flow in an inner tube of double pipe U-bend heat exchanger with and without longitudinal strip inserts, Experimental Thermal and Fluid Science, 17 (2017) 1-50.

[31] K. Poongavanam, K. Panchabikesan, S. Duraisamy, V. Ramalingam, R. Murugesan, Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of MWCNT- solar glycol based nanofluids in shot peened double pipe heat exchanger, Powder Technology, 19 (2019) 1-52.

[32] M. Tusar, K. Ahmed, M. Bhuiya, P. Bhowmik, M. Rasoul, N. Ashwath, CFD study of heat transfer enhancement and fluid flow characteristics of laminar flow through tube with helical screw tape insert, Energy Procedia, 160 (2019) 699-706.

[33] T. Ravi Kumar, P. Bhramara, T. Kumar, Effect of twisted tape inserts on heat transfer and friction factor of Fe_3O_4 nanofluids flow in a double pipe U-bend heat exchanger, International communication in Heat and Mass Transfer, 36 (2018) 100-103.

[34] A. Vaisi, R. Moosavi, M. Lashkari, M. Mohsen Soltani, Experimental investigation of perforated twisted tapes turbulator on thermal performance in double pipe heat exchangers, Chemical Engineering and Processing:Process Intensification, 154 (2020) 1-35.

[35] W.M Kays, M. E. Crawford, B. Weigand, Convective heat and masstransfer, Fourth edition, Mc Graw Hill, (2005).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

[36] B. Pak, Y. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Experimental heat transfer, 11 (1998) 151-170.

[37] H. C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solution, journal of chemical and physics, 20 (1952) 571-581.

[38] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, John Wiley and Sons Ltd (2004).

[39] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R. A. Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), International Journal of Heat and Mass Transfer, 49 (2006) 240-250.

[40] Y. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang, H. Lu, Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO2 nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50 (2007) 2272-2281.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]

چکیده انگلیسی:

Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of Al2O3-base oil nanofluid in a helically coiled tube and effect of turbulator on the thermal performance of shell and tube heat exchanger

Seyed Mahmood Kia[1], Mohammad Hasan Nobakhti[2*], Morteza Khayat[3]

[1]Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2] Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[3] Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: April 2020, Accepted: November 2020

Abstract

These days With respect to the high importance of energy concept, limitation of natural resources, regulation of environmental issues, and global warming, heat transfer systems' applications get more attention. In the present paper, the experimental effect of Nano-fluid and turbulator on the heat transfer and pressure drop is investigated. AL2O3-SN300 base oil nanofluid with weight percentage of 0.05, 0.1, 0.3, and 0.5 are used. To investigate the effect of heat transfer, a steel twisted tape turbulator was inserted inside pipe of shell and tube heat exchanger. The experiments were conducted under a constant heat flow rate of 3950 W/m2 and 5280 W/m2 and temperatures of 30, 40, 50, and 60 C. The whole process has been repeated for eight different mass flow rates under the laminar flow condition and Reynolds number ranges from 300 to 950. The results show a higher heat transfer coefficient of Nano-fluid than the base fluid. Increasing the weight percentage of Nano-fluid caused enhancement of heat transfer coefficient and pressure drop in the system. The heat transfer coefficient directly relates to the mass flow rate and increases by raising the Reynolds number. The results reveal that using a turbulator enhances the heat transfer significantly. The experimental results are in reasonable agreement with theory by less than 10 percent mean error.

Key words: Base oil nanofluid, Turbulator, Heat transfer coefficient, Pressure drop
*corresponding author: m.nobakhti@srbiau.ac.ir

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.5.6]