بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت جریان نانو سیال در لوله U-شکل

پایان نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی

محمد راسخ

اساتید راهنما

دکتر ابراهیم شیرانی

دکتر محمد علی اخوان

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی آقای محمد راسخ

تحت عنوان

بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت جریان نانو سیال در لوله U-شکل

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه	دکتر ابراهیم شیرانی
۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه	دکتر محمد علی اخوان
۳- استاد داور	دکتر احمد صداقت
۴- استاد داور	دکتر محمد رضا سلیم پور
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سعید ضیائی راد

تشکر و قدردانی

از اساتید عزیزم دکتر ابراهیم شیرانی و دکتر محمد علی اخوان بهابادی به واسطه زحمات و راهنمایی‌های ارزشمندشان در انجام این پروژه تشکر و قدردانی می‌کنم.

از جناب آقای نوروز که در تکمیل این پروژه مرا کمک کردند، تشکر و قدردانی کرده و از خداوند متعال سربلندی و موفقیتشان را در تمام مراحل زندگی خواستارم. همچنین از جناب آقای مهندس جابر بابایی و دکتر علیمراد رشیدی که در انجام این پروژه با مشاوره‌های بی‌دریغ خود مرا یاری نمودند، تشکر می‌کنم.

در پایان نیز همراهی‌ها و همکاری‌های دوستان عزیزم آقایان امیر بهادر مشهدی و محسن لاهوتی را ارج می‌نهم و صمیمانه از ایشان تشکر می‌کنم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

تقدیم به اسطوره‌های عشق و پایداری؛

مادر و پدرم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ۱

چکیده ۱

فصل اول ۲

مقدمه ۲

۱ - ۱ کلیات ۲

۱-۲ روش‌های افزایش انتقال حرارت ۴

۱-۳ کاربردهای نانوسیال و لوله های U- شکل ۵

۱-۴ تعریف مسئله ۶

۱-۵ اهداف مطالعه ۷

۱-۶ روش اجرای طرح ۸

فصل دوم ۲

مروری بر تحقیقات گذشته ۲

۲-۱ مقدمه ۲

۲-۲ نانوسیال ۱۰

۲-۲-۱ روشهای تهیه نانوسیال ۱۰

۲-۳ یافته های تجربی نانوسیال ۱۲

۲-۳-۱ اندازه گیری هدایت حرارتی ۱۲

۲-۳-۲ مطالعات رئولوژیکی و اندازه‌گیری ویسکوزیته ۱۶

۲-۳-۳ انتقال حرارت جابجایی ۱۷

۲-۳-۴ افت فشار ۲۰

۲-۴ بررسی روابط ارائه شده برای نانوسیالات ۲۲

۲-۴-۱ چگالی و گرمای ویژه نانوسیال ۲۲

۲-۴-۲ ویسکوزیته نانوسیال ۲۳

۲-۴-۳ هدایت حرارتی نانوسیال ۲۴

۲-۴-۴ انتقال حرارت جابجایی نانوسیال ۲۸

۲-۵ ساختار و دلایل افزایش انتقال حرارت در نانوسیال ۳۰

فصل سوم ۹

انتخاب سیال پایه و نانوذرات ۹

۳-۱ انتخاب سیال پایه ۹

۳-۲ ویژگی های روغن پایه ۳۴

۳-۳ انتخاب نوع نانوذرات ۳۷

فصل چهارم ۳۹

دستگاه آزمایش ۳۹

۴-۱ تشریح دستگاه آزمایش ۳۹
۴-۲ کالیبراسیون وسایل اندازه‌گیری ۴۳
۴-۳ تهیه نانوسیال ۴۴
۴-۴ دستور العمل آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها ۴۶

فصل پنجم ٤٨

بررسی رفتار و خواص نانو سیال ٤٨

۵-۱ مقدمه ۴۸
۵-۲ اندازه گیری چگالی نانوسیال ۴۹
۵-۳ اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی ۴۹
۵-۴ رفتار رئولوژیکی نانوسیال و اندازه گیری ویسکوزیته ۵۲
۵-۵ اندازه گیری گرمای ویژه ۵۷
۵-۶ جمع بندی ۶۰

فصل ششم ٦١

ارائه نتایج و بحث ٦١

۶-۱ مقدمه ۶۱
۶-۲ نحوه محاسبات ۶۲
۶-۲-۱ محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی ۶۲
۶-۲-۲ محاسبه ضریب انتقال حرارت میانگین ۶۳
۶-۲-۳ محاسبه عدد نوسلت ۶۳
۶-۲-۴ حل تئوری مسئله در حالت خاص ۶۳
۶-۳ بررسی دقت و تایید دستگاه آزمایش توسط روغن پایه خالص ۶۷
۶-۴ نتایج حاصل انتقال حرارت برای لوله U-شکل ۶۹
۶-۴-۱ تاثیر تغییر در شار حرارتی یکنواخت خارجی ۶۹
۶-۴-۲ تأثیر تغییر در عدد رینولدز بر عدد نوسلت محلی ۷۳
۶-۴-۳ تأثیر غلظت نانولوله بر انتقال حرارت ۷۷
۶-۴-۴ تاثیر شعاع لوله U-شکل ۸۰
۶-۴-۵ تاثیر اسیدیته (pH) ۸۴
۶-۴-۶ جمع‌بندی نتایج آزمایشگاهی ۸۷
۶-۵نتایج افت فشار بدست آمده برای لوله U-شکل ۸۸
۶-۵-۱ تاثیر شار حرارتی و عدد رینولدز ۸۸
۶-۵-۲ تاثیر افزودن نانولولههای کربنی بر افت فشار جریان سیال ۹۱
۶-۵-۳ تاثیر شعاع لوله U-شکل ۹۳
۶-۵-۵ جمع‌بندی نتایج افت فشار لوله U-شکل ۹۴
۶-۶ روابط تجربی برای عدد نوسلت و ضریب اصطکاک ۹۵
۶-۶-۱ رابطه تجربی برای محاسبه عدد نوسلت ۹۶

۶-۶-۲ رابطه تجربی برای محاسبه ضریب اصطکاک ۹۷
۶-۷ حل عددی جریان در لوله U-شکل ۹۸
۶- ۷ -۱ مشخصات مدل ۹۸
۶- ۷ – ۲ بررسی استقلال شبکه ۹۹
۶- ۷ -۳ روند حل عددی ۱۰۱
۶-۷-۴ نتایج حاصل از انتقال حرارت در لوله U-شکل ۱۰۲
۶-۷-۵ نتایج حاصل از افت فشار در لوله U-شکل ۱۰۳
۶-۷-۶ بررسی میدانهای سرعت، دما و فشار ۱۰۳
۶-۸ ارزیابی عملکرد استفاده از نانوسیال از بعد افزایش توأم انتقال حرارت و افت فشار ۱۰۷
۶- ۸-۱ ارزیابی عملکرد توأم لوله U-شکل و نانوسیال ۰/۶۹ درصد جرمی ۱۰۸
۶- ۹ مقایسه حل عددی و حل تجربی ۱۰۹
۶-۹-۱ مقایسه نتایج حاصل از انتقال حرارت در لوله U-شکل ۱۰۹
۶-۹-۲ مقایسه نتایج حاصل از افت فشار در لوله U-شکل ۱۱۰
۶-۹-۳- جمع بندی نتایج حل عددی ۱۱۱

فصل هفتم ۱۱۰

نتیجه‌گیری ۱۱۰

۷-۱ مقدمه ۱۱۰

۷-۲ خصوصیات ترموفیزیکی سیالات مورد آزمایش ۱۱۱
۷-۳ نتایج آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال داخل لوله U-شکل ۱۱۱
۷-۴ نتایج آزمایشگاهی افت فشار جریان نانوسیال داخل لوله U-شکل ۱۱۲
۷-۵ نتایج حاصل از حل عددی ۱۱۳
۷-۵ پیشنهاد برای تحقیقات آینده ۱۱۴

پیوست ۱۱۵

تحلیل خطای نتایج آزمایشگاهی ۱۱۵

پ-۱ مقدمه ۱۱۵
پ-۲ خطای محاسبه ضریب انتقال حرارت محلی ۱۱۶
پ-۳ خطای محاسبه ضریب انتقال حرارت میانگین ۱۱۸
پ-۴ خطای محاسبه عدد نوسلت ۱۱۸
پ-۵ خطای محاسبه عدد نوسلت میانگین ۱۱۸
پ-۶ خطای محاسبه عدد رینولدز ۱۱۸
پ-۷ خطای محاسبه عدد پرانتل ۱۱۹
پ-۸ خطای محاسبه عدد پکلت ۱۱۹
پ-۹ خطای محاسبه ضریب اصطکاک ۱۱۹
پ-۱۰ خطاهای دستگاههای اندازه گیری ۱۲۰
پ-۱۱ خطای آزمایش‌ها ۱۲۰

مراجع ۱۲٤

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱. مقایسه مقادیر تجربی هدایت حرارتی نانوسیالات [۴۴]. ۱۶

شکل ۲-۲. خواص رئولوژیکی نانوسیال آب –اکسیدآلومنیوم [۵۶]. ۱۷

شکل ۲-۳. شماتیک دستگاه آزمایش فوتوکیان و نصر اصفهانی [۷۲]. ۲۲

شکل ۲-۴. شماتیک مقطع ساختار نانوسیال [۷۹]. ۲۵

شکل ۲-۵. مقادیر مختلف هدایت حرارتی برحسب درصد حجمی نانوسیال آب/AL_2O_3 [۸۰]. ۲۵

شکل ۲-۶. شماتیک چند مکانیزم ممکن افزایش K : (A) افزایش بدلیل هدایت بالای لایه مایع در ساختار سطح تماس مایع/ذره؛ (B) انتشار و حرکت پرتابی فوتون در ذره جامد؛ (C) افزایش K بدلیل افزایش اثر ϕ از خوشه شدن نانوذرات. ۳۱

شکل ۲-۷. تصاویر (TEM) میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده پراکندگی نانوذرات [۹۴]. ۳۲

شکل ۴-۱. طرح شماتیک سیستم آزمایشی ۴۰

شکل ۴-۲. تصویر دستگاه آزمایش برای لوله مستقیم ۴۰

شکل ۴-۳. تصویر دستگاه آزمایش برای لوله U–شکل ۴۱

شکل ۴-۴. تصویر پمپ و شیر بر روی خط جریان برگشتی ۴۱

شکل ۴-۵. تصویر دستگاه فشارسنج دیفرانسیلی در مدار آزمایش ۴۳

شکل ۴-۶. تصویر بخش اندازه گیری دبی ۴۳

شکل ۴-۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نانولوله های کربنی چند لایه ۴۴

شکل ۴-۸. آنالیز RAMAN نانو لوله های کربنی چند لایه ۴۵

شکل ۴-۹. تصور دستگاه اولتراسونیک ۴۶

شکل ۵-۱. تصویر دستگاه اندازه‌گیری چگالی. ۴۹

شکل ۵-۲. تصویری از دستگاه KD 2 و نمونه آزمایش. ۵۰

شکل۵-۳. نمودار ضریب هدایت حرارتی بر حسب غلظت جرمی نانوسیال در دمای ^{O}C ۳۰. ۵۱

شکل۵-۴. نمودار نسبت ضرایب هدایت حرارتی نانوسیال به سیال پایه بر حسب غلظت جرمی نانوسیال در دمای ^{O}C ۳۰. ۵۱

شکل۵-۵. نمودار نسبت ضرایب هدایت حرارتی نانوسیال به سیال پایه بر حسب دما برای غلظت‌های جرمی ۰/۲۳ و ۰/۶۹درصد. ۵۲

شکل ۵-۶. تصویر دستگاه ویسکومتر بروکفیلد با حمام آب. ۵۳
شکل ۵-۷. تنش برشی برحسب نرخ برشی برای نانوسیال روغن پایه- CNTبا غلظت ۰/۶۹ درصد جرمی در دماهای مختلف. ۵٤
شکل ۵-۸. ویسکوزیته برحسب نرخ برشی برای نانوسیال روغن پایه- CNTبا غلظت ۰/۶۹ درصد جرمی در دماهای مختلف. ۵۵
شکل ۵-۹. تغییرات ویسکوزیته دینامیکی روغن پایه و نانوسیال‌ها برحسب دما. ۵٦
شکل ۵-۱۰. تغییرات نسبت ویسکوزیته نانوسیالها به سیال پایه برحسب دما. ۵٦
شکل۵-۱۱. تصویری از دستگاه کالریمتر پویشی دیفرانسیلی. ۵۸
شکل ۵-۱۲. تغییرات گرمای ویژه بر حسب دما برای سیال پایه و نانوسیال‌های مختلف. ۵۸
شکل ۵-۱۳. مقایسه داده‌های تجربی گرمای ویژه نانوسیال با رابطه پیشنهاد شده (۵-۴). ۵۹
شکل ۶-۱- محل نصب ترموکوپلها بر روی لوله ٦۲
شکل۶-۲ الف. مقایسه نتایج تئوری انتقال حرارت با داده های آزمایش برای جریان روغن پایه در لوله مستقیم تحت شارهای حرارتی مختلف ٦۸
شکل۶-۲ ب. مقایسه نتایج تئوری ضریب اصطکاک با داده های آزمایش برای جریان روغن پایه در لوله مستقیم تحت شارهای حرارتی مختلف ٦۸
شکل۶-۳ الف. تغییرات عدد نوسلت بر حسب عدد رینولدز برای جریان روغن پایه در لوله U-شکل تحت شارهای حرارتی مختلف ۷۰
شکل ۶-۳ ب. تغییرات عدد نوسلت بر حسب عدد رینولدز تحت شارهای حرارتی مختلفبرای جریان نانوسیال ۰/۴۶ درصد جرمی در لوله U-شکل ۷۱
شکل ۶-۴ الف. تغییرات عدد نوسلت بر حسب عدد رینولدز تحت شارهای حرارتی مختلف برای جریان نانوسیال ۰/۶۹ درصد جرمی و روغن پایه در لوله U-شکل ۷۲
شکل۶-۴ب. تغییرات نسبت عدد نوسلت تحت شار حرارتی ۶۸۵۰ و ۳۳۵۰ وات بر متر مربع بر حسب عدد رینولدز برای جریان روغن پایه و نانوسیال ۰/۶۹ درصد جرمی در لوله U-شکل ۷۲
شکل ۶-۵ الف. تغییرات عدد نوسلت محلی بر حسب فاصله بی بعد ورودی لوله برای جریان روغن پایه تحت شار حرارتی W/M^2 ۳۳۵۰ ۷٤
شکل ۶-۵ ب. تغییرات عدد نوسلت محلی بر حسب فاصله بی بعد ورودی لوله برای جریان نانوسیال ۰/۶۹ درصد جرمی تحت شار حرارتی W/M^2 ۳۳۵۰ ۷۵

شکل ۶-۶. تغییرات عدد نوسلت محلی جریان روغن پایه بر حسب عدد رینولدز در طول های حرارتی مختلف تحت شار حرارتی W/M^2 ۳۳۵۰ ۷۶

شکل ۶-۷. تغییرات عدد نوسلت محلی جریان نانوسیال ۰/۶۹ درصد جرمی بر حسب عدد رینولدز در طول های حرارتی مختلف تحت شار حرارتی W/M^2 ۳۳۵۰ ۷۶

شکل ۶-۸ الف. تغییرات عدد نوسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای روغن پایه و نانوسیالات با درصدهای جرمی مختلف تحت شار حرارتی W/M^2 ۳۳۵۰ ۷۷

شکل ۶-۸ ب. تغییرات عدد نوسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای روغن پایه و نانوسیالات با درصدهای جرمی مختلف تحت شار حرارتی W/M^2 ۶۸۵۰ ۷۸

شکل ۶-۹الف. تغییرات نسبت عدد نوسلت متوسط جریان نانوسیال به عدد نوسلت روغن پایه بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیالات با درصدهای جرمی مختلف تحت شار حرارتی W/M^2 ۳۳۵۰ ۷۹

شکل ۶-۹ب. تغییرات نسبت عدد نوسلت متوسط جریان نانوسیال به عدد نوسلت روغن پایه بر حسب عدد رینولدز برای نانوسیالات با درصدهای جرمی مختلف تحت شار حرارتی W/M^2 ۶۸۵۰ ۷۹

شکل۶-۱۰الف. تغییرات عدد نوسلت بر حسب عدد رینولدز برای جریان نانو سیال ۶۹/. درصد جرمی در لوله های U-شکل با شعاع مختلف تحت شار حرارتی ۳۳۵۰ وات بر متر مربع ۸۱

شکل۶-۱۰ب. تغییرات عدد نوسلت بر حسب عدد رینولدز برای جریان نانو سیال ۶۹/. درصد جرمی در لوله های U-شکل با شعاع مختلف تحت شار حرارتی ۶۸۵۰ وات بر متر مربع ۸۲

شکل۶-۱۱الف. تغییرات نسبت عدد نوسلت جریان نانوسیال ۶۹/. درصد جرمی در لوله های U-شکل به عددنوسلت نانو سیال ۶۹/. درصد جرمی در لوله U-شکل با شعاع MM ۳۸ بر حسب عدد رینولدز تحت شار حرارتی ۳۳۵۰ وات بر متر مربع ۸۳

شکل۶-۱۱ب. تغییرات نسبت عدد نوسلت جریان نانوسیال ۶۹/. درصد جرمی در لوله های U-شکل به عدد نوسلت نانو سیال ۶۹/. درصد جرمی در لوله U-شکل با شعاع MM ۳۸ بر حسب عدد رینولدز تحت شار حرارتی ۶۸۵۰ وات بر متر مربع ۸۳

شکل۶-۱۲الف. تغییرات عدد نوسلت بر حسب عدد رینولدز برای جریان نانو سیال ۶۹/. درصد جرمی در لوله U-شکل همراه با افزودن اسید تحت شار حرارتی ۳۳۵۰ وات بر متر مربع ۸۴

شکل۶-۱۲ب. تغییرات عدد نوسلت بر حسب عدد رینولدز برای جریان نانو سیال ۶۹/. درصد جرمی در لوله U-شکل همراه با افزودن اسید تحت شار حرارتی ۶۸۵۰ وات بر متر مربع ۸۵

شکل۶-۱۳الف. تغییرات نسبت عدد نوسلت متوسط جریان نانو سیال ۶۹/. درصد جرمی با اسید به عدد نوسلت نانو سیال ۶۹/. درصد جرمی بر حسب عدد رینولدز در لوله U-شکل تحت شار حرارتی ۳۳۵۰ وات بر متر مربع ۸۶

شکل۶-۱۳ب. نسبت عدد نوسلت متوسط جریان نانو سیال ۶۹/. درصد جرمی با اسید به عدد نوسلت نانو سیال ۶۹/. درصد جرمی بر حسب عدد رینولدز در لوله U-شکل تحت شار حرارتی ۶۸۵۰ وات بر متر مربع ۸۶

شکل ۶-۱۴ الف. تغییرات افت فشار جریان روغن پایه داخل لوله U-شکل بر حسب عدد رینولدز تحت شارهای حرارتی ۳۳۵۰ و ۶۸۵۰ وات بر متر مربع ۸۹

شکل ۶-۱۴ ب. تغییرات افت فشار جریان نانوسیال ۰/۶۹ درصد جرمی داخل لوله U-شکل بر حسب عدد رینولدز تحت شارهای حرارتی ۳۳۵۰ و ۶۸۵۰ وات بر متر مربع _____ ۹۰

شکل ۶-۱۵. تغییرات نسبت افت فشار جریان نانوسیال ۰/۶۹ درصد جرمی به جریان روغن پایه داخل لوله U-شکل بر حسب عدد رینولدز در شارهای حرارتی ۳۳۵۰ و ۶۸۵۰ وات بر متر مربع _____ ۹۰

شکل ۶-۱۶ الف. تغییرات افت فشار جریان روغن پایه و نانوسیالات با درصدهای جرمی مختلف در لوله U-شکل بر حسب عدد رینولدز تحت شار حرارتی W/M2 ۳۳۵۰ _____ ۹۲

شکل ۶-۱۶ ب. تغییرات نسبت افت فشار جریان نانوسیال با درصد های مختلف جرمی به روغن پایه بر حسب عدد رینولدز برای لوله U-شکل تحت شار حرارتی W/M2 ۳۳۵۰ _____ ۹۲

شکل ۶-۱۷ الف. تغییرات افت فشار جریان نانوسیال ۶۹٪ درصد جرمی در لوله های U-شکل بر حسب عدد رینولدز تحت شار حرارتی ۳۳۵۰ وات بر متر مربع _____ ۹۳

شکل ۶-۱۷ ب. تغییرات افت فشار جریان نانوسیال ۶۹٪ درصد جرمی در لوله های U-شکل به افت فشار نانو سیال ۶۹٪ درصد جرمی در لوله U-شکل با شعاع MM ۱۱۱ بر حسب عدد رینولدز تحت شار حرارتی ۳۳۵۰ وات بر متر مربع _____ ۹٤

شکل ۶-۱۸. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی عدد نوسلت با مقادیر پیشبینی شده توسط رابطه (۶-۲۳). _____ ۹٦

شکل ۶-۱۹. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی ضریب اصطکاک با مقادیر پیشبینی شده توسط رابطه (۶-۲۵). _____ ۹۷

شکل ۶-۲۰ نمونه‌ای از شبکه‌بندی مقطع عرضی مدل _____ ۹۹

شکل ۶-۲۱ تکثیر در راستای محور Z _____ ۹۹

شکل ۶-۲۲ پروفیل سرعت در مقطع از لوله برای سه شبکه‌ی مختلف _____ ۱۰۰

شکل ۶-۲۳ پروفیل دما در مقطع از لوله برای سه شبکه‌ی مختلف _____ ۱۰۱

شکل ۶-۲۴ تغییرات عدد نوسلت نانو سیال در لوله U-شکل بر حسب رینولدز (حل عددی) _____ ۱۰۲

شکل ۶-۲۵ افت فشار نانو سیال در لوله U-شکل بر حسب رینولدز (حل عددی) _____ ۱۰۳

شکل ۶-۲۶ میدان سرعت سیال در سه صفحه ساخته شده _____ ۱۰٤

شکل ۶-۲۷ میدان سرعت داخل لوله U-شکل _____ ۱۰۵

شکل ۶-۲۸ میدان دما سیال در سه صفحه ساخته شده _____ ۱۰٦

شکل ۶-۲۹ میدان فشار داخل لوله U-شکل _____ ۱۰۷

شکل ۶-۳۰. مقایسه نتایج حل عددی با حل تجربی برای جریان نانو سیال در لوله U-شکل _____ ۱۰۹

شکل ۶-۳۱ مقایسه نتایج حل عددی با حل تجربی برای جریان نانو سیال در لوله U-شکل _____ ۱۱۰

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: هدایت حرارتی مواد گوناگون _____ ۳

جدول ۳-۱. هدایت حرارتی سیالهای پایه مورد استفاده توسط وانگ _____ ۳٤

جدول ۳-۲. مشخصات روغن پایه SN-500. _____ ۳٦

جدول ۵-۱. نتایج حاصل از محاسبات تئوری و مقادیر تجربی چگالی نانوسیال روغن پایه– CNT در دمای ۳۰°C. _____ ٤۹

جدول۵-۲. روابط پیشنهادی برای محاسبه گرمای ویژه روغن پایه و نانوسیالات._____ ۵۹

جدول۶-۱. حل بوسیله سری های بینهایت برای لوله دایروی، شار حرارتی ثابت و طول ورودی حرارتی _____ ٦۵

جدول۶-۲. عدد نوسلت برای لوله دایروی، شار حرارتی ثابت و طول ورودی حرارتی _____ ٦۵

جدول ۶-۳ مشخصات سه شبکه‌ی مورد بررسی برای مدل _____ ۱۰۰

جدول ۶-۴، ضرایب زیرتخفیف مورد استفاده در نرم‌افزار FLUENT_____ ۱۰۱

جدول پ-۱. خطاهای هر یک از کمیتهای اندازهگیری شده. _____ ۱۲۰

جدول پ-۲. حداکثر خطای محاسبه شده در آزمایش ها مختلف._____ ۱۲۰

جدول پ-۳. مشخصات جریان و نانوسیال استفاده شده برای محاسبات نمونه. _____ ۱۲۱

فهرست علائم و نمادها	
مفهوم نماد	نماد
نمادهای لاتین	
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)	C_P
قطر ذره (m)	d_P
قطر لوله (m)	D
ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی (W/m^2K)	h
ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین (W/m^2K)	$\bar{h}$
ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	k
ثابت بولتزمن	k_b
طول لوله (m)	L
دبی جرمی (kg/s)	$\dot{m}$
ضریب شکل	n
عدد ناسلت محلی (hD/k)	Nu
عدد ناسلت جریان کاملاً توسعه یافته	Nu_∞
عدد ناسلت میانگین	$\overline{Nu}$
محیط سطح مقطع لوله (m)	P
عدد پرانتل ($\mu c_p/k$)	Pr
شار حرارتی (W/m^2)	q''
توان حرارتی (W)	Q
فاصله شعاعی از مرکز لوله (m)	r
شعاع لوله (m)	r_0
مقاومت حرارتی بین سطحی (Km^2/W)	R_b
عدد رینولدز ($\rho VD/\mu$)	Re
زمان (s)	t
دما (°C)	T
دمای متوسط سیال (°C)	T_m
سرعت (m/s)	u

خطای اندازه‌گیری و یا محاسبه	U
سرعت میانگین یک ذره براونی (m/s)	v_N
سرعت میانگین سیال (m/s)	V
دبی حجمی (m^3/s)	$\dot{V}$
حجم مخزن اندازه‌گیری دبی (m^3)	V_1
حجم نمونه برای اندازه‌گیری چگالی (m^3)	V_2
فاصله از ورودی لوله (m)	x
نمادهای یونانی	
ضریب پخش حرارتی ($k/\rho c_p$)	α
عدد بایو نانوذره	α_b
نسبت ضخامت نانولایه به شعاع اولیه نانوذرات	β
نسبت حجمی نانوذرات	φ
نسبت جرمی نانوذرات	φ
شاخص عملکرد	η
ویسکوزیته دینامیکی (kg/ms)	μ
چگالی (kg/m^3)	ρ
ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)	ν
کرویت	ψ
زیرنویس‌ها	
میانگین در طول لوله	ave
براونی	br
سیال پایه	f
ورودی	i
محلی	loc
نانوسیال	nf
ذره	p
سطح	s

چکیده

در این پایان نامه، افزایش انتقال حرارت و افت فشار در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چند لایه‌ای به روغن پایه در لوله U–شکل، به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها برای جریان روغن پایه و نانوسیالات مختلف درون لوله U–شکل، انجام گرفت. بخش آزمایش توسط المنت حرارتی تحت شار حرارتی یکنواخت خارجی قرار داشت. روغن پایه Sn-500 به همراه سه نانوسیال روغن پایه- نانو لوله‌های کربنی چند لایه‌ای با غلظتهای جرمی ۰/۲۳، ۰/۴۶ و ۰/۶۹ درصد به عنوان سیالات کاری در نظر گرفته شدند. خصوصیات ترموفیزیکی این سیالات شامل چگالی، ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و گرمای ویژه به صورت آزمایشگاهی اندازه-گیری شد و بر اساس این داده‌ها روابطی برای محاسبه خصوصیات نانوسیال ارائه گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن نانولوله‌ها باعث افزایش چگالی، ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته و گرمای ویژه روغن پایه شده است. در بخش انتقال حرارت جابجایی مشاهده شد که برای لوله U–شکل، با افزایش شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد، ضمن اینکه افزایش دبی جریان و در نتیجه عدد رینولدز باعث بیشتر شدن انتقال حرارت می‌گردد. همچنین مشاهده شد که استفاده از جریان نانوسیال به جای سیال پایه به طور قابل توجهی ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. در بخش افت فشار نیز مشاهده شد که برای لوله U–شکل با افزودن نانوذرات به سیال پایه، میزان افت فشار جریان افزایش پیدا می‌کند. در پایان بخش آزمایش نیز با استفاده از ارزیابی عملکرد صورت گرفته مشخص شد که استفاده از عوامل پایدارساز(اسید اولئیک) به سوسپانسیون روغن–نانو لوله‌های کربنی روش بهینه‌تری برای افزایش انتقال حرارت نسبت به روش دیگر یعنی استفاده از نانوسیال به جای سیال پایه می‌باشد. در بخش عددی با استفاده از نرم افزار Fluent لوله‌های U–شکل شبیه سازی شد و با استفاده از معادلات به دست آمده در قسمت خواص ترموفیزیکی، خواص سیال مورد آزمایش به نرم افزار ارائه گردید. شرایط مرزی نیز مانند قسمت آزمایشگاهی به نرم افزار ارائه شد. در پایان خروجی‌های حل عددی با اطلاعات به دست آمده از قسمت آزمایشگاهی مقایسه گردید و تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دیده شد.

کلید واژه: انتقال حرارت، افت فشار، نانوسیال، شار حرارتی ثابت، لوله U–شکل

فصل اول

مقدمه

۱ - ۱ کلیات

خنک‌کاری جزیی ناگزیر برای ثابت نگهداشتن عملکرد مورد نظر و مطمئن محدوده وسیعی از محصولات همانند کامپیوترها، موتور خودروها و اشعه‌های ایکس و لیزر است. با افزایش شارهای حرارتی که در اثر تولید قدرت بیشتر و یا اندازه‌های کوچکتر بوجود آمده‌است، خنک‌کاری به یکی از بزرگترین چالش‌های پیش روی صنایع پیشرفته‌ای چون میکروالکترونیک، حمل و نقل، ساخت و دفاع تبدیل شده است. بطور مثال صنایع الکترونیک، کامپیوترهایی با سرعت‌های بالاتر، اندازه‌های کوچکتر و قابلیت‌های بیشتر بوجود آورده است که منجر به تولید شارهای حرارتی بالا در ابعاد کوچک شده است. اگرچه خنک‌کاری با هوا معمولترین سیستم خنک‌کاری تاکنون است، اما برخی محصولات احتیاج به سیالات خنک‌کننده‌ای با قابلیت‌های بالاتر دارند.

در صنعت حمل و نقل، خنک‌کاری یک موضوع حیاتی است زیرا که روند پیش‌رو در افزایش قدرت موتورها و یا خودروهای هیبرید، ناگزیر در استفاده از رادیاتورهای بزرگ‌تر و در نتیجه سطح پیشانی[1] بیشتر است که باعث افزایش نیروی درگ و مصرف سوخت بالاتر می‌گردد.

[1] Frontal area

راه‌های مرسوم در بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های حرارتی عبارت از افزایش سطح تماس و تغییر مشخصات جریان می‌باشند، اما روش‌های دیگری نیاز است که پاسخگوی کامل درخواست صنایع در خنک‌کاری باشد. تکنولوژی نانوسیال پتانسیل بالایی را برای توسعه سیستم‌های خنک‌کاری با عملکرد بالا، در حجم کوچک و با صرفه اقتصادی ارائه می‌دهد.

سیالات مرسوم برای انتقال حرارت نظیر آب، اتیلن گلیکول و روغن دارای خواص حرارتی ضعیفی در مقایسه با فلزات و حتی اکسید های فلزی هستند. برای مثال ضریب هدایت حرارتی نانو لوله های کربنی در دمای معمولی بیشتر از ۴۹۰۰ برابر آب و بیش از ۲۰۰۰۰ برابر بیشتر از روغن است. بدلیل اینکه ضریب انتقال حرارت این نوع سیالات پائین است احتیاج به روشی برای افزایش آن داریم. جدول ۱-۱ هدایت حرارتی برخی از مواد را برای مقایسه ارائه می‌دهد.

جدول ۱-۱: هدایت حرارتی مواد گوناگون [۱]

گروه	ماده	هدایت حرارتی در ۳۰۰K (W/m.K)
فلزات جامد	نقره	۴۲۹
	مس	۴۰۱
	آلومینیوم	۲۳۷
غیر فلزات جامد	الماس	۳۳۰۰
	نانولوله کربنی	۳۰۰۰
	سیلیکون	۱۴۸
	آلومینا	۴۰
مایعات	آب	۰/۶۱۳
	اتیلن گلیکول	۰/۲۵۳
	روغن موتور	۰/۱۴۵
	روغن پایه (SN 500)	۰/۱۳۱

هدایت حرارتی ضعیف سیالات معمول یک محدودیت اساسی را در انتقال حرارت بوجود می‌آورد. بنابراین از یک قرن پیش، از زمان ماکسول[1]، دانشمندان و مهندسان تلاش زیادی به خرج دادند تا این محدودیت‌ها را از طریق پراکنده کردن ذرات میلی‌متری و میکرومتری در مایعات، از بین ببرند. در حالیکه مانع اصلی در استفاده از این چنین سوسپانسیون‌هایی ته‌نشینی ذرات در مایعات و خراشیدگی‌ها و سایش بود. با پیشرفت تکنولوژی و ساخت نانوذرات، استفاده از ذرات دوباره در کانون توجه قرار گرفت و تحقیقات روی جوانب مختلف نانوسیالات که در اثر پراکنده سازی نانوذرات در سیال به وجود می‌آیند، انجام پذیرفت.

تکنولوژی نانوسیال یک شاخه علمی جدید با ویژگی مرتبط بودن با رشته‌های مختلف علمی است که بررسی آن نیازمند آشنایی با رشته‌های مختلفی چون شیمی، الکتروشیمی، فیزیک و مکانیک است. دو خصوصیت برجسته نانوسیال‌ها (پراکندگی مناسب ذرات در داخل سیال و ضریب هدایت حرارتی بالا)، آنها را کاندیدای مناسبی برای نسل آینده سیال‌های واسط جهت سیستم‌های انتقال حرارت می‌سازد؛ بنابراین بررسی هرچه بیشتر خواص این نوع جدید از سیال‌های انتقال‌دهنده حرارت برای شناخت مزایا (افزایش ضرایب هدایت حرارتی و انتقال حرارت جابجایی) و معایب آن (افزایش میزان افت فشار و سایش) از اهمیت به سزایی برخوردار است.

۱-۲ روش‌های افزایش انتقال حرارت

انتقال حرارت جریان آرام در بسیاری از کاربردهای مهندسی وجود دارد و برای مایعات لزجی[2] که گرم یا سرد می‌شوند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه ضریب انتقال حرارت در این نوع جریانات معمولاً پائین می‌باشد احتیاج به روشی برای افزایش آن داریم. در زمینه روش‌های افزایش انتقال حرارت مطالعات زیادی انجام شده است. در این راستا، برگلز و همکارانش[3] [۲]، و وب و کیم[4] [۳] روش‌های مختلف را برای افزایش انتقال حرارت ارائه نمودند. این روش‌ها شامل دو دسته روش‌های فعال۵ و روش‌های غیر فعال[6] تقسیم می‌شوند. در روش-های غیرفعال از سطوح با هندسه‌های خاص یا سیال‌های افزودنی برای افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شود. از روش‌های غیر فعال به قرار دادن وسایل افزایشی جابجا شده[7] در داخل مجرای جریان و افزودنی‌ها برای مایعات[8] می‌توان اشاره کرد که در ادامه به آنها خواهیم پرداخت. در روش‌های فعال به یک نیروی خارجی نظیر میدان الکتریکی یا آکوستیک و ارتعاش سطحی نیاز داریم.

مبدل‌های حرارتی با استفاده از سطوح انتقال حرارت ساده ساخته می‌شوند. استفاده از یک سطح افزایش دهنده انتقال حرارت می‌تواند مقادیر بالاتری برای hA به ازای واحد سطح پایه نسبت به سطح صاف تولید کند. از سطوح

---

[1] Maxwell
[1] Viscous Liquids
[2] Bergles et el.
[4] Webb and Kim
[4] Active
[6] Passive
[6] Displaced insert devices
[8] Additives for liquids