



مؤسسه آموزش عالی غیر دولتی غیر انتفاعی انرژی

مطالعه آزمایشگاهی و مدلسازی خواص رئولوژیکی نانو سیالات در سیستمهای گرمایشی
با نرم افزار متلب

پایان نامه یا رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو

باقر بیگدلی

استاد راهنما اول:

دکتر مجتبی میرزایی

نیمسال اول ۹۸



مؤسسه آموزش عالی غیر دولتی غیر انتفاعی انرژی

پایان نامه یا رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو

باقر بیگدلی

استاد راهنما دوم:

دکتر حیدر مداح

نیمسال اول ۹۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب باقر بیگدلی به شماره دانشجویی ۳۰۴۱ دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله برای همگان بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

دکتر مجتبی میرزایی و دکتر حیدر مداح

تاریخ:

امضا:

تقدیم و قدردانی به:

به مصداق ((لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق)) بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای مجتبی میرزایی و جناب آقای حیدر مداح که با کرامتی چون خورشید سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کار ساز و سازنده بارور ساختند تقدیر و تشکر نمایم .

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی تجربی تأثیر نانوسیالات Al_2O_3 آب در تقویت انتقال حرارت در داخل مبدل حرارتی لوله دو تایی در دمای ورودی متغیر انجام شده است. نانوذرات Al_2O_3 با غلظت ۰,۲۵ و ۰,۵ با غلظت حجم در دمای ورودی مختلف استفاده شده است. مجموعه آزمایشی متشکل از مبدل حرارتی دو جداره با نانوسیالات در سمت سرد در جریان آشفته با رینولدز ۲۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ استفاده شده است. نتایج حاصل از مطالعه نشان می دهد که انتقال حرارت با افزایش دما و غلظت حجم ذرات نانو افزایش می یابد. با افزایش حداکثر تعداد ناسلت در دمای ورودی ۳۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد افزایش قابل توجهی در آب مشاهده میشود.

واژه‌های کلیدی: نانو سیال ، مبدل حرارتی ، نوار مار پیچی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول : کلیات تحقیق
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۱-۲- ضرورت های خاص
۴	فصل دوم مروری بر کارهای گذشتگان
۵	۲-۱- مقدمه
۷	۲-۲- خواص ترموفیزیکی
۷	۲-۲-۱- چگالی
۸	۲-۲-۲- گرمای ویژه
۸	۲-۲-۳- هدایت حرارتی
۹	۲-۳-۱- نانوسیالات بر پایه اتیلن گلیکول
۱۲	۲-۳-۲- نانوسیالات بر پایه پروپیلن -گلیکول
۱۵	۲-۴-۱- رفتار رئولوژیکی نانوسیالات
۱۸	۲-۴-۲- نانوسیالات بر پایه پروپیلن-گلیکول
۲۰	۲-۴-۳- افزایش انتقال حرارت
۲۰	۲-۵- نتایج تجربی
۲۳	۲-۶- شبیه سازی های عددی
۲۸	۲-۷- چشم اندازهای تحقیق
۲۸	فصل سوم: تجهیزات آزمایشگاه
۲۹	۳-۱- یک نانو سیال
۲۹	۳-۲- آشفته سازی جریان
۳۸	فصل چهارم: مدل سازی نتایج
۳۹	۴-۱- شبکه های عصبی
۳۹	۴-۲- انتخاب نوع شبکه

۴۰	۳-۴- مقدار مومنتوم
۴۲	۴-۴- تابع انتقال و قانون آموزش
۴۳	۵-۴- تعداد لایه های میانی یا لایه های پنهانی (hidden layer)
۴۴	۶-۴- تعداد نورون های لایه پنهان
۴۶	۷-۴- شبکه عصبی بهینه سازی شده با الگوریتم ژنتیک
۵۱	نتایج و پیشنهادات
۵۵	مراجع

اشکال

صفحه	عنوان
۲۹	شکل ۳-۱- تصویر SEM نانوذرات آلومینا
۳۰	شکل ۳-۲- شماتیک آشفته ساز نوار مارپیچی
۳۱	شکل ۳-۳- نوارهای مارپیچی به کاررفته در تحقیق
۳۳	شکل ۳-۴- تاثیر تغییر ایجاد شده در نوارهای مارپیچی برروی انتقال حرارت
۳۳	شکل ۳-۵- ارزیابی مدل ارائه شده با استفاده از داده های آزمایشگاهی
	شکل ۳-۶- = نوار های مارپیچی تغییر داده شده (a) نوار معمولی (b) نوار با زاویه ۳۰۰ درجه (c)
۳۴	۶۰۰ درجه و (o) (d) ۹۰ چرخش
۳۴	شکل ۳-۷- دستگاه آزمایشگاهی
۳۶	شکل ۳-۸- نتایج تحقیق
۳۶	شکل ۳-۹- کوئل های به کار رفته در تحقیق جعفری و همکارانش
۳۷	شکل ۳-۱۰- تاثیر کوئل های سیمی برروی انتقال حرارت
۴۷	شکل ۴-۱- عملکرد شبه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک در پیشبینی بازده (تمامی داده ها)
۴۹	شکل ۴-۲- نمودار (الف) توزیع نرمال (ب) توزیع خطا برای برای مدل ارائه شده
	شکل ۴-۳- بررسی توزیع باقیمانده های شبکه عصبی و نتایج آزمایشگاهی در مدل پیشبینی
۵۰	کننده

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- نقطه انجماد و محلول آب بر پایه اتیلن گلیکول و پروپیلن در دماهای مختلف	۵
جدول ۲-۲- نقطه جوش محلول آب بر پایه اتیلن گلیکول و پروپیل گلیکول در دماهای مختلف	۵
جدول ۳-۲- مقایسه خواص ترموفیزیکی اتیلن و پروپیلن گلیکول با آب در دمای 20°C	۶
جدول ۴-۲- خلاصه داده های آزمایشگاهی برای تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات بر پایه اتیلن گلیکول (EG) و پروپیلن گلیکول (PG)	۱۳
جدول ۵-۲- خلاصه مطالعات موجود در زمینه ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات بر پایه EG و PG و f_{Gnps} و نانو پلاکت های گرافنی عامل دار شده	۱۶
جدول ۱-۳- ویژگی های فنی نوار ای مپیچی به کار رفته در تحقیق	۳۲
جدول ۲-۳- مشخصات کویل	۳۶
جدول ۱-۴- بررسی مقایسه ای تاثیر نوع شبکه بر روی عملکرد ANN	۴۰
جدول ۴-۲- مقدار ضرب همبستگی در شبکه های اموطش یافته با استفاده از تابع تانژانت هیپربولیک و مقادیر مختلف مومنتم	۴۱
جدول ۳-۴- مقدار ضریب همبستگی در شبکه های آموزش یافته با استفاده از تابع سیگموئید و مقادیر مختلف مومنتم	۴۲
جدول ۴-۴- مقادیر ضریب همبستگی در در شبکه های عصبی آموزش یافته با استفاده از تابع انتقال و قانون آموزش مختلف	۴۳
جدول ۵-۴- مقدار همبستگی در شبکه های آموزش یافته با تعداد مختلف لایه پنهان	۴۴
جدول ۶-۴- مقدار ضریب همبستگی در شبکه های عصبی تدوین شده با تعداد نورون های مختلف در لایه های پنهان	۴۵
جدول ۷-۴- پارامترهای شبکه عصبی بهینه سازی شده با الگوریتم ژنتیک	۴۶

فصل اول :

کلیات تحقیق

بحث در فصل های اخیر حقایق فریبنده درباره ساختار، ترکیب، و رسانایی حرارتی نانوسیالات نشان میدهد. علاقه اولیه در نانو سیالات از یک دیدگاه فنی امکان استفاده از این سیالات برای اهداف سرمایه‌گذاری است. اگر چه رسانایی بالاتر یک اتفاق دلگرم کننده است، به هیچ وجه مدرک قطعی از توانایی های سرمایه‌گذاری چنین سیالاتی نیست. برای این منظور، لازم است که یک تایید معین از عملکرد چنین سیالی تحت یک محیط جا به جایی داشته باشیم. آن نه تنها برای نشان دادن رفتار جا به جایی نانوسیالات مهم است بلکه همچنین تئوری های جامع دینامیک سیالات و انتقال حرارت نانوسیالات را ارائه می دهد. در حال حاضر، مطالعات جابه جایی نانوسیالات در مقایسه با مطالعات تجربی و تئوری بر روی رسانش خیلی محدود است. در این فصل ما مفاهیم محدود شده انتقال حرارت جا به جایی در نانو سیالات را که در سال های اخیر توسعه داده شده است را ارائه می دهیم. قبل از انجام این کار، تشریح تعدادی مفاهیم پایه ای انتقال حرارت جابه جایی به ویژه برای خوانندگان میان رشته ای که مطالعات دقیق انجام شده از انتقال حرارت جا به جایی ندارند، مهم است.

۱-۲- ضرورت های خاص :

عملکرد انتقال حرارت سیالات سنتی پایین است که همین امر موجب می شود راندامان بهبود انتقال حرارتی پایین بماند. به منظور ارتقای هدایت حرارتی سیال سنتی و مشخصات انتقال حرارت، ذرات جامد در ابعاد نانو در مایع پایه در مبدل های حرارتی به صورت معلق پراکنده میشود.

کاربردها:

استفاده در صنایع برودتی و گرمایشی و ساخت مبدل های حرارتی و گرم کن های خورشیدی - نفت و گاز - دودکش های نیروگاهی

فرضیات:

- نانوذرات موجب افزایش چشمگیر انتقال حرارت میشوند.
- نوار مارپیچی موجب افزایش چشمگیر انتقال حرارت میشود.
- نوار مارپیچی موجب افزایش افت فشار میشود.
- نرم افزار متلب به خوبی قادر به مدلسازی میزان انتقال حرارت میباشد.

روش پژوهش و مرحله انجام پایان نامه:

مطالعه بنیادی و جستجوی کتابخانه ای و اینترنتی برای یافتن منابع معتبر

بررسی انواع مبدل‌های موجود و مطالعه مدل‌های بکاربرده شده در متلب

ارایه یک کد مدلسازی

ارائه نتایج به صورت نمودار و جداول توصیفی و تحلیل داده ها.

تفسیر و بحث و نتیجه گیری

۶-تنظیم و ارائه پایان نامه.

فصل ۲

مروری بر کارهای گذشتگان

۲-۱-مقدمه

سیالات انتقال حرارت (HTF) نقش مهمی در از بین بردن گرمای اضافی از یک سیستم دارند و کاربردهای گوناگونی در سیستم های حرارتی مختلف شامل سیستم های گرمایشی، تهویه و تهویه مطبوع ساختمان (HVAC)، الکترونیک، خودرو یا زیست پزشکی دارند [۱]. در مناطق سردسیر مانند کانادا، آلاسکا و قطب شمال انرژی بسیار زیادی برای سیستم های گرمایشی مسکونی و صنعتی در طول زمستان که دمای محیط ممکن است به -40°C برسد مصرف می شود. بنابراین، استفاده از اتیلن گلیکول یا پروپیلن گلیکول مخلوط با آب به عنوان نانوسیالات انتقال حرارت برای کاهش نقطه انجماد آب مایع، معمول است. برای کاربردهای دما بالا، مانند رادیاتورهای داخل اتومبیل یا مبدل های حرارتی صنعتی، مخلوطی از اتیلن گلیکول و آب (EG-W)، یا پروپیلن گلیکول و آب (PG-W)، برای کاهش نقطه انجماد آب مایع استفاده می شود. در جداول ۲-۱ و ۲-۲ نقاط انجماد و جوش هر دو مخلوط EG-W و PG-W به طور خلاصه آورده شده است.

جدول ۲-۱ نقطه انجماد محلول آب برپایه اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول در دماهای مختلف [۲]

Ethylene Glycol Solution (% by Volume)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	۰	-۳,۴	-۷,۹	-۱۳,۷	-۲۳,۵	-۳۶,۸	-۵۲,۸
Propylene-glycol solution (% by volume)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	۰	-۳	-۸	-۱۴	-۲۲	-۳۴	-۴۸

جدول ۲-۲ نقطه جوش محلول آب برپایه اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول در دماهای مختلف [۲]

Ethylene Glycol Solution (% by Volume)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	۱۰۰	۱۰۱,۱	۱۰۲,۲	۱۰۴,۴	۱۰۴,۴	۱۰۷,۲	۱۱۱,۱
Propylene-glycol solution (% by volume)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰,۵	۱۰۲,۲	۱۰۳,۸	۱۰۵,۵	۱۰۷,۲

همانطور که در جداول ۲-۱ و ۲-۲ نشان داده شده است، محلول های EG-W دارای نقاط انجماد کمتر و نقاط جوش بالاتر در مقایسه با محلول های PG-W هستند. با این حال، استفاده از مخلوط PG-W به ویژه در کاربردهای تعامل انسانی مانند گرم کردن ساختمان های مسکونی به شدت توصیه می شود زیرا پروپیلن گلیکول غیر سمی و به راحتی در محیط تجزیه می شود، برخلاف اتیلن گلیکول که سمی است و

مدت زمان طولانی تری برای تجزیه آن لازم است [۷-۳]. مخلوط های اتیلن و پروپیلن گلیکول همچنین هدایت حرارتی حدوداً سه برابر کمتر از آب در دمای 20°C (جدول ۳) دارند. این محدودیت اصلی در توسعه سیستم های دارای کارایی حرارتی است. محدودیت های دیگر ظرفیت حرارتی کمتر و ویسکوزیته دینامیک بالاتر است که به ترتیب باعث محدودیت در ذخیره انرژی حرارتی و قدرت پمپاژ مورد نیاز می شود که این امر انتقال این سیالات را با محدودیت روبه رو می کند. در طول چند دهه گذشته، مهندسين و محققان با استفاده از روشهای غیرفعال (passive) یا فعال (active)، تلاش های چشمگیری برای بهبود بازده انتقال حرارت این سیالات انتقال حرارت (HTF) انجام داده اند: این روش ها شامل جریان آشوبناک (chaotic advection)، تلاطم پیشرفته (آشفته‌گی)، HTF با خصوصیات حرارتی بالا یا ترکیبی از این روش ها [۸] می باشند. در بین این روش ها، ثابت شده است که نانوسیالات بدون افزایش اندازه، هزینه و پیچیدگی تجهیزات حرارتی راهی مؤثر برای دستیابی به این هدف هستند. بنابراین نانوسیالات برپایه اتیلن و پروپیلن گلیکول به طور گسترده ای و عمدتاً برای حذف گرما در رادیاتورهای اتومبیل [۹-۲۱]، ژنراتورهای دیزل [۲۲]، مبدل های حرارتی صنعتی [۲۳] و دستگاههای الکترونیکی [۲۴،۲۵] مورد استفاده قرار گرفته اند.

جدول ۳-۲ مقایسه خواص ترموفیزیکی اتیلن و پروپیلن گلیکول با آب در دمای 20°C

Properties		ρ	k ($\text{W. m}^{-1}. \text{K}^{-1}$)	μ (Pa.s)
Ethylene-glycol	۱۱۲۶	۲۳۵۴	۰,۲۵۶	
Propylene-glycol	۱۰۳۵,۳	۲۴۷۹	۰,۱۹۶۲	$57,571 \times 10^{-3}$
Water	۹۹۹	۴۱۸۵	۰,۶	$1,002 \times 10^{-3}$

بررسی های کلی در مورد نانوسیالات تاکنون در مقالات با تمرکز بر تهیه و پایداری نانوسیالات ارائه شده است [۲۶،۲۷]. این مقالات، در مورد سنتز، خصوصیات ترموفیزیکی، و مکانیسم های انتقال حرارت نانوسیالات [۲۸] یا کاربردهای آن ها در مبدل های حرارتی [۲۹] می باشند. Wang و Mujumdar [۳۰] و سپس Kleinstreuer و Xu [۲۵] در مورد روش های نظری یا عددی اختصاص داده شده به شبیه سازی نانوسیالات و نانوروانکارها بررسی مفصلی را ارائه دادند. Patel و همکاران [۳۱] خواص ترموفیزیکی نانو مبردها را در یک سیستم تبرید به طور خلاصه بیان کردند. همه این جنبه ها نیز در تک نگاری Bianco [۳۲] به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. براساس دانش ما، هیچ نقد و بررسی جدیدی در سال ۲۰۱۸ به نانوسیالات برپایه اتیلن و پروپیلن گلیکول اختصاص داده نشده است. هدف از کار حاضر، پر کردن این شکاف با خلاصه کردن یافته های مهم منتشر شده در خصوص خواص ترموفیزیکی و بهبود انتقال حرارت می باشد.

مقاله حاضر به شرح زیر سازماندهی شده است: بخش ۲ به خواص ترموفیزیکی نانوسیالات برپایه اتیلن و پروپیلن گلیکول می پردازد. در حالی که بخش ۳ روی بهبود انتقال حرارت این نانوسیالات تمرکز می کند. سرانجام ، بخش ۴ بعضی از چشم اندازهای تحقیق برای نفوذ نانوسیالات به صنعت را پیش نهاد می کند.

۲-۲ خواص ترموفیزیکی

به منظور داشتن بینش بیشتر در مورد تأثیر استفاده از نانوسیالات به عنوان خنک کننده، اندازه گیری دقیق خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیالات بسیار مهم است. مورد نیازترین خواص ترموفیزیکی نانوسیالات ، هدایت حرارتی ، ویسکوزیته ، چگالی و گرمای ویژه آنهاست.

مقالات بی شماری در مورد هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات مختلف برپایه EG- و PG- منتشر شده است. با این حال ، مقالات با موضوع گرمای ویژه و چگالی نانوسیالات بسیار محدود است. مقاله مروری حاضر فقط به مطالعات تجربی انجام شده در مورد خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیالات می پردازد. زیرا با وجود تلاش های اساسی محققان تاکنون هیچ مدل تجربی یا تئوری در مقالات برای پیش بینی دقیق خواص نانوسیالات وجود ندارد. این امر می تواند به دلیل مکانیزم های مختلفی که در عملکرد نانوسیالات نقش دارند اما در مدل ها در نظر گرفته نشده است باشد (به مقالات مروری [۳۵-۳۳،۳۰] مراجعه کنید).

۱-۲-۲-چگالی

به منظور ارزیابی دینامیک سیال و عملکرد انتقال حرارت نانوسیالات، چگالی باید معلوم باشد. با این حال، داده های محدودی برای نانوسیالات خصوصا برای محلول های EG-W و PG-W موجود است. بیشتر محققان ترجیح می دهند از قانون مخلوط ها استفاده کنند:

$$\rho_{nf} = \rho_{nf}\varphi + (1 - \varphi)\rho_{bf} \quad (1)$$

Vajjha و همکاران [۳۶] چگالی را برای نانو ذرات ZnO ، Al_2O_3 و Sb_2O_5 : SnO_2 پخش شده در یک مخلوط EG آب با نسبت ۶۰:۴۰ و با غلظت های حجمی مختلف نانوذرات تا $\varphi = 10\%$ و دماهای بین ۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد که برای کل نانوسیالات مورد مطالعه، چگالی با افزایش غلظت نانوذرات φ افزایش می یابد. به عنوان مثال، در دمای $T = 10^\circ\text{C}$ ، هنگامی که بارگذاری نانوذرات Al_2O_3 در سیال پایه از $\varphi = 1$ تا $\varphi = 10$ درصد وزنی افزایش می یابد چگالی نانوسیال حدود ۲۲ درصد افزایش می یابد. چگالی با دما برای این مجموعه از پارامترها به طور خطی به طور جزئی کاهش می یابد. آنها نتایج خود را با معادله Pak و Cho [۳۷] (معادله ۱) مقایسه کردند و اظهار داشتند که داده های آنها با داده های Pak و Cho با انحراف حدودا $\pm 1\%$ مطابقت دارد به استثنای نانوسیال ZnO ، که با افزایش مقادیر φ ۲ تا ۸٪ انحراف را نشان می دهد. برای جبران این اختلاف ، آنها یک فاکتور تصحیح را پیشنهاد کردند که تابعی از φ می باشد.

اندازه گیری چگالی بر روی چندین نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید روی ، اکسید مس ، اکسید تیتانیوم ، دی اکسید سیلیکون و نانولوله های کربن که به صورت جداگانه در یک سیال پایه ۶۰:۴۰ پروپیلن گلیکول و آب پراکنده شده اند در محدوده دما بین ۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد انجام شد [۳۸]. نتایج نشان داد که چگالی نانوسیال مستقل از غلظت نانوذره بوده اما با افزایش غلظت نانوذره افزایش و با افزایش

دما کاهش می یابد. آن ها داده های تجربی خود را با مقادیر پیش بینی شده از معادله تئوری (۱) Pak و Cho برای غلظت نانوذرات تا ۶ درصد حجمی و اندازه نانوذرات در محدوده ۱۰ تا ۷۶ نانومتر مقایسه کردند. آنها دریافتند که نتایج تجربی با نتایج تئوری موجود با حداکثر انحراف ۳,۸ درصد برای نانوسیال CuO و میانگین انحراف ۰,۱ درصد برای تمام نانوسیالات مطابقت خوبی داشتند.

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، چگالی EG و PG فقط ۱۲,۷٪ و ۳,۶٪ بیشتر از آب مایع در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد است. از این نقطه نظر، ممکن است هیچ یک از این سیالات پایه ترجیحاً از نظر پدیده رسوب توصیه نشوند.

۲-۲-۲- گرمای ویژه

تاکنون هیچ مطالعه تجربی در مورد گرمای ویژه نانوسیالات برپایه EG-W و PG-W در مقالات موجود نیست. با این حال، دو رابطه اصلی برای تعیین گرمای ویژه نانوسیال وجود دارد که توسط Pak و Cho (معادله (۲)) [۳۷] و Xuan و Roetzel (معادله (۳)) پیشنهاد شده است:

$$C_{p_{nf}} = C_{p_{nf}} \varphi + (1 - \varphi) C_{p_{bf}} \quad (2)$$

$$C_{p_{nf}} = \frac{\varphi(\rho C_p)_{np} + (1 - \varphi)(\rho C_p)_{bf}}{\rho_{nf}} \quad (3)$$

رابطه اول (معادله (۲)) بر اساس قانون مخلوط ها است که فرض می کند گرمای ویژه معادل با استفاده از یک ترکیب حجمی ساده از گرمای ویژه هر یک از اجزا مخلوط بدست می آید. تنها تعداد معدودی از محققان در مطالعات خود این رابطه را انتخاب کرده اند [۴۱،۴۰،۳۷]. رابطه دوم (معادله (۳)) بر این فرض استوار است که یک موازنه حرارت بین نانوذرات و سیال پایه وجود دارد. بنابراین، گرمای ویژه نانوذرات را می توان از موازنه حرارت به دست آمده از قانون مخلوط ها به دست آورد. این معادله به طور گسترده ای توسط نویسندگان [۴۴-۴۲] استفاده شده است. برخلاف چگالی و گرمای ویژه، مطالعات تجربی زیادی برای ارزیابی هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات وجود دارد.

۲-۲-۳- هدایت حرارتی

هدایت حرارتی k اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول خالص به ترتیب ۲,۳ و ۳,۱ کمتر از آب مایع در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد است (جدول ۳). افزودن نانوذرات در این مایعات پایه برای جبران این محدودیت ضروری است و باعث افزایش سرعت انتقال حرارت هدایتی می شود. روابط زیادی برای پیش بینی هدایت حرارتی نانوسیالات به عنوان تابعی از هدایت حرارتی نانوذرات k_{np} و هدایت حرارتی سیالات پایه k_{bf} و کسر حجمی نانوذرات φ بسط داده شده است. این روابط قبلاً در مقالات مورد بازبینی گسترده قرار گرفته اند [۴۶،۴۵،۳۲،۲۵]. فقط روابط اصلی در اینجا به طور خلاصه فراخوانده می شود. مدل Hamilton-Crosser مدل تعمیم یافته Maxwell است:

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)(k_{np} - k_{bf})\varphi}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + (k_{np} - k_{bf})\varphi} \quad (4)$$

n یک ضریب شکلی تجربی که برابر $S / 3$ می باشد و S ضریب کروی بودن نانوذرات است. برای ذرات کروی $S = 1$ می باشد که مدل Maxwell را برای غلظت های کم میکروذرات، بسط می دهد.

جالب تر اینکه ، ما در زیربخش های زیر بر روی نتایج و روابطی که هدایت حرارتی نانوسیالات بر پایه EG-W و PG-W را محاسبه می کنند تمرکز خواهیم کرد.

۱-۳-۲- نانوسیالات بر پایه اتیلن گلیکول

اولین مطالعات انجام شده در مورد بهبود راندمان حرارتی نانوسیالات بر پایه EG در آزمایشگاه ملی Argonne انجام شده است. Lee و همکاران [۴۷] به طور تجربی تأثیر نانوذرات و نوع سیال پایه را بر هدایت حرارتی محلول بررسی کردند. دو نانوذره Al_2O_3 و CuO به طور جداگانه در آب یا در EG پراکنده شدند و در نتیجه چهار نانوسیال مختلف ایجاد شد. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی مخلوط بطور خطی با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می یابد. این نویسندگان اظهار داشتند که نانوسیال CuO - اتیلن گلیکول در مقایسه با نانوسیال Al_2O_3 -EG، CuO -Water و Al_2O_3 -water افزایش هدایت حرارتی بیشتری دارند. به عنوان مثال ، برای کسر حجمی یکسان نانوذرات ۴ درصد، هدایت حرارتی EG با افزودن نانوذرات CuO و Al_2O_3 به ترتیب حدود ۲۰٪ و ۱۴٪ افزایش یافته است. Wang و Choi [۴۸] نانوسیالی را در نظر گرفتند که از نانوذرات Al_2O_3 و CuO پخش شده در آب، یک سیال پمپ خلاء ، روغن موتور یا اتیلن گلیکول تشکیل شده است. آنها خاطرنشان کردند که افزودن کسر حجمی خیلی کمی از نانوذرات به یکی از این سیالات پایه باعث افزایش قابل توجه هدایت حرارتی مخلوط می شود. هدایت حرارتی نانوسیال آخر با افزایش ϕ افزایش یافت. به عنوان مثال ، هدایت حرارتی مؤثر EG به ترتیب برای $\phi = 5\%$ و $\phi = 8\%$ از نانوذرات Al_2O_3 به ترتیب ۲۶٪ و ۴۰٪ افزایش یافته است. نرخ افزایش برای EG و روغن موتور بالاترین بود، در حالی که نرخ افزایش برای سیال پمپ کمترین بود. پراکندگی $\phi = 5\%$ پودرهای Al_2O_3 و CuO به EG باعث افزایش هدایت حرارتی مؤثر در مقایسه با EG خالص به ترتیب به میزان ۲۰٪ و ۲۶٪ شد. آنها اظهار داشتند که نانوسیال بر پایه EG تا کسر حجمی ۱۶ درصد بسیار پایدار است. در حالی که نانوسیال های بر پایه آب ، روغن موتور و سیال پمپ در کسر حجمی ۱۰ درصد و بیشتر ناپایدار شدند. Reddy and Rao هدایت حرارتی مؤثر نانوسیالات حاوی نانوذرات TiO_2 (dnp = ۲۱nm) را که به طور جداگانه در آب ، مخلوط اتیلن گلیکول-آب ۴۰:۶۰ و ۵۰:۵۰ پراکنده شدند برای $0.2 < \phi < 1\%$ و $30 < T < 70^\circ C$ به طور آزمایشگاهی اندازه گیری کردند. آنها خاطرنشان کردند که با افزایش غلظت اکسید تیتانیوم ، هدایت حرارتی نانوسیالات افزایش یافته است. نانوسیال بر پایه مخلوط ۵۰:۵۰ آب - EG در مقایسه با آب خالص و سیال بر پایه مخلوط ۴۰:۶۰ آب - EG ضریب هدایتی مؤثر (k) بیشتری داشت. به عنوان مثال ، در دمای $T = 30^\circ C$ ، با افزودن ۰٫۲ درصد حجمی و ۱ درصد حجمی از نانوذرات TiO_2 به مخلوط ۵۰:۵۰ EG-آب ، افزایش رسانایی حرارتی به ترتیب ۱۰٫۶۴٪ و ۱۴٫۲٪ اندازه گیری شد. با این حال، تحت همین شرایط، برای نانوسیال بر پایه آب-اتیلن گلیکول ۴۰:۶۰ افزایش هدایت حرارتی بسیار پایین تر بود یعنی با افزودن ۰٫۲ درصد حجمی و ۱ درصد حجمی از نانوذرات TiO_2 به مخلوط آب-اتیلن گلیکول ۴۰:۶۰ افزایش هدایت حرارتی به ترتیب بین ۰٫۶۴۹٪ تا ۵٫۰۱٪ و بین ۱٫۹۴٪ و ۴٫۳۸٪ بود.

$$k_{nf} = k_{bf}[a + b\phi] \quad (5)$$

پارامترهای تنظیم a و b ، به ϕ بستگی دارند.

اندازه گیری آزمایشگاهی هدایت حرارتی نانوذرات Al_2O_3 و CuO پراکنده در مخلوط اتیلن گلیکول-آب ۵۰:۵۰ توسط Sundar و همکاران انجام شد [۵۰]. آنها گزارش دادند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات و افزایش دما، هدایت حرارتی هر دو نانوسیال افزایش می یابد. نانوسیال برپایه CuO افزایش هدایت حرارتی بیشتری نسبت به نانوسیالات برپایه Al_2O_3 در شرایط عملیاتی یکسان نشان داد. آنها خاطرنشان کردند که افزایش هدایت حرارتی نانوذرات Al_2O_3 از ۹,۸ تا ۱۷,۸۹ درصد متفاوت است و هدایت حرارتی برای نانوسیال برپایه CuO از ۲۴/۶ تا ۵۶/۵ درصد در محدوده دمایی ۱۵ تا ۵۰ درجه سانتیگراد و کسر حجمی ۰,۸ درصد در مقایسه با سیال پایه متغیر بود. Usri و همکاران [۵۱] هدایت حرارتی نانوسیالات Al_2O_3 / EG-W در نسبت های مختلف آب ۴۰:۶۰، ۵۰:۵۰ و ۶۰:۴۰ بررسی کردند. اندازه گیری های KD_2pro برای هدایت حرارتی برای $\lambda_{\text{np}} = 13\text{nm}$ ، $T = [30-70^\circ\text{C}]$ و $0.5 \leq \phi \leq 2\%$ انجام شد. با استفاده از تمام نتایج با فاصله اطمینان ۵٪ رابطه زیر حاصل شد:

$$k_{nf} = 0.634(1 + \phi)^{0.1045} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0.1094} (1 + \text{BR})^{-1.159} \quad (6)$$

آن BR نسبت سیال پایه است، برای مخلوط ۴۰:۶۰ EG:W، $\text{BR} = 0.4$ می باشد.

داده های تجربی بدست آمده توسط Chen و همکاران برای نانوذرات تیتانیوم دی اکسید پراکنده در اتیلن گلیکول خالص در دو دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد نشان داده است [۵۲]. افزودن این نانوذرات باعث افزایش هدایت حرارتی مخلوط می شود و اگر دما از ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد، این افزایش اندکی بیشتر است. با این حال، این اختلاف در محدوده خطا باقی مانده است. جالب تر اینکه، نتایج آنها نشان داد که اولاً اگر داده های خود را با داده های به دست آمده از تئوری ماکسول برای میکروذرات مقایسه کند، می توان با انتخاب نانوذرات (در اینجا ۲۵ نانومتر) به بهبود حرارتی بهتری دست یافت. دوماً این نویسندگان یک رابطه جالب برای هدایت حرارتی، که یک نسخه اصلاح شده از رابطه ماکسول است پیشنهاد کردند. این رابطه نسبتاً پیچیده به طور خاص برای $\phi \geq 0.4\%$ مناسب می باشد.

افزایش عملکرد حرارتی نانوسیال حاوی نانوذرات الماس پراکنده شده در مخلوط EG و آب (۴۵:۵۵) توسط Xie و همکاران انجام شد [۵۳]. آنها مشاهده کردند که هدایت حرارتی سیال بصورت خطی با کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد. آنها خاطرنشان کردند که بارگذاری ۲٪ حجمی نانوذرات الما، هدایت حرارتی EG-آب را بیش از ۱۸٪ افزایش داد. نویسندگان ادعا کردند که عملکرد حرارتی بهینه نانوسیال در $\phi = 0.5$ درصد حجمی به دست آمد. پیشرفت های قابل توجهی در خصوص هدایت حرارتی با افزودن نانوذرات مس به اتیلن گلیکول توسط Eastman و همکاران گزارش شده است [۵۴]. تنها افزودن ۰,۳ درصد حجمی از نانوذرات مس باعث افزایش ۴۰ درصدی هدایت حرارتی اتیلن گلیکول شد. Hong و Yang [۵۵] افزایش ۱۸ درصدی هدایت حرارتی با افزودن ۰,۵۵ درصدی پودر نانوکریستالی آهن را گزارش کردند. بارگذاری ۰,۱ درصد حجمی از نانوذرات مس در EG منجر به افزایش هدایت حرارتی به میزان تقریباً ۹٪ شد [۵۶]. Xie و همکاران [۵۷] هدایت حرارتی نانوذرات بر پایه EG حاوی اکسیدهایی از جمله نانوذرات MgO ، TiO_2 ، ZnO و Al_2O_3 را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که در کسر حجمی یکسان، نانوسیال MgO-EG بیشترین افزایش هدایت حرارتی را نسبت به سایر نانوسیالات نشان داد. آنها

خاطر نشان کردند که حداکثر افزایش هدایت حرارتی در کسر حجمی ۴ درصد برابر با ۴۰,۶ درصد برای نانوذرات MgO بود. Vajjha و Das [۴۵] مجموعه کاملی از داده های هدایت حرارتی اندازه گیری شده برای سه نانوسیال را ارائه دادند: ZnO و CuO , Al_2O_3 پراکنده در مخلوط اتیلن گلیکول آب ۶۰:۴۰. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی یک تابع خطی از ϕ برای همه نانوسیالات مورد مطالعه است. به عنوان مثال، در دمای معین، با پراکندن ۶٪ درصد حجمی از نانوذرات ZnO , Al_2O_3 و CuO ، به ترتیب هدایت حرارتی نسبت به سیال پایه ۴۲٪، ۴۶٪ و ۶۰٪ افزایش یافت. نویسندگان همچنین تأثیر اندازه نانوذرات روی هدایت حرارتی EG-W را بررسی کردند. دو مجموعه اندازه گیری برای نانوسیال بر پایه ZnO با اندازه ذرات ۲۹ و ۷۷ نانومتر انجام شد. آنها دریافتند که هدایت حرارتی برای قطر نانوذرات کوچکتر بیشتر است زیرا مساحت سطح بیشتری برای انتقال انرژی حرارتی فراهم می کند. به عنوان نمونه، در کسر حجمی ۴ درصد، هدایت حرارتی ۳,۳٪ برای ذرات ۲۹ نانومتر در مقایسه با ذرات ۷۷ نانومتر بیشتر بود. با استفاده از اندازه گیری های تجربی آنها یک رابطه اصلاح شده از رابطه ماکسول حاصل شد:

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{k_p}{k_f}$$

(۷)

$$f(T, \phi) = (2.8217 \times 10^{-2} + 3.9117 \times 10^{-3}) \left(\frac{T}{T_0} \right) + (-3.0699 \times 10^{-2} \phi - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (1)$$

β تابعی از ϕ است که به نوع نانوذرات بستگی دارد، k ثابت بولتزمن و $T = 273 \text{ K}$ این رابطه برای سه قطر نانوذرات (۲۹، ۵۳ و ۷۷ نانومتر) در محدوده دمایی $298 < T < 363 \text{ K}$ معتبر است. کسر حجمی، بین ۱٪ و ϕ_{\max} متفاوت است که برای نانوذرات ZnO , Al_2O_3 و CuO به ترتیب برابر ۱۰، ۷ و ۶ درصد است.

Xie و همکاران [۵۸] رفتار هدایت حرارتی سوسپانسیون نانوذرات SiC را مورد بررسی قرار داد. ذرات SiC کروی با قطر متوسط $d_{np} = 26$ نانومتر و ذرات SiC استوانه ای با قطر متوسط ۶۰۰ نانومتر در آب و اتیلن گلیکول به طور جداگانه پراکنده شدند. داده های اندازه گیری شده به وضوح نشان می دهند که نسبت هدایت حرارتی (نسبت هدایت حرارتی مخلوط به سیال پایه) به غلظت، اندازه و شکل نانوذرات بستگی دارد. آنها متوجه شدند که برای مورفولوژی یکسان نانوذرات، نسبت هدایت حرارتی مستقل از سیالات پایه بود، اما مقدار مطلق هدایت حرارتی نانوسیال متناسب با هدایت حرارتی سیال پایه بود. یک مطالعه مقایسه ای در مورد عملکرد حرارتی نانوذرات ۴ درصد حجمی SiC در آب و در مخلوط ۵۰:۵۰ اتیلن گلیکول-آب توسط Timofeeva و همکاران انجام شد [۵۹]. آنها خاطر نشان کردند که با افزایش اندازه ذرات، هدایت حرارتی نانوسیال آب- SiC / EG افزایش می یابد که مشابه رفتارهای گزارش شده برای نانوسیال آب- SiC ، اما با مقادیر متفاوت بود. در غلظت نانوذرات یکسان، افزایش هدایت حرارتی نانوسیال آب- SiC / E با افزایش اندازه ذرات از ۱۶ تا ۹۰ نانومتر، به ترتیب از ۱۱,۵ تا ۱۷ افزایش یافته است.

نتایج نشان داد که در شرایط عملیاتی یکسان، افزودن نانوذرات SiC در EG -آب منجر به افزایش هدایت حرارتی به میزان ۴ تا ۵ درصد بیشتر از آب خالص می شود. نویسندگان یافته های خود را به مقادیر کمتر مقاومت حرارتی بین سطحی (ترشوندگی بهتر) در آب- EG نسبت به نانوسیال برپایه آب ارجاع دادند. آنها همچنین خاطر نشان کردند که چنین اثری را نمی توان به سادگی با استفاده از هدایت حرارتی کمتر سیال پایه آب- EG توضیح داد، زیرا اختلاف مقادیر افزایش هدایت حرارتی که از نظریه متوسط مؤثر به دست آمده، کمتر از ۰,۱ درصد بود.

برای یک سوسپانسیون متشکل از نانو لوله های اتیلن گلیکول و کربن (CNTs) در $\phi = 1$ درصد حجمی، هدایت حرارتی به ترتیب ۱۲,۶ درصد و ۱۲,۴ درصد افزایش یافت که توسط Xie [۶۱] و Liu [۶۲] گزارش شده است. آنها خاطرنشان کردند که هدایت حرارتی مخلوط با کسر حجمی CNT به صورت یکنواخت افزایش می یابد. به عنوان مثال، با افزودن ۰,۲ درصد حجمی و ۰,۱ درصد حجمی CNT هدایت حرارتی ۱,۶ درصد و ۱۲,۴ درصد در مقایسه با اتیلن گلیکول خالص افزایش یافت [۶۱]. Harish و همکاران [۶۲] هدایت حرارتی موثر نانولوله های کربنی تک دیواره (SWCNTs) پراکنده در اتیلن گلیکول را اندازه گیری کردند. آنها گزارش دادند که هدایت حرارتی محیط با توجه به بارگزاری نانولوله افزایش یافته است. حداکثر افزایش هدایت حرارتی نسبت به هدایت حرارتی اتیلن گلیکول خالص ۱۴,۸٪ بود که در کسر حجمی $\phi = 0,2\%$ حاصل شد.

مقاله مروری Puliti و همکاران [۶۳] برخی از مطالعات گذشته تا سال ۲۰۱۲ در مورد هدایت حرارتی نانوسیالات برپایه اتیلن گلیکول را پوشش داده و مقایسه مفیدی را در مورد افزایش هدایت حرارتی به دست آمده از منابع مختلف ارائه داده است. رابطه اصلی استفاده شده برای پیش بینی هدایت حرارتی نیز ذکر شده است. همچنین می توان به کار Prasher و همکاران اشاره کرد [۶۴]، که اعتبار مدل ذرات کروی براونی را با استفاده از داده های تجربی در مورد هدایت حرارتی نانوسیالات برپایه اتیلن گلیکول نشان داد.

۲-۳-۲- نانوسیالات برپایه پروپیلن - گلیکول

در جدول ۲-۴ نتایج اصلی در مورد هدایت حرارتی نانوسیالات بر پایه EG یا PG خلاصه شده است که به وضوح نشان می دهد هدایت حرارتی نانوسیالات برپایه PG تاکنون در مقالات مورد توجه قرار نگرفته است. Palabiyik و همکاران [۵] به طور تجربی پایداری پراکندگی و هدایت حرارتی نانوسیالات برپایه PG حاوی نانوذرات Al_2O_3 و TiO_2 را برای غلظت های مختلف (۱، ۶ و ۹ درصد وزنی) در محدوده دمایی [۲۰ درجه سانتیگراد تا ۸۰ درجه سانتیگراد] مطالعه کردند. آنها به طرز جالب توجهی دریافتند که متوسط اندازه نانوذرات سوسپانسیون با افزایش دما بر خلاف تصور رایج کاهش می یابد [۶۵]. به عنوان مثال، در غلظت آلومینا ۱ درصد وزنی، اندازه نانوذرات از ۹۰ تا ۷۰ نانومتر در محدوده دمایی موردنظر، کاهش یافته است. آنها همچنین دریافتند که افزایش هدایت حرارتی برای هر دو نانوسیال یک تابع غیرخطی از غلظت و مستقل از دما می باشد.

ساتی و همکاران [۶] یک مطالعه تجربی به منظور تعیین هدایت حرارتی پنج نانوسیال مختلف حاوی نانوذرات Al_2O_3 ، CuO ، ZnO و TiO_2 پراکنده در سیال پایه متشکل از مخلوط ۶۰:۴۰ پروپیلن گلیکول و آب در محدوده دما [۳۰- تا ۹۰ درجه سانتیگراد] انجام دادند. برخلاف مطالعه [۵]،

آنها دریافتند که هدایت حرارتی نانوسیالات به شدت وابسته به دما، غلظت نانوذرات، اندازه نانوذرات، نوع نانوذرات و سیال پایه است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت و دما، هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می یابد. با افزایش قطر نانوذرات، هدایت حرارتی نیز افزایش یافت.

Srinivasan و Leena [۶۶] پراکندگی نانوذرات TiO_2 را در مخلوط ۷۰:۳۰ (درصد وزنی) پروپیلن گلیکول-آب برای ϕ در محدوده [۰,۱-۰,۸ درصد] در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیالات با غلظت حجمی و دما افزایش یافته است و می توان رابطه ای برای آن به دست آورد. نکته جالب توجه این است که این نویسندگان همچنین در مورد مزایای بالقوه انتقال حرارت با استفاده از این نانوسیالات در شرایط جریان آرام و آشفته بحث کرده اند.

جدول ۴-۲ خلاصه داده های آزمایشگاهی برای تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات برپایه اتیلن گلیکول (EG) و پروپیلن گلیکول (PG)

Authors	Nanofluid	Nanoparticle Concentration on ϕ	Particle Size (nm)	Increase in k (%)	Temperature Range (°C)
Eastman et al. [۵۴]	Cu/EG	۰,۳ vol. %	۱۰	۴۰	۱۷-۳۷
Lee et al. [۴۷]	CuO/EG	۱-۴ vol. %	۲۴	۴-۲۰	۱۷-۳۷
	Al_2O_3 /EG	۱-۴ vol. %	۳۸	۲-۱۴	۱۷-۳۷
Wang and Choi [۴۸]	Al_2O_3 /EG	۶-۱۰ vol. %	۲۸	۲۶-۴۰	۲۰
	CuO/EG	۵-۱۵ vol. %	۲۳	۲۰-۵۵	۲۰
Hong and Yang [۵۵]	Fe/EG	۱۰ vol. %	۰,۵۵	۱۸	۲۰
Xie et al. [۶۰]	CNTs/EG	۱ vol. %	۱۵ $\times ۳۱۰^{-۴}$	۱۲,۶	۲۰
Xie et al. [۵۸]	SiC/EG	۴,۲ vol. %	۲۶	۱۵,۸	۴
			(spherical shape)		
	SiC/EG	۴ vol. %	۶۰۰	۲۲,۹	۴
			(spherical shape)		
Chen et al. [۵۲]	TiO_2 /EG	$\leq ۱,۸$ vol. %	۲۵	$\leq ۱۴,۵$	۲۰, ۴۰
Garg et al.	Cu/EG	۰,۰۴-۲ vol. %	۲۰۰	۲-۱۲,۶	۲۵

[67]					
Xie et al. [57]	MgO/EG	Δ vol. %	20	40,6	10-60
	Al ₂ O ₃ /EG	Δ vol. %	20	28,2	10-60
	TiO ₂ /EG	Δ vol. %	20	27,2	10-60
	ZnO/EG	Δ vol. %	20	26,8	10-60
	SiO ₂ /EG	Δ vol. %	20	25,3	10-60
Chopkar et al. [68]	Al-Cu/EG	0,2-2,5 vol. %	15	6-220	20
	Ag-Al/EG	0,2-2,5 vol. %	18	8-250	20
Palabiyik et al. [5]	Al ₂ O ₃ /PG	1-9 wt. %	70-100	3,6-11	20-80
	TiO ₂ /PG	1-9 wt. %	100-140	1,4-9	20-80
Harish et al. [62]	SWCNT/EG	0,2 vol. %	1,6 - 150	14,8	27-57
Xie et al. [53]	Diamond/EG-W(45:55)	0,5-2 vol. %	10	6-18	10-60
Timofeeva et al. [59]	SiC/EG-W(50:50)	4 vol. %	16, 29, 66 and 90	11,5-17	15-85
Vajjha and Das [45]	Al ₂ O ₃ /EG-W(60:40)	1-10 vol. %	53	8-69	25-90
	CuO/EG-W(60:40)	1-6 vol. %	29	14-60	25-90
	ZnO/EG-W(60:40)	1-7 vol. %	29 and 77	9,8-48,5	25-90
Sundar et al. [50]	Al ₂ O ₃ /EG-W(50:50)	0,2-0,8 vol. %	36,5	9,8-17,89	15-50
	CuO/EG-W(50:50)	0,2-0,8 vol. %	27	15,6-24,56	15-50
Reddy and Rao [49]	TiO ₂ /EG-W(40:60)	0,2-1 vol. %	21	1,94-4,3	30-70
	TiO ₂ /EG-W(50:50)	0,2-1 vol. %	21	10,64-14,2	30-70

Satti et al. [۶]	Al ₂ O ₃ /PG-W(۶۰:۴۰)	۰,۵-۶ vol. %	۱۵-۴۵	۲-۱۲,۲	
	ZnO/PG-W(۶۰:۴۰)	۰,۵-۶ vol. %	۳۶-۷۶	۱,۶-۲۱,۳۶	
	CuO/PG-W(۶۰:۴۰)	۰,۵-۶ vol. %	۳۰	۲,۳-۱۵,۶	
	SiO ₂ /PG-W(۶۰:۴۰)	۶ vol. %	۳۰	۴,۷-۷,۲	
	TiO ₂ /PG-W(۶۰:۴۰)	۰,۵-۱,۵ vol. %	۱۵	۱-۷,۳	

۱-۴-۲- رفتار رئولوژیکی نانوسیالات

ویسکوزیته دینامیک اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول خالص به ترتیب ۲۱ و ۵۷,۶ برابر بیشتر از آب مایع در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد است (جدول ۳). از آن جایی که ویسکوزیته دینامیک سیال انتقال حرارت (HTF) مستقیماً روی افت فشار تأثیر می گذارد برای کاربردهای صنعتی که نیاز به حمل و نقل سیال انتقال حرارت (HTF) است، نگرانی اصلی قدرت پمپاژ مورد نیاز برای انتقال آن است. بنابراین ویسکوزیته دینامیک مسلماً به اندازه هدایت حرارتی هنگام انتخاب نانوسیال مناسب برای یک سیستم مهندسی مشخص، بسیار مهم است.

با این حال، بیشتر مقالات منتشر شده تا به امروز عمدتاً تلاش خود را روی انتقال حرارت معطوف داشته اند. مطابق جدول ۵، کمتر داده های معتبری در مورد ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات برپایه EG- یا PG ارائه شده است. بیشتر نویسندگان هنوز از روابط کلی برای پیش بینی رفتار رئولوژیکی نانوسیالات برپایه PG-W یا EG-W مانند معادله Brinkman استفاده می کنند:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \frac{1}{(1-j)^{2.5}} \quad (9)$$

یا رابطه کسرحجمی-ویسکوزیته که رابطه براونی را به حساب می آورد:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + \mu_{int}\varphi + k_H\varphi^2 + O(\varphi^3)) \quad (10)$$

μ_{int} ویسکوزیته ذاتی است که برای ذرات کروی بدون بار مقدار آن برابر ۲,۵ می باشد (رابطه انیشتین) و k_H ضریبی برای برهم کنش های بین دو ذره ای که باهم برخورد می کنند می باشد و مقدار آن برابر ۶,۲ می باشد (مدل Batchelor). این معادله برای سوسپانسیون پایدار تا کسرحجمی ۱۵ درصد معتبر است. روابط دیگری نیز موجود است [۲۵ و ۳۲] که عمدتاً براساس مدل اخیر و با مقادیر متفاوت μ_{int} و k_H هستند. در زیربخش بعدی، تنها روابط بسط داده شده برای نانوسیالات برپایه EG-W- و PG-W- براساس داده های آزمایشگاهی ارائه خواهند شد.

جدول ۵-۲ خلاصه مطالعات موجود در زمینه ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات بر پایه EG و PG ، f-GnPs و نانوپلاکت های گرافنی عامل دار شده

Authors	Nanofluid	Nanoparticle Concentration ϕ	Particle Size (nm)	Increase in k (%)	Temperature Range (°C)
Chen et al. [۵۲]	TiO ₂ /EG	۰,۵-۸ wt%	۷۰-۱۰۰	۰,۵-۲۲,۷۵	۲۰-۶۰
Wang and Choi [۴۸]	Al ₂ O ₃ /EG	۱,۲-۳,۵ vol. %	۲۸	۸-۴۰	۲۰
Garg et al. [۶۷]	Cu/EG	۰,۰۴-۲ vol. %	۲۰۰	۴,۷-۲۳,۸	۲۵
Xie et al. [۵۷]	MgO/EG	۵ vol. %	۲۰	۱۷,۴	۱۰-۶۰
	Al ₂ O ₃ /EG	۵ vol. %	۲۰	۲۸,۲	۱۰-۶۰
	TiO ₂ /EG	۵ vol. %	۲۰	۳۱,۲	۱۰-۶۰
	ZnO/EG	۵ vol. %	۲۰	۱۲۹,۲	۱۰-۶۰
	SiO ₂ /EG	۵ vol. %	۲۰	۳۱,۵	۱۰-۶۰
Akbari et al. [۶۹]	SiO ₂ /EG	۰,۱-۳ vol. %	۲۵	۸-۱۱۶	۳۰-۵۰
Namburu et al. [۷۰]	CuO/EG-W(۶۰:۴۰)	۱-۶,۱۲ vol. %	۲۹	۱۲,۲۵-۴۵,۶	-۳۵-۵۰
Timofeeva et al. [۵۹]	SiC/EG-W(۵۰:۵۰)	۴ vol. %	۱۶-۹۰	۴۸-۱۴	۱۵-۸۵
Kulkarni et al. [۳]	CuO/PG-W(۶۰:۴۰)	۱-۵,۹ vol. %	۲۹	۱۰۰	-۳۵-۵۰
Naik et al. [۴]	CuO/PG-W(۶۰:۴۰)	۰,۰۲۵-۱,۲ vol. %	۵۰	۰,۲-۵	-۱۵-۶۰
Kumar et al. [۷۱]	ZnO/PG-W(۱۰:۹۰)	۰,۰۲-۰,۱ wt. %	۳۰	۱,۶۹-۳,۴۸	۳۰-۴۰
Afrand et al. [۷۲]	MgO/EG-W(۵۰:۵۰)	۰,۱-۱,۵ vol. %	۴۰	۲,۱۵-۵۲,۷۲	۲۵-۵۰
Vallejo et al. [۷]	f-GnPs/PG-W(۱۰:۹۰)	۰,۲۵-۰,۵ wt. %	-	۶۰-۱۱۰	۵-۵۰
			-	۴۰-۲۲۲	۵-۵۰

	f-GnPs/PG-W(۳۰:۷۰)	۰,۲۵-۱ wt. %			
--	--------------------	--------------	--	--	--

Namburu و همکاران ویسکوزیته نانوذرات SiO_2 پخش شده در مخلوط (۶۰:۴۰ جرمی) آب/اتیلن گلیکول را تحت شرایط دمایی منفی اندازه گیری کردند. نتایجشان نشان داد که μ در محدوده کسر حجمی بین ۲ تا ۱۰ درصد به طور یکنواخت از ۳۵- تا ۵۰ درجه سانتیگراد کاهش می یابد. در کسر حجمی ۶ درصد آن ها نشان دادند که قطر نانوذرات در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰ نانومتر اثر ضعیفی بر روی ویسکوزیته دینامیک مخلوط دارد. برای نانوذرات Al_2O_3 (با قطر متوسط ۵۳ نانومتر) با کسر حجمی ۱ تا ۱۰ درصد در مخلوط ۶۰:۴۰ آب/اتیلن گلیکول نتایج مشابهی به دست آمد. Akbari و همکاران نوع مشابهی از نانوذرات ($d_{np}=20-30 \text{ nm}$) را در نظر گرفتند اما در اتیلن گلیکول خالص با $\phi \leq 3 \text{ vol. \%}$ و دمای ۳۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد پراکنده کردند. اندازه گیری ها نشان داد نانوسیال SiO_2/EG رفتار نیوتونی برای تمام شرایط در نظر گرفته شده از خود نشان داد. آن ها خاطر نشان کردند که ویسکوزیته دینامیک با افزایش کسر حجمی سیلیکا افزایش یافته و با افزایش دما کاهش می یابد. از آن جایی که ویسکوزیته دینامیک تمام مایعات خالص با دما کاهش می یابد این تغییر ویسکوزیته با دما قابل انتظار می باشد. ویسکوزیته با افزایش غلظت نانوذرات SiO_2 از ۰,۱ تا ۳ درصد حجمی در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد حدود ۱۱۶ درصد افزایش می یابد. آن ها در نهایت یک رابطه جدید که کل محدوده پارامترهای عملیاتی را پوشش می دهد ارائه دادند.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = -24.81 + 3.23T^{0.008014} e^{1.838\phi^{0.002334}} - 0.0006779T^2 + 0.024\phi^3 \quad (11)$$

Chen و همکاران [۵۲] رفتار رئولوژیکی نانوذرات TiO_2 ($d_{np} = 25 \text{ nm}$) در اتیلن گلیکول خالص برای کسر جرمی ۰,۵ تا ۸ درصد وزنی را مطالعه کردند. پس از پراکنده کردن نانوذرات درون سیال پایه، لخته ها تشکیل شده و سپس یک تصفیه اولتراسونیک انجام شد. در نهایت آن ها به یک نانوسیال خیلی پایدار به مدت دو ماه با قطرانوذرات بین ۷۰ تا ۱۰۰ نانومتر دست یافتند. آن ها دریافتند که نانوسیال $\text{TiO}_2\text{-EG}$ یک رفتار نیوتونی در محدوده نرخ برش بین ۰,۵ تا 10^4 s^{-1} نشان می دهد. آن ها خاطر نشان کردند که ویسکوزیته نانوسیال وابستگی قوی به دما و غلظت نانوذرات دارد. μ یک تابع کاهشی برحسب دما در مقیاس لگاریتمی می باشد پ تابع پلینومیال درجه دو برحسب ϕ می باشد که با افزایش ϕ افزایش می یابد. به عنوان مثال ، با افزودن ۸ درصد وزنی نانوذرات، ویسکوزیته اتیلن گلیکول ۲۲,۷۵ درصد افزایش می یابد. آن ها اظهار داشتند که پدیده لخته شدن می تواند یکی از پارامترهای کلیدی باشد که عامل افزایش ویسکوزیته است. نتایج آن ها با رابطه تجربی زیر که براساس قطر لخته ها (d_{agg}) می باشد مقایسه شد:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = (1 - \frac{\phi}{0.605} (\frac{d_{agg}}{d_{np}}))^{-1.5125} \quad (12)$$

۰,۶۰۵ حد/کثر ضریب پرکن و $d_{agg}=3.34d_{np}$ می باشد.

رفتار رئولوژیکی نانوسیال $MgO-EG$ در دمای محیط توسط Xie و همکاران [۵۷] بررسی شد. اندازه گیری های آزمایشگاهی نشان داد که رابطه خطی بین تنش برشی و نرخ برش وجود دارد که رفتار نانوسیال نیوتونی را مشخص می کند. آن ها ذکر کردند که ویسکوزیته نانوسیال به سرعت با دما کاهش می یابد. باین حال، در زمان یکسان، با کسر حجمی نانوذره به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

یک بررسی تجربی از خواص رئولوژیکی نانوذرات اکسید مس معلق در مخلوط اتیلن گلیکول و آب ۶۰:۴۰ در دمای ۳۵- تا ۵۰ درجه سانتیگراد و غلظت حجمی ذرات تا ۶,۱۲ درصد توسط Namburu و همکاران انجام شده است [۷۰]. آن ها خاطرنشان کردند که سیال پایه در دمای ۴۵- درجه سانتیگراد منجمد می شود و بنابراین آخرین اندازه گیری در دمای ۳۵- درجه سانتیگراد انجام شده است. نتایج آنها نشان داد که نانوسیال برپایه CuO یک رفتار نیوتنی را در تمام شرایط آزمایشگاهی به نمایش گذاشته است. آنها مشاهده کردند که با افزایش غلظت نانوذرات، ویسکوزیته نانوسیالات افزایش یافته است. به عنوان مثال، در دمای ۳۵- درجه سانتیگراد و کسر حجمی ۶,۱۲ درصد، ویسکوزیته سیال پایه چهار برابر افزایش می یابد. آن ها همچنین خاطرنشان کردند که با افزایش دما، ویسکوزیته نانوسیالات بصورت نمایی کاهش می یابد. Timofeeva و همکاران [۵۹] تغییرات ویسکوزیته آب و مخلوط EG -آب را هنگام افزودن ۴ درصد حجمی نانوذرات SiC ، ارزیابی کردند. آن ها نشان دادند که ویسکوزیته نسبی با افزایش اندازه متوسط ذرات در هردو سوسپانسیون آب و آب EG -کاهش یافته است. با این حال، در همان کسر حجمی نانوذرات SiC ، افزایش ویسکوزیته نسبی در سیستم سوسپانسیون EG -آب نسبت به نانوسیالات برپایه آب خالص، به ویژه هنگامی که سوسپانسیون حاوی نانوذرات کوچکتر بود، کمتر بود. به عنوان مثال، برای قطر نانوذرات برابر با ۱۶ نانومتر و کسر حجمی ۴ درصد، ویسکوزیته آب و EG -آب به ترتیب ۷۵٪ و ۴۸٪ نسبت به سیال پایه افزایش یافته است. آنها تأیید کردند که پدیده مشاهده شده می تواند مربوط به تفاوت در ساختار و ضخامت لایه نفوذ سیال در اطراف نانوذرات درسیالات پایه مختلف باشد که این امر بر غلظت حجمی موثر و در نهایت ویسکوزیته سوسپانسیون تأثیر می گذارد. در مطالعه ای که توسط Xie و همکاران [۵۳] انجام شد برای نانوذرات الماس پراکنده شده در محلول ۴۵:۵۵ آب EG - در کسر حجمی نانوذرات ۰,۵ تا ۲ درصد رفتار نیوتونی گزارش شد. آنها نشان دادند که رابطه معکوس بین ویسکوزیته نانوسیالات و دما ناشی از اثر تضعیف کننده نیروهای درون ذره ای/ درون مولکولی است. نکته جالب توجه این است که این اندازه گیری های ویسکوزیته اگرچه با اندازه گیری دوپارامتر هدایت حرارتی و انتقال حرارت که عملکرد نانوسیال را تحت تاثیر قرار می دهند، همزمان نیستند، اما به یکدیگر مرتبط هستند.

Afrand و همکاران [۷۲] ویسکوزیته دینامیک نانوذرات اکسید منیزیم پراکنده در مخلوط ۵۰:۵۰ آب EG - برای ϕ تا ۳ درصد و محدوده دمایی $[25-50^{\circ}C]$ اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد که نانوسیالات با کسر حجمی کمتر از ۱,۵ درصد رفتار نیوتنی نشان دادند. ویسکوزیته دینامیک به طور خطی با ϕ افزایش یافت و با T کاهش یافت. در مقابل، نانوسیالات با کسر حجمی ۳ درصد رفتار نازک شونده برشی نشان دادند یعنی ویسکوزیته دینامیک با افزایش نرخ برش کاهش یافت. از طریق یک آنالیز حساسیت، آن ها نشان دادند که حساسیت ویسکوزیته نانوسیالات به دما در مقادیر زیاد ϕ بیشتر از

حساسیت ویسکوزیته به دما در مقادیر کم φ بود. نویسندگان بر اساس داده های تجربی خود، یک رابطه جدید برای پیش بینی ویسکوزیته نانوسیال ۵۰:۵۰ آب / EG- MgO که برای $d_{np} = 40\text{ nm}$ و $\varphi \leq 1.5\%$ معتبر است ارائه دادند.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1.0198 + 11.82\varphi^{0.7465}T^{-1.3841}e^{0.015\varphi^{0.264}T^{1.2202}} \quad (13)$$

۲-۴-۲- نانوسیالات برپایه پروپیلن- گلیکول

همانند هدایت حرارتی، ویسکوزیته های دینامیکی نانوسیالات برپایه PG در مقایسه با نانوسیالات برپایه EG، همانطور که در جدول ۵ گزارش شده است کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ویسکوزیته دینامیک مخلوط ۶۰:۴۰ پروپیلن گلیکول و آب با کسرهای حجمی مختلف از نانوذرات اکسید مس ($d_{np} = 29\text{ nm}$) در محدوده دمایی ۳۵- تا ۵۰ درجه سانتیگراد توسط Kulkarni و همکاران اندازه گیری شده است [۳]. آنها خاطرنشان کردند که با افزایش غلظت نانوذرات CuO، ویسکوزیته نانوسیال افزایش یافت و همانطور که انتظار می رود با ویسکوزیته افزایش دما کاهش یافت. به عنوان مثال، در دمای ۳۵- درجه سانتیگراد، ویسکوزیته با اضافه کردن ۱ و ۵،۹ درصد حجمی از نانوذرات مس به مخلوط آب PG- از ۰،۷۳۶ به ۳،۲۹ b t o s افزایش یافت. هنگامی که در کسر $a > 1$ درصد دما از ۳۵- تا ۵۰ درجه سانتیگراد افزایش می یابد ویسکوزیته مؤثر تقریباً ۱۰۰ برابر کاهش می یابد. تمام نانوسیالات یک رفتار نیوتنی را برای کسرحجمی ۰ تا ۵،۹ درصد در کل محدوده دمای در نظر گرفته شده نشان دادند. آن ها رابطه زیر را که تمام محدوده های در نظر گرفته شده برای تمام پارامترها را پوشش می دهد ارائه دادند:

$$\mu_{nf} = Ae^{B\varphi} \quad \ln A = 736.9e^{-0.0199T} \quad (14)$$

Naik و همکاران [۴] رفتار رئولوژیکی نانوذرات اکسید مس ($\varphi = [0.25 - 1.2 \text{ vol}\%]$) در محلول ۶۰:۴۰ PG- آب برای $T = [-15; 60]^\circ\text{C}$ بررسی کردند. آن ها همچنین از رفتار نیوتنی نانوسیالات تحت همه شرایط عملیاتی خبر دادند. آنها روند مشابهی را برای تغییرات ویسکوزیته نانوسیالات به عنوان تابعی از T و φ مانند [۳] بدست آوردند که بعداً توسط Leena و Srinivasan [۶۶] برای نانوذرات TiO_2 پراکنده شده در مخلوط ۷۰:۳۰ (درصد وزنی) آب-پروپیلن-گلیکول تأیید شد. Leena و Srinivasan [۶۶] روابطی را برای ویسکوزیته دینامیک این نانوسیالات در محدوده $\varphi = [0.1 - 0.8 \text{ vol}\%]$ ارائه دادند و در مورد مزایای بالقوه استفاده از این نانوسیالات در انتقال حرارت در شرایط جریان آرام و آشفته بحث کردند. اندازه گیری ویسکوزیته نانوذرات اکسید روی پراکنده در مخلوط ۱۰:۹۰ پروپیلن گلیکول - آب برای دماهای مختلف ($T = 30$ و ۳۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد) اخیراً توسط Kumar و همکاران انجام شد [۷۱]. آن ها اظهار داشتند که ویسکوزیته نانوسیالات با افزایش غلظت نانوذرات ZnO تا ۰،۰۴ درصد وزنی، به دلیل افزایش برهم کنش های مولکولی بین ZnO، آب و PG افزایش می یابد. پس از آن، ویسکوزیته با افزایش غلظت نانوذرات تا ۰،۰۸ درصد وزنی کاهش می یابد که ممکن است بخاطر برهم کنش های مولکولی قوی تر بین ZnO و آب و پروپیلن گلیکول و کمتر شدن برهم کنش های بین

آب و پروپیلن گلیکول باشد. با بارگذاری بیشتر نانوذرات ZnO (۰,۱ درصد وزنی) ویسکوزیته نانوسیال دوباره شروع به افزایش کرد که به علت لخته شدن نانوذرات می باشد.

Vallejo و همکاران [۷] به طور تجربی رفتار رئولوژیکی پراکندگی های مختلف نانوذرات گرافنی عامل دارشده، F-GnPs (از ۰,۲۵ تا ۱ درصد وزنی) در دو مخلوط پروپیلن گلیکول-آب (۱۰:۹۰ و ۳۰:۷۰) در محدوده دما مورد مطالعه ۵ تا ۵۰ درجه سانتیگراد مطالعه کردند. آن ها همچنین یک رفتار نیوتونی در تمام محدوده های در نظر گرفته شده برای غلظت، دما و نرخ برش را گزارش دادند. آن ها دریافتند که یک سیال پایه با ویسکوزیته کم باعث افزایش بیشتر ویسکوزیته نانوسیالات تشکیل یافته به ویژه در دماهای پایین تر می شود. ویسکوزیته دینامیک با بارگیری نانوپلاکت ها به میزان ۱ درصد وزنی F-GnPs در مخلوط ۳۰:۷۰ آب- PG در دمای ۵ درجه سانتیگراد در مقایسه با سیال پایه به میزان ۲۲۲ درصد افزایش یافت. آن ها یک رابطه جدید برای توصیف وابستگی ویسکوزیته به دما و غلظت حجمی نانوسیالات برپایه نانوپلاکت های گرافن پیشنهاد کردند:

$$\mu_{nf} = \mu \cdot e^{AT/(T-T_0)} + Be^{C/T} \varphi - D\varphi^2 \quad (15)$$

φ کسر حجمی نانوذرات است، T دما برحسب کلوین، K ، B ، C و D پارامترهای فیت شده برای این رابطه و μ ، A و T_0 پارامترهای قابل تنظیم است که از معادله Vogel-Fulcher-Tammann برای سیال پایه گرفته شده است. این رابطه برای مخلوط های آب-PG ۱۰:۹۰ درصدوزنی و ۳۰:۷۰ درصدوزنی با کسر جرمی ذرات تا ۵,۰ درصد معتبر است.

۳-۴-۲- افزایش انتقال حرارت

با توجه به افزایش مشاهده شده در هدایت حرارتی، پیش بینی می شود نانوسیالات پتانسیل انتقال حرارت بیشتری نسبت به سیالات پایه را داشته باشند که می تواند امکان توسعه تجهیزات انتقال حرارت بسیار جمع و جور و مؤثر برای بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله الکترونیک، حمل و نقل، مواد غذایی و زیست پزشکی را فراهم کند. بررسی حاضر فقط روی برنامه های کاربردی از جمله نانوسیالات برپایه اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول متمرکز است. مطالعات تجربی و عددی موجود در مقالات به طور عمده تأثیر سوسپانسیون نانوذرات بر عملکرد سیستم های خنک کننده به ویژه رادیاتورهای اتومبیل را مورد بررسی قرار داده اند.

۵-۲- نتایج تجربی

تحقیقات آزمایشگاهی درمورد انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات Al_2O_3 / EG و CuO / EG از طریق مبدل های حرارتی صفحه ای و دولوله ای تحت شرایط جریان آشفته توسط Zamzarian و همکاران انجام شد [۲۳]. نتایج یک افزایش قابل توجه در عملکرد انتقال حرارت با نانوسیالات در مقایسه با EG خالص برای هردو مبدل حرارتی در تمام شرایط عملیاتی نشان داد. به عنوان مثال در مبدل حرارتی دولوله ای افزودن ۱ درصد حجمی نانوذرات Al_2O_3 و CuO به EG انتقال حرارت مؤثر را به ترتیب حدود

۲۶ و ۳۷ درصد در مقایسه با سیال پایه افزایش داد. آن ها این افزایش را به این واقعیت نسبت دادند که حرکت آشوبناک نانوذرات می تواند باعث بهبود فرایند انتقال حرارت بین سیال و دیواره مبدل حرارتی شود. Kulkarni و همکاران [۲۲] به طور آزمایشگاهی راندمان تولید ترکیبی و انتقال حرارت مبدل حرارتی دستگاه دیزلی تولید برق (DEG) با نانوسیالات را بررسی کرد. خواص حرارتی نانوسیالات متشکل از نانوذرات اکسید آلومینیوم پراکنده در مخلوط ۵۰:۵۰ آب EG- در محدوده دمایی ۲۵ تا ۷۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت. آن ها گزارش دادند که حرارت ویژه نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات کاهش می یابد و این بدان معنی است که برای غلظت های بالاتر نانوذرات آلومینا، برای افزایش دمای نانوسیال به حرارت ورودی کمتری نیاز است. آن ها تأیید کردند که با کاهش مدت زمان لازم برای حرارت دادن، استفاده از نانوسیالات به عنوان یک ژاکت در صنعت خودرو به ویژه در مناطق قطبی بسیار سودمند خواهد بود. آن ها تأثیر نانوسیالات را بر روی راندمان تولید ارزیابی کردند که مجموع انرژی الکتریکی کاهش یافته و سرعت بازیابی گرما تقسیم بر سرعت انرژی مرتبط با ورودی سوخت به ژنراتور تعریف شده است. نتایج نشان داد که راندمان تولید ترکیبی موتور دیزل با افزایش غلظت نانوذرات Al_2O_3 ، کاهش می یابد. به عنوان مثال، با افزودن ۶ درصد حجمی از نانوذرات Al_2O_3 ، بازده تولید ترکیبی مخلوط آب - EG از ۷۹,۱ درصد به ۷۶,۱۱ درصد کاهش یافته است. آن ها همچنین تأثیر نانوذرات را بر روی راندمان مبدل حرارتی متصل به موتور دیزل بررسی کردند. آن ها مشاهده کردند که با افزایش غلظت نانوذرات راندمان مبدل حرارتی افزایش یافت که ناشی از ضریب انتقال حرارت بیشتر نانوسیال در مقایسه با سیال پایه می باشد. به عنوان مثال، پراکندن ۶ درصد حجمی نانوذرات Al_2O_3 درون مخلوط آب/EG باعث بهبود راندمان انتقال حرارت تا ۸۱,۱۱ درصد در مقایسه با سیال پایه آب/EG می باشد.

Heris و همکاران [۱۵] به طور آزمایشگاهی در مورد تأثیر استفاده از CuO در مخلوط ۵۰:۵۰ آب / EG به عنوان یک مایع خنک کننده بر عملکرد انتقال حرارت رادیاتور اتومبیل در طیف دمایی بین ۳۵ تا ۵۴ درجه سانتیگراد تحقیق کردند. نتایج یک افزایش قابل توجه در نرخ انتقال حرارت با افزودن نانوذرات CuO به سیال پایه نشان داد. آنها خاطرنشان کردند که با افزایش عدد رینولدز و نیز غلظت حجمی نانوذرات، انتقال حرارت کل افزایش یافت. بالاترین افزایش عدد Nusselt در حدود ۵۵ درصد در $\phi = 0,8\%$ در مقایسه با سیال پایه آب / EG به دست آمد. اخیراً یک آزمایش توسط Beriache و همکاران [۱۷] به منظور ارزیابی عملکرد انتقال حرارت یک سیستم رادیاتور ۱۰۰۰cc Perodua Kelisa طراحی شده است که با نانوسیالات حاوی نانولوله های کربنی چند دیواره پراکنده در مخلوط ۵۰:۵۰ آب / EG در رژیم جریان آرام کار می کند. نتایج نشان داد که عملکرد حرارتی رادیاتور اتومبیل با افزودن MWCNT به محلول آب / EG بهبود یافته است. همانطور که انتظار می رود، h یک تابع افزایشی برحسب عدد رینولدز است. ضریب انتقال حرارت به میزان ۲۶,۸٪، ۱۳۵,۳٪ و ۱۹۶,۳٪ برای $\phi = 0,1$ ، ۰,۲۵ و ۰,۵ درصد حجمی درمقایسه با سیال پایه افزایش یافت.

Peyghambarzadeh و همکاران [۱۱] آزمایش های انتقال حرارت را برای نانوسیالات جریان یافته در لوله های آلومینیومی مسطح یک رادیاتور اتومبیل تحت شرایط جریان آشفته انجام دادند. آنها عملکرد انتقال حرارت سه نوع نانوسیال مختلف برپایه آلومینا: Al_2O_3 در آب، در EG یا مخلوط آب / EG. آن ها

خاطر نشان کردند که رفتارهای انتقال حرارت این سه نانوسیال وابستگی بسیاری به غلظت ذرات و شرایط جریان و وابستگی ضعیف به دما دارد. بیشترین افزایش عدد Nusselt تا ۴۰٪ از طریق افزودن تنها ۱٪ نانوذرات Al_2O_3 در آب و اتیلن گلیکول به دست آمد. آنها اثر سه غلظت نانوسیال بر پایه آب / EG شامل ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی اتیلن گلیکول را بر روی ویژگی های انتقال حرارت ارزیابی کردند. آنها دریافتند که با افزایش غلظت EG در آب، عدد Nusselt کاهش می یابد. به عنوان مثال، در $\phi = 0.3\% \text{ vol.}$ و دمای ورودی برابر با ۴۵ درجه سانتیگراد، با افزایش غلظت EG از ۵ تا ۲۰ درصد حجمی، عدد Nusselt به طور جزئی از ۱۱۴٫۵۶ به ۱۱۰٫۵۵ کاهش می یابد. با این حال، برای هر غلظت معین از مخلوط آب / EG، سرعت انتقال حرارت با افزودن نانوذرات آلومینا افزایش یافته است. به عنوان نمونه، پراکندن ۰٫۳ درصد از نانوذرات Al_2O_3 در مخلوط ۲۰:۸۰ آب / EG در مقایسه با سیال پایه خالص، عدد Nusselt تا ۲۲٪ افزایش یافت.

عملکرد اتلاف گرمای یک رادیاتور موتورسیکلت پر شده از نانولوله های کربنی چند جداره (MWCNTs) پراکنده در مخلوط ۵۰:۵۰ آب/EG به طور آزمایشگاهی توسط Teng و Yu [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است. این آزمایشات در محدوده دما [۸۰-۹۵ درجه سانتیگراد] و نرخ جریان حجمی متغیر از L/min ۴٫۵ تا ۸٫۵ انجام شد. آنها سه نانو خنک کننده با غلظت های مختلف از MWCNT ها، یعنی ۰٫۱، ۰٫۲ و ۰٫۴ درصد وزنی تهیه کردند. آنها دریافتند که عدد Nusselt برای هر یک از این نانو خنک کننده ها به دلیل افزایش بیشتر هدایت حرارتی در مقایسه با افزایش ضریب انتقال حرارت، کمتر از آب / EG است. آنها با محاسبه نسبت ظرفیت تبادل حرارت به توان پمپاژ که ضریب راندمان تعریف شده، راندمان کلی مبدل حرارتی را ارزیابی کردند. آنها گزارش دادند که نانو خنک کننده با $\phi = 0.1$ درصد وزنی بالاترین میزان ظرفیت تبادل حرارت و ضریب راندمان در مقایسه با دو نانو خنک کننده دیگر و سیال پایه را نشان می دهد. آنها تأیید کردند که غلظت بالای MWCNT ها نمی تواند ظرفیت تبادل حرارت بهتری را تضمین کنند زیرا چگالی غیرهمگن نانو خنک کننده مقاومت حرارتی فصل مشترک جامد-مایع را افزایش می دهد، که به طور موثر باعث کاهش سطح تماس بین MWCNT و مخلوط آب / EG می شود. برای کلیه شرایط آزمایشگاهی، حداکثر افزایش نسبت تبادل گرما، قدرت پمپاژ و ضریب راندمان در مقایسه با سیال پایه به ترتیب تقریباً ۱۲٫۸٪، ۴٫۹٪ و ۱۴۰٪ بود.

عملکرد نانوسیال اتیلن گلیکول TiO_2 - و آب TiO_2 - به عنوان یک خنک کننده رادیاتور اتومبیل توسط Devireddy و همکاران [۱۸] مطالعه شد. نانوسیالات از طریق پراکندن نانوذرات مختلف TiO_2 با درصد حجمی ۰٫۱، ۰٫۳ و ۰٫۵ درون یک مخلوط ۴۰:۶۰ آب / EG آماده شدند. نانوسیالات از طریق لوله های رادیاتور با سطح مقطع بیضوی تحت شرایط جریان آشفته جریان یافتند. نتایج نشان داد که حضور نانوذرات TiO_2 به طور قابل توجهی نرخ انتقال حرارت را تا ۳۷ درصد در مقایسه با سیال پایه بهبود می بخشد. آن ها مشاهده کردند که افزایش نرخ چرخش سیال باعث بهبود عملکرد انتقال حرارت می شود درحالی که دمای ورودی سیال اثر کمی بر روی هر عملکرد انتقال حرارت هر دوسیال پایه خالص و نانوسیال

دارد. هدایت حرارتی موثر با افزایش غلظت نانوذرات افزایش یافت. با این حال آن ها خاطرنشان کردند که این افزایش تنها عامل موثر بر عملکرد انتقال حرارت کلی رادیاتور ماشین نیست. فواید پراکندگی نانوذرات Al_2O_3 در مخلوط ۵۰:۵۰ آب / EG به عنوان یک خنک کننده رادیاتور اتومبیل به طور آزمایشگاهی توسط Subhedar و همکاران در شرایط جریان آرام برای کسرهای حجمی مختلف نانوذرات تا ۰,۸ درصد و دماهای بین ۶۵ تا ۸۵ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت [۲۰]. نتایج نشان داد که عملکرد انتقال حرارت رادیاتور با استفاده از نانوسیالات در مقایسه با سیال پایه افزایش یافته است. آنها خاطرنشان کردند که با افزایش غلظت نانوذرات، سرعت انتقال حرارت افزایش یافت. به عنوان مثال، در یک سرعت جریان معین، هنگامی که کسر حجمی Al_2O_3 از ۰,۲ تا ۰,۸ درصد حجمی افزایش می یابد عدد *Nusselt* از ۳,۸۹ تا ۲۸,۴۷ درصد افزایش می یابد. آنها اظهار داشتند که استفاده از نانوسیال باعث می شود طراحی رادیاتورهای جمع و جور یا فشرده در اتومبیل ها که می توانند وزن سیستم را کاهش دهند، نیروی درگ را کم کنند و به همین ترتیب ، باعث صرفه جویی در مصرف سوخت می شوند امکان پذیر شود.

Salamon و همکاران [۱۹] به طور آزمایشگاهی ویژگی های انتقال حرارت رادیاتور اتومبیل را با استفاده از نانوسیال TiO_2 برپایه آب / PG به عنوان یک خنک کننده تجزیه و تحلیل کردند. نانوسیالات با پراکندن ۰,۱ و ۰,۳ درصد حجمی از نانوذرات TiO_2 به مخلوط ۳۰:۷۰ آب / PG تحت دماهای عملیاتی مختلف در محدوده [۵۰-۸۰] درجه سانتیگراد آماده شدند. آنها مشاهده کردند که با افزایش دمای ورودی و سرعت جریان، عدد *Nusselt* افزایش می یابد. آنها گزارش دادند که در دمای کم خنک کننده ورودی، سرعت انتقال حرارت مخلوط آب / PG بیشتر از سرعت انتقال حرارت نانوسیال بود. با این حال، در سرعت جریان بیشتر و دمای عملیاتی بیشتر ، نانوسیالات عملکرد انتقال حرارت بهتری را نشان دادند. به عنوان مثال ، اضافه کردن ۰,۳ درصد حجمی از نانوذرات TiO_2 به مخلوط آب / EG، عدد *Nusselt* را در مقایسه با سیال پایه در $T = 80^\circ C$ تا ۸,۵ درصد افزایش داد. سرانجام، آنها از نتایج خود نتیجه گرفتند که خنک کننده های نانوسیالی برای موتورهای سنگین مناسب هستند. این مطالعه تجربی متأسفانه یکی از معدود مطالعاتی بود که از پروپیلن گلیکول در یک کاربرد واقع بینانه استفاده می کرد.

۲-۶- شبیه سازی های عددی

هدف از بخش حاضر گزارش در مورد مهمترین نتایج عددی در رابطه با عملکرد حرارتی و هیدرولیکی نانوسیالات برپایه EG و PG در پیکربندی های واقع بینانه است. خواننده علاقمند می تواند برای توضیحات مفصل در مورد روشهای عددی که در حال حاضر برای مدل سازی ماهیت چندفازی نانوسیالات استفاده می شود ، به مطالعه مروری Bahiraei [۷۴] مراجعه کند.

جریان متلاطم یا آشفته و انتقال حرارت سه نانوسیال مختلف : Al_2O_3 ، CuO و SiO_2 برپایه مخلوط ۴۰:۶۰ (جرمی) آب / EG، که از طریق یک لوله دایره ای در شرایط شار حرارتی ثابت جریان می یابد، به طور عددی توسط Namburu و همکاران بررسی شده است [۷۳]. ضریب انتقال حرارت h با افزایش غلظت نانوذرات و عدد رینولدز افزایش یافته است. به عنوان نمونه ، در $Re = 20000$ ، عدد *Nusselt* با اضافه کردن ۶ درصد حجمی از نانوذرات CuO در مقایسه با سیال پایه در حدود ۱,۳۵ برابر افزایش یافت. در

شرایط عملیاتی مشابه، نانوسیال CuO عملکرد انتقال حرارت بیشتری نسبت به نانوسیالات برپایه Al_2O_3 و SiO_2 به نمایش گذاشت.

عملکرد واحدهای گرمایشی لوله ای پره دار با نانوسیالات درمقایسه با سیال انتقال حرارت رایج که متشکل از ۶۰٪ اتیلن گلیکول و ۴۰٪ آب است توسط *Strandberg and Das* [۷۴] مقایسه شده است. نانوذرات Al_2O_3 و CuO در مخلوط ۶۰:۴۰ آب/EG در غلظت های مختلف از ۱ تا ۴ درصد حجمی پراکنده شدند. شرایط سیال ورودی همان شرایط سیال سیستم های گرمایشی در مناطق قطب شمال بود. نتایج نشان داد که با استفاده از نانوسیالات به عنوان واسطه انتقال حرارت، عملکرد حرارتی لوله های پره دار افزایش یافته است. به عنوان مثال، با افزودن ۴ درصد حجمی از نانوذرات Al_2O_3 و CuO به مخلوط آب-EG، مدل آنها افزایش عملکرد حرارتی لوله فین دار را به ترتیب ۱۱،۶٪ و ۸،۷٪ پیش بینی کرد. آنها هم چنین خاطرنشان کردند که توان پمپاژ مورد نیاز برای یک خروجی گرمایش معین و هندسه لوله پره دار معین با استفاده از نانوسیال آب/EG - Al_2O_3 و نانوسیال آب/EG - CuO در مقایسه با سیال پایه کاهش می یابد. برای همه این سیالات، لوله پره دار با کسر حجمی ۴ درصد از نانوذرات Al_2O_3 در مخلوط EG-آب کمترین قدرت پمپاژ مایع را ارائه می دهد.

Leong و همکاران [۱۰] در مورد افزایش انتقال حرارت در رادیاتور اتومبیل که با نانوسیالات برپایه مس / EG کار می کند، تحقیق کردند. تجزیه و تحلیل آنها نشان داد که چنین نانوسیالی نرخ انتقال حرارت کلی در سیستم خنک کننده موتور را افزایش می دهد. آن ها خاطرنشان کردند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ضریب انتقال حرارت h افزایش یافت. در $\text{Re} = 5000$ ، با افزودن ۲ درصد از نانوذرات مس به EG، میزان انتقال حرارت تقریباً ۴ درصد افزایش یافته و مساحت ناحیه جلوی رادیاتور که در تماس با هوا قرار دارد تقریباً ۱۹ درصد کاهش می یابد. با این حال، برای همان سرعت جریان، ۱۳،۱۲ درصد افزایش در قدرت پمپ گزارش شده است. یک جریان آرام سه بعدی و انتقال حرارت مرتبط با آن، برای دو نانوسیال مختلف، که از نانوذرات Al_2O_3 یا CuO پراکنده در یک مخلوط ۶۰:۴۰ آب/EG تشکیل شده است توسط *Vajjha* و همکاران [۹] به شکل عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در اعداد رینولدز مختلف، ضریب انتقال حرارت، ضریب اصطکاک و افت فشار با افزایش غلظت حجمی نانوذرات افزایش یافته است. با این وجود، آنها خاطرنشان کردند که به دلیل کاهش جریان حجمی مورد نیاز برای همین میزان انتقال حرارت، از پمپاژ مورد نیاز کاسته می شود. به عنوان نمونه، برای مقدار یکسان انتقال حرارت، میزان توان پمپاژ مورد نیاز برای نانوسیال Al_2O_3 در کسر حجمی ۱۰ درصد، ۸۲ درصد کمتر و برای نانوسیالات CuO در کسر حجمی ۶ درصد ۷۷ درصد کمتر از سیال پایه بود. آنها روابط جدیدی برای عدد ناسلت برای هر دو ناحیه ورودی و ناحیه کاملاً توسعه یافته پیشنهاد کردند. *Tijani* و *Sudirman* [۲۱] به صورت عددی عملکرد حرارتی رادیاتور اتومبیل پر شده از نانوذرات آلومینا و اکسید مس را که به طور جداگانه در مخلوط ۵۰:۵۰ آب/EG پراکنده شده بودند، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که عملکرد انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات به عنوان خنک کننده در مقایسه با خنک کننده معمولی بسیار افزایش یافته است. با افزودن ۰،۳ درصد حجمی نانوذرات Al_2O_3 و CuO به محلول آب/EG، هدایت حرارتی تقریباً دو برابر افزایشی یافت. آن ها دریافتند که نانوسیال برپایه اکسید مس دارای عملکرد انتقال حرارت بالاتر در

مقایسه با عملکرد انتقال حرارت نانوسیال برپایه Al_2O_3 است. به عنوان مثال، در کسر حجمی ۳، ۰ درصد و سرعت جریان حجمی $6L/min$ عدد *Nusselt* برای نانوسیال برپایه Al_2O_3 و CuO در مقایسه با محلول پایه آب $EG/$ به ترتیب ۵،۴٪ و ۲۷٪ افزایش یافته است. مقالات مروری نشان می دهد که مطالعات عددی برای پیکربندی های واقعی با استفاده از نانوسیالات بر پایه پروپیلن گلیکول هنوز وجود ندارند.

۷-۲- چشم اندازهای تحقیق

با توجه به بحث بالا، نانوسیالات می توانند به عنوان کلوئیدهای عامل دار شده با الزامات خاص مانند بارگذاری کم ذرات برای جلوگیری از لخته شدن، ته نشین شدن و کلوخه شدن خطوط انتقال، رفتار رئولوژیکی مطلوب برای کم کردن توان پمپاژ موردنیاز جهت انتقال نانوسیال و البته عملکرد حرارتی بالا برای ذخیره انرژی حرارتی و نیز انتقال حرارت مورد استفاده قرار بگیرند. با این حال، مشخصه یابی خواص ترموفیزیکی و عملکرد نانوسیالات خنک کننده، به ویژه در رژیم دمایی زیر صفر، هنوز هم همچنان بسیار محدود باقی مانده و تنها کارهای اندکی درخصوص این موضوع برای کاربردهای برودتی انجام شده است. در مقابل، تحقیقات بیشتری در مورد دماهای بالا به ویژه برای افزایش سرعت انتقال حرارت در رادیاتورهای اتومبیل منتشر شده است.

هنوز باید تحقیقات بیشتری در مورد سنتز نانوسیالات، پایداری و سازگاری با دیگر مواد سیستم های حرارتی انجام شود. برای کاربردهای تجاری یا صنعتی، تهیه و پایداری نانوسیالات برپایه اتیلن یا پروپیلن گلیکول باید با دقت بیشتری مورد توجه قرار گیرد. برای پیشبرد تجاری سازی بالقوه نانوسیالات، آماده سازی آنها باید تا حد امکان با محدود کردن کنترل pH، استفاده از مواد فعال سطحی (سورفکتانت ها) و مرحله فراصوت ساده باشد. یک مطالعه مشابه از Bouguerra و همکاران [۷۶] برای نانوسیالات برپایه آب Al_2O_3 انجام شده که اثر موافعال سطحی بر روی پایداری بلندمدت نانوسیالات را بررسی کرده اند.

تحقیقات آزمایشگاهی بیشتر در مورد هدایت حرارتی مؤثر، ظرفیت حرارتی، چگالی و ویسکوزیته دینامیک نیز برای درک بهتر انتقال حرارت و ویژگیهای انتقال نانوسیالات در طیف وسیع تری از دماهای کم (۵۰- تا ۰ درجه سانتیگراد) مورد نیاز است. تکنیک های مناسب اندازه گیری به ویژه تکنیک سیم داغ برای هدایت حرارتی و رئومتر تنش کنترل شده برای ویسکوزیته دینامیک، باید بر دستگاه $KD2pro$ و اندازه گیری افت فشار/ جریان ترجیح داده شود تا داده های تجربی قابل اطمینان تری حاصل شود. این داده ها می توانند از این پس به عنوان داده های مرجع جهت بسط روابط و ایجاد روابط کاربردی در مدل های عددی آینده مورد استفاده قرار گیرند. هنگامی که دما تغییر می کند باید به پدیده پسماند (hysteresis phenomenon) نیز توجه ویژه ای داشت. این پدیده توسط Bouguerra [۷۷] از طریق اندازه گیری همزمان ویسکوزیته

دینامیک و هدایت حرارتی برای نانوسیالات برپایه آب / Al_2O_3 ، حتی در غلظت های پایین مشاهده شده است. این پدیده اگرچه ممکن است تأثیر زیادی بر ظرفیت پمپاژ یک سیستم معین داشته باشد، در عین حال اطلاعات مفیدی را در مورد رژیم پراکندگی و پایداری سوسپانسیون در اختیار شما قرار می دهد.

برای اعتبارسنجی مدل های عددی، اندازه گیری های بیشتری نیز در خصوص هندسه های کانونی نسبت به هندسه های پیچیده شامل لوله ها و کانال ها همراه یا بدون پروموتور اغتشاش مورد نیاز است. اندازه گیری دمای موضعی، سرعت و غلظت به طور خاص برای مقایسه دقیق مورد نیاز است. هر سیستم نیز در طول عمر مفید خود باید با تعیین میزان کاهش عملکرد نانوسیال در طی صدها چرخه گرمایشی/سرمایشی مورد بررسی قرار بگیرد. این امر بینش بهتری در خصوص پایداری بلندمدت نانوسیالات خنک کننده در سیستم های واقعی به ما می دهد.

عملکرد جریان های نانوسیالی دشوار است و مقایسه بین دو نانوسیال به ندرت در مورد معیارهای عینی مورد بحث قرار می گیرد، زیرا خصوصیات آن ها به پارامترهای زیادی مانند اندازه ، نوع و غلظت نانوذرات، هندسه سیستم و پارامترهای عملیاتی (سرعت جریان ، دما ، فشار) بستگی دارد. از معیارهای مهم تر باید به شکل سیستماتیک تر استفاده شود، کاری که Sekrani و همکاران برای نانوسیالات برپایه آب / Al_2O_3 ته درون لوله [۴۴] و جریان آرام درون کانال [۷۸] انجام دادند. معیارهای متداول شامل موارد زیر است:

- نسبت C_μ/C_K توسط Prasher و همکاران [۷۹] معرفی شده که هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات را کنار هم می آورد.

- عدد Mouromtseff ، $Mo = \rho^a k^b C_p^c / \mu^d$ که چهار خاصیت ترموفیزیکی را کنار هم می آورد. توان های a ، b ، c و d متناسب با نوع انتقال حرارت موردنظر مقادیر مناسبی را به خود اختصاص می دهند این رابطه توسط [۸۰] Simons پیش نهاد داده شده است.

- معیار ارزیابی عملکرد $PEC = \dot{m} C_{p_{nf}} \delta T / (\dot{V} \delta P)$ معرفی شده توسط Ferrouillat و همکاران [۸۱] که براساس نسبت حرارت منتقل شده به پمپاژ مورد نیاز است. \dot{m} ، δT و \dot{V} به ترتیب سرعت جرمی جریان ، اختلاف دما ، سرعت حجمی جریان و افت فشار هستند.

- بازده کلی $\eta = Nu_{nf} \delta P_{bf} / Nu_{bf} \delta P_{nf}$ که Nu عدد Nusselt را نشان می دهد.

- راندمان نانوسیالات براساس قوانین اول و دوم ترمودینامیک می تواند با در نظر گرفتن پارامتر عملکرد PE پیشنهاد شده توسط Siavashi و Jamali [۸۲] باشد:

$$PE = Nu_{nf} Ns_{bf} / Nu_{bf} Ns_{nf} , Ns \text{ تولید آنتروپی بدون بعد است.}$$

شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) ابزاری ارزشمند برای پیش بینی هر دو خواص ترموفیزیکی نانوسیالات و عملکرد حرارتی آنها در کاربردهای صنعتی است. علاوه بر این، شبکه های عصبی مصنوعی می توانند برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی یا عددی به دست آمده از طریق روش های مختلف و سپس تحلیل تغییرپذیری زیاد نتایج منتشر شده مورد استفاده قرار گیرند. شبکه های عصبی مصنوعی در ترکیب با الگوریتم های چندهدفه مانند ژنتیک، می توانند برای یافتن طراحی بهینه سیستم های حرارتی شامل نانوسیالاتی که عملکرد آن ها به تعداد زیادی از پارامترهای هندسی و عملیاتی وابسته است مورد استفاده قرار گیرند. مدل

های ANN به طور گسترده ای برای نانوسیالات برپایه آب کاربرد دارند، اما برای نانوسیالات برپایه اتیلن یا پروپیلن گلایکول کمتر استفاده می شوند. علت این امر را می توان ناشی از کمبود داده های آزمایشگاهی معتبر که برای آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی مدل های شبکه های عصبی استفاده می شوند، دانست. برای نانوسیالات برپایه اتیلن گلایکول می توان فقط به کارهای Esfe و همکارانش [۸۳] مراجعه کرد. آن ها هدایت حرارتی سوسپانسیون حاوی نانوذرات SWCNT-Al₂O₃ و هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیک سوسپانسیون حاوی نانوذرات Al₂O₃ [۸۴] را مطالعه کردند. باید مطالعات مشابه این مطالعه به انواع دیگر نانوسیالات تعمیم داده شود تا خصوصیات حرارتی آن ها و همچنین عملکرد آنها در کاربردهای واقعی پیش بینی شود.

درنهایت، به دلیل عدم وجود مطالعات در مورد لخته شدن، ته نشین شدن و پدیده فرسایش نانوذرات در طی چرخه های گرمایشی/سرمایشی در دماهای پایین (۰ درجه سانتیگراد) استفاده از نانوسیالات در کاربردهای صنعتی هنوز هم جای سوال دارد و قطعاً مانع تجاری سازی آن ها می شود. برای پر کردن این شکاف باید تلاش های جدی صورت گیرد و سپس از نتایج حاصل شده در جهت توسعه بیشتر سیستم های حرارتی کارآمد که با خواص حرارتی بهبودیافته نانو خنک کننده ها کار می کنند استفاده شود.

فصل ۳

تجهيزات آزمایشگاهی

۱-۳- یک نانو سیال

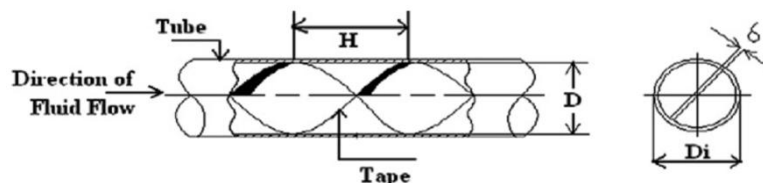
به منظور ارزیابی مورفولوژی نانو ذرات سنتز شده از آنالیز SEM استفاده گردیده شد. شکل (۱-۳) نشان دهنده SEM نانو ذرات خالص و نانو کامپوزیت سنتز شده می باشد. برای آلومینا بررسی SEM نشان می دهد که نمونه از ذرات شفاف در اندازه های کوچک تشکیل شده است.



شکل (۱-۳) تصویر SEM نانوذرات آلومینا

۲-۳- آشفته سازهای جریان

به جرات می توان گفت که نوار های مارپیچی شکل بیشترین کاربرد را در میان آشفته ساز ها دارند. دلیل این امر کاربرد آسان و کارایی بالای چنین آشفته ساز هایی می باشد. شماتیک این نوع افزاینده های انتقال حرارت در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲) شماتیک آشفته ساز نوار مارپیچی [۱]

مهمترین پارامتری که در نوار های مارپیچی برای افزایش انتقال حرارت مطرح می باشد نسبت گام ها^۱ می باشد. نسبت گام به صورت زیر تعریف می گردد:

که در آن y طول گام و w ارتفاع گام می باشد. در این تحقیق بر روی کاربرد همزمان نانو سیال آلومینا و نوار مارپیچی انجام دادیم دریافتیم که این روش میزان انتقال حرارت را تا بیش از ۳۰,۹۶٪ افزایش می دهد. و با استفاده از داده های آزمایشگاهی مدلی را برای پیش بینی رفتار نانو سیال در حضور آشفته ساز ارائه شد. این مدل به صورت زیر می باشد:

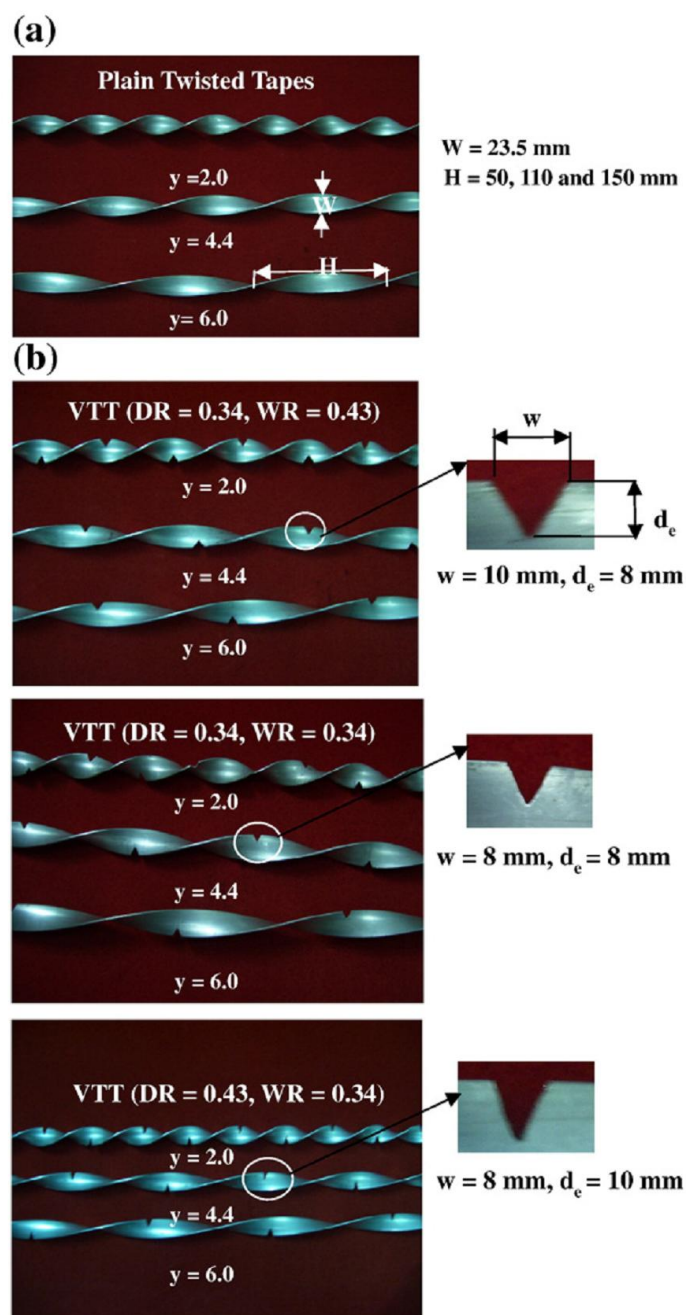
همانطور که از مدل ارائه شده پیداست افزایش نسبت گام سبب کاهش میزان انتقال حرارت می گردد. یکی از دلایل عمده ای که نوار های مارپیچی را قادر به افزایش انتقال حرارت می کند به تاخیر افتادن پیدایش لایه مرزی می باشد. هر چه قدر که نسبت گام کمتر باشد میزان آشفتگی سیال افزایش خواهد یافت که این امر به نوبه خود سبب به تاخیر افتادن تشکیل لایه مرزی شده و افزایش انتقال حرارت را شیب خواهد شد.

همچنین در این تحقیق که به بررسی عملکرد نانو سیال آلومینیوم در کنار نوار های مارپیچی ت صورت گرفت نتایج نشان داد که استفاده از نانو سیال به تنهایی قادر به افزایش انتقال حرارت به میزان ۳۰٪ می باشد این در حالی است که در استفاده همزمان از نوار مارپیچی و نانو سیال این میزان تا بیش از ۱۲۰٪ افزایش می یابد.

همچنین با ایجاد تغییراتی در نوع نوار های مارپیچی سعی کردند تا کارایی این تکنیک را افزایش دهند. بدین منظور وی و همکارانش بریدگی های V - شکل برو روی گام های نوار ایجاد نمودند. نوع نوار های

^۱ Twist Ratio

مارپیچی که آنها استفاده نمودند در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. ویژگی های تکنیکالی این نوع نوارهای مارپیچ در جدول (۳-۱) نشان داده شده است.



شکل (۳-۳) نوارهای مارپیچی بکار رفته در تحقیق

جدول (۳-۱) ویژگی های فنی نوار های مارپیچی بکار رفته در تحقیق

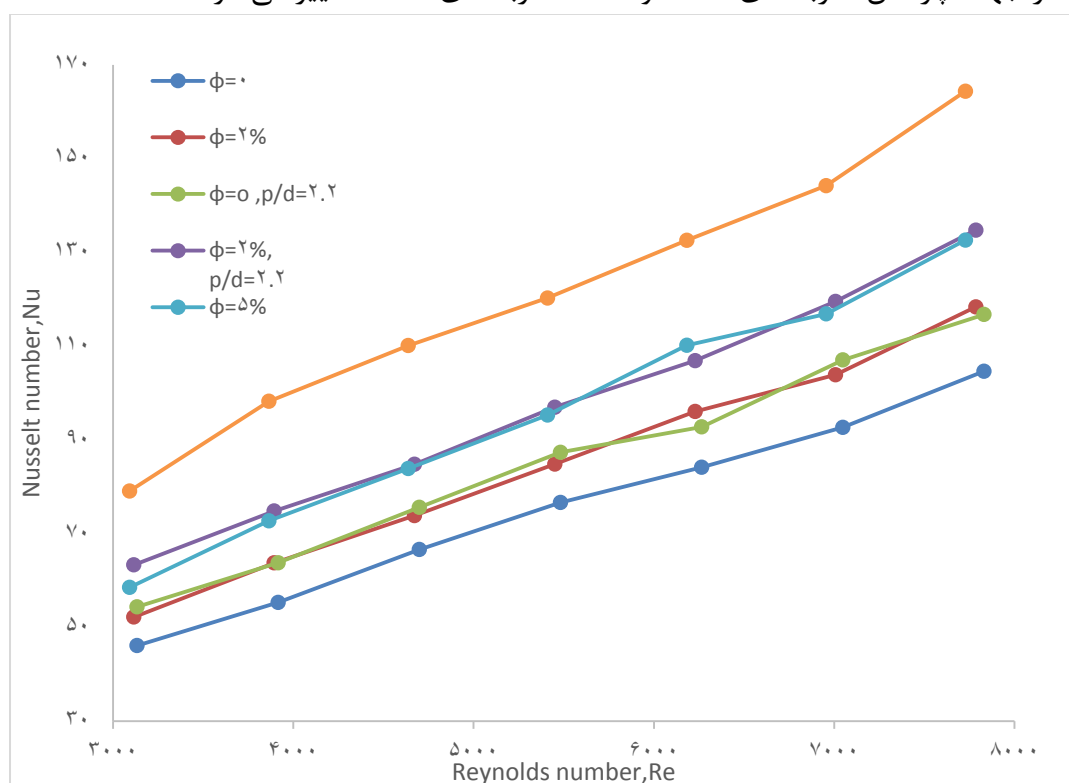
(A) Experimental set-up	
(a) Inner tube inner diameter(di)	۲۵,۰ mm
(b) Outer tube inner diameter(do)	۵۴,۵ mm
(c) Test tube length	۲۰۰۰ mm
(d) Material of inner tube	Copper
(e) Material of outer tube	Galvanized iron
(f) Insulation material	Asbestos rope and glass wool
(g) Temperature measurements	RTD Pt ۱۰۰ type (±۰,۱ °C accuracy)
(h) Flow measurements	Rotameter, ۰-۲۰ l min ^{-۱} (±۰,۱ L min ^{-۱} accuracy)
(i) Pressure measurement	U-tube manometer
(j) Monomeric fluid	Dibutyl phthalate, carbon tetra chloride
(k) Heater capacity	۳ kw
(B) Twisted tape	
(a) Material	Aluminum
(b) Tape width(w)	۲۳,۵ mm
(c) Tape thickness	۱,۵ mm
(d) Tape pitch length(H. ۱۸. °)	۵۰,۱۱۰ and ۱۵۰ mm
(e) Twist ratio (y=H/di)	۲,۰, ۴,۴ and ۶,۰
(f) Width of V cut (w)	۸ and ۱۰ mm
(g) depth of V cut (de)	۸ and ۱۰ mm
(h) Depth ratio (DR)(de/W)	۰,۳۴ and ۰,۴۳
(i) width ratio (WR)(w/W)	۰,۳۴ and ۰,۴۳
(j) Configuration used	(i) DR=۰,۳۴ and WR=۰,۴۳ (ii) DR=۰,۳۴ and WR=۰,۳۴ (iii) DR=۰,۴۳ and WR=۰,۳۴

شکل (۳-۴) نشان دهنده نتایج تحقیقات می باشد. همانطور که از شکل پیداست، تغییرات ایجاد شده بر روی نوار های مارپیچی سبب افزایش کارایی سیستم گردیده است. آنها به منظور دقیق تر نشان دادن این اثر، مدل تجربی به صورت را ارائه کردند:

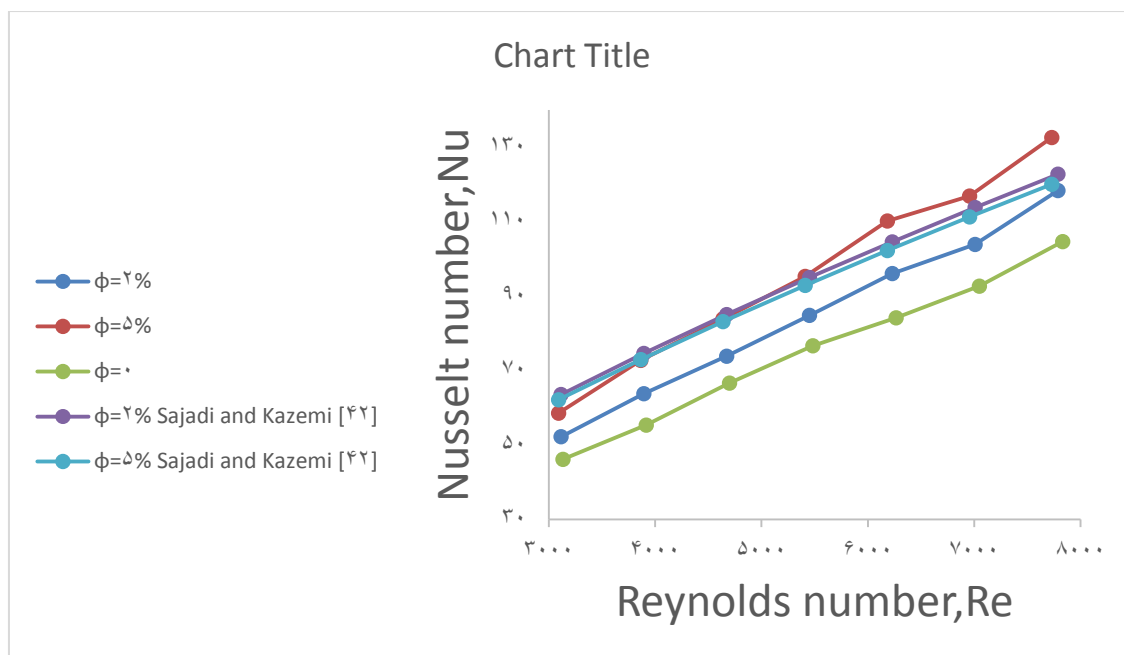
$$Nu = 0.0269 Re^{0.853} Pr^{0.33} y^{-0.222} \left(1 + \left[\frac{d_e}{W}\right]\right)^{1.148} \left(1 + \left[\frac{w}{W}\right]\right)^{-0.751} \quad (3-1)$$

آنالیز نتایج نشان داد که مدل ارائه شده با خطای ۶٪ قادر به پیش بینی رفتار نوار مارپیچی تغییر داده شده می باشد. شکل (۳-۵)

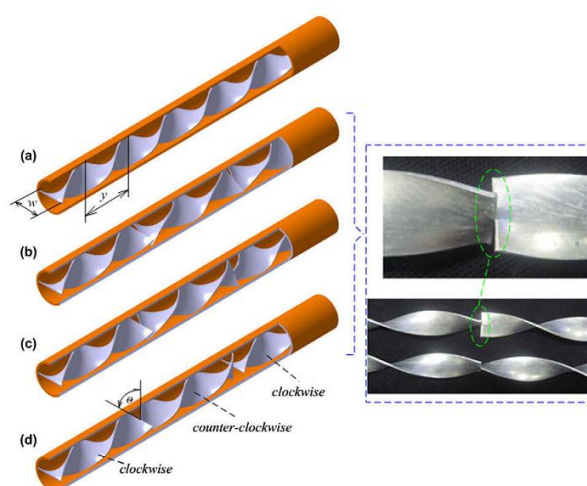
همچنین از نوار مارپیچی شکل که جهت گام ها در طول نوار متغیر می بود برای افزایش انتقال حرارت استفاده شد. شماتیک نوار مارپیچی استفاده شده در شکل (۳-۶)، تجهیزات آزمایشگاهی در شکل (۳-۷) و نتایج تحقیقات در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. نوار مارپیچی تهیه شده از جنس آلومینیوم بوده که دارای ضخامت ۱ میلی متر، ارتفاع ۱۸ میلی متر و طول ۱۰۰۰ میلی متر می باشد. گام نوار به صورتی متناوب در جهت چرخش عقربه های ساعت و خلاف عقربه های ساعت تغییر می کرد.



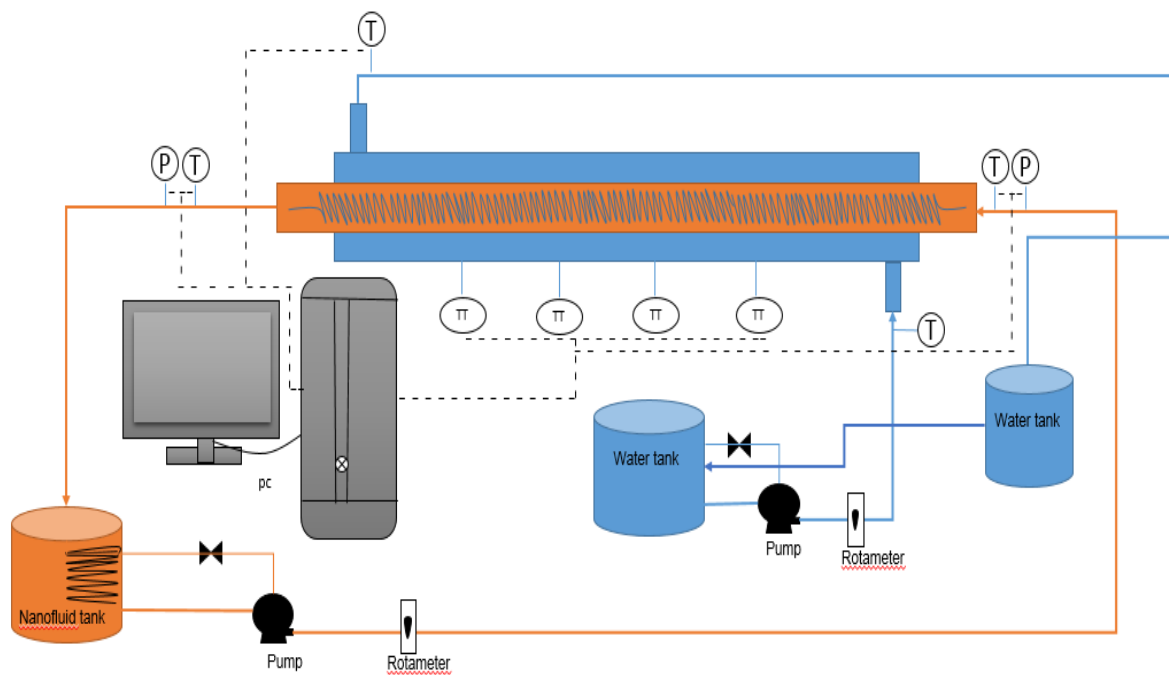
شکل (۳-۴) تاثیر تغییر ایجاد شده در نوار های مارپیچی بر روی انتقال حرارت



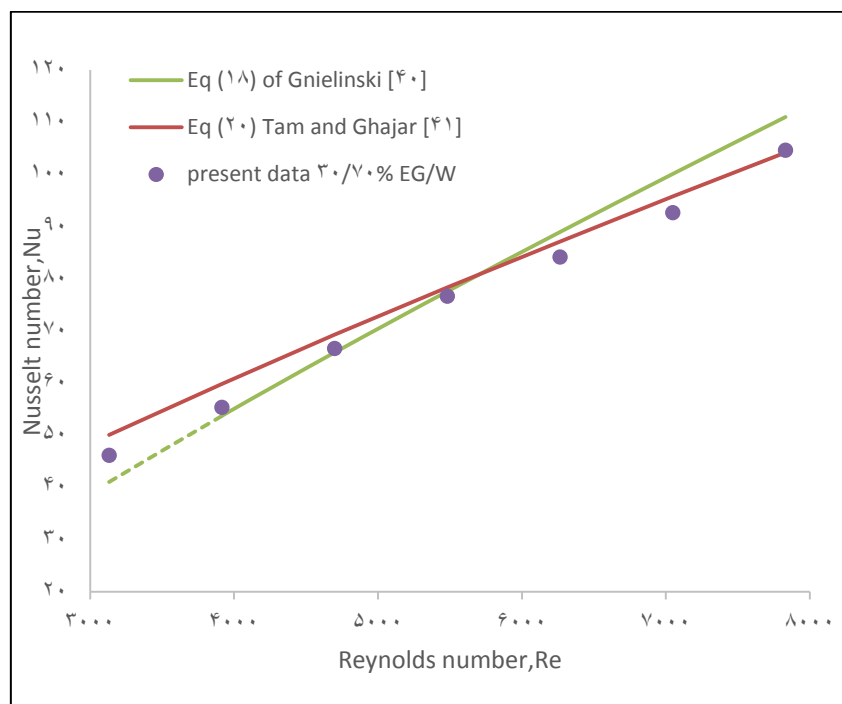
شکل (۳-۵) ارزیابی مدل ارائه شده با استفاده از داده های آزمایشگاهی

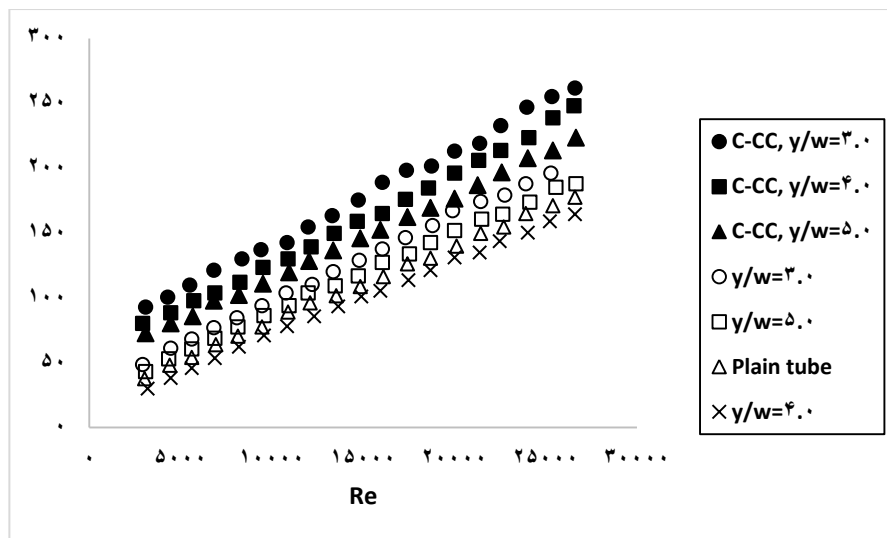


شکل (۳-۶) نوار های مارپیچی تغییر داده شده (a) نوار معمولی (b) نوار با زاویه ۳۰ درجه (c) ۶۰ درجه و (d) ۹۰ درجه و چرخش



شکل (۳-۷) دستگاه آزمایشگاهی





شکل (۸-۳) نتایج تحقیقات

نتایج نشان داد که استفاده از این نوع نوار مارپیچی می تواند تا بیش از ۹۰٪ سبب بهبود انتقال حرارت گردد.

همانطور که در ابتدای فصل نیز ذکر گردید استفاده از کویل های سیمی نیز در کنار نوار های مارپیچی از کاربرد فراوانی برخوردار می باشد. کویل های سیمی به دلیل دارا بودن شرایط زیر از مزیت های بیشتری نسبت به سایر روش ها برخوردار می باشند:

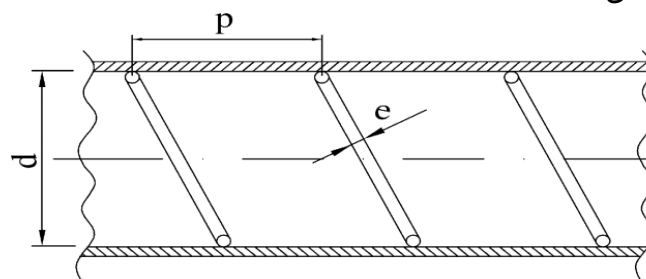
نصب آسان

فرایند آسان ساخت و کم هزینه

محافظت از تجهیزات مبدل لوله ای در مقابل تنش های مکانیکی

جلوگیری از رسوب گرفتگی در مبدل

در این تحقیق بر روی مبدل دارای کویل های سیمی شکل (۳-۹) انجام داده شد و مشخص گردید که استفاده از این کویل های می تواند تا بیش از ۱۰۰٪ میزان انتقال حرارت را افزایش دهد. آن ها در تحقیق خود از چهار نوع کویل با طول و قطر متفاوت بهره گرفتند. مشخصات چهار نوع کویل بکارگرفته شده در جدول (۳-۲) نشان داده شده است.



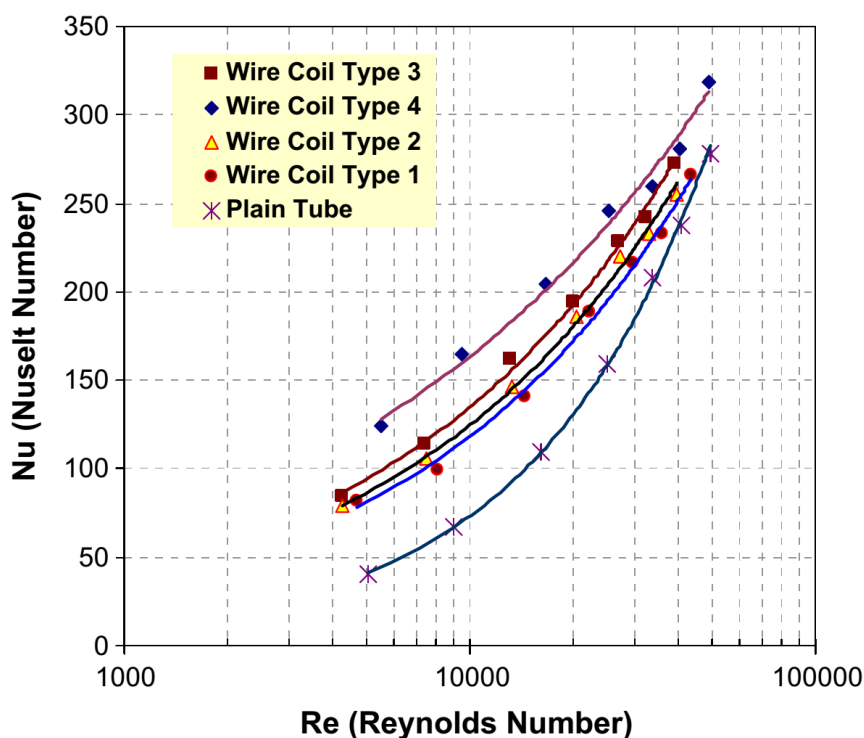
شکل (۳-۹) کویل های به کار رفته در تحقیق جعفری و همکارانش [۹]

Wire coil#	d [mm]	d_{insert} [mm]	d_h [mm]	p [mm]	e [mm]	p/d_h [-]	e/d_h [-]
Smooth tube	16	–	16	–	–	–	–
Type 1	16	13.8	14.07	2.2	0.38	0.1564	0.0270
Type 2	16	13.8	12.91	3.4	0.9	0.2634	0.0697
Type 3	16	13.8	12.71	4.5	1.2	0.3541	0.0944
Type 4	16	16	15.75	4.5	1.2	0.2857	0.0762

جدول (۲-۳) مشخصات کویل [۹]

میزان افزایش انتقال حرارت در سیستم ارائه شده در شکل (۳-۱۰) قابل مشاهده می باشد. همانطور که از نمودار مشخص است افزایش نسبت ضخامت به قطر هیدرولیکی سبب افزایش میزان آشفته‌گی جریان و در نتیجه افزایش بیشتر انتقال حرارت نسبت به مبدل عاری از کویل سیمی می گردد. البته باید در نظر گرفت که این میزان افزایش انتقال حرارت بر روی افزایش اصطکاک نیز تاثیر گذار است و باید در این بین صرف اقتصادی و تکنولوژی با یکدیگر ارزیابی گردند تا بتوان بهترین و بهینه ترین مورد را انتخاب کرد. به منظور ارزیابی سیستم با استفاده از داده های آزمایشگاهی مدل تجربی زیر ارائه گردید:

$$Nu = 1.2877 Re^{0.4515} Pr^{0.6876} \left(\frac{p}{d_h}\right)^{-0.2565} \left(\frac{e}{d_h}\right)^{0.2865}$$



شکل (۳-۱۰) تاثیر کویل های سیمی بر روی انتقال حرارت

آنچه در این فصل سعی نمودیم به طور اختصار بررسی نماییم بررسی استفاده از آسفته ساز های جریان در کنار استفاده از نانو سیالات برای افزایش انتقال حرارت بود..

فصل ۴

مدلسازی نتایج

۴-۱- شبکه های عصبی

از شبکه عصبی پیش رو برای مدل سازی کارایی در مبدل حرارتی دولوله ای حاوی نانوسیال و آشفته ساز اصلاح شده استفاده خواهد شد. پارامترهای عدد رینولدز نانو سیال، غلظت نانو سیال، گام نوار مارپیچی و نسبت تصاعد گام نوار مارپیچی به عنوان داده های ورودی و بازدهی به عنوان پارامتر هدف انتخاب گردیدند. منظور از پارامتر هدف پارامتری است که ما در پی پیش بینی آن برای سیستم می باشیم. برای انتخاب پارامترهای قابل تنظیم و در نتیجه تعیین بهترین ساختار شبکه عصبی، تعداد زیادی شبکه عصبی با ساختار مختلف طراحی و ارزیابی گردید. این شبکه های عصبی با تغییر پارامترهای قابل تنظیم، (شامل نوع شبکه، تابع انتقال، قانون یادگیری، مقدار مومنتم، تعداد لایه میانی، تعداد نرونهای لایه میانی، تعداد الگوها و متغیرهای ورودی)، ساخته و اجرا شدند. دقت این شبکه ها به وسیله معیارهای آماری محاسبه شده در مرحله آزمون، بررسی گردید. و در نهایت شبکه های که نزدیکترین نتیجه را با واقعیت داشت به عنوان شبکه اصلی انتخاب شد. از آنجا که انتخاب هر یک از پارامترهای متغیر شبکه عصبی مستلزم آزمون و خطاهای مکرر و در نتیجه آموزش تعداد زیادی شبکه با ساختار مختلف بود، در ادامه از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه یابی تعدادی از این پارامترها استفاده شد. بدین وسیله کارایی این روش در بهینه سازی شبکه عصبی، در زمینه برآورد بازدهی، بررسی گردید.

۴-۲- انتخاب نوع شبکه

برای انتخاب نوع شبکه چند لایه ای از ساختارهای پرسپترون و شعاعی استفاده گردیده شد. در مطالعه ی حاضر برای آموزش ی شبکه RBF به نحوی که از قابلیت تعمیم دهی مناسبی برخوردار باشد، ابتدا مقداری به عنوان خطای هدف به صورت مجموع مربعات خطا در نظر گرفته شد، سپس مقادیر گستره و تعداد توابع انتقال با آزمون و خطا به گونه ای انتخاب شد که میانگین مربعات خطا (MSE) در مجموعه آموزش و صحت سنجی کمینه گردد. با توجه به جدول زیر ساختار شبکه پرسپترون نسبت به شعاعی از دقت بالاتری برخوردار می باشد.

نوع شبکه	تابع انتقال	قانون آموزش	مومنتو م	تعداد لایه پنهان	نرون لایه پنهان	R ₂
Radial Basis Function	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۱	۱	۴	۰,۷ ۱
Multilayer Perceptron	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۱	۱	۴	۰,۸ ۲

جدول (۴-۱) بررسی مقایسه ای تاثیر نوع شبکه بر روی عملکرد ANN

۳-۴- انتخاب مقدار مومنتم

در حالت کلی نمیتوان نظر قطعی در مورد مقدار مومنتم، که یکی از پارامترهای یادگیری در قانون آموزش مومنتم میباشد، بیان نمود. انتخاب مقدار مومنتم، که همواره کوچکتر از یک است، به صورت آزمون و خطا انجام میگردد. برای تعیین مناسبترین مقدار مومنتم، مدل‌های مختلف شبکه عصبی، که در آنها مقدار مومنتم ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹، ۰/۹۵، ۰/۹۹ و ۱ در نظر گرفته شد، با استفاده از تابع انتقال تانژانت هیپربولیک و قانون آموزش مومنتم اجرا و مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای این شبکه‌ها محاسبه شد. جدول (۴-۲) همچنین به منظور مقایسه عملکرد دو تابع انتقال تانژانت هیپربولیک و سیگموئید، شبکه‌های دیگری با مقادیر مومنتم مختلف و با استفاده از تابع انتقال سیگموئید آموزش داده شد که نتایج مقدار ضریب همبستگی برای آنها در جدول (۴-۳) ارائه شده است. با بررسی جدول‌های (۴-۲) و (۴-۳) ملاحظه میگردد که، اگر در طراحی ساختار شبکه عصبی از قانون آموزش مومنتم استفاده شود، تابع انتقال تانژانت هیپربولیک در تدوین مدل‌ها عملکرد بهتری نسبت به تابع سیگموئید خواهد داشت. در مجموع تا این مرحله، بهترین مدل از نظر دقت وقتی که از تابع تانژانت هیپربولیک و به مقدار مومنتم ۰/۹، استفاده شد، به دست آمد.

جدول (۴-۲) مقدار ضریب همبستگی در شبکه های آموزش یافته با استفاده از تابع تانژانت هیپربولیک و

مقادیر مختلف مومنتم

ساختر	تابع انتقال	قانون آموزش	مومنتو م	تعداد لایه پنهان	نرون لایه پنهان	R _۲
۱	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۱	۱	۴	۰,۸۴
۲	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۲	۱	۴	۰,۸۲
۳	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۳	۱	۴	۰,۸۶
۴	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۴	۱	۴	۰,۸۲۵
۵	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۵	۱	۴	۰,۸۵۱
۶	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۶	۱	۴	۰,۸۳۳
۷	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۷	۱	۴	۰,۸۹
۸	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۸	۱	۴	۰,۸۷۷
۹	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۹	۱	۴	۰,۹۱
۱۰	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۹۵	۱	۴	۰,۸۷۶
۱۱	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۰,۹۹	۱	۴	۰,۸۲۵
۱۲	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۱	۱	۴	۰,۸۷

جدول (۳-۴) مقدار ضریب همبستگی در شبکه های آموزش یافته با استفاده از تابع سیگموئید و مقادیر مختلف مومنتم

ساختر	تابع انتقال	قانون آموزش	مومنتوم	تعداد لایه پنهان	نرون لایه پنهان	R ^۲
۱	سیگموئید	مومنتم	۰,۱	۱	۴	۰,۷۹۳
۲	سیگموئید	مومنتم	۰,۲	۱	۴	۰,۸۰۲
۳	سیگموئید	مومنتم	۰,۳	۱	۴	۰,۸۰۵
۴	سیگموئید	مومنتم	۰,۴	۱	۴	۰,۸۰۰
۵	سیگموئید	مومنتم	۰,۵	۱	۴	۰,۸۰۴
۶	سیگموئید	مومنتم	۰,۶	۱	۴	۰,۸۲۳
۷	سیگموئید	مومنتم	۰,۷	۱	۴	۰,۸۴۴
۸	سیگموئید	مومنتم	۰,۸	۱	۴	۰,۸۵۳
۹	سیگموئید	مومنتم	۰,۹	۱	۴	۰,۸۵۳
۱۰	سیگموئید	مومنتم	۰,۹۵	۱	۴	۰,۸۱۲
۱۱	سیگموئید	مومنتم	۰,۹۹	۱	۴	۰,۸۰۹
۱۲	سیگموئید	مومنتم	۱	۱	۴	۰,۸۳۵

۴-۴- تابع انتقال و قانون آموزش

در این مرحله برای انتخاب نوع تابع انتقال و قانون آموزش مناسب، شبکه های عصبی مختلف، با تغییر تابع انتقال و قانون آموزش، ساخته و اجرا شد که ساختار و نتایج آماری اجرای آنها در جدول (۴-۴) ارائه شده است. با بررسی این جدول مشاهده می شود که برای سیستم مورد بررسی مورد بررسی، بیشترین مقدار ضریب همبستگی در نتیجه بهترین مدل از نظر دقت با استفاده از تابع انتقال سیگموئید و قانون آموزش لونبرگ مارکوارت حاصل می شود. در تدوین مدل هایی که در ساختار آنها از قانون آموزش مومنتم استفاده میشود، لازم است مقدار مومنتم، به نحوی که مدل دارای بیشترین دقت باشد، تعیین گردد. این عمل برای دو تابع انتقال به کار رفته در این تحقیق، در مرحله قبل انجام شد.

جدول (۴-۴) مقدار ضریب همبستگی در شبکه های عصبی آموزش یافته با استفاده از تابع انتقال و قانون آموزش مختلف

ساخ تار	تابع انتقال	قانون آموزش	تعداد لایه پنهان	نرون لایه پنهان	R ^۲
۱	تانژانت هیپربولیک	مومنتم	۱	۴	۰,۸۹۹
۲	تانژانت هیپربولیک	روشگرادیان شیب	۱	۴	۰,۸۶۰
۳	تانژانت هیپربولیک	لونبرگ مارکوارت	۱	۴	۰,۹۰۰
۴	تانژانت هیپربولیک	نیوتن	۱	۴	۰,۸۷۰
۵	سیگموئید	مومنتم	۱	۴	۰,۸۵۳
۶	سیگموئید	روشگرادیان شیب	۱	۴	۰,۸۶۶
۷	سیگموئید	لونبرگ مارکوارت	۱	۴	۰,۹۲۱
۸	سیگموئید	نیوتن	۱	۴	۰,۸۳۲

۵-۴- تعداد لایه میانی یا لایه پنهان (Hidden Layer)

برای یافتن بهترین تعداد لایه پنهان، شبکه های عصبی مختلف، با تعداد ۱ تا ۴ لایه پنهان، ساخته و اجرا شد. در آموزش این شبکه ها از تابع انتقال و قانون آموزش انتخاب شده در مرحله قبل استفاده گردید. از نتایج آماری آموزش این شبکه ها جدول (۴-۵) مشاهده می شود که با افزایش تعداد لایه پنهان از ۱ به ۴، مقدار ضریب همبستگی افزایش نمی یابد و بیشترین مقدار آن با همان یک لایه پنهان حاصل می شود. بنابراین تا این مرحله، شبکه های عصبی با یک لایه پنهان به عنوان بهترین ساختار در نظر گرفته شد.

جدول (۴-۵) مقدار ضریب همبستگی در شبکه های آموزش یافته با تعداد مختلف لایه پنهان

ساختار	تابع انتقال	قانون آموزش	تعداد لایه پنهان	نرون لایه پنهان	R^2
۱	سیگموئید	لونبرگ مارکوارت	۱	۴	۰,۹۲۱
۲	سیگموئید	لونبرگ مارکوارت	۲	۴	۰,۹۱۰
۳	سیگموئید	لونبرگ مارکوارت	۳	۴	۰,۹۱۰
۴	سیگموئید	لونبرگ مارکوارت	۴	۴	۰,۸۹۰

۴-۶- تعداد نرونهای لایه پنهان

تعداد نرونها (یا عناصر پردازشگر Processing Elements, PE) در لایه پنهان به طوری که شبکه کمترین خطا را داشته باشد، به روش آزمون و خطا تعیین میشود. به منظور یافتن بهترین تعداد نرون لایه پنهان، مدل‌های شبکه عصبی با ساختار ۱ تا ۱۲ نرون در لایه پنهان اجرا و معیارهای آماری محاسبه گردید. در اجرای این شبکه ها از همان داده های ورودی اولیه و تابع انتقال، قانون آموزش و تعداد لایه پنهان مناسب، که در مراحل قبل انتخاب شدند، استفاده گردید. نتایج آماری آموزش این شبکه ها در جدول (۴-۶) ارائه شده است. مشاهده می شود که بیشترین مقدار مقدار R^2 با تعداد ۸ نرون در لایه پنهان حاصل میشود.

جدول (۴-۶) مقدار ضریب همبستگی در شبکه های عصبی تدوین شده با تعداد نرونهای مختلف در لایه

پنهان

ساختار	تابع انتقال	قانون آموزش	تعداد لایه پنهان	نرون لایه پنهان	R ^۲
۱	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۱	۰٫۸۹ ۰
۲	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۲	۰٫۹۱ ۰
۳	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۳	۰٫۸۷ ۳
۴	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۴	۰٫۹۲ ۱
۵	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۵	۰٫۸۹ ۷
۶	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۶	۰٫۹۰ ۹
۷	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۷	۰٫۹۱ ۷
۸	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۸	۰٫۹۴ ۶
۹	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۹	۰٫۸۸ ۷
۱۰	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۱۰	۰٫۸۷ ۳
۱۱	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۱۲	۰٫۸۸ ۹
۱۲	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۱۴	۰٫۹۰ ۴
۱۳	سیگموئید	لونیبرگ مارکوارت	۱	۱۶	۰٫۸۹ ۰

۷-۴- شبکه عصبی بهینه سازی شده با الگوریتم ژنتیک

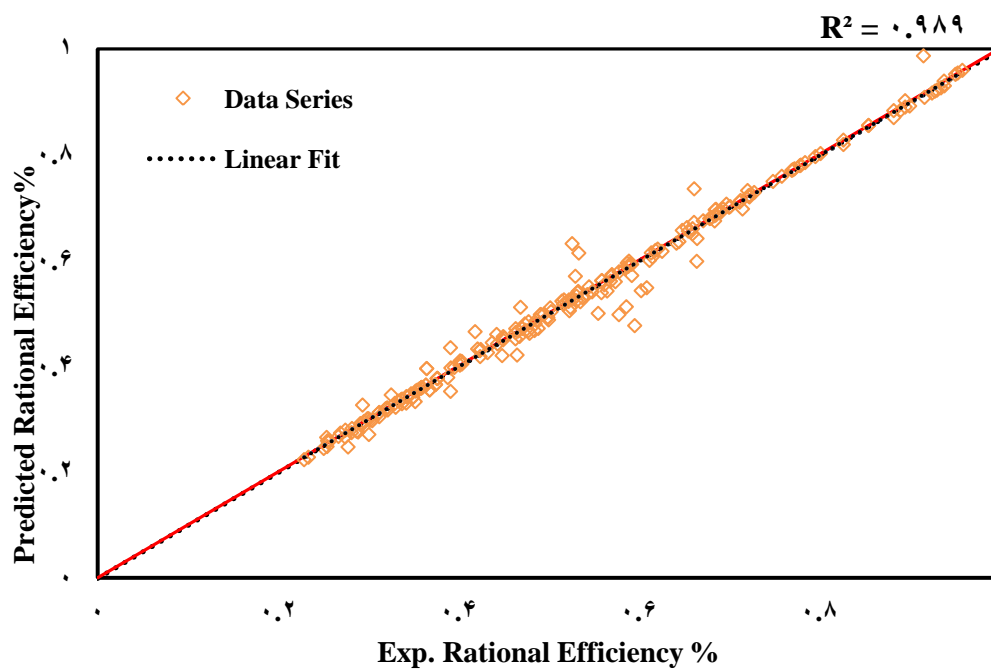
در این تحقیق پارامترهای شبکه عصبی، شامل متغیرهای ورودی و تعداد نرونها در لایه پنهان، با الگوریتم ژنتیک بهینه- یابی شدند که در مرحله آزمون شبکه عصبی، نتایج برآورد شده توسط مدل، یا داده های خروجی (Output Data) بهترین برآزش را با داده های واقعی، یا داده های مطلوب، داشته باشند. برای اجرای این بهینه سازی، در الگوریتم ژنتیک از تلاقی دو نقطه ای با احتمال $0/9$ و جهش یکنواخت (Uniform Mutation) با احتمال $0/1$ استفاده گردید و تعداد تکرار 1000 ، تعداد جمعیت 40 و حداکثر نسل تولید شده 100 در نظر گرفته شد. پارامترهای مناسب شبکه های عصبی بهینه سازی شده و نتایج آماری اجرای این شبکه ها در جدول (۷-۴) ارائه شده است. با بررسی جدول (۷-۴) ملاحظه میشود که بهینه سازی شبکه عصبی با الگوریتم ژنتیک، موجب افزایش دقت مدل شده است.

جدول (۷-۴) پارامترهای شبکه عصبی بهینه سازی شده با الگوریتم ژنتیک

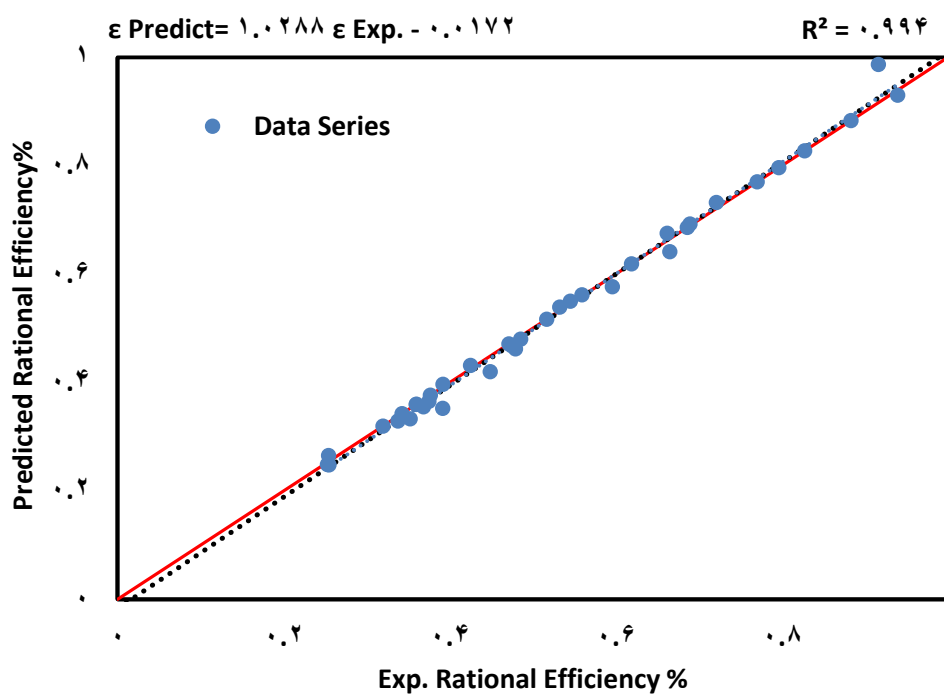
تابع انتقال	قانون آموزش	تعداد لایه پنهان	نرون لایه پنهان	حداکثر تکرار	بهترین تکرار	R ²
سیگموئید	لونبرگ مارکوارت	۱	۶	۱۰۰۰	۳۳۶	۰,۹۹۷

نمودار های شکل (۱-۴) نشان دهنده مقادیر پیش بینی شده برای حلالیت در مقابل مقادیر بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی می باشد. همانطور که مشخص است داده های نمودار ها از خط $Y=X$ پیروی می نمایند که نشان شبکه توانسته است با دقت بالایی حلالیت را پیش بینی نماید. به عبارت دیگر، زمانی که مقادیر پیش بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی متناظرشان یکسان باشند باید تابع خط 45 درجه باشند. هر چه قدر پراکندگی مقادیر حول خط $Y=X$ کمتر باشد عملکرد سیستم بهتر می باشد. در علم آمار، این پراکندگی با ضریب همبستگی نشان داده می شود. اگر ضریب همبستگی به عدد یک نزدیک باشد به این مفهوم می باشد که مقادیر پیش بینی شده برای مدل و و اندازه گیری شده در آزمایشگاه یکسان می باشند.

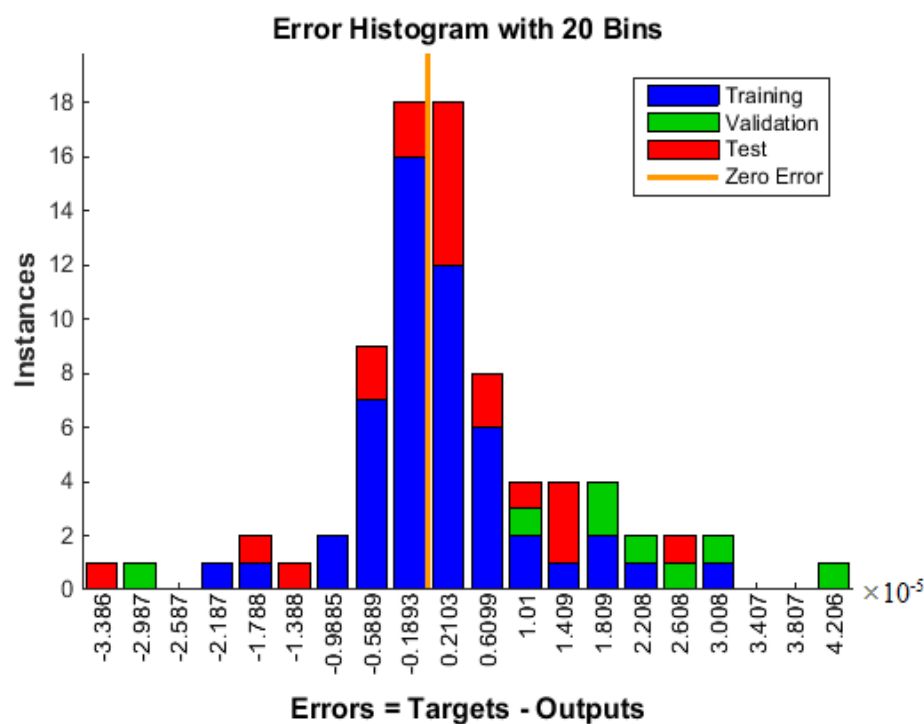
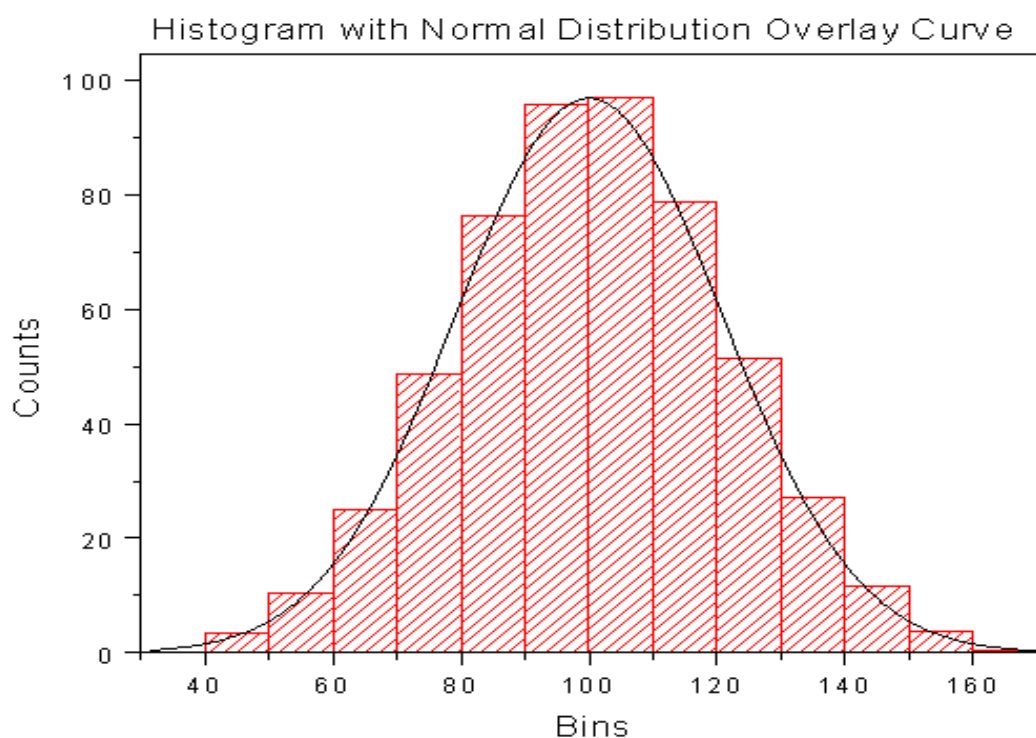
All Data



شکل (۴-۱) عملکرد شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک در پیش بینی بازده (تمامی داده ها)



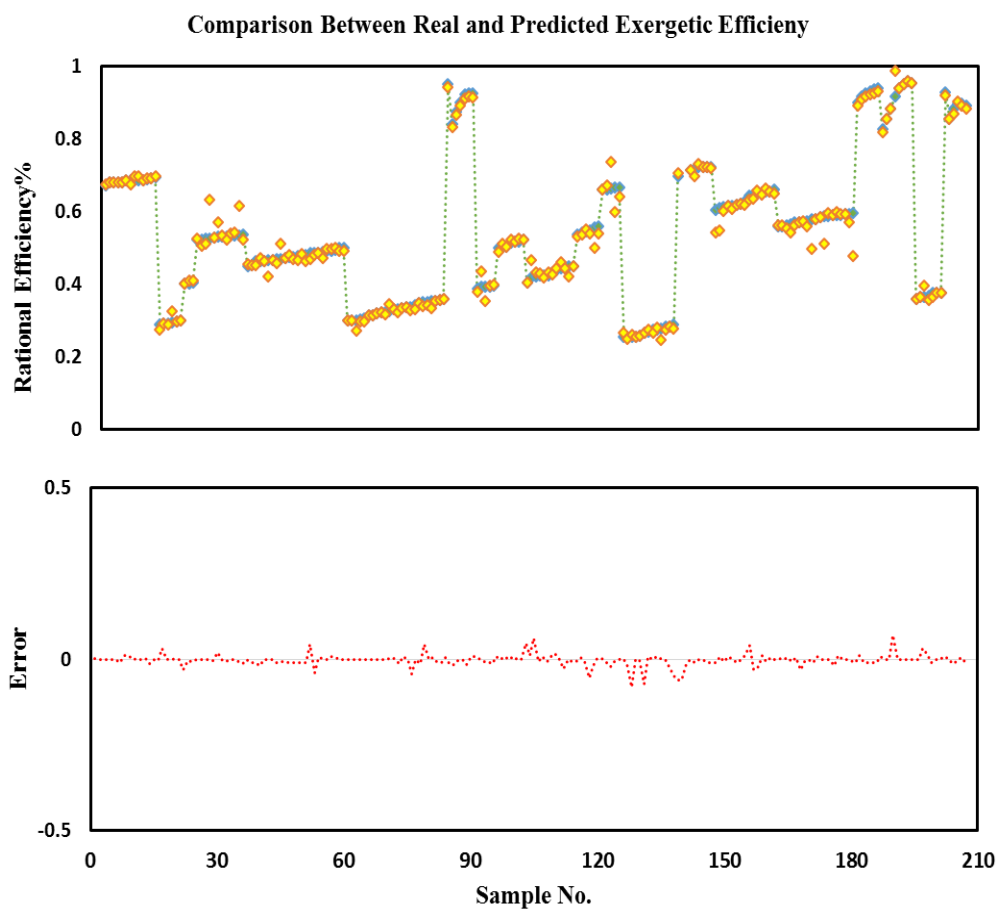
Residual (باقی‌مانده) اختلاف بین مشاهده و مقادیر مدل پیشگوی متغیر وابسته است. باقی‌مانده یک محصول عبارتست از مقدار مشاهده شده عبارت خطا برای آن محصول. هیستوگرام باقی‌مانده برای بررسی فرض نرمال بودن عبارت خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای یک مدل با دقت بالا، باید نمودار توزیع خطا از نمودار توزیع نرمال پیروی نماید. به عبارت دیگر، خطاها همواره دارای توزیع طبیعی است که حول مقدار ثابتی پراکنده شده است. نمودار توزیع نرمال و هیستوگرام خطا های مدل در شکل (۴-۳) نشان داده شده اند. همانطور که مشخص است نمودار توزیع خطا از توزیع نرمال پیروی می نماید.



شکل (۲-۴) نمودار (الف) توزیع نرمال (ب) توزیع خطا برای مدل ارائه شده (محور x خطا، محور y تعداد داده)

نمودار شکل (۳-۴) اثبات دیگری برای دقت بالای مدل می باشد. همانطور که از نمودار پیداست داده های پیش بینی شده انطباق خوبی بر نتایج آزمایشگاهی دارند. هم چنین در نمودار باقیمانده مقادیر خطا حول عدد صفر پراکنده شده اند. این به مفهوم این است که متوسط انحرافها نزدیک به صفر است. این خاصیت از

این امر ناشی می شود که بعضی انحرافها مثبت و انحرافهای دیگر منفی اند، و مجموع انحراف های مثبت مجموع انحرافهای منفی را خنثی می کنند.



شکل (۳-۴) بررسی توزیع باقیمانده های شبکه عصبی و نتایج آزمایشگاهی در مدل پیش بینی کننده

نتایج و پیشنهادات

نتایج

به جرات می توان گفت که نوار های مارپیچی شکل بیشترین کاربرد را در میان آشفته ساز ها دارند. دلیل این امر کاربرد آسان و کارایی بالای چنین آشفته ساز هایی می باشد.

نتایج نشان داد که استفاده از نانو سیال به تنهایی قادر به افزایش انتقال حرارت به میزان ۳۰٪ می باشد این در حالی است که در استفاده همزمان از نوار مارپیچی و نانو سیال این میزان تا بیش از ۱۲۰٪ افزایش می یابد.

نتایج نشان داد که استفاده از این نوع نوار مارپیچی می تواند تا بیش از ۹۰٪ سبب بهبود انتقال حرارت گردد.

افزایش نسبت ضخامت به قطر هیدرولیکی سبب افزایش میزان آشفته گی جریان و در نتیجه افزایش بیشتر انتقال حرارت نسبت به مبدل عاری از کوئل سیمی می گردد. البته باید در نظر گرفت که این میزان افزایش انتقال حرارت بر روی افزایش اصطکاک نیز تاثیر گذار است و باید در این بین صرف اقتصادی و تکنولوژی با یکدیگر ارزیابی گردند تا بتوان بهترین و بهینه ترین مورد را انتخاب کرد.

برای پیش بینی بازدهی مبدل حرارتی از شبکه های عصبی استفاده شد. بدین منظور شبکه عصبی با ساختار پرسپترون چند لایه برای تدوین مدل برآورد بازدهی به کارگرفته شد. برای طراحی ساختار مدل ، با تغییر پارامترهای قابل تنظیم، (شامل تابع انتقال، قانون آموزش، مقدار مومنتم، تعداد لایه پنهان، تعداد نرون لایه پنهان) شبکه های عصبی مختلف ساخته و اجرا شد. در هر مورد، ساختاری که بیشترین مقدار ضریب همبستگی را داشت به عنوان مدل نهایی انتخاب گردید. از آنجا که انتخاب هر یک از پارامترهای متغیر شبکه عصبی مستلزم آزمون و خطاهای مکرر و در نتیجه آموزش تعداد زیادی شبکه با ساختار مختلف بود، از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه یابی این پارامترها استفاده شد و کارایی این روش در بهینه سازی شبکه عصبی بررسی گردید. نتایج نشان داد، شبکه عصبی در مدلسازی و برآورد بازدهی از دقت بالایی برخوردار است. همچنین تلفیق آن با الگوریتم ژنتیک، برای بهینه سازی شرایط اجرای شبکه عصبی، مثبت ارزیابی گردید و روش تلفیقی در اکثر موارد برتری خود را نسبت به اجرای شبکه عصبی بدون بهینه سازی نشان داد. دقیقترین مدل با استفاده از تابع انتقال سیگموئید و قانون آموزش لوبزبرگ مارکوارت حاصل گردید.

پیشنهادات

استفاده از دینامیک محاسبات سیالاتی برای بررسی رفتار سیستم های حرارتی ابزاری قدرتمند می باشد. پیشنهاد می گردد که فرایند مورد مطالعه در این تحقیق با نرم افزار های دینامیک محاسباتی شبیه سازی و پروفایل دمایی در داخل سیال بیشتر تحت مطالعه قرار گیرد. پیشنهاد می گردد تا از سایر ترکیبات با ضریب هدایت حرارتی بالا برای بهبود خواص حرارتی بهره گرفته شده و نتایج آن با تحقیق فعلی مقایسه گردیده شود.

١. Handbook, A.F. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; ASHRAE Inc.:Atlanta, GA, USA, ٢٠٠٩.
٢. Engineeringtoolbox. Ethylene Glycol Heat-Transfer Fluid. ٢٠١٨. Available online: https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_١٤٦.html (accessed on ١٥ November ٢٠١٨).
٣. Kulkarni, D.P.; Das, D.K.; Patil, S.L. Effect of temperature on rheological properties of copper oxide nanoparticles dispersed in propylene-glycol and water mixture. *J. Nanosci. Nanotechnol.* ٢٠٠٧, ٧, ٢٣١٨–٢٣٢٢.
٤. Naik, M.; Janardhana, G.R.; Reddy, K.V.K.; Reddy, B.S. Experimental investigation into rheological property of copper oxide nanoparticles suspended in propylene-glycol–water based fluids. *ARN J. Eng. Appl. Sci.* ٢٠١٠, ٥, ٢٩–٣٤.
٥. Palabiyik, I.; Musina, Z.; Witharana, S.; Ding, Y. Dispersion stability and thermal conductivity of propylene glycol-based nanofluids. *J. Nanopart. Res.* ٢٠١١, ١٣, ٥٠٤٩–٥٠٥٥.
٦. Satti, J.R.; Das, D.K.; Ray, D. Investigation of the thermal conductivity of propylene-glycol nanofluids and comparison with correlations. *Int. J. Heat Mass Transf.* ٢٠١٧, ١٠٧, ٨٧١–٨٨١.
٧. Vallejo, J.P.; Gómez-Barreiro, S.; Cabaleiro, D.; Gracia-Fernández, C.; Fernández-Seara, J.; Lugo, L. Flow behaviour of suspensions of functionalized graphene nanoplatelets in propylene-glycol–water mixtures. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* ٢٠١٨, ٩١, ١٥٠–١٥٧.
٨. Rashidi, S.; Eskandarian, M.; Mahian, O.; Poncet, S. Combination of nanofluid and inserts for heat transfer enhancement-Gaps and challenges. *J. Ther. Anal. Calorim.* ٢٠١٨, ١–٢٤.
٩. Vajjha, R.S.; Das, D.K.; Namburu, P.K. Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al₂O₃ and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *Int. J. Heat Fluid Flow* ٢٠١٠, ٣١, ٤١٣–٤٢١.
١٠. Leong, K.; Saidur, R.; Kazi, S.; Mamun, A. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). *Appl. Ther. Eng.* ٢٠١٠, ٣٠, ٢٤٨٥–٢٤٩٢.
١١. Peyghambarzadeh, S.; Hashemabadi, S.; Hoseini, S.; Jamnani, M.S. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol-

based nanofluids as a new coolant for car radiators. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* ۲۰۱۱, ۳۸, ۱۲۸۳–۱۲۹۰.

۱۲. Peyghambarzadeh, S.M.; Hashemabadi, S.H.; Jamnani, M.S.; Hoseini, S.M. Improving the cooling performance of automobile radiator with Al_2O_3 /water nanofluid. *Appl. Ther. Eng.* ۲۰۱۱, ۳۱, ۱۸۳۳–۱۸۳۸.

۱۳. Teng, T.P.; Yu, C.C. Heat dissipation performance of MWCNTs nano-coolant for vehicle. *Exp. Ther. Fluid Sci.* ۲۰۱۳, ۴۹, ۲۲–۳۰.

۱۴. Chavan, D.; Pise, A.T. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid as a coolant. *J. Ther. Sci. Eng. Appl.* ۲۰۱۴, ۶.

۱۵. Heris, S.Z.; Shokrgozar, M.; Poorpharhang, S.; Shanbedi, M.; Noie, S. Experimental study of heat transfer of a car radiator with CuO /ethylene-glycol-water as a coolant. *J. Dispers. Sci. Technol.* ۲۰۱۴, ۳۵, ۶۷۷–۶۸۴.

۱۶. Ali, M.; El-Leathy, A.; Al-Sofyany, Z. The effect of nanofluid concentration on the cooling system of vehicles radiator. *Adv. Mech. Eng.* ۲۰۱۴, ۶, ۹۶۲۵۱۰.

۱۷. M'hamed, B.; Sidik, N.A.C.; Akhbar, M.F.A.; Mamat, R.; Najafi, G. Experimental study on thermal performance of MWCNT nano-coolant in Perodua Kelisa ۱۰۰۰cc radiator system. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* ۲۰۱۶, ۷۶, ۱۵۶–۱۶۱.

۱۸. Devireddy, S.; Mekala, C.S.R.; Veeredhi, V.R. Improving the cooling performance of automobile radiator with ethylene-glycol water based TiO_2 nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* ۲۰۱۶, ۷۸, ۱۲۱–۱۲۶.

۱۹. Salamon, V.; Senthil Kumar, D.; Thirumalin, S. Experimental investigation of heat transfer characteristics of automobile radiator using TiO_2 -nanofluid coolant. *Mater. Sci. Eng.* ۲۰۱۷, ۲۲۵, ۰۱۲۱۰۱.

۲۰. Subhedar, D.G.; Ramani, B.M.; Gupta, A. Experimental investigation of heat transfer potential of Al_2O_3 /Water-Mono Ethylene Glycol nanofluids as a car radiator coolant. *Case Stud. Ther. Eng.* ۲۰۱۸, ۱۱, ۲۶–۳۴.

۲۱. Tijani, A.S.; bin Sudirman, A.S. Thermos-physical properties and heat transfer characteristics of water/anti-freezing and Al_2O_3 / CuO based nanofluid as a coolant for car radiator. *Int. J. Heat Mass Transf.* ۲۰۱۸, ۱۱۸, ۴۸–۵۷.

۲۲. Kulkarni, D.P.; Vajjha, R.S.; Das, D.K.; Oliva, D. Application of aluminium oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant. *Appl. Ther. Eng.* ۲۰۰۸, ۲۸, ۱۷۷۴–۱۷۸۱.

۲۳. Zamzamian, A.; Oskouie, S.N.; Doosthoseini, A.; Joneidi, A.; Pazouki, M. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. *Exp. Ther. Fluid Sci.* ۲۰۱۱, ۳۵, ۴۹۵–۵۰۲.
۲۴. Selvakumar, P.; Suresh, S. Thermal performance of ethylene-glycol-based nanofluids in an electronic heat sink. *J. Nanosci. Nanotechnol.* ۲۰۱۴, ۱۴, ۲۳۲۵–۲۳۳۳.
۲۵. Kleinstreuer, C.; Xu, Z. Mathematical Modeling and Computer Simulations of Nanofluid Flow with Applications to Cooling and Lubrication. *Fluids* ۲۰۱۶, ۱, ۱۶.
۲۶. Yu, W.; Xie, H. A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications. *J. Nanomater.* ۲۰۱۲, ۲۰۱۲, ۱.
۲۷. Ali, H.M.; Babar, H.; Shah, T.R.; Sajid, M.U.; Qasim, M.A.; Javed, S. Preparation Techniques of TiO₂ Nanofluids and Challenges: A Review. *Appl. Sci.* ۲۰۱۸, ۸, ۵۸۷.
۲۸. Patil, M.S.; Seo, J.H.; Kang, S.J.; Lee, M.Y. Review on Synthesis, Thermo-Physical Property, and Heat Transfer Mechanism of Nanofluids. *Energies* ۲۰۱۶, ۹, ۸۴۰.
۲۹. Huminic, G.; Huminic, A. Application of nanofluids in heat exchangers: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* ۲۰۱۲, ۱۶, ۵۶۲۵–۵۶۳۸.
۳۰. Wang, X.Q.; Mujumdar, A.S. A review on nanofluids-part I: theoretical and numerical investigations. *Braz. J. Chem. Eng.* ۲۰۰۸, ۲۵, ۶۱۳–۶۳۰.
۳۱. Patil, M.S.; Kim, S.C.; Seo, J.H.; Lee, M.Y. Review of the Thermo-Physical Properties and Performance Characteristics of a Refrigeration System Using Refrigerant-Based Nanofluids. *Energies* ۲۰۱۶, ۹, ۲۲.
۳۲. Bianco, V.; Manca, O.; Nardini, S.; Vafai, K. Heat Transfer Enhancement with Nanofluids; CRC Press, Taylor & Francis: London, UK, ۲۰۱۵.
۳۳. Kakac, S.; Pramuanjaroenkij, A. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* ۲۰۰۹, ۵۲, ۳۱۸۷–۳۱۹۶.
۳۴. Pinto, R.V.; Fiorelli, F.A.S. Review of the mechanisms responsible for heat transfer enhancement using nanofluids. *Appl. Ther. Eng.* ۲۰۱۶, ۱۰۸, ۷۲۰–۷۳۹.

۳۵. Riazi, H.; Murphy, T.; Webber, G.B.; Atkin, R.; Mostafavi Tehrani, S.S.; Taylor, R.A. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *Int. J. Ther. Sci.* ۲۰۱۶, ۱۰۷, ۲۵–۳۸.
۳۶. Vajjha, R.; Das, D.; Mahagaonkar, B. Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory. *Pet. Sci. Technol.* ۲۰۰۹, ۲۷, ۶۱۲–۶۲۴.
۳۷. Pak, B.C.; Cho, Y.I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp. Heat Transf. Int. J.* ۱۹۹۸, ۱۱, ۱۵۱–۱۷۰.
۳۸. Satti, J.R.; Das, D.K.; Ray, D.R. Measurements of Densities of Propylene Glycol-Based Nanofluids and Comparison With Theory. *J. Ther. Sci. Eng. Appl.* ۲۰۱۶, ۸, ۰۲۱۰۲۱.
۳۹. Xuan, Y.; Roetzel, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* ۲۰۰۰, ۴۳, ۳۷۰۱–۳۷۰۷.
۴۰. Lee, J.; Mudawar, I. Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels. *Int. J. Heat Mass Transf.* ۲۰۰۷, ۵۰, ۴۵۲–۴۶۳.
۴۱. Moraveji, M.K.; Ardehali, R.M. CFD modeling (comparing single and two-phase approaches) on thermal performance of Al_2O_3 /water nanofluid in mini-channel heat sink. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* ۲۰۱۳, ۴۴, ۱۵۷–۱۶۴.
۴۲. Behzadmehr, A.; Saffar-Avval, M.; Galanis, N. Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach. *Int. J. Heat Fluid Flow* ۲۰۰۷, ۲۸, ۲۱۱–۲۱۹.
۴۳. Sekrani, G.; Poncet, S. Further Investigation on Laminar Forced Convection of Nanofluid Flows in a Uniformly Heated Pipe Using Direct Numerical Simulations. *Appl. Sci.* ۲۰۱۶, ۶, ۳۳۲.
۴۴. Sekrani, G.; Poncet, S.; Proulx, P. Modeling of convective turbulent heat transfer of water-based Al_2O_3 nanofluids in an uniformly heated pipe. *Chem. Eng. Sci.* ۲۰۱۸, ۱۷۶, ۲۰۵–۲۱۹.
۴۵. Vajjha, R.S.; Das, D.K. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *Int. J. Heat Mass Transf.* ۲۰۰۹, ۵۲, ۴۶۷۵–۴۶۸۲.

۴۶. Pal, R. A Novel Method to Determine the Thermal Conductivity of Interfacial Layers Surrounding the Nanoparticles of a Nanofluid. *Nanomaterials* ۲۰۱۴, ۴, ۸۴۴–۸۵۵.
۴۷. Lee, S.; Choi, S.U.S.; Li, S.; Eastman, J.A. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *J. Heat Transf.* ۱۹۹۹, ۱۲۱, ۲۸۰–۲۸۹.
۴۸. Wang, X.; Xu, X.; Choi, S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *J. Thermophys. Heat Transf.* ۱۹۹۹, ۱۳, ۴۷۴–۴۸۰.
۴۹. Reddy, M.C.S.; Rao, V.V. Experimental studies on thermal conductivity of blends of ethylene glycol-water-based TiO₂ nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* ۲۰۱۳, ۴۶, ۳۱–۳۶.
۵۰. Sundar, L.S.; Farooky, M.H.; Sarada, S.N.; Singh, M. Experimental thermal conductivity of ethylene-glycol and water mixture based low volume concentration of Al₂O₃ and CuO nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* ۲۰۱۳, ۴۱, ۴۱–۴۶.
۵۱. Usri, N.; Azmi, W.; Mamat, R.; Abdul Hamid, K.; Najafi, G. Thermal Conductivity Enhancement of Al₂O₃ Nanofluid in Ethylene Glycol and Water Mixture. *Energy Procedia* ۲۰۱۵, ۷۹, ۳۹۷–۴۰۲.
۵۲. Chen, H.; Ding, Y.; He, Y.; Tan, C. Rheological behaviour of ethylene-glycol-based titania nanofluids. *Chem. Phys. Lett.* ۲۰۰۷, ۴۴۴, ۳۳۳–۳۳۷.
۵۳. Xie, H.; Yu, W.; Li, Y. Thermal performance enhancement in nanofluids containing diamond nanoparticles. *J. Phys. D Appl. Phys.* ۲۰۰۹, ۴۲, ۰۹۵۴۱۳.
۵۴. Eastman, J.A.; Choi, S.U.S.; Li, S.; Yu, W.; Thompson, L. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.* ۲۰۰۱, ۷۸, ۷۱۸–۷۲۰.
۵۵. Hong, T.K.; Yang, H.S.; Choi, C. Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids. *J. Appl. Phys.* ۲۰۰۵, ۹۷.
۵۶. Zhu, H.T.; Zhang, C.Y.; Yin, Y.S. Rapid synthesis of copper nanoparticles by sodium hypophosphite reduction in ethylene-glycol under microwave irradiation. *J. Cryst. Growth* ۲۰۰۴, ۲۷۰, ۷۲۲–۷۲۸.
۵۷. Xie, H.; Yu, W.; Chen, W. MgO nanofluids: Higher thermal conductivity and lower viscosity among ethylene-glycol-based nanofluids containing oxide nanoparticles. *J. Exp. Nanosci.* ۲۰۱۰, ۵, ۴۶۳–۴۷۲.

58. Xie, H.; Wang, J.; Xi, T.; Liu, Y. Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles. *Int. J. Thermophys.* 2002, 23, 571–580.
59. Timofeeva, E.V.; Yu, W.; France, D.M.; Singh, D.; Routbort, J.L. Base fluid and temperature effects on the heat transfer characteristics of SiC in ethylene-glycol/H₂O and H₂O nanofluids. *J. Appl. Phys.* 2011, 109, 014914.
60. Xie, H.; Lee, H.; Youn, W.; Choi, M. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. *J. Appl. Phys.* 2003, 94, 4967–4971.
61. Liu, M.S.; Lin, M.C.C.; Huang, I.T.; Wang, C.C. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2005, 32, 1202–1210.
62. Harish, S.; Ishikawa, K.; Einarsson, E.; Aikawa, S.; Chiashi, S.; Shiomi, J.; Maruyama, S. Enhanced thermal conductivity of ethylene-glycol with single-walled carbon nanotube inclusions. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2012, 55, 3885–3890.
63. Puliti, G.; Paolucci, S.; Sen, M. Nanofluids and Their Properties. *Appl. Mech. Rev.* 2012, 64, 030803.
64. Prasher, R.; Bhattacharya, P.; Phelan, P.E. Brownian-Motion-Based Convective-Conductive Model for the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids. *J. Heat Transf.* 2006, 128, 588–595.
65. Prasher, R.; Evans, W.; Meakin, P.; Fish, J.; Phelan, P.; Keblinski, P. Effect of aggregation on thermal conduction in colloidal nanofluids. *Appl. Phys. Lett.* 2006, 89, 143119.
66. Leena, M.; Srinivasan, S. Experimental Investigation of the Thermophysical Properties of TiO₂=Propylene Glycol-Water Nanofluids for Heat-Transfer Applications. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2018, 91, 498–506.
67. Garg, J.; Poudel, B.; Chiesa, M.; Gordon, J.; Ma, J.; Wang, J.; Ren, Z.; Kang, Y.; Ohtani, H.; Nanda, J.; et al. Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene-glycol nanofluid. *J. Appl. Phys.* 2008, 103, 074301.
68. Chopkar, M.; Kumar, S.; Bhandari, D.; Das, P.K.; Manna, I. Development and characterization of Al₂Cu and Ag₂Al nanoparticle dispersed water and ethylene-glycol-based nanofluid. *Mater. Sci. Eng. B* 2007, 139, 141–148.

۶۹. Akbari, M.; Afrand, M.; Arshi, A.; Karimipour, A. An experimental study on rheological behaviour of ethylene-glycol based nanofluid: proposing a new correlation as a function of silica concentration and temperature. *J. Mol. Liq.* ۲۰۱۷, ۲۳۳, ۳۵۲–۳۵۷.
۷۰. Namburu, P.K.; Kulkarni, D.P.; Misra, D.; Das, D.K. Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene-glycol and water mixture. *Exp. Ther. Fluid Sci.* ۲۰۰۷, ۳۲, ۳۹۷–۴۰۲.
۷۱. Kumar, M.; Sawhney, N.; Sharma, A.K.; Sharma, M. Thermo-physical profile of zinc oxide nanoparticles dispersed in aqueous solution of propylene-glycol. *J. Mol. Liq.* ۲۰۱۸, ۲۴۹, ۶۵۰–۶۵۸.
۷۲. Afrand, M.; Abedini, E.; Teimouri, H. How the dispersion of magnesium oxide nanoparticles effects on the viscosity of water-ethylene-glycol mixture: experimental evaluation and correlation development. *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostruct.* ۲۰۱۷, ۸۷, ۲۷۳–۲۸۰.
۷۳. Namburu, P.K.; Das, D.K.; Tanguturi, K.M.; Vajjha, R.S. Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties. *Int. J. Ther. Sci.* ۲۰۰۹, ۴۸, ۲۹۰–۳۰۲.
۷۴. Bahiraei, M. A Comprehensive Review on Different Numerical Approaches for Simulation in Nanofluids: Traditional and Novel Techniques. *J. Dispers. Sci. Technol.* ۲۰۱۴, ۳۵, ۹۸۴–۹۹۶.
۷۵. Strandberg, R.; Das, D.K. Finned tube performance evaluation with nanofluids and conventional heat transfer fluids. *Int. J. Ther. Sci.* ۲۰۱۰, ۴۹, ۵۸۰–۵۸۸.
۷۶. Bouguerra, N.; Poncet, S.; Elkoun, S. Dispersion regimes in alumina/water-based nanofluids: simultaneous measurements of thermal conductivity and dynamic viscosity. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* ۲۰۱۸, ۹۲, ۵۱–۵۵.
۷۷. Bouguerra, N. Caractérisation des propriétés thermiques et rhéologiques des nanofluides eau-alumine: compréhension des mécanismes physicochimiques et études paramétriques. Ph.D. Thesis, Université de Sherbrooke, Longueuil, QC, Canada, ۲۰۱۸.
۷۸. Sekrani, G.; Poncet, S.; Proulx, P. Conjugated heat transfer and entropy generation of Al₂O₃-water nanofluid flows over a heated wall-mounted obstacle. *J. Ther. Anal. Calorim.* ۲۰۱۸.
۷۹. Prasher, R.; Song, D.; Phelan, J.W. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. *App. Phys. Lett.* ۲۰۰۶, ۸۹.

۸۰. Simons, R.E. Comparing heat transfer rates of liquid coolants using the Mouromtseff number. *Calcul. Corner* ۲۰۰۶, ۱۲, ۱۰.
۸۱. Ferrouillat, S.; Bontemps, A.; Ribeiro, J.; Gruss, J.; Soriano, O. Hydraulic and heat transfer study of SiO₂/water nanofluids in horizontal tubes with imposed wall temperature boundary conditions. *Int. J. Heat Fluid Flow* ۲۰۱۱, ۳۲, ۴۲۴–۴۳۹.
۸۲. Siavashi, M.; Jamali, M. Heat transfer and entropy generation analysis of turbulent flow of TiO₂-water nanofluid inside annuli with different radius ratios using two-phase mixture model. *Appl. Ther. Eng.* ۲۰۱۶, ۱۰۰, ۱۱۴۹–۱۱۶۰.
۸۳. Esfe, M.H.; Rejvani, M.; Karimpour, R.; Arani, A.A.A. Estimation of thermal conductivity of ethylene-glycol-based nanofluid with hybrid suspensions of SWCNT-Al₂O₃ nanoparticles by correlation and ANN methods using experimental data. *J. Ther. Anal. Calorim.* ۲۰۱۷, ۱۲۸, ۱۳۵۹–۱۳۷۱.
۸۴. Esfe, M.H.; Razi, P.; Hajmohammad, M.H.; Rostamian, S.H.; Sarsam, W.S.; Arani, A.A.A.; Dahari, M. Optimization, modeling and accurate prediction of thermal conductivity and dynamic viscosity of stabilized ethylene-glycol and water mixture Al₂O₃ nanofluids by NSGA-II using ANN. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* ۲۰۱۷, ۸۲, ۱۵۴–۱۶۰.

Abstract:

This study aims at experimentally investigating the effect of Al₂O₃ /water nanofluids on the heat transfer enhancement inside the double tube heat exchanger at variable inlet temperature. Al₂O₃ nanoparticle with concentration of ۰.۲۵% and ۰.۵% by volume concentration has been used at different inlet temperature. The experimental setup consisted of double tube heat exchanger with nanofluids on the cold side was used in turbulent regime with Reynolds number ranging from ۲۰۰۰ to ۱۲۰۰۰. Results from the study shows that the heat transfer increases with the increase in temperature and volume concentration of nano-particles. Significant improvement over the water is seen with maximum Nusselt number increase up to ۳۰% at ۳۰–۵۰ °C inlet temperature.

Keywords: Nano fluid-Heat exchanger-Spiral strip



Energy Institute of Higher Education

**Experimental study and modeling of the rheological properties of nanofluid
in heating systems using matlab software**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Science (Doctor of Philosophy) in mechanical
engineering**

By:

Bagher bigdeli

Supervisor:

Dr. -----

Advisor:

Dr. mojtaba mirzaei

Dr. heydar maddah

Autumn ۲۰۱۹