دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

موضوع:

بررسی تجربی خواص نانوسیالات

(ضریب رسانش حرارتی و ضریب لزجت)

اساتید راهنما:

دکتر موسی فرهادی

دکتر کوروش صدیقی

استاد مشاور:

دکتر نغمه جمشیدی

نگارنده:

ساناز اکبرزاده

مرداد ۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

تشکر و قدردانی

باسپاس از خداوند متعال

بر خود لازم می دانم از زحمات و تلاش های بی شائبه و صبورانه اساتید راهنما جناب آقایان دکتر موسی فرهادی و دکتر کوروش صدیقی و مشاور خانم دکتر نغمه جمشیدی تشکر و قدردانی نمایم.

از آقایان دکتر بهزاد مهر و دکتر فرزانه اساتید محترم دانشگاه زاهدان به جهت در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی کمال تشکر را دارم.

از دوست عزیزم خانم محبوبه ابراهیمی به خاطر الطاف صمیمانه و ارزشمندش تقدیر و تشکر می کنم.

تقدیم به:

مادر عزیز و پدر مهربانم

و خواهران عزیزم

چکیده

در این پایان‌نامه ضریب انتقال حرارت و ویسکوزیته ی نانو ذرات اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، سیلیکا (SiO_2)، تیتانیوم دی اکسید (TiO_2)، اکسید روی (ZnO) و سیلیکون کاربید (SiC) در پنج نوع سیال پایه؛ آب دی یونیزه، اتیلن گلیکول (EG)، پروپیلن گلیکول (PG)، مخلوط آب/ اتیلن گلیکول با نسبت وزنی (۶۰:۴۰) و مخلوط آب/ پروپیلن گلیکول با نسبت وزنی (۶۰:۴۰) در بازه‌ی دمایی ۲۰ تا ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و در درصدهای حجمی ۰ تا ۳ مورد آزمایش قرار گرفت. ویسکوزیته توسط ویسکومتر مرتعش VL700 و ضریب هدایت حرارتی به روش منبع حرارتی خطی گذرا توسط دستگاه KD2 اندازه گیری شده است. نانو سیال با پایداری مناسب با استفاده از روش دو مرحله‌ای تولید شده است. مدت زمان هم زدن و آلتراسونیک بر پایداری نانو سیال و در نتیجه بر توانایی نانو سیال در دفع حرارت تأثیرگذار است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد نانو ذره‌ی Al_2O_3 با افزایش ۲۵ درصدی در غلظت حجمی ۳٪ بیش‌ترین تأثیر را بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال دارد. در نانو سیالات حاوی Al_2O_3 و SiC بیش‌ترین افزایش ضریب هدایت حرارتی مشاهده شده و SiO_2, TiO_2, ZnO به ترتیب در مرتبه‌های بعدی قرار دارند. با افزایش دما ضریب هدایت حرارتی نانو سیال افزایش و ضریب لزجت کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت حجمی نانو ذرات، ضریب هدایت حرارتی و ضریب لزجت نانو سیال افزایش می‌یابد که مقدار این تغییرات وابسته به جنس نانو ذره، نوع سیال پایه و نحوه‌ی پراکندگی نانو ذرات در سیال پایه است. نانو ذرات SiC , TiO_2, ZnO ,Al_2O_3 بیش‌ترین افزایش ضریب هدایت حرارتی را در سیال پایه‌ی آب/اتیلن گلیکول و کمترین مقدار را در سیال پایه‌ی آب دارا هستند. نانو سیال حاوی نانو ذره‌ی SiO_2 به ترتیب بیش‌ترین و کمترین مقدار افزایش ضریب هدایت حرارتی را در سیالات پایه‌ی اتیلن گلیکول و آب دارد. در نانو سیالات آب اتیلن گلیکول/آلومینا، آب اتیلن گلیکول/سیلیکون کاربید، آب اتیلن گلیکول/اکسید تیتانیوم و آب اتیلن گلیکول/سیلیکا حداکثر افزایش ضریب هدایت حرارتی در ۳ درصد حجمی و به ترتیب برابر با ۲۵٪ ، ۲۳٪، ۱۵٪ و ۷٪ بوده است. بیش‌ترین مقادیر ویسکوزیته در نانو سیالات در سیال پایه‌ی پروپیلن گلیکول مشاهده شده است. بیش‌ترین افزایش ویسکوزیته با افزایش غلظت نانو ذره در نانو سیال SiC/PG,W در بازه‌ی ۰/۵ تا ۳ درصد حجمی از ۳۰ تا ۱۵۰ درصد نسبت به سیال پایه مشاهده شده است. همچنین مقدار کاهش ویسکوزیته به صورت نمایی با افزایش دما در سیال پایه‌ی پروپیلن گلیکول برای نانو ذره‌ی SiO_2 در ۳ درصد حجمی به مقدار ۷۰٪ مشاهده شده است.

کلمات کلیدی: نانو سیال، ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته، ویسکومتر مرتعش، KD2.

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فصل اول- مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- انگیزه بهبود ضریب هدایت حرارتی سیالات ۳

۱-۳- دلایل منطقی استفاده از ذرات در سایز نانو ۴

۱-۴- هدف و موضوع این پژوهش ۴

۱-۵- رئوس مطالب پایان‌نامه ۵

فصل دوم- ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارت ۶

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- مقدمه‌ای بر ویسکوزیته ۷

۲-۲-۲- پارامترهای تأثیرگذار بر ویسکوزیته ۸

۲-۲-۲-۱- اثر دما ۸

۲-۲-۲-۲ - اثر سایز و شکل ذره ۱۰

۲-۲-۲-۳- اثر کسر حجمی ۱۲

۲-۲-۳- بررسی‌های نظری ویسکوزیته ۱۳

۲-۲-۳- بررسی‌های تجربی ضریب هدایت حرارتی ۱۸

۲-۳-۱- عوامل موثر بر ضریب هدایت حرارتی نانو سیال ۱۸

۲-۳-۱-۱- کسر حجمی ۱۸

۲-۳-۱-۲- جنس نانو ذرات ۱۹

۲-۳-۱-۳- اثر سیال پایه ۲۰

۲-۳-۱-۴- اثر اندازه ذره ۲۰

۲-۳-۱-۵- اثر شکل ذره ۲۱

۲-۳-۱-۶- اثر حرکت براونی ۲۲

۲-۳-۱-۷- اثر دما ۲۳

۲-۳-۱-۸- خوشه‌ای شدن ۲۳
۲-۳-۱-۹- لایه‌ای شدن در اطراف نانو ذره ۲۵
۲-۳-۱-۱۰- مقدار PH ۲۶
۲-۳-۱-۱۱- ترموفورز ۲۶
۲-۴- بررسی‌های نظری ضریب هدایت حرارتی ۲۶
۲-۴-۱- مدل‌های ریاضی تخمین ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات ۲۷
۲-۴-۲- مدل های مبتنی بر تئوری محیط موثر کلاسیک ۲۸
۲-۴-۳- مدل های مبتنی بر نانو لایه ۲۹
مدل های نظری ۲۹
مدل‌های ترکیبی ۳۰
مدل‌های محاسباتی ۳۲
۲-۴-۴- مدل های مبنی بر حرکت براونی ۳۲
مدل‌های نظری ۳۲
مدل های محاسباتی ۳۳
مدل های تجربی ۳۴
۲-۴-۵- مدل‌های مبتنی بر خوشه‌ای شدن ۳۴
مدل های اصلاح‌شده ۳۴
مدل های اثرات ترکیبی ۳۵
مدل های محاسباتی ۳۶
۲-۵- نتیجه‌گیری ۳۶
فصل سوم- روش‌های اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی (ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی) ۳۷
۳-۱- مقدمه ۳۸
۳-۲- انواع ویسکوزیته ۳۸
۳-۳- ضرایب ویسکوزیته ۳۹
۳-۴- اهمیت اندازه‌گیری ویسکوزیته ۳۹
۳-۵- روش‌های عمده اندازه‌گیری ویسکوزیته ۴۰
۳-۵-۱- ویسکومترهای نوع درگی ۴۱
ویسکومترهای جسم سقوطی ۴۱
ویسکومتر حبابی (لوله) ۴۲

ویسکومتر دورانی ۴۲
۳-۵-۲- ویسکومتر جریانی..... ۴۴
ویسکومترهای جریان معکوس..... ۴۴
ویسکومتر اوریفیس (فنجانی)..... ۴۵
۳-۵-۳- ویسکومتر مرتعش..... ۴۵
۳-۶- ضریب هدایت حرارتی..... ۴۷
۳-۷- روش‌های اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی در نانو سیالات..... ۴۸
۳-۷-۱- روش‌های پایا..... ۴۸
روش صفحه موازی حالت پایا..... ۴۹
روش سلول استوانه‌ای..... ۵۰
۳-۷-۲- روش‌های گذرا..... ۵۲
روش نوسان دما..... ۵۲
روش سیم داغ گذرا..... ۵۳
روش تحلیل‌گر ثابت حرارتی..... ۵۶
روش 3ω..... ۵۸
۳-۸- نانو سیال..... ۶۰
۳-۹- تهیه نانو سیال..... ۶۰
۳-۱۰- پایداری نانوذرات در نانوسیالات..... ۶۳
تغییر PH سوسپانسیون..... ۶۴
استفاده از فعال‌کننده‌های سطح و پخش‌کننده‌ها (پایدارسازی استریکی)..... ۶۴
استفاده نوسانات ماورای صوت..... ۶۴
پایدارسازی الکترواستاتیکی..... ۶۵
۳-۱۱- تکرار پذیری آزمایش..... ۷۰
فصل چهارم- نتایج تجربی..... ۷۲
۴-۱- نتایج تجربی..... ۷۳
۴-۲- اندازه گیری ویسکوزیته..... ۷۳
۴-۲-۱ اعتبارسنجی..... ۷۳
۴-۲-۲ تأثیر درصد حجمی نانو ذرات بر روی ویسکوزیته ی نانو سیال..... ۷۴
۴-۲-۲ تأثیر دما بر روی ویسکوزیته ی نانو سیال..... ۸۱
۴-۳ ارائه ی روابط ریاضی..... ۹۱

۴-۴ اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی ۱۰۱
۴-۴-۱ اعتبارسنجی ۱۰۱
۴-۴-۲ تأثیر درصد حجمی نانو ذرات بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال ۱۰۱
۴-۴-۳ تأثیر دما بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال ۱۱۰
۴-۴-۴ تاثیر نوع نانو ذره و سیال پایه بر روی ضریب هدایت حرارتی ۱۲۴
۴-۵ ارائه ی روابط ریاضی ۱۳۲
فصل پنجم- پیشنهادات و نتیجه گیری ۱۴۳
۵-۱ نتیجه گیری ۱۴۴
۵-۲ پیشنهادات ۱۴۶
مراجع ۱۴۷
پیوست ۱۵۳

.

فهرست شکل‌ها

عنوان | صفحه

شکل (۱-۱): افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به صورت تابعی از کسر حجمی نانو ذره..... ۴
شکل (۲-۱): کاهش ویسکوزیته با افزایش دما..... ۹
شکل (۲-۲): کاهش نمایی ویسکوزیته با افزایش دما..... ۹
شکل (۲-۳): ویسکوزیته نسبی مستقل از دما..... ۱۰
شکل (۲-۴) افزایش ویسکوزیته با افزایش قطر ذره را نشان می‌دهد..... ۱۰
شکل (۲-۵): کاهش ویسکوزیته با افزایش قطر ذره..... ۱۱
شکل (۲-۶): ویسکوزیته نانو سیال تابع قوی قطر نانو ذرات نیست..... ۱۲
شکل (۲-۷): افزایش ویسکوزیته با افزایش کسر حجمی در غلظت‌های مختلف Al_2O_3 ..... ۱۳
شکل (۲-۸): افزایش ویسکوزیته با افزایش کسر حجمی در غلظت‌های مختلف TiO_2 ..... ۱۳
شکل (۲-۹): اثر انباشتگی بر بهبود ضریب هدایت حرارتی نانو سیال..... ۲۴
شکل (۲-۱۰): مشخصه وابسته به زمان نانو سیال اکسید مس آب..... ۲۴
شکل (۳-۱): انواع ویسکوزیته..... ۳۹
شکل (۳-۲): ویسکومتر لوله حبابی..... ۴۲
شکل (۳-۳): الف) نمای استوانه در ویسکومتر دوار استوانه‌ای ب) ویسکومتر دوکی شکل..... ۴۳
شکل (۳-۴): هندسه‌ی ویسکومتر دوار الف) استوانه‌ای ب) صفحه موازی ج) مخروطی و صفحه‌ای..... ۴۳
شکل (۳-۵): ویسکومتر لوله موئین الف)استوالد ب)آبلهد و ج)جریان معکوس..... ۴۴
شکل (۳-۶): ۱) ویسکومتر فنجانی ۲) ویسکومتر فنجانی فورد..... ۴۵
شکل (۳-۷): ۱) ویسکومتر مرتعش ویسکولایت (VL700)..... ۴۷
شکل(۳-۸): مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی در نانو سیالات [۲]..... ۴۸
شکل (۳-۹): سیستم آزمایشگاهی در روش صفحه موازی حالت پایا..... ۵۰
شکل (۳-۱۰): دیاگرام شماتیک تجهیزات صفحه موازی (گرم کن = H و مقاومت دماسنج = R)..... ۵۰
شکل (۳-۱۱): مقطع عرضی تجهیزات سلول استوانه‌ای..... ۵۱
شکل (۳-۱۲): شماتیک سلول تست استوانه‌ای..... ۵۱
شکل (۳-۱۳): شماتیک سیستم آزمایشگاهی..... ۵۲
شکل (۳- ۱۴): ساختار سلول تست..... ۵۳

شکل (۳-۱۵): شماتیک سیستم آزمایشگاهی سیم داغ گذرا ۵۶
شکل (۳-۱۶): دیاگرام شماتیک سیستم آزمایشگاهی در روش منبع صفحه‌ای گذرا ۵۷
شکل (۳-۱۷): دیاگرام شماتیک حسگرTPS ۵۷
شکل (۳-۱۸): اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی توسط KD2 Pro ۶۰
شکل (۳-۱۹): روش تک مرحله‌ای تهیه نانوسیال ۶۱
شکل (۳-۲۰): تصویر TEM نانوسیال حاوی نانو ذرات مس که به طریق یک‌مرحله‌ای تهیه‌شده است ۶۲
شکل (۳-۲۱): الف- ذره‌ی فلزی پایدارسازی الکترواستاتیکی ب- ذره‌ی فلزی پایدارسازی استریکی ۶۵
شکل (۳-۲۲): اندازه‌گیری جرم مورد نیاز ۶۷
شکل (۳-۲۳): الف) همزن مغناطیسی ب)دستگاه آلتراسونیک پالسی ۶۸
شکل (۳-۲۴): مراحل تولید نانوسیال ۶۸
شکل (۳-۲۵): سیستم آزمایشگاهی جهت اندازه گیری ویسکوزیته ۶۹
شکل (۳-۲۶): سیستم آزمایشگاهی جهت اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی ۷۰
شکل (۳-۲۷): تکرارپذیری آزمایش در شرایط مشابه ۷۱
شکل (۳-۲۸): تکرارپذیری آزمایش در شرایط مشابه ۷۱
شکل (۴-۱): مقایسه‌ی تغییرات ویسکوزیته ی سیال‌های پایه با نتایج سایر محققین ۷۳
شکل (۴-۲): تأثیر درصد حجمی بر روی ویسکوزیته ی نسبی در سیال پایه‌ی آب ۷۵
شکل (۴-۳): تأثیر درصد حجمی بر روی ویسکوزیته ی نسبی در سیال پایه‌ی اتیلن گلیکول ۷۶
شکل (۴-۴): تأثیر درصد حجمی بر روی ویسکوزیته ی نسبی در سیال پایه‌ی آب/ اتیلن گلیکول با نسبت وزنی ۶۰:۴۰ ..... ۷۷
شکل (۴-۵): تأثیر درصد حجمی بر روی ویسکوزیته ی نسبی در سیال پایه‌ی پروپیلن گلیکول ۷۸
شکل (۴-۶): تأثیر درصد حجمی بر روی ویسکوزیته ی نسبی در سیال پایه‌ی آب/ پروپیلن گلیکول با نسبت وزنی ۶۰:۴۰ ..... ۷۹
شکل (۴-۷): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال آب/اکسید تیتانیوم،آب/آلومینا و آب/سیلیکون کاربید با نتایج سایر محققین ۸۰
شکل (۴-۸): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال اتیلن گلیکول/اکسید روی با نتایج سایر محققین ۸۱
شکل (۴-۹): تأثیر دما بر روی ویسکوزیته در سیال پایه‌ی آب ۸۲
شکل (۴-۱۰): تأثیر دما بر روی ویسکوزیته در سیال پایه‌ی اتیلن گلیکول ۸۲
شکل (۴-۱۱): تأثیر دما بر روی ویسکوزیته در سیال پایه‌ی آب/ اتیلن گلیکول با نسبت وزنی ۶۰:۴۰ ..... ۸۳
شکل (۴-۱۲): تأثیر دما بر روی ویسکوزیته در سیال پایه‌ی پروپیلن گلیکول ۸۴
شکل (۴-۱۳): تأثیر دما بر روی ویسکوزیته در سیال پایه‌ی آب/ پروپیلن گلیکول با نسبت وزنی ۶۰:۴۰ ..... ۸۵

شکل (۴-۱۴): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال آب/آلومینا، آب/سیلیکا، آب/اکسید تیتانیوم و آب/سیلیکون کاربید با نتایج سایر محققین ۸۶
شکل (۴-۱۵): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال پروپیلن گلیکول/آلومینا با نتایج سایر محققین ۸۷
شکل (۴-۱۶): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال اتیلن گلیکول/اکسید روی با نتایج سایر محققین ۸۷
شکل (۴-۱۷): تأثیر جنس نانوذره بر روی ویسکوزیته در سیال پایه‌ی آب ۸۸
شکل (۴-۱۸): تأثیر جنس نانوذره بر روی ویسکوزیته در سیال پایه‌ی اتیلن گلیکول ۸۹
شکل (۴-۱۹): تأثیر جنس نانوذره بر روی ویسکوزیته در سیال پایه‌ی آب/ اتیلن گلیکول با نسبت وزنی ۶۰:۴۰ ..... ۹۰
شکل (۴-۲۰): تأثیر جنس نانوذره بر روی ویسکوزیته در سیال پایه‌ی پروپیلن گلیکول. ۹۰
شکل (۴-۲۱): تأثیر جنس نانوذره بر روی ویسکوزیته در سیال پایه‌ی آب/ پروپیلن گلیکول با نسبت وزنی ۶۰:۴۰ ..... ۹۱
شکل (۴-۲۲): مقایسه مقادیر تجربی ویسکوزیته ی آب/سیلیکون کاربید با نتایج تئوری ۹۲
شکل (۴-۲۳): مقایسه مقادیر تجربی ویسکوزیته ی آب/اکسید تیتانیوم با نتایج تئوری ۹۳
شکل (۴-۲۴): مقایسه مقادیر تجربی ویسکوزیته ی (آب/ اتیلن گلیکول با نسبت وزنی ۶۰:۴۰)/ آلومینا با نتایج تئوری ۹۳
شکل (۴-۲۵): مقایسه مقادیر تجربی ویسکوزیته ی (W/ EG با نسبت وزنی ۶۰:۴۰)/ سیلیکون کاربید با نتایج تئوری. ۹۴
شکل (۴-۲۶): مقایسه مقادیر تجربی ویسکوزیته ی (W/ EG با نسبت وزنی ۶۰:۴۰)/ اکسید تیتانیوم با نتایج تئوری ۹۵
شکل (۴-۲۷): مقایسه مقادیر تجربی ویسکوزیته ی (W/ EG با نسبت وزنی ۶۰:۴۰)/ اکسید روی با نتایج تئوری ۹۶
شکل (۴-۲۸): مقایسه مقادیر تجربی ویسکوزیته ی PG/ آلومینا با نتایج تئوری ۹۷
شکل (۴-۲۹): مقایسه مقادیر تجربی ویسکوزیته ی PG/ سیلیکا با نتایج تئوری ۹۸
شکل (۴-۳۰): مقایسه مقادیر تجربی ویسکوزیته ی (W/ PG با نسبت وزنی ۶۰:۴۰)/ سیلیکون کاربید با نتایج تئوری ۹۹
شکل (۴-۳۱): مقایسه مقادیر تجربی ویسکوزیته ی (W/ PG با نسبت وزنی ۶۰:۴۰)/ اکسید روی با نتایج تئوری ۱۰۰
شکل (۴-۳۲): مقایسه ی نتایج تجربی ویسکوزیته سایر محققین با مدل ارائه شده برای نانو سیال آب/اکسید تیتانیوم ۱۰۱
شکل (۴-۳۳): مقایسه ی تغییرات ضریب هدایت حرارتی سیال های پایه با نتایج سایر محققین ۱۰۱

شکل (۴-۳۴): تأثیر درصد حجمی بر روی ضریب هدایت حرارتی نسبی در سیال پایه‌ی آب..... ۱۰۴
شکل (۴-۳۵): تأثیر درصد حجمی بر روی ضریب هدایت حرارتی نسبی در سیال پایه‌ی اتیلن گلیکول..... ۱۰۴
شکل (۴-۳۶): تأثیر درصد حجمی بر روی ضریب هدایت حرارتی نسبی در سیال پایه‌ی آب/ اتیلن گلیکول با نسبت وزنی ۴۰:۶۰..... ۱۰۵
شکل (۴-۳۷): تأثیر درصد حجمی بر روی ضریب هدایت حرارتی نسبی در سیال پایه‌ی پروپیلن گلیکول..... ۱۰۶
شکل (۴-۳۸): تأثیر درصد حجمی بر روی ضریب هدایت حرارتی نسبی در سیال پایه‌ی آب/ پروپیلن گلیکول با نسبت وزنی ۴۰:۶۰..... ۱۰۷
شکل (۴-۳۹): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال آب/آلومینا، آب/اکسید تیتانیومو آب/اکسید روی با نتایج سایر محققین..... ۱۰۸
شکل (۴-۴۰): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال اتیلن گلیکول/آلومینا، اتیلن گلیکول /اکسید تیتانیوم و اتیلن گلیکول /اکسید روی با نتایج سایر محققین..... ۱۰۹
شکل (۴-۴۱): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال آب/ اتیلن گلیکول با نسبت وزنی ۴۰:۶۰/آلومینا با نتایج سایر محققین..... ۱۱۰
شکل (۴-۴۲): تأثیر دما بر روی ضریب هدایت حرارتی و نسبت ضریب هدایت حرارتی در سیال پایه‌ی آب.... ۱۱۲
شکل (۴-۴۳): تأثیر دما بر روی ضریب هدایت حرارتی و نسبت ضریب هدایت حرارتی در سیال پایه‌ی اتیلن گلیکول..... ۱۱۴
شکل (۴-۴۴): تأثیر دما بر روی ضریب هدایت حرارتی و نسبت ضریب هدایت حرارتی در سیال پایه‌ی آب/ اتیلن گلیکول با نسبت وزنی ۴۰:۶۰..... ۱۱۶
شکل (۴-۴۵): تأثیر دما بر روی ضریب هدایت حرارتی و نسبت ضریب هدایت حرارتی در سیال پایه‌ی پروپیلن گلیکول..... ۱۱۸
شکل (۴-۴۶): تأثیر دما بر روی ضریب هدایت حرارتی و نسبت ضریب هدایت حرارتی در سیال پایه‌ی آب/ پروپیلن گلیکول با نسبت وزنی ۴۰:۶۰..... ۱۲۰
شکل (۴-۴۷): مقایسه ی نتایج تجربی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال Al_2O_3 در سیال‌های پایه‌ی اتیلن گلیکول، پروپیلن گلیکول، مخلوط آب/پروپیلن با مدل کو و کلینستر..... ۱۲۱
شکل (۴-۴۸): مقایسه ی نتایج تجربی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال Al_2O_3 در سیال‌های پایه‌ی اتیلن گلیکول، پروپیلن گلیکول، مخلوط آب/پروپیلن با مدل کو و کلینستر..... ۱۲۱
شکل (۴-۴۹): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال آب/آلومینا، آب/سیلیکا، آب/اکسید تیتانیوم با نتایج سایر محققین..... ۱۲۲
شکل (۴-۵۰): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال اتیلن گلیکول/آلومینا و اتیلن گلیکول/اکسید روی با نتایج سایر محققین..... ۱۲۳

شکل (۴-۵۱): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال آب/ اتیلن گلیکول/آلومینا و آب/ اتیلن گلیکول/اکسید روی با نتایج سایر محققین..... ۱۲۳
شکل (۴-۵۲): مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی نانو سیال پروپیلن گلیکول/آلومینا و پروپیلن گلیکول/اکسید تیتانیوم با نتایج سایر محققین..... ۱۲۴
شکل (۴-۵۳) تأثیر نوع نانو ذره بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال در سیال پایه‌ی آب..... ۱۲۴
شکل (۴-۵۴) تأثیر نوع نانو ذره بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال در سیال پایه‌ی اتیلن گلیکول..... ۱۲۵
شکل (۴-۵۵) تأثیر نوع نانو ذره بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال در سیال پایه‌ی آب/ اتیلن گلیکول..... ۱۲۶
شکل (۴-۵۶) تأثیر نوع نانو ذره بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال در سیال پایه‌ی پروپیلن گلیکول..... ۱۲۶
شکل (۴-۵۷) تأثیر نوع نانو ذره بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال در سیال پایه‌ی آب/ پروپیلن گلیکول..... ۱۲۷

شکل (۴-۵۸) تأثیر سیال پایه بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال..... ۱۲۸
شکل (۴-۵۹) تأثیر سیال پایه بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال..... ۱۲۹
شکل (۴-۶۰) تأثیر سیال پایه بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال..... ۱۳۰
شکل (۴-۶۱) تأثیر سیال پایه بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال..... ۱۳۱
شکل (۴-۶۲) تأثیر سیال پایه بر روی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال..... ۱۳۲
شکل (۴-۶۳): مقایسه مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی اتیلن گلیکول/سیلیکون کاربید با نتایج تئوری..... ۱۳۳
شکل (۴-۶۴): مقایسه مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی اتیلن گلیکول/ اکسید تیتانیوم با نتایج تئوری..... ۱۳۴
شکل (۴-۶۵): مقایسه مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی اتیلن گلیکول/ اکسید روی با نتایج تئوری..... ۱۳۵
شکل (۴-۶۶): مقایسه مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی (آب/ اتیلن گلیکول با نسبت وزنی ۴۰:۶۰)/ سیلیکون کاربید با نتایج تئوری..... ۱۳۶
شکل (۴-۶۷): مقایسه مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی (آب/ اتیلن گلیکول با نسبت وزنی ۴۰:۶۰)/ اکسید تیتانیوم با نتایج تئوری..... ۱۳۷
شکل (۴-۶۸): مقایسه مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی (آب/ پروپیلن گلیکول با نسبت وزنی ۴۰:۶۰)/ آلومینا با نتایج تئوری..... ۱۳۸
شکل (۴-۶۹): مقایسه مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی (آب/ پروپیلن گلیکول با نسبت وزنی ۴۰:۶۰)/ سیلیکون کاربید با نتایج تئوری..... ۱۳۹
شکل (۴-۷۰): مقایسه مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی (آب/ پروپیلن گلیکول با نسبت وزنی ۴۰:۶۰)/ اکسید تیتانیوم با نتایج تئوری..... ۱۴۰
شکل (۴-۷۱): مقایسه‌ی نتایج تجربی ضریب هدایت حرارتی سایر محققین با مدل ارائه شده برای نانو سیال

اتیلن گلیکول/اکسید تیتانیوم..... ۱۴۱
شکل (۴-۷۲): مقایسه‌ی نتایج تجربی ضریب هدایت حرارتی سایر محققین با مدل ارائه شده برای نانو سیال اتیلن گلیکول/اکسید روی..... ۱۴۲

فهرست جداول

عنوان | صفحه

جدول(۲-۱): مدل‌های تخمین ضریب هدایت گرمایی سوسپانسیون‌های جامد – مایع..... ۲۷
جدول (۲-۲): خلاصه‌ای از مدل های مبتنی بر محیط موثر کلاسیک برای ضریب هدایت حرارتی نانو سیال..... ۲۹
جدول (۲-۳): خلاصه‌ای از مدل ها با در نظر گرفتن اثر حرکت براونی..... ۳۳
جدول (۳-۱): مقایسه انواع ویسکومتر ها..... ۴۶
جدول (۳-۲): مشخصات ویسکولایت VL700..... ۴۷
جدول (۳-۳):خواص ترموفیزیکی سیال‌های پایه در دمای ۲۵ درجه..... ۶۶
جدول (۳-۴): خواص نانو ذرات..... ۶۷

فهرست علائم

شعاع سیال پایه	a_{bf}
ضریب تغییرات حرارتی مقاومت سیم	B_o
دما سانتی‌گراد	^oC
ضریب نفوذ	D_o
شعاع نانوذره	d_p
اتیلن گلیکول	EG
عدد فوریه	Fo
پتانسیل کل ذره	G_T
فاصله بین ذرات	h
تابع بسل اصلاح شده	I_o
ضریب هدایت حرارتی خوشه $(W/m.^oC)$	k_a
ثابت بولترمن	k_b
ضریب هدایت حرارتی مس	k_c
ضریب هدایت حرارتی مؤثر خوشه‌های نانوذره	k_{cl}
ضریب هدایت حرارتی ذرات مختلط	k_{cp}
ضریب هدایت حرارتی نانوسیال $(W/m.^oC)$	k_{eff}
ضریب هدایت حرارتی فضاپرکن	K_g
ضریب هدایت حرارتی لایه $(W/m.^oC)$	k_{layer}
ضریب هدایت حرارتی معادل ذرات معادل $(W/m.^oC)$	k_{pe}
طول ویژه	L
طول استوانه	L
مسیر پویش آزاد مایع	L_{bf}
ضخامت فضاپرکن بین دو صفحه‌ی مسی	L_g
وزن نانوذرات	m_c
پروپیلن گلیکول	PG
ضخامت لایه پوشش	r
مقاومت سیم در دمای مرجع	$\overline{R_o}$

شعاع لوله شیشه‌ای	r_1
شعاع خارجی استوانه داخلی	r_2
شعاع مؤثر خوشه	r_a
مقاومت کاپیتزا	R_k
شعاع پراب	r_p
مساحت مقطع عرضی	
مساحت مقطع فضاپرکن	S_g
دمای اندازه‌گیری شده نانوسیال	T
تغییرات لحظه‌ای دمای یک سیم فلزی طویل نامحدود	$T(t)$
دمای سطح بیرونی استوانه داخلی	T_i
دمای سطح بیرونی استوانه خارجی	T_o
دمای مرجع	T_o
سرعت متوسط	$\bar{u}$
پتانسیل الکتریکی	$V(t)$
آب	W

علائم یونانی

نفوذ حرارتی	α_{bf}
شعاع معادل خوشه	α_{cl}
شعاع کاپیتزا	α_k
تابع هندسی	$D(\tau)$
مقاومت پراب وابسته به زمان	$R_P(\tau)$
افزایش دمای پراب	$\Delta T(\tau)$
کسر حجمی نانوذره	ϕ
کسر حجمی مؤثر	ϕ_e
کسر حجمی هیدرودینامیکی نانوذرات جامد	ϕ_h
ماکزیمم کسر حجمی ذره	ϕ_m
کسر حجمی کامل نانوذره و نانولایه	ϕ_v
دانسیته سیال	ρ_f
چگالی نانولایه	ρ_{layer}
چگالی نانوذره	ρ_p

ضخامت نانولایه	δ
فاصله بین نانوذرات	δ
ضریب لزجت سیال پایه	μ_{bf}
ضریب لزجت نانوسیال	μ_{nf}
ضریب ویریال	η
پارامتر تجربی	ω
ویسکوزیته سیال پایه	ν
زیرنویس	
خوشه	a
سیال پایه	bf
خوشه	cl
فضاپرکن	g
هیدرودینامیکی	h
کاپیتزا	k
نانوذره	nf
لایه	$layer$
ذره	P
معادل	pe

فصل اول

مقدمه