



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بررسی آزمایشگاهی خنک کاری قطعات الکترونیکی توسط نانوسیال

نگارنده: محمود نیستانی

اساتید راهنما

دکتر محمد محسن شاه مردان

دکتر محسن نظری

استاد مشاور

مهندس مجتبی آشوری

بهمن ۱۳۹۵

**باسمه تعالی**

شماره:  
تاریخ:  
ویرایش:

**فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد**

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمود نیستانی به شماره دانشجویی ۹۳۱۷۹۳۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی خنک کاری قطعات الکترونیکی توسط نانوسپال که در تاریخ ۱۳۹۵/۱۱/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

مردود       دفاع مجدد       قبول (با درجه: عالی امتیاز ۱۹)

- ۱- عالی (۲۰ - ۱۹)      ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)
- ۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)      ۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)
- ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱- اساتیدراهما	دکتر محمد محسن شاهردان	دانشیار	
	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۲- استاد مشاور	مهندس مجتبی آشوری	-	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد ضامن	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر پوزیا اکبرزاده	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر علی جباری مقدم	دانشیار	

رئیس دانشکده:

امضاء



ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان، آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است.

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم

؛

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

؛

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی‌کران  
مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.

؛

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم در رضای شما

؛

گران‌سنگ‌تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم غبار  
خستگی‌تان را بزدايد.

بوسه بر دستان پرمهرتان

## تشکر و قدردانی

ضمن سپاس خداوند، که هر آنچه داریم از فضل بی‌کران اوست و هر آنچه نداریم از حکمت بی‌پایان اوست. در ابتدا لازم می‌دانم از استاد محترم آقای دکتر محمد محسن شاه مردان و آقای دکتر محسن نظری که باره‌نمایی‌های مدیرانه خود نظارت و سرپرستی این پایان‌نامه را برعهده داشتند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از آقای مهندس مجتبی آشوری که کمک‌های فراوانی به بنده در انجام این پژوهش کردند، و تمامی اساتیدی که در این مدت افتخار شاگردی ایشان را داشتم، کمال قدردانی خود را بیان می‌کنم.

## تعهد نامه

اینجانب محمود نیستانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده

مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی خنک کاری قطعات

الکترونیکی توسط نانوسیال تحت راهنمایی دکتر محمد محسن شاهمردان و دکتر محسن نظری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

هدف از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی خنک کاری و انتقال حرارت قطعات الکترونیکی توسط سیال‌های مختلف در رژیم جریان آرام درون چاه‌های حرارتی از جنس مس که توسط دستگاه فرز CNC با دقت  $\pm 0.01$  میلیمتر در سه آرایش عمودی، متخلخل و مورب ساخته شده است، می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام شده، پژوهشی در زمینه تغییر هندسه چاه حرارتی و مقایسه آن‌ها در خنک کاری قطعات الکترونیکی و استفاده از نانوسیال مورد توجه چندانی قرار نگرفته است. در این پژوهش سه آرایش که در بالا ذکر شد، مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج بدست آمده با هم مقایسه می‌شود. سیال‌های مورد آزمایش آب مقطر و نانوسیال آب-آلومینا با درصدهای حجمی  $0/1$  و  $0/2$  درصد مورد استفاده قرار گرفت. تمامی آزمایشات در دبی‌های مختلف و در دو شار حرارتی ثابت  $100$  و  $150$  وات انجام شده است و نتایج باهم مقایسه شده‌اند. جهت بالا بردن دقت آزمایش و افزایش محدوده اطمینان نتایج هر آزمایش در دبی مورد نظر و شار حرارتی ثابت سه بار تکرار و داده‌ها طبق جداول آماری تحلیل شده‌اند. ضرایب انتقال حرارت همرفت، دماهای نهایی، میانگین اختلاف دمای لگاریتمی و مقاومت حرارتی قطعه الکترونیکی، برای یک گستره از پارامترها گزارش شده است. نتایج بدست آمده حاکی از افزایش حداکثر  $16/3$  درصدی انتقال حرارت در چاه حرارتی هندسه محیط متخلخل نسبت به حالت هندسه شیار مورب و افزایش  $47/7$  درصدی نسبت به حالت هندسه شیار عمودی است، همچنین حداکثر افزایش  $37/36$  درصدی انتقال حرارت نانوسیال  $0/2$  درصد، نسبت به سیال پایه (آب مقطر) در چاه حرارتی با هندسه محیط متخلخل مشاهده شده است. و در نتیجه میزان انتقال حرارت در هندسه متخلخل بهتر از سایر هندسه‌های مورد استفاده در این پژوهش است.

**کلمات کلیدی:** نانوسیال، چاه حرارتی، هندسه، شیار عمودی، شیار مورب، محیط متخلخل

## فهرست مطالب

فصل ۱: کلیات	۱
مقدمه	۲
۱-۱ روش‌های بهبود انتقال حرارت	۲
۱-۱-۱ روش‌های فعال	۳
۱-۱-۱-۱ ابزار مکانیکی	۳
۱-۱-۱-۲ ارتعاش سطوح	۳
۱-۱-۱-۳ ارتعاش سیال یا جریان طپشی	۳
۱-۱-۱-۴ تزریق	۴
۱-۱-۱-۵ مکش	۴
۲-۱ روش‌های غیرفعال	۴
۱-۲-۱-۱ کاهش ابعاد کانال	۴
۲-۲-۱-۱ سطوح ناهموار	۴
۳-۲-۱-۱ سطوح گسترش یافته	۵
۴-۲-۱-۱ ابزار جریان چرخشی	۵
۵-۲-۱-۱ لوله‌های مارپیچ	۵
۶-۲-۱-۱ مواد افزودنی	۵
۱-۲ نانو سیالات	۵
۱-۲-۱ نانو سیال در چاه حرارتی	۵



- ۲-۲-۱ تولید نانوسیال ..... ۷
- ۳-۲-۱ کاربردهای نانوسیال ..... ۸
- ۱-۳-۲-۱ صنعت حمل و نقل ..... ۹
- ۱-۱-۳-۲-۱ نانوسیال در سیستم خنک کاری ..... ۹
- ۲-۱-۳-۲-۱ نانوسیال در سوخت ..... ۱۰
- ۳-۱-۳-۲-۱ نانوسیال در سیستم روغنکاری ..... ۱۰
- ۲-۳-۲-۱ خنک کاری صنعتی ..... ۱۰
- ۳-۳-۲-۱ خنک کاری قطعات الکترونیکی ..... ۱۱
- ۴-۳-۲-۱ پزشکی ..... ۱۲
- ۱-۴-۳-۲-۱ تحویل دارو ..... ۱۲
- ۲-۴-۳-۲-۱ درمان سرطان ..... ۱۳
- ۴-۲-۱ پارامترهای تأثیر گذار بر ضریب هدایت حرارتی ..... ۱۳
- ۱-۴-۲-۱ کسر حجمی ..... ۱۴
- ۲-۴-۲-۱ جنس نانوذرات ..... ۱۵
- ۳-۴-۲-۱ نوع سیال ..... ۱۶
- ۴-۴-۲-۱ اندازه نانوذرات ..... ۱۶
- ۵-۴-۲-۱ شکل نانوذرات ..... ۱۷
- ۶-۴-۲-۱ دما ..... ۱۸
- ۷-۴-۲-۱ مقدار PH ..... ۱۹

- ۱۹ ..... ۸-۴-۲-۱ حرکت براونی
- ۲۰ ..... ۹-۴-۲-۱ خوشه‌ای شدن
- ۲۱ ..... ۵-۲-۱ دیگر مکانیزم‌های مؤثر بر انتقال حرارت
- ۲۱ ..... ۱-۵-۲-۱ ترموفورسیس
- ۲۲ ..... ۲-۵-۲-۱ دیفیوژنوفرسیس
- ۲۳ ..... فصل ۲: بررسی کارهای انجام شده
- ۲۴ ..... مقدمه
- ۲۴ ..... ۱-۲ جریان در کانال‌ها
- ۲۷ ..... ۲-۲ نانو سیال
- ۲۹ ..... ۳-۲ نانو سیال در چاه حرارتی
- ۳۰ ..... ۴-۲ جمع‌بندی
- ۳۱ ..... ۵-۲ توصیف مساله
- ۳۲ ..... ۶-۲ نوآوری
- ۳۲ ..... ۷-۲ روند عملکرد در این پایان نامه
- ۳۳ ..... فصل ۳: تعیین خواص نانوسیال
- ۳۴ ..... مقدمه
- ۳۴ ..... ۱-۳ چگالی
- ۳۵ ..... ۲-۳ ظرفیت گرمای ویژه
- ۳۵ ..... ۳-۳ ضریب انبساط حرارتی

- ۳-۴ ضریب هدایت حرارتی ..... ۳۶
- ۳-۴-۱ مدل های مبتنی بر حرکت براونی ..... ۳۷
- ۳-۴-۲ مدل مبتنی بر خوشه‌ای شدن نانوذرات ..... ۴۲
- ۳-۴-۳ دیگر مدل ها ..... ۴۵
- ۳-۵ لزجت دینامیکی ..... ۴۶
- فصل ۴ : سیستم آزمایشگاهی ..... ۵۳
- ۴-۱ تجهیزات آزمایشگاهی ..... ۵۴
- ۴-۱-۱ پمپ دنده‌ای مدل WT3000-FB ..... ۵۴
- ۴-۱-۲ رادیاتور ..... ۵۵
- ۴-۱-۳ منبع تغذیه (اتو ترانس) ..... ۵۶
- ۴-۱-۴ مخزن ..... ۵۷
- ۴-۱-۵ داده نگار ..... ۵۸
- ۴-۲ چاه حرارتی ..... ۵۹
- ۴-۲-۱ دلایل گرایش به ابعاد کوچک تر ..... ۵۹
- ۴-۲-۲ دسته‌بندی کانال ها از لحاظ ابعاد ..... ۶۰
- ۴-۲-۲-۱ چاه حرارتی شیار عمودی ..... ۶۰
- ۴-۲-۲-۲ چاه حرارتی شیار مورب ..... ۶۱
- ۴-۲-۲-۳ چاه حرارتی ساده برای محیط متخلخل ..... ۶۲
- ۴-۲-۲-۳-۱ مشخصات ساچمه‌های کراسمن بی بی ۶۰۰ ..... ۶۳

۳-۴	معادلات حاکم بر هندسه‌ها	۶۴
۴-۴	آماده‌سازی نانو سیال	۶۷
۵-۴	روش آزمایش	۶۹
۱-۵-۴	تصویر سیستم آزمایشگاه	۷۱
فصل ۵ : نتایج		
مقدمه		
۱-۵	نتایج حاصل از شار حرارتی ۱۰۰ وات	۷۶
۱-۱-۵	مقایسه هندسه‌های شیار عمودی، محیط متخلخل و شیار مورب	۷۶
۲-۱-۵	مقایسه نانو سیال و آب مقطر	۷۸
۳-۱-۵	دمای دیواره	۸۰
۱-۳-۱-۵	مقایسه سیالات مختلف در نمودارهای دمای دیواره نسبت به زمان	۸۲
۴-۱-۵	میانگین اختلاف دمای لگاریتمی (LMTD)	۸۴
۵-۱-۵	مقاومت حرارتی	۸۶
۶-۱-۵	نرخ افزایش	۸۹
۲-۵	نتایج حاصل از شار حرارتی ۱۵۰ وات	۹۰
۱-۲-۵	مقایسه هندسه‌های شیار عمودی، محیط متخلخل و شیار مورب	۹۰
۲-۲-۵	مقایسه نانو سیال و آب مقطر	۹۲
۳-۲-۵	دمای دیواره	۹۴
۱-۳-۲-۵	مقایسه سیالات مختلف در نمودارهای دمای دیواره نسبت به زمان	۹۶

- ۹۸ ..... میانگین اختلاف دمای لگاریتمی (LMTD) ..... ۴-۲-۵
- ۱۰۰ ..... مقاومت حرارتی ..... ۵-۲-۵
- ۱۰۳ ..... نرخ افزایش ..... ۶-۲-۵
- ۱۰۴ ..... آنالیز عدم قطعیت نتایج ..... ۳-۵
- ۱۰۵ ..... فصل ۶ : نتیجه گیری و پیشنهادها ..... ۵-۲-۵
- ۱۰۶ ..... نتیجه گیری از شار حرارتی ۱۰۰ وات ..... ۱-۶
- ۱۰۶ ..... نتیجه گیری از شار حرارتی ۱۵۰ وات ..... ۲-۶
- ۱۰۷ ..... نتایج کلی ..... ۳-۶
- ۱۰۸ ..... پیشنهادها ..... ۳-۶
- ۱۰۹ ..... مراجع ..... ۳-۶

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: تصویر SEM از نانوسیال  $\gamma\text{-}Al_2O_3$  [۳] ..... ۷
- شکل ۱-۲: شماتیکی از یک سینک گرمایی [۴۴] ..... ۲۱
- شکل ۱-۳: اتو ترانس امگا ..... ۲۵
- شکل ۱-۴: تصویر پمپ دنده‌ای مدل WT3000-FB ..... ۵۵
- شکل ۲-۴: رادیاتور ..... ۵۶
- شکل ۳-۴: اتو ترانس امگا ..... ۵۷
- شکل ۴-۴: مخزن ..... ۵۸
- شکل ۵-۴: داده نگار ADAM-4015 ..... ۵۸
- شکل ۶-۴: مبدل ADAM-4561 ..... ۵۹
- شکل ۷-۴: چاه حرارتی شیار مستقیم ..... ۶۱
- شکل ۸-۴: چاه حرارتی شیار مورب ..... ۶۲
- شکل ۹-۴: چاه حرارتی ساده ..... ۶۳
- شکل ۱۰-۴: چیدمان ساچمه‌ها داخل چاه حرارتی ..... ۶۳
- شکل ۱۱-۴: شماتیک برش مقطع هندسه‌ها ..... ۶۷
- شکل ۱۲-۴: نانو سیال آب-آلومینا تهیه‌شده توسط دستگاه آلتراسونیک ..... ۶۹
- شکل ۱۳-۴: محل قرارگیری حس‌گرها در کف چاه حرارتی ..... ۷۱
- شکل ۱۴-۴: تصویر سیستم آزمایشگاهی ..... ۷۱
- شکل ۱۵-۴: شماتیک نمونه چاه حرارتی مونتاژ شده ..... ۷۲
- شکل ۱۶-۴: شماتیک سیستم آزمایشگاهی ..... ۷۳
- شکل ۱-۵: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۷۷

- شکل ۵-۲: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۷۷
- شکل ۵-۳: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۷۸
- شکل ۵-۴: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه محیط متخلخل در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۷۹
- شکل ۵-۵: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه شیار مورب در زمان ۱۰۰۰ ثانیه.. ۷۹
- شکل ۵-۶: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه شیار عمودی در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۸۰
- شکل ۵-۷: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۸۱
- شکل ۵-۸: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال با درصد حجمی ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۸۱
- شکل ۵-۹: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۸۲
- شکل ۵-۱۰: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه شیار عمودی ..... ۸۳
- شکل ۵-۱۱: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه شیار مورب ..... ۸۳
- شکل ۵-۱۲: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه محیط متخلخل ..... ۸۴
- شکل ۵-۱۳: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی برحسب رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۸۵
- شکل ۵-۱۴: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی برحسب رینولدز برای نانو سیال-۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۸۶

- شکل ۵-۱۵: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی برحسب رینولدز برای نانو سیال-۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۶: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۷: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال-۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۸: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال-۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۸۹
- شکل ۵-۱۹: نمودار مقایسه عدد ناسلت نانو سیال نسبت به عدد ناسلت آب مقطر برای هندسه‌های متفاوت ..... ۹۰
- شکل ۵-۲۰: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۹۱
- شکل ۵-۲۱: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۹۱
- شکل ۵-۲۲: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۹۲
- شکل ۵-۲۳: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه محیط متخلخل در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۹۳
- شکل ۵-۲۴: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه شیار مورب در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۹۳
- شکل ۵-۲۵: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه شیار عمودی در زمان ۱۰۰۰ ثانیه ..... ۹۴
- شکل ۵-۲۶: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای سیال آب مقطر



- در زمان ۱۰۰۰ ثانیه..... ۹۵.....
- شکل ۲۷-۵: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال با
- درصد حجمی ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه..... ۹۵.....
- شکل ۲۸-۵: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال با
- درصد حجمی ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه..... ۹۶.....
- شکل ۲۹-۵: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه شیار عمودی..... ۹۷.....
- شکل ۳۰-۵: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه شیار مورب..... ۹۷.....
- شکل ۳۱-۵: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه محیط متخلخل..... ۹۸.....
- شکل ۳۲-۵: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی برحسب رینولدز برای
- سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه..... ۹۹.....
- شکل ۳۳-۵: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی برحسب رینولدز برای
- نانو سیال- ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه..... ۱۰۰.....
- شکل ۳۴-۵: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی برحسب رینولدز برای
- نانو سیال- ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه..... ۱۰۰.....
- شکل ۳۵-۵: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای سیال آب
- مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه..... ۱۰۲.....
- شکل ۳۶-۵: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال-
- ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه..... ۱۰۲.....
- شکل ۳۷-۵: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال-
- ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه..... ۱۰۳.....
- شکل ۳۸-۵: نمودار مقایسه عدد ناسلت نانو سیال نسبت به عدد ناسلت آب مقطر برای
- هندسه‌های متفاوت..... ۱۰۴.....

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳: خواص بعضی سیال‌ها و نانوذرات [۶۲] و [۱۲] ..... ۳۴
- جدول ۲-۳: جدول ضرایب ثابت برای مدل کو و کلینستروئر [۳۶] ..... ۴۰
- جدول ۳-۳: ضریب ثابت  $\beta$  برای مدل ضریب هدایت حرارتی واجها و داس [۶۷] ..... ۴۱
- جدول ۴-۳: ضرایب ثابت مدل ضریب هدایت حرارتی دوانگدونسوک و وونگویس [۷۷] ..... ۴۵
- جدول ۵-۳: ضرایب ثابت در ناحیه دمایی مدل لزجت نامبورو و همکاران [۸۶, ۸۷] ..... ۴۸
- جدول ۶-۳: ضرایب ثابت در دو ناحیه دمایی مدل لزجت نامبورو و همکاران [۸۷] ..... ۴۹
- جدول ۷-۳: جدول ثابت‌های رابطه لزجت دینامیکی دوانگدونسوک و وونگویس [۷۷] ..... ۵۰
- جدول ۱-۴: مشخصات پمپ ..... ۵۴
- جدول ۲-۴: دسته‌بندی انواع کانال از لحاظ قطر هیدرولیکی ..... ۶۰
- جدول ۳-۴: مشخصات نانو پودر  $AL_2O_3$  مدل  $\gamma$  ..... ۶۸

## لیست علائم و اختصارات

Nu	عدد ناسلت
$h(w/m^2.k)$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
$d_h(m)$	قطر هیدرولیکی
$K(w/m.k)$	ضریب هدایت حرارتی
$C_p(j/kg.k)$	ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت
$m(kg)$	جرم
$v(m^3/kg)$	حجم مخصوص
$\phi$	اتلاف لزجتی
$Q(m^3/s)$	دبی حجمی
$T(C^\circ)$	دما
Pr	عدد پراتل
Re	عدد رینولدز
$K_b$	ثابت بولتزمن
$C_v$	ظرفیت گرمای ویژه در حجم ثابت
Pe	عدد پکله
$M$	جرم مولکولی سیال
$A(m^2)$	مساحت
$q(w)$	شار حرارتی
$n$	ضریب شکل نانو ذره
$N(\approx 6.023 \times 10^{23})$	عدد آووگادرو
$\dot{m}(kg/s)$	دبی جرمی

$V(\text{m/s})$	سرعت
$H_w(\text{m})$	فاصله حسگر تا دیواره
$w_1(\text{m})$	عرض چاه حرارتی
$l_2(\text{m})$	طول چاه حرارتی
$t$	تعداد فین ها
$h_f(\text{m})$	ارتفاع فین
$w_f(\text{m})$	عرض فین
$h_c(\text{m})$	ارتفاع کانال
$w_c(\text{m})$	عرض کانال
$s_f(\text{m})$	فاصله عرضی فین ها

### علائم یونانی

$\rho(\text{kg/m}^3)$	چگالی
$\beta(\text{k}^{-1})$	ضریب انبساط حجمی
$\mu(\text{kg/m.s})$	ویسکوزیته دینامیکی
$\varphi$	نسبت حجمی ذرات نانو به سیال
$\nu(\text{m}^2/\text{s})$	ویسکوزیته سینماتیکی
$\lambda(\text{m})$	مسافت آزاد میانگین مولکول ها
$\alpha(\text{m}^2/\text{s})$	ضریب پخش حرارتی

### زیر نویس ها

<i>nf</i>	نانوسیال
<i>p</i>	نانوذرات
<i>f</i>	سیال
<i>in</i>	ورودی
<i>out</i>	خروجی
<i>m</i>	متوسط
<i>w</i>	دیواره
<i>hs</i>	چاه حرارتی
<i>eff</i>	مساحت هیدرولیکی کانال
Br	براونی

## فصل ۱: کلیات

## مقدمه

گرمایش و سرمایش یک سیستم توسط سیال در بسیاری از صنایع مانند صنایع الکترونیک، نیروگاه‌ها، دستگاه‌های نوری، آهنرباهای ابررسانا، کامپیوترهای فوق‌سریع و موتور اتموبیل از اهمیت زیادی برخوردار است. دستگاه‌های خنک‌کننده و گرمایشی بر پایه روش‌های مختلف انتقال حرارت طراحی می‌شوند. با توجه به این امر توسعه تکنیک‌های مؤثر انتقال حرارت با توجه به محدودیت منابع طبیعی و تمایل به کاهش هزینه‌ها بسیار ضروری است. با پیشرفت روز افزون علوم کامپیوتر استفاده از کامپیوترهایی با قدرت پردازش بالا افزایش پیدا کرده است، افزایش قدرت پردازش سبب شده تا کاربران در حین استفاده از کامپیوتر جز سر و صدای زیاد فن صدای دیگری نشنوند. در اغلب کامپیوترها این فن‌ها به خوبی از عهده وظیفه خود که همان خنک کاری چیپست هاست بر می‌آیند، اما برای افرادی که می‌خواهند از بهترین سخت افزار و آخرین تکنولوژی استفاده کنند و در عین حال بار پردازشی زیادی روی کامپیوتر خود داشته باشند ممکن است دیگر فن به تنهایی قادر به تهویه گرمای تولید شده نباشد. در این حالت خنک کاری با مایعات یا آب راه حل مسئله است این عمل ممکن است کمی غیر منطقی به نظر برسد اما این حقیقتی است، که برای خنک کاری آب به مراتب بهتر از هوا عمل می‌کند. سیستم خنک کاری با آب در کامپیوتر بسیار شبیه سیستم خنک کاری اتموبیل است. با این تفاوت که به جای موتور اتموبیل، پردازشگر کامپیوتر با آب خنک می‌شود. در این سیستم‌ها از قطعه‌ای به نام چاه حرارتی<sup>۱</sup> که وظیفه دفع حرارت را دارد استفاده می‌کنند. در این فصل ابتدا روش‌های بهبود انتقال حرارت را دسته‌بندی کرده و در مورد روش‌هایی که در این پایان‌نامه به کار گرفته خواهند شد، با جزئیات بیشتری شرح داده خواهد شد. و سپس در مورد مشخصات نانوسیال توضیحاتی داده شده است.

## ۱-۱ روش‌های بهبود انتقال حرارت

برگلز و همکاران [۱] روش‌های بهبود انتقال حرارت را به دودسته فعال و غیرفعال تقسیم کردند.

---

<sup>۱</sup> Heat sink

میزان تأثیر هر روش علاوه بر شرایط اعمال آن، شدیداً وابسته به نوع انتقال حرارت است که محدوده زیادی از مسائل از تک فاز و دو فاز گرفته تا جابجایی طبیعی و اجباری و... را می پوشاند. به طور کلی با بررسی دسته بندی های مختلفی که در مقالات مختلف ارائه شده اند، انواع روش های بهبود را می توان به دو گروه کلی زیر تقسیم کرد:

### **۱-۱-۱ روش های فعال**

به روش هایی گفته می شود که برای اعمال آن ها به یک توان با نیروی اعمالی خارجی به سیستم نیاز است. به دلیل پیچیدگی های زیاد در طراحی، اقبال زیادی به استفاده از این روش ها وجود ندارد. علاوه بر این در برخی شرایط استفاده از این روش ها غیرممکن است. روش های زیر را می توان از نوع فعال دانست. تمام این روش ها دارای این نقطه ضعف هستند که هر کدام مستلزم هزینه اضافی می باشند که باید در محاسبات اولیه برآورد هزینه ها مورد ارزیابی قرار گیرند تا به صرفه بودن آن ها صحت گذاری شود.

#### **۱-۱-۱-۱ ابزار مکانیکی**

وسایل مکانیکی که برای به هم زدن سیال استفاده می شوند. این روش در صنایع پلاستیک کاربرد زیادی دارد.

#### **۱-۱-۱-۲ ارتعاش سطوح**

ارتعاش دیواره کانال مبدل در فرکانس های کم و زیاد یکی از روش های کسب بهبود در انتقال حرارت تک فازی است.

#### **۱-۱-۱-۳ ارتعاش سیال یا جریان پیشی**

یکی از عملی ترین روش های اعمال ارتعاش است که در مبدل های زیادی استفاده می شود. محدوده ارتعاش از ۱ هرتز تا مافوق صوت تغییر می کند. این روش بیشتر در جریان تک فازی مورد استفاده قرار می گیرد.



### ۱-۱-۱-۴ تزریق

شامل افزودن گاز به سیال در حال حرکت از طریق یک سطح انتقال حرارت متخلخل یا تزریق یک سیال مشابه به ناحیه‌ای که انتقال حرارت صورت می‌گیرد، می‌شود. این روش نیز بیشتر در جریان تک فاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۱-۱-۱-۵ مکش

می‌تواند شامل دفع بخار از طریق سطح انتقال حرارت متخلخل در انتقال حرارت پوششی یا دفع سیال از طریق سطح انتقال حرارت متخلخل در جریان تک فاز باشد.

### ۱-۱-۲ روش‌های غیرفعال

روش‌های غیرفعال شامل روش‌هایی می‌شود که نیاز به توان یا نیروی خارجی ندارند و در صورت نیاز به توان اضافی، توان در دسترس سیستم مورد استفاده قرار خواهد گرفت. برگلز و همکاران [۱] از لحاظ چگونگی اعمال، روش‌های زیر را در دسته‌بندی غیرفعال برشمردند.

### ۱-۱-۲-۱ کاهش ابعاد کانال

یکی از راه‌های بهبود انتقال حرارت در کانال‌ها استفاده از کانال‌هایی با ابعاد کوچک‌تر است که در سال‌های اخیر به این موضوع توجه زیادی شده است. با توجه به این که در این پایان‌نامه از تغییر در هندسه چاه‌های حرارتی استفاده شده است در بخش‌های بعدی توضیحات بیشتری در این مورد داده خواهد شد.

### ۱-۱-۲-۲ سطوح ناهموار

استفاده از سطوح ناهموار که به صورت تصادفی یا منظم روی سطوح انتقال حرارت ایجاد می‌شوند، منجر به تحریک سیال و ایجاد اغتشاش شده تا افزایش سطح انتقال حرارت، این روش نیز بیشتر در جریان تک فاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۱-۲-۳ سطوح گسترش یافته

استفاده از این روش در مبدل‌های حرارتی بسیار معمول است. سطوح گسترش یافته می‌تواند به صورت پره‌های داخلی یا خارجی باشند.

### ۱-۲-۴ ابزار جریان چرخشی

شامل تعدادی از آرایش‌های هندسی یا زوائد می‌شود که در سیال، حرکت دورانی یا چرخشی ایجاد می‌کنند، همانند تولیدکننده گردابه در ورودی، زوائد نواری پیچانده<sup>۱</sup> و ... .

### ۱-۲-۵ لوله‌های مارپیچ

باعث فشردن شدن مبدل می‌شوند. جریان ثانویه ایجاد شده در آن‌ها نیز باعث افزایش ضریب انتقال حرارت تک فازی و توسعه نواحی جوششی در جریان دوفازی می‌شود.

### ۱-۲-۶ مواد افزودنی

این مواد افزودنی می‌تواند به صورت مواد جامد و حباب‌های گازی برای سیال مایع و قطرات مایع و ذرات جامد برای سیال گازی باشند. یک نمونه پرکاربرد از این نوع روش بهبود انتقال حرارت، استفاده از نانو سیال (افزودن نانو ذرات فلزات به سیال مایع) است که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

### ۱-۲ نانو سیالات

#### ۱-۲-۱ نانو سیال در چاه حرارتی

با ترکیب دو یا چند روش از روش‌های فوق می‌توان به بهبود بیشتری در انتقال حرارت دست یافت، به این روش‌ها، روش‌های ترکیبی گویند. در این پایان‌نامه دو روش بهبود انتقال حرارت غیرفعال، یعنی تغییر هندسه و استفاده از مواد افزودنی به‌عنوان یک روش ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفته و اثر

---

<sup>۱</sup> Twisted-tape inserts

پارامترهای هندسی و فیزیکی بر کارایی این روش بررسی خواهد شد.

برای این که اهمیت استفاده از این دو روش برای بهبود کارایی مبدل‌های حرارتی مشخص شود، می‌توان فواید استفاده هم‌زمان از نانو سیال و تغییر هندسه را برای جریان آرام تک فاز به صورت زیر بررسی کرد [۲] همان‌گونه که در ادامه خواهیم دید در جریان کاملاً توسعه‌یافته آرام، عدد ناسلت مقدار ثابتی خواهد داشت که مقدار آن به هندسه و شرایط مرزی بستگی دارد. لذا می‌توان چنین برداشت کرد که در ناحیه توسعه‌یافته در درون یک کانال رابطه زیر برقرار است.

$$\text{Nu} = \frac{hd_h}{k} \quad (1-1)$$

و بنابراین:

$$h \propto \frac{k}{d_h} \quad (2-1)$$

با استفاده از این رابطه اهمیت تغییر هندسه و استفاده از نانو سیال را می‌توان درک کرد. با کاهش ابعاد کانال، قطر هیدرولیکی که در مخرج کسر فوق ظاهر می‌شود کاهش یافته و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. از طرفی با افزودن نانو ذرات، ضریب هدایت افزایش می‌یابد و به تبع آن، طبق رابطه فوق، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد؛ بنابراین استفاده از نانو سیال و کاهش ابعاد کانال در کنار یکدیگر می‌تواند به بهبود مناسبی در فرآیند انتقال حرارت منجر شود.

در این پایان نامه، از نانو سیال در چاه حرارتی استفاده خواهد شد که یک کاربرد شناخته شده آن، خنک کاری میکروپردازشگرها در کامپیوترها است. با توجه به انواع کاربردهای نانو سیال که در این بخش ارائه شده می‌توان نتایج زیر را برداشت کرد:

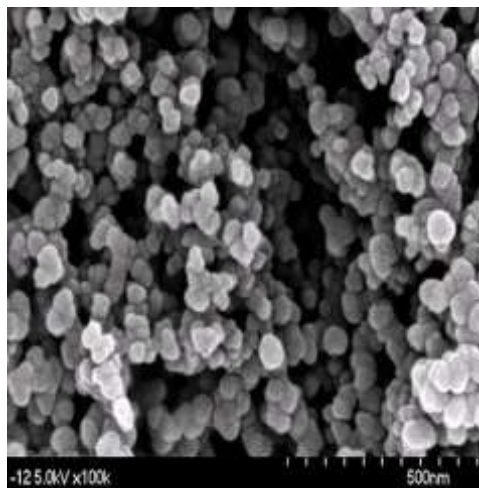
۱- استفاده از نادرتهای باعث تغییر خواص سیال می‌شود که بسته به نوع کاربرد سیال می‌توان از ذرات مختلف استفاده کرد. برخی از این فرآیندها بدون نانو ذرات امکان پذیر نبوده و برخی

دیگر با بکارگیری نانو ذرات بهبود می یابند. عموم کاربردهای موجود، از بهبود خواص حرارتی سیال با استفاده از نانو ذرات ناشی می شوند.

۲- با این وجود نباید بحث اقتصادی و هزینه های ناشی از تولید یا تهیه نانوسیال و توان پمپاژ اضافی و ... را نادیده گرفت.

### ۲-۲-۱ تولید نانوسیال

بهبود خواص حرارتی نانوسیال احتیاج به انتخاب روش تهیه مناسب این سوسپانسیون<sup>۱</sup> دارد تا از ته نشینی و ناپایداری آن ها جلوگیری شود. متناسب با کاربرد، انواع بسیاری از نانوسیالات از جمله نانوسیال اکسید فلزات<sup>۲</sup>، نیتريت ها، کاربید فلزات و غیر فلزات که با و یا بدون استفاده از مواد فعال سطحی<sup>۳</sup> در سیالاتی مانند آب، اتیلن گلیکول<sup>۴</sup> و روغن تولید شده اند. مطالعات زیادی روی چگونگی تهیه نانوذرات و روش های پراکنده سازی آن ها در سیال پایه انجام شده است که در اینجا بطور مختصر چند روش متداول که برای تهیه نانوسیال وجود دارد ذکر خواهد شد.



شکل ۱-۱: تصویر SEM<sup>۵</sup> از نانوسیال  $\gamma - Al_2O_3$  [۳]

<sup>۱</sup> Suspension

<sup>۲</sup> Metal oxid

<sup>۳</sup> Surfactant

<sup>۴</sup> Ethylene glycol

<sup>۵</sup> Scanning electron microscope

یکی از روش‌های متداول تهیه نانوسیال، روش دو مرحله‌ای است. در این روش ابتدا نانو ذره به وسیله روش رسوب بخار شیمیایی<sup>۱</sup> (CVD) در فضای گاز بی اثر به صورت پودرهای خشک تهیه می شود، در مرحله بعد نانو ذره در داخل سیال پراکنده می شود. برای این کار از روش هایی مانند لرزاننده های مافوق صوت و یا از مواد فعال سطحی استفاده می شود تا توده های نانو ذره‌ای به حداقل رسیده و باعث بهبود رفتار پراکندگی شود. روش دو مرحله‌ای برای بعضی موارد مانند اکسید فلزات در آب دیونیزه شده بسیار مناسب است و برای نانوسیالات شامل ذرات فلزی سنگین بدلیل تمایل آن ها به انباشتگی، کمتر موفق بوده است. روش دو مرحله‌ای دارای مزایای اقتصادی بالقوه‌ای است؛ زیرا شرکت های زیادی توانایی تهیه نانو پودرها در مقیاس صنعتی را دارند.

روش یک مرحله‌ای نیز به موازات روش دو مرحله‌ای پیشرفت کرده است، بطور مثال نانوسیالات شامل نانو ذرات فلزی با استفاده از روش تبخیر مستقیم تهیه شده اند. در این روش، منبع فلزی تحت شرایط خلاء تبخیر می شود و تراکم توده نانو ذرات به حداقل خود می رسد. فشار بخار پایین سیال یکی از معایب این فرایند محسوب می شود ولی با این حال روش های شیمیایی تک مرحله‌ای مختلفی برای تهیه نانوسیال به وجود آمده است که از آن می توان به روش احیای نمک فلزات و تهیه سوسپانسیون آن در حلال های مختلف برای تهیه نانوسیال فلزات اشاره کرد. مزیت اصلی روش یک مرحله‌ای، کنترل بسیار مناسب روی اندازه و انباشتگی کمتر نانوذرات نسبت به روش دو مرحله‌ای می‌باشد.

### ۱-۲-۳ کاربردهای نانوسیال

از نانوسیال می توان برای بهبود انتقال حرارت و افزایش راندمان در سیستم های مختلف انرژی همانند خنک کاری اتومبیل ها و موارد مشابه استفاده کرد. در حال حاضر تعداد موسسات صنعتی و

---

<sup>۱</sup> Chemical vapor distillation

تحقیقاتی که در حال بررسی استفاده از نانوسیال در محصولات خود هستند در حال افزایش است. زمینه‌های مختلف کاربرد نانوسیال، چه آنان که بصورت بالقوه وجود دارند و چه آنهایی که بصورت بالفعل در آمده اند، بطور مختصر در زیر ارائه می شوند [۴].

### ۱-۳-۲-۱ صنعت حمل و نقل

روغن موتورها، سیال های انتقال قدرت اتوماتیک، خنک کننده‌ها، روانکارها و دیگر موارد در سیستم های گرمایی خودروها که با انتقال حرارت سیال با دماهای بالا سر و کار دارند مثل موتور، رادیاتور و سیستم تهویه ذاتاً دارای خواص انتقال حرارت پایینی هستند. با اضافه کردن نانوذرات به سیال می توان در فرایندهای فوق بهبود ایجاد کرد [۵].

### ۱-۳-۲-۱-۱ نانوسیال در سیستم خنک کاری

برای یافتن راهی جهت بهبود طراحی آیرودینامیکی خودروها و متعاقب آن، صرفه جویی در مصرف سوخت، تولید کننده ها باید مقدار انرژی مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت هوا را کاهش دهند. در سرعت های بالا، تقریباً ۶۵٪ انرژی کل تولیدی در خودرو صرف غلبه بر پسای آیرودینامیکی می شود. این امر تا حدودی بخاطر رادیاتور بزرگی است که در جلوی موتور قرار می گیرد تا اثر سرمایشی هوای ورودی را به حداکثر مقدار خود برساند.

ترکیب اتیلن گلیکول و آب که تقریباً در تمام دنیا به عنوان خنک کننده وسایل حمل و نقل استفاده می شود، در مقایسه با آب، یک سیال با ضریب انتقال حرارت پایین است. اضافه کردن نانو ذرات به خنک کننده استاندارد موتور، می تواند باعث بهبود نرخ خنک کاری اتومبیل ها و ماشین های سنگین شود. به این ترتیب می توان گرمای موتور را، با یک سیستم خنک کاری کوچکتر دفع کرد. سیستم خنک کاری کوچکتر، به معنی رادیاتور کوچکتر و سبکتر است که این خود از دیدگاههای مختلفی باعث بهبود کارایی اتومبیل و صرفه جویی در مصرف سوخت می شود. از یکسو، استفاده از نانوسیال بعنوان خنک کننده باعث کاهش ابعاد و قرار گیری مناسب تر رادیاتور می شود و از طرف دیگر، از آنجا که به علت کارایی بهتر نانوسیال، نسبت به سیال خالص به مقدار کمتری از آن لازم است، به پمپ کوچکتری

برای سیال خنک کننده نیاز است و موتور خودرو می تواند در دماهای بالاتری کار کرده به توان های بالاتری دست یابد بدون اینکه استانداردهای آلودگی را خیلی نقض کند. از دیدگاه دیگر، بهبود نرخ خنک کاری می تواند باعث توانایی تولید موتورهایی با قدرت بیشتر با همان ابعاد سیستم خنک کاری فعلی شود. سینگ و همکاران [۶] دریافتند که استفاده از نانوسیال با هدایت حرارتی بالا در رادیاتورهای می تواند باعث کاهش سطح مقطع جلوی اتومبیل به اندازه ۱۰٪ شود.

### ۲-۱-۳-۲-۱ نانوسیال در سوخت

نانو ذرات آلومینیوم که با روش قوس پلاسما تولید شده اند با لایه هایی از اکسید آلومینیوم پوشانده شده و به دلیل اکسیداسیون شدید آلومینیم خالص، سطح تماس بزرگتری با آب داشته و در طول فرآیند احتراق، باعث تجزیه هیدروژن بیشتری از آب خواهد شد. در طول فرآیند احتراق، اکسید آلومینیوم بعنوان یک کاتالیست عمل کرده و نانو ذرات آلومینیم، آب را تجزیه می کنند و به تولید هیدروژن بیشتری منجر می شوند. نتایج یک آزمایش نشان داده است که اضافه کردن مخلوط معلق آبکی<sup>۱</sup> اکسید آلومینیم به سوخت گازوئیل، گرمای کلی ناشی از احتراق را افزایش داده و غلظت دود و دی اکسید نیتروژن در محصولات احتراق را کاهش داده است [۷].

### ۳-۱-۳-۲-۱ نانوسیال در سیستم روغنکاری

زتگ و همکاران [۸] ذرات اکسید مس و اکسید آلومینیم را به روغن سیستم انتقال قدرت یک ماشین اضافه کردند. آنها آزمایش را در سرعت های مختلف موتور انجام دادند. نتایج، حاکی از بهبود اشکار انتقال حرارت در این سیستم بود. البته در تمام سیستم های نانوسیال باید برخی فاکتورها همانند، ته نشین شدن و انباشتگی ذرات و همچنین خوردگی سطوح را در نظر گرفت .

### ۲-۳-۲-۱ خنک کاری صنعتی

در دنیای امروز پیشرفت تکنولوژی و توسعه روز افزون ابزارهای الکترونیکی همچون لب تاپ ها و

---

<sup>۱</sup> Aqueous

گوشی‌های همراه، نیاز به استفاده از یک تکنولوژی هوشمند برای بکارگیری منابع انرژی را ایجاد می‌کند. بررسی‌های مختلف نشان داده است که نانوسیال توانایی لازم جهت تامین این نیاز را دارد. دونزلی و همکاران [۹] نشان دادند که یک دسته مشخص از نانوسیال را می‌توان بعنوان ماده هوشمند در شیرهای گرمایی برای کنترل جریان گرما بکار برد.

### ۱-۲-۳-۳ خنک کاری قطعات الکترونیکی

چگالی توان میکروپروسورها به طور روز افزون در حال افزایش است. پیش بینی می‌شود که در سال ۲۰۱۸، مدارهای مجتمع<sup>۱</sup> با کارایی بالا، شامل بیش از ۹ بلیون ترانزیستور در یک چیپ با مساحت ۲۸۰ میلی متر مربع خواهند بود که این مقدار بیش از ۶۰ برابر مقدار حال حاضر بر روی یک نود<sup>۲</sup> به ابعاد ۹۰ نانومتر است. برای کارایی در این حد، به سرمایشی فراتر از مقدار خنک کاری ناشی از هوا که در سیستم های امروزی استفاده می‌شود نیاز است. بدین منظور از مایع تک فازی، دو فازی و یا نانوسیال می‌توان استفاده کرد. سای و همکاران [۱۰] از نانوسیالی با سیال پایه آب، در لوله‌های گرمایشی دوار<sup>۳</sup> استفاده کردند که می‌توان از آن در پردازشگر یک کامپیوتر همراه یا یک کامپیوتر شخصی استفاده کرد. نتایج، بیانگر افزایش مشهود ضریب انتقال حرارت در نانوسیال نسبت به آب می‌باشد. نگوین و همکاران [۱۱] بهبود خواص انتقال حرارتی و رفتار نانوسیال آب -  $Al_2O_3$  را در یک سیستم سرمایش مدار بسته برای خنک کاری میکروپردازنده‌ها یا دیگر ابزار الکترونیکی مورد ارزیابی قرار دادند. با توجه به بهبود قابل توجهی که در ضریب انتقال حرارت جابجایی مشاهده شد، نتایج آنها استفاده از نانوسیال را بعنوان سیال جایگزین در این دستگاه‌ها تأیید می‌کند. براساس گزارش آن‌ها در غلظت نانوسیال ۶/۸٪ ضریب انتقال حرارت در مقایسه با سیال پایه آب، ۴۰٪ افزایش پیدا کرد.

نظری و همکاران [۱۲] از نانوسیال‌های آب-آلومینا، اتیلن گلیکول و CNT برای خنک کاری سی

---

<sup>۱</sup> Integrated

<sup>۲</sup> Node

<sup>۳</sup> Heat pipes



پی یو کامپیوتر، مورد ارزیابی قرار دادند. و نتایج آنها به این صورت گزارش شده که افزایش ۰.۴٪ ضریب انتقال حرارت برای اتیلن گلیکول و افزایش انتقال حرارت ۰.۶٪ برای نانوسیال آب-آلومینا بوده است و بهترین بهبود در انتقال حرارت (حدود ۰.۱۳٪) برای نانوسیال CNT گزارش شده است.

علی و ارشاد [۱۳] بهبود خواص انتقال حرارتی و رفتار نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم را در دو هندسه شیار مورب و شیار عمودی برای خنک کاری قطعات الکترونیکی بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و نتایج زیر را گزارش کردند.

- ۱- افزایش ۳۷/۷ درصدی انتقال حرارت هندسه شیار مورب نسبت به شیار عمودی
  - ۲- افزایش ۱۶/۴۶ درصدی انتقال حرارت نانوسیال نسبت به آب مقطر
- عزیزی و همکاران [۱۴] در یک مطالعه تجربی کارایی گرمایی چاه حرارتی استوانه‌ای (میکروکانال) که قطر هیدرولیکی آن ۵۶۰ میکرون است را توسط آب مقطر و نانوسیال آب-مس با غلظت‌های مختلف بعنوان سیال خنک کننده مورد استفاده قرار دادند، که در دو شار حرارتی ۳۵ و ۵۰ وات آزمایشات را انجام دادند و افزایش ۱۷، ۱۹ و ۲۳ درصدی را برای عدد ناسلت بترتیب با غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۳ درصد، نسبت به آب مقطر گزارش کردند.

### ۱-۲-۳-۴ پزشکی

نانوسیال و نانو ذرات در صنعت دارو، کاربرد فراوانی دارند. برای مثال می توان به خنک کاری ناحیه جراحی و همچنین برای تولید دمای زیاد در اطراف تومور و از بین بردن سلول های سرطانی بدون صدمه زدن به سلول های مجاور، اشاره کرد (جوردن و همکاران [۱۵]). بیشتر مطالعات در زمینه‌های مرتبط با پزشکی بصورت دانشگاهی در دهه ۱۹۹۰ انجام شد و در حال حاضر تجاری سازی برخی از این ابزار آغاز شده است.

### ۱-۲-۳-۴-۱ تحویل دارو

یکی از اهدافی که با استفاده از نانوسیال امکان پذیر است، توسعه یک سیستم یکپارچه تحویل داروی میکرو یا نانو است. در حالیکه سیستم معمول تحویل دارو (به بدن) بصورت زیاد یا کم دسته‌بندی

می شود، ابزارهای میکرو، تحویل مقدار دقیق دارو را به هر دو روش کاشت و تزریق پوست تامین می کنند. این بدان معنی است که زمانی که دارو بصورت معمول توزیع می شود، غلظت دارو در پوست افزایش یافته به یک مقدار حداکثر رسیده و سپس با مصرف آن توسط بدن، کاهش می یابد و این چرخه برای هر بار که دارو وارد بدن می شود تکرار می شود. با استفاده از سیستم تحویل داروی نانو<sup>۱</sup>، میزان کنترل شده ای از دارو در یک بازه وسیعتر از زمان در اختیار بدن قرار می گیرد. لذا غلظت دارو در بدن در یک محدوده مشخص درمانی باقی می ماند.

### ۱-۲-۳-۴-۲ درمان سرطان

در سال های اخیر در زمینه استفاده از نانوسیال در عکسبرداری از غده سرطانی و تحویل دارو به آن ابتکارهایی ارائه شده است. این ابتکار شامل استفاده از نانوسیال های حاوی آهن بصورت حامل های دارو یا استفاده از تشعشع برای بیمار سرطانی است. از نانوسیال هایی با خاصیت مغناطیسی استفاده می شود تا با استفاده از آهنربا در مسیر خون به سمت تومور هدایت شود. این به پزشکان اجازه می دهد تا مقدار زیادی دارو یا تشعشع را به سمت ناحیه مورد نظر هدایت کنند. بدون آنکه بافت سالم کناری صدمه ای ببیند. نانو ذرات مغناطیسی نسبت به سلول های غیر مغناطیسی چسبندگی بیشتری به تومور دارند و توان بیشتری را دریافت می کنند. این روش یک روش جایگزین مناسب در درمان سرطان است. دلیل استفاده از نانو ذرات مغناطیسی این است که در مقایسه با نانو ذرات فلزی آنها با استفاده از میدان مغناطیسی قابل کنترل هستند [۱۶]. با استفاده از میدان مغناطیسی متغیر و خاصیت مغناطیسی نانوسیال می توان انرژی اطراف را جذب کرده و دمای زیاد تولید شده در بدن را تحت کنترل در آورد.

### ۱-۲-۴ پارامترهای تأثیر گذار بر ضریب هدایت حرارتی

همان طور که در بخش قبل بیان شد، در این پایان نامه از بهبود خواص انتقال حرارتی سیال پایه با بکارگیری نانو ذرات، استفاده خواهد شد. نتایج اولیه تجربی از بررسی انتقال حرارت نانوسیال در

---

<sup>۱</sup> Nanodrug delivery

کانال هایی با هندسه های مختلف، حاکی از یک بهبود غیر معمول در ضریب هدایت حرارتی و به تبع آن، ضریب انتقال حرارت جابجایی می باشد. تحقیقات مختلفی برای بررسی علت این رفتار غیر متعارف صورت گرفت و حتی برخی از مقالات در سال های اخیر این رفتار را رد کردند. بهرحال در ادامه به بررسی عوامل موثر بر خواص انتقال حرارتی نانوسیال خواهیم پرداخت.

## ۱-۲-۴-۱ کسر حجمی

ماسودا و همکاران [۱۷] اولین محققینی بودند که ضریب هدایت نانوسیال را اندازه گیری کردند. آنها از روش دو مرحله ای برای تولید نانو ذرات استفاده کردند و نانو ذرات مختلف همانند ذرات ۱۳ نانومتر اکسید آلومینیوم، ۱۲ نانومتر دی اکسید سیلیسیم و ۲۷ نانومتر دی اکسید تیتانیوم در آب را آزمایش کردند. نتایج آنها بیانگر بهبود ۳۲/۴٪ در ضریب هدایت حرارتی با ۰/۷۵٪ کسر حجمی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در دمای ۳۱/۸۵ درجه ی سانتیگراد بود. ضریب هدایت بصورت خطی با افزایش کسر حجمی افزایش می یافت.

لی و همکاران [۱۸] نانو ذرات ۳۸/۵ نانومتر اکسید آلومینیوم و ۲۳/۶ نانومتر اکسید مس را که با روش معیان گاز تولید شده بودند، در آب و اتیلن گلیکول مورد آزمایش قرار دادند. آزمایش در دمای اتاق انجام شد و نتایج همانند نتایج ماسودا و همکاران [۱۷] بیانگر افزایش ضریب هدایت با کسر حجمی بصورت خطی بود. بیشترین بهبود مشاهده شده مقدار ۲۰٪ بود که در کسر حجمی ۰/۴٪ نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید مس بدست آمد.

تقریباً در تمام کارهای تجربی مربوط به ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، تاثیر پارامتر کسر حجمی در نظر گرفته شده و در بیشتر موارد رابطه این دو پارامتر خطی بوده است؛ اما نتایج برخی تحقیقات بیانگر رابطه غیر خطی ضریب هدایت با کسر حجمی است. بعنوان مثال، مرشد و همکاران [۱۹] نانو ذرات دی اکسید مس در آب را در محدوده کسر حجمی ۰/۵ تا ۵ درصد مورد مطالعه قرار دادند. آنها شاهد رفتار غیر خطی ضریب هدایت با کسر حجمی بخصوص در مقادیر کسر

حجمی پایین بودند. البته آنها احتمال دادند که دلیل این رفتار، استفاده از رقیق کننده<sup>۱</sup> ستیل تری متیل آلومینیم بروماید باشد. چوی و همکاران [۲۰] نیز برای نانو لوله‌های چند دیواره کربن در نفت رفتار غیر خطی را مشاهده کردند. آنها دلیل این امر را اثر متقابل نانو ذرات بر یکدیگر اعلام کردند.

## ۱-۲-۴-۲ جنس نانو ذرات

یکی دیگر از عواملی که در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال موثر است، جنس نانو ذرات است. با وجود آنکه به نظر می آید با استفاده از ماده‌ای با ضریب هدایت حرارتی بالاتر، ضریب هدایت نانوسیال نیز باید افزایش یابد، اما نتایج تجربی گاهی بیانگر خلاف این موضوع است. بعنوان مثال، لی و همکاران [۱۸] با مقایسه نانو ذرات اکسید مس و اکسید آلومینیم مشاهده کردند که با وجود آنکه ضریب هدایت ذرات اکسید آلومینیم بیشتر از اکسید مس است اما نانوسیال حاوی اکسید مس ضریب هدایت بیشتری دارد. آنها دلیل این امر را اینگونه توضیح دادند که نانو ذرات اکسید مس، خوشه‌های<sup>۲</sup> نسبتاً بزرگتری می سازند. تنها زمانی که مهمترین مکانیزم بهبود انتقال حرارت در نانوسیال را حرکت براونی<sup>۳</sup> بدانیم، پدیده کاهش ضریب هدایت در نانوسیال اکسید آلومینیم قابل توجیه است، زیرا در این صورت، با افزایش ابعاد ذره با تشکیل خوشه‌ها، اثر حرکت براونی کاهش یافته و ضریب هدایت کاهش خواهد یافت. البته برخی از مقالات خوشه ای شدن را یک عامل بهبود انتقال حرارت در نانوسیال‌ها می‌دانند. اضافه کردن نانو لوله‌ها باعث افزایش چشمگیری در ضریب انتقال حرارت سیال می شود. چوی و همکاران [۲۰] با اضافه کردن ۱٪ نانو لوله کربن چند دیواره با قطر متوسط ۲۵ نانومتر و طول حدود ۵۰ نانومتر به نفت ترکیب آلفا الفین<sup>۴</sup> به افزایش ۱۶۰٪ دست یافتند. آنها دلیل این افزایش خارق العاده را شکل طویل این ذرات و تشکیل لایه در اطراف نانو لوله دانستند. طول زیاد این نانو لوله ها باعث می شود تا گرما به سرعت مسیر زیادی را در این مواد طی کند.

---

<sup>۱</sup> Surfactant

<sup>۲</sup> Cluster

<sup>۳</sup> Brownian motion

<sup>۴</sup> Synthetic poly( $\alpha$ -olefin) oil

## ۱-۲-۴-۳ نوع سیال

هرگاه از مدل موثر (همانند مدل ماکسول<sup>۱</sup>) استفاده شود، ملاحظه می شود که با ضریب هدایت حرارتی سیال، نسبت ضریب هدایت نانوسیال به سیال کاهش می یابد. با وجود آنکه برخی نتایج تجربی همانند مقاله چوپکار و همکاران [۲۱] و لیو و همکاران [۲۲] این نتیجه گیری را نقض می کنند اما نتایج تعداد زیادی از کارهای تجربی در این زمینه تایید کننده این مطلب است.

## ۱-۲-۴-۴ اندازه نانوذرات

از دیدگاه تئوریک به نظر می آید که با کاهش ابعاد نانو ذره باید نسبت ضریب هدایت نانوسیال به سیال افزایش یابد. در واقع این پدیده یکی از دلایل رو آوردن به ذرات در ابعاد نانو در مقایسه با ذرات در ابعاد میکرو است. از دیدگاه مکانیزمهای حاکم بر ضریب هدایت که در بخش بعدی به آن پرداخته می شود، با کاهش ابعاد نانو ذره، حرکت براونی تشدید شده و اثر لایه نازک تشکیل شده بر روی آن افزایش می یابد که هر دو عامل فوق باعث افزایش ضریب هدایت نانوسیال می شوند. گرچه تعداد زیادی از مقالات تجربی همانند ایستمن و همکاران [۲۳] و [۵] و مینیستا و همکاران [۲۴] در این زمینه مطلب فوق را تایید می کنند، اما از طرف دیگر تعداد زیادی از مقالات نیز به نتایجی متفاوت با مطلب فوق دست یافتند. البته این نتایج متفاوت بخصوص برای ذرات اکسید آلومینیم بیشتر از ذرات اکسید مس است. بعنوان مثال بک و همکاران [۲۵] در یک کسر حجمی معین برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیم مشاهده کردند که با کاهش ابعاد نانو ذرات، ضریب هدایت نانوسیال کاهش می یابد. میزان این کاهش برای نانو ذرات کوچکتر از ۵۰ نانومتر مشهود تر بود. آنها دلیل این امر را کاهش ضریب هدایت نانو ذرات با کاهش ابعاد آنها بیان کردند. شاید یک دلیل کاهش ضریب هدایت با کاهش ابعاد نانو ذره، پدیده خوشه ای شدن ذرات است. همانطور که در بخش های بعدی اشاره خواهد شد، خوشه ای شدن تا یک حد معین باعث بهبود ضریب هدایت حرارتی و بعد از آن به دلیل ته نشینی

---

<sup>۱</sup> Maxwell

ذرات باعث کاهش این ضریب خواهد شد [۲۶]. فنگ و همکاران [۲۷] نشان دادند که در نانو ذرات با ابعاد ریزتر پدیده خوشه ای شدن مشهودتر است و این می تواند توجیهی برای کاهش ضریب هدایت با کاهش ابعاد نانو ذرات باشد.

## ۱-۲-۴-۵ شکل نانو ذرات

اساساً دو شکل برای نانو ذرات در تحقیقات انجام شده وجود دارد: نانو ذرات کروی و نانو ذرات استوانه‌ای، نانو ذرات استوانه‌ای به دلیل اینکه سطح بیشتری از آنها در تماس با سیال است دارای ضریب هدایت بالاتری می‌باشند.

سای و همکاران [۲۸] دو نوع نانو ذره کروی و استوانه ای کربن سیلیسید<sup>۱</sup> را در آب و همچنین اتانول مورد بررسی قرار دادند. قطر متوسط نانو ذرات کروی ۲۶ نانومتر و قطر متوسط نانو ذرات استوانه ای ۶۰ نانومتر بود. آنها دریافتند که افزایش ۴/۲٪ نانو ذرات کروی به آب باعث بهبود ۱۵/۸٪ در ضریب هدایت آن می‌شود، در حالیکه با افزودن ۴٪ نانو ذرات استوانه‌ای مقدار بهبود ایجاد شده ۲۲/۹٪ است. این نتایج مناسب‌تر بودن شکل استوانه ای نانو ذرات را تأیید می‌کند.

همینطور مرشد و همکاران [۱۹] شکل‌های مختلف نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم<sup>۲</sup> را در آب یون زدایی شده مورد مطالعه قرار دادند. قطر متوسط نانو ذرات کروی ۱۵ نانومتر بود و ابعاد نانو ذرات استوانه ای، قطر ۱۰ نانومتر در طول ۴۰ نانومتر بود. براساس نتایج بدست آمده، با افزودن ۵٪ نانو ذرات کروی، ضریب هدایت حرارتی ۲۹/۷٪ افزایش یافت در حالیکه در همین کسر حجمی، نانو ذرات استوانه ای ۳۲/۸٪ افزایش ایجاد کردند.

علاوه بر این، نانوسیال‌هایی با نانو ذرات به شکل نانو لوله (که استوانه ای شکل هستند) عموماً دارای ضریب هدایت بسیار بالاتری نسبت به انواع کروی آن هستند. یکی از دلایل این امر، همانطور که قبلاً اشاره شد، اینست که با توجه به آنکه طول این نانو ذرات در حد میکرون است، گرما می تواند

---

<sup>۱</sup> Sic

<sup>۲</sup> TiO<sub>2</sub>

مسیر زیادتری را با سرعت بیشتر در طول این ذرات طی کند؛ اما این نکته نیز باید مورد توجه قرار گیرد که نانوسیال حاوی نانو لوله ها دارای لزجت بیشتری بوده و در نتیجه به توان پمپاژ بیشتری نیز برای جریان یافتن در کانال نیاز دارد؛ بنابراین در انتخاب نانو ذره مناسب باید هر دو عامل انتقال حرارت و توان پمپاژ مورد نیاز در کنار هم مورد ارزیابی قرار گیرند.

#### ۱-۲-۴-۶ دما

در مخلوط‌هایی با ذراتی به ابعاد بزرگتر، وابستگی ضریب هدایت به دما، تنها تحت تاثیر وابستگی ضریب هدایت سیال و ذره به دما می باشد. این در حالیست که در نانوسیال‌ها افزایش دما می تواند حرکت براونی و خوشه‌ای شدن نانو ذرات را نیز تحت تاثیر قرار دهد که این امر باعث شدیدتر شدن اثرات دما می شود.

لی و پیترسون [۲۹] اثر دما را بر ضریب هدایت نانوسیال های آب- اکسید مس و آب- اکسید آلومینیم بررسی کردند. آنها دریافتند که در حالت نانو ذرات اکسید آلومینیم، تاثیر کسر حجمی در دماهای بالاتر، شدیدتر می شود.

داس و همکاران [۳۰] نیز با اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال های آب- اکسید مس و آب - اکسید آلومینیم در دماهای مختلف به بررسی این عامل پرداختند. با افزایش دما از ۲۱ تا ۵۱ درجه ی سانتیگراد در کسر حجمی ۱٪ نانوسیال آب- اکسید آلومینیم، میزان بهبود در ضریب انتقال حرارت، از ۲٪ به ۱۰/۸٪ افزایش یافت. با افزایش کسر حجمی به ۴٪ آنها مشاهده کردند که این اثر مشهودتر بوده و با همان افزایش دما، میزان بهبود ضریب انتقال حرارت از ۹/۴٪ به ۲۴/۳٪ افزایش یافت. بیشتر مقالات در این زمینه اثری مشابه این گروه را مشاهده کرده و با افزایش دما شاهد افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی بودند.

از طرف دیگر برخی مقالات به نتایجی متفاوتی اشاره می کنند بعنوان مثال، ماسودا و همکاران [۱۷] با بررسی نانو ذرات  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  در آب مشاهده کردند که با افزایش دما، ضریب هدایت کاهش می یابد. از طرفی تورگوت و همکاران [۳۱] با بررسی نانو ذرات  $TiO_2$  اثر دما را

ناچیز دیدند. البته برخی از محققان دلایلی را برای این انحرافات، ارائه می کنند. بعنوان مثال در مقاله تورگوت و همکاران [۳۱] دلیل احتمالی، استفاده نکردن از رقیق کننده است.

### ۱-۲-۴-۷ مقدار PH

تعداد مقالاتی که در زمینه تاثیر پارامتر PH وجود دارند، محدود است. بیشتر نتایج بیانگر کاهش ضریب هدایت با افزایش مقدار PH سیال پایه است؛ اما میزان این تاثیر متفاوت گزارش شده است. در حالیکه سای و همکاران [۳۲] اثر این پارامتر را بر ضریب هدایت نانوسیال اکسید مس - آب و اتیلن گلیکول بسیار چشمگیر گزارش کردند، مرشد و همکاران [۳۳] این اثر را برای نانوسیال دی اکسید تیتانیوم - آب بسیار کم و بصورت ۲٪ کاهش به ازای افزایش PH از ۳/۴ به ۹ اعلام کردند.

در عین حال ونگ و همکاران [۳۴] به یک مقدار بهینه برای مقدار PH در دو نانوسیال آب - اکسید مس و اکسید آلومینیم دست یافتند. این مقدار بهینه، برای نانو ذرات اکسید آلومینیم ۸٪ و برای نانوذرات اکسید مس ۹/۵٪ بود.

### ۱-۲-۴-۸ حرکت براونی

حرکت براونی، حرکت تصادفی ذرات معلق در یک سیال است. در نانوسیالها این حرکت تصادفی، در مقایسه با ابعاد نانو ذره حائز اهمیت شده و می تواند یکی از عوامل انتقال حرارت باشد. یک عامل دیگر که به انتقال حرارت در نانوسیال کمک می کند، اثر جابجایی سیال در ابعاد میکرو<sup>۱</sup> است که در اثر اختلاط سیال در اطراف ذره ایجاد می شود. در واقع این عامل اثر ثانویه ای از حرکت براونی است. برخی محققان حرکت براونی را حتی مهمترین عامل افزایش غیر عادی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می دانند. از جمله این افراد می توان به جنگ و چوی [۳۵]، کو و کلینستروئر [۳۶] و پریش و همکاران [۳۷] نام برد که بر این اساس مدل هایی نیز برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ارائه کرده اند.

لی و پیترسون [۳۸] به بررسی اثر حرکت براونی و جابجایی در ابعاد میکرو پرداختند. آنها جریان

---

<sup>۱</sup> Micro-convection effect



سیال را حول یک ذره، دو ذره و همچنین تعداد زیادی ذره بررسی کردند. نتایج، نشان دادند که ضریب هدایت مخلوط، برای حالتی که دو ذره نزدیک به هم در نظر گرفته شده بودند دو برابر حالت تک ذره بود و این اثر برای افزایش تعداد ذرات بیشتر شد. آنها نتیجه گرفتند که پدیده اختلاط که در اثر حرکت براونی نانو ذرات اتفاق می افتد باعث این افزایش می شود. البته آنها در مدل محاسباتی خود ذره را در ابعاد ماکرو در نظر گرفته بودند و از لغزش سرعت<sup>۱</sup> صرف نظر کرده بودند.

از طرفی برخی از محققان نیز اثر حرکت براونی را ناچیز اعلام کردند. کبیلنسکی و همکارانش [۳۹] با آنالیز ابعادی نشان دادند که مقدار نفوذ ناشی از حرکت براونی در مقایسه با نفوذ حرارتی، مقدار ناچیزی بوده و قابل صرف نظر است. اونز و همکاران [۴۰] با استفاده از شبیه سازی مولکولی<sup>۲</sup> به این نتیجه رسیدند که تحرک نانو ذرات به علت حرکت براونی آنقدر آهسته است که اهمیت چندانی در انتقال گرما از طریق نانو سیال ندارد. البته حرکت براونی نقش غیر مستقیم مهمی در تشکیل خوشه های نانو ذره که به نوبه ی خود در افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی بسیار موثر است، دارند.

### ۱-۲-۴-۹ خوشه ای شدن

نانو ذرات پس از برخورد با یکدیگر می توانند تحت شرایطی با یکدیگر ترکیب شده و ذره بزرگتری را بسازند به این پدیده خوشه ای شدن گویند. اونز و همکاران [۴۱] نشان دادند که خوشه ای شدن می تواند باعث شود که گرما در مسافت نسبتاً بیشتری در طول ذرات به هم چسبیده، با سرعت بالاتر نسبت به سرعت در محیط سیال، طی کند.

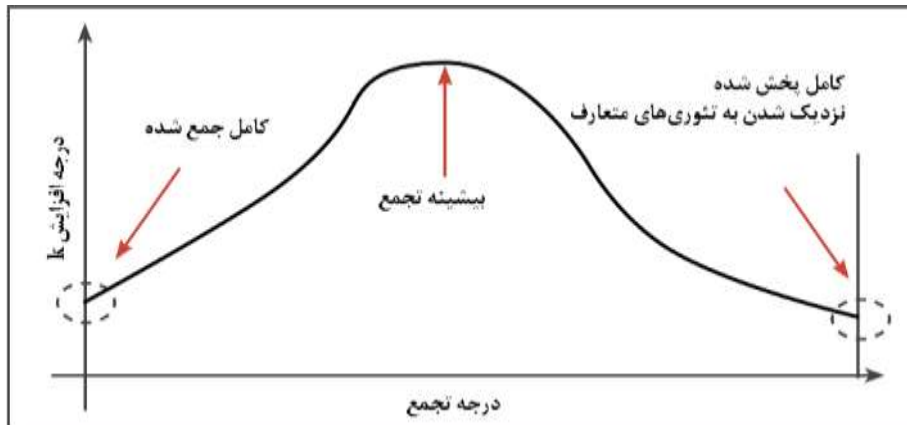
اخیراً برخی محققان به بررسی اثر انباشتگی ذرات پرداختند. آنها برای پدیده انباشتگی ذرات یک اثر دوگانه معرفی کردند. با انباشته شدن بیش از حد نانو ذرات، احتمال ته نشینی زیاد شده و ضریب هدایت کاهش می یابد. طبق بررسی های برخی محققان (پریش و همکاران [۳۷] و اونز و همکاران [۴۱]) ( یک مقدار بهینه برای مقدار بهبود ایجاد شده در ضریب هدایت حرارتی در اثر انباشتگی وجود دارد

---

<sup>۱</sup> Velocity slip

<sup>۲</sup> Molecular-level simulation

که بسیار فراتر از مقدار مربوط به توزیع یکنواخت نانو ذرات است (شکل ۱-۲) باید به این نکته نیز توجه کرد که ساختار این انباشتگی نانو ذرات نیز سست بوده و در اثر حرکت و انتقال حرارت در هم شکسته می شود [۳].



شکل ۱-۲: وجود یک مقدار بهینه برای انباشتگی نانوذرات [۴۲]

## ۱-۲-۵ دیگر مکانیزم‌های مؤثر بر انتقال حرارت

برخی از مکانیزم‌های انتقال حرارت گرچه مستقیماً بر ضریب هدایت اثر ندارد اما به انتقال حرارت در نانوسیال کمک می کنند.

### ۱-۲-۵-۱ ترموفورسیس<sup>۱</sup>

ترموفورسیس یا اثر سورت<sup>۲</sup>، در مخلوط‌های معلق ذرات و سیال ظاهر می شود. این پدیده در اثر گرادیان دما ایجاد می شود، بدین ترتیب که جنبش ملکول‌های سیال در ناحیه گرم و میزان انرژی زیاد در این ناحیه، نانو ذرات را به سمت ناحیه سرد می راند. به این ترتیب، با حرکت ذرات داغ از ناحیه گرم به ناحیه سرد، فرآیند انتقال حرارت تسریع می شود. با توجه به ابعاد ملکولهای سیال و ذره، این نیرو تنها در سرعت‌های بسیار پایین سیال و بخصوص در جریان جابجایی طبیعی حائز اهمیت می شود [۴۳].

<sup>۱</sup> Thermophoresis

<sup>۲</sup> Soret

## ۱-۲-۵-۲ دیفیوژنوفرسیس<sup>۱</sup>

دیفیوژنوفرسیس یا اسموفورسیس با حرکت ذرات از ناحیه با غلظت کم به ناحیه با غلظت زیاد اتفاق می افتد. این پدیده اصلاً مطلوب نیست و احتمال انباشتگی و غیر همگنی در توزیع نانو ذرات را زیاد می کند و با وجود آنکه بونگیورنر [۴۳] در مقاله خود ثابت کرده است که در جریان آرام، اثر این پارامتر غیر قابل صرفنظر خواهد بود، به دلیل کمبود مبانی نظری در مورد این پارامتر و تاثیر نسبتاً کمتر آن نسبت به دیگر عوامل، از این عامل، در بیشتر مطالعات انجام شده، صرفنظر شده است.

---

<sup>۱</sup> Diffusiophoresis

فصل ۲ : بررسی کارهای انجام شده

## مقدمه

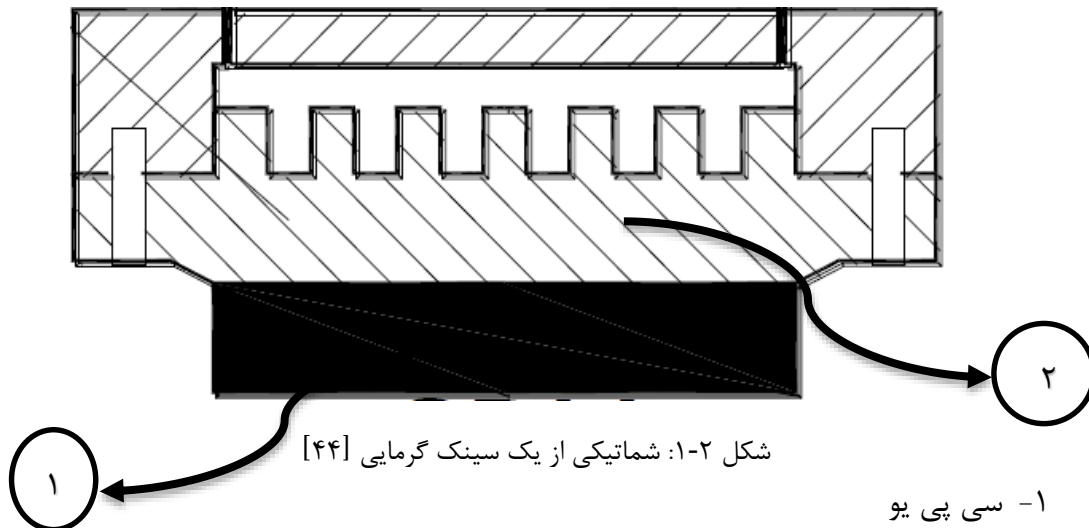
در این بخش به بررسی مقالات موجود در زمینه‌ی بررسی عددی و یا تجربی کانال‌ها و نانوسیال پرداخته خواهد شد. در انتهای فصل مقالاتی که هر دو مقوله چاه حرارتی و نانو سیال را تحت پوشش قرار می‌دهند، مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

## ۱-۲ جریان در کانال‌ها

مبدل‌های حرارتی از جمله ابزاری هستند که در صنعت دارای اهمیت فراوان بوده و طراحی مناسب آن‌ها تأثیر بسزایی در بهینه‌سازی صنایع مختلف دارد. در سالهای اخیر با توسعه روزافزون در زمینه‌های مختلف صنعتی، خصوصاً صنایع الکترونیک و نیاز به کارگیری قطعات با ابعاد خیلی کوچک، استفاده از مبدل‌های حرارتی در ابعاد میکرو یا میکرو مبدل‌ها اهمیت قابل توجهی پیدا کرده است. نکته کلیدی در این مبدل‌ها، نسبت سطح به حجم بسیار بالاست که قابلیت دفع گرمای زیادی به آن‌ها می‌دهد. سرمایه‌های یکی از دغدغه‌های تکنولوژیکی بسیار مهم در صنایعی همانند میکروالکترونیک، حمل‌ونقل، تولید و اندازه‌گیری است. راه‌های مختلفی برای دفع مؤثر نرخ گرمای زیاد تولیدشده مورد استفاده قرار می‌گیرد، از جمله می‌توان به سرمایه‌های با استفاده از هوا، مایع و سیال دوفازی اشاره کرد. سرمایه‌های هوایی به دلیل سادگی آن پرکاربردترین روش خنک کاری بیشتر قطعات الکترونیکی از یک چیپ ساده گرفته تا یک مدار کامل چاپ شده است. اما خنک کاری توسط سیال عموماً با استفاده از یک سینک گرمایی پره دار<sup>1</sup> که مساحت دفع گرما را افزایش می‌دهد صورت می‌پذیرد. گرمای تولیدشده توسط چیپ از یک پخش‌کننده گرما<sup>2</sup> عبور کرده و سپس با عبور از پره‌ها با استفاده از جابجایی اجباری سیال خنک می‌شود. (شکل ۱-۲)

<sup>1</sup> Finned heat sink

<sup>2</sup> Thermal spreader



شکل ۱-۲: شماتیکی از یک سینک گرمایی [۴۴]

- ۱- سی پی یو
- ۲- چاه حرارتی

با توجه به ضریب هدایت و ظرفیت حرارتی پایین هوا، در جاهایی که اتلاف حرارتی بیش از  $w/cm^2$  ۱۰۰ مورد نیاز باشد، قابل استفاده نخواهد بود. از طرفی، مایعات دارای خواص حرارتی برتری نسبت به هوا بوده و با استفاده از آب یا دیگر مایعات برای خنک کاری می توان محدودیت ضرایب انتقال حرارت پایین را از میان برداشت. بخصوص در مورد آب، ضریب هدایت و ظرفیت حرارتی به اندازه یک مرتبه بزرگی از هوا بیشتر است.

از میان مایعات، آب دارای مزایای دیگری نیز هست، از جمله می توان به قیمت پایین و رفتار شناخته شده آن اشاره کرد. مبدل های حرارتی به روش های مختلف از مایع برای خنک کاری استفاده می کنند: سینک های گرمایی، خنک کاری افشانه ای<sup>۱</sup> و خنک کاری با برخورد جت<sup>۲</sup>.

در سال ۱۹۸۱، تاکرمن و پیس [۴۵] برای اولین بار از یک سینک گرمایی میکرو کانال سیلیکونی که از آب جهت خنک کاری بهره می جست، استفاده کردند. در واقع استفاده از مایع در میکرو کانال های سیستم خنک کاری پردازشگرها اولین بار توسط آنها معرفی گردید و سپس توسط محققان متعدد مورد بررسی قرار گرفت.

گااو و همکاران [۴۶] به بررسی اثرات ابعادی مختلف جریان مایع در میکرو کانال پرداختند. آنها

<sup>۱</sup> Spray cooling

<sup>۲</sup> Jet impingement cooling

به دلیل پراکندگی در نتایج ارائه شده در مورد اثرات ابعادی در میکرو کانال سعی در بررسی دقیق آن‌ها به صورت تجربی و تحلیلی داشتند. بدین منظور یک سیستم آزمایشگاهی<sup>۱</sup> برای بررسی کانال دوبعدی طراحی کردند که قابلیت بررسی کانال‌هایی با ارتفاع ۰/۱ میلی‌متر تا ۱ میلی‌متر را داشت. نتایج آن‌ها نشان داد که برای ارتفاع کانال‌های بزرگ‌تر از ۰/۴ میلی‌متر قوانین کلاسیک هیدرودینامیک و انتقال حرارت همخوانی خوبی با نتایج تجربی داشت ولی برای ارتفاع کانال‌های کمتر، کاهش شدیدی در عدد ناسلت اندازه‌گیری شده مشاهده شد و عدد پوازی روند خود را حفظ کرد. در ارتفاع کانال ۰/۱ میلی‌متر این کاهش در عدد ناسلت تا ۶۰٪ گزارش شد. همچنین نتایج نشان داد که انتقال از رژیم آرام به مغشوش از ابعاد کانال تأثیر نمی‌پذیرد.

باویر و همکاران [۴۷] به بررسی عددی و تجربی جریان و انتقال حرارت دوبعدی سیال در میکرو کانال پرداختند. آن‌ها در حقیقت دو کار قبلی این گروه که تحت رهبری فاور مارینت بود را ادامه دادند. آن‌ها رژیم‌های جریان آرام در حال توسعه، ناحیه انتقال و آشفته ( $200 < Re < 8000$ ) را مورد مطالعه قرار دادند. همانند کارهای قبلی با کاهش ارتفاع کانال، یک کاهش شدید در عدد ناسلت مشاهده شد که با بررسی‌هایی که انجام شد، این امر مشکل در اندازه‌گیری دمای سطح مشترک جامد و مایع اعلام شد. با در نظر گرفتن این میزان خطا و محاسبه مجدد عدد ناسلت مقدار جدید با قوانین کلاسیک کانال‌های متداول مطابقت داشت.

لی و همکاران [۴۸] به بررسی تجربی و عددی جریان درون میکرو کانال پرداختند تا قابلیت تئوری کلاسیک که برای کانال‌هایی با ابعاد متداول استفاده می‌شد را برای بررسی رفتار حرارتی میکرو کانال مورد ارزیابی قرار دهند. سینک گرمایی از جنس مس بوده و عمق کانال ۵ برابر عرض آن بود. نتایج آن‌ها نشان داد که در محدوده اعداد رینولدز در نظر گرفته شده (۳۰۰ تا ۳۵۰۰) داده‌های تجربی همخوانی خوبی با نتایج به دست آمده از روش‌های کلاسیک مبتنی بر فرض پیوستگی دارد. آن‌ها برای

---

<sup>۱</sup> Experimental setup

حل معادلات از نرم افزار Fluent استفاده کردند.

مکرانی و همکاران [۴۹] به بررسی تجربی جریان درون یک میکرو کانال مستطیلی طویل پرداختند. بررسی نتایج هیدرودینامیکی و گرمایی نشان داد که با تغییر قطر هیدرولیکی از ۱ میلیمتر تا ۱۰۰ میکرومتر داده‌های تجربی استخراج شده با نتایج به دست آمده از روابط کلاسیک کانال‌های در ابعاد بزرگ مطابقت دارد. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که برای میکرو کانال‌هایی با دیواره هموار و قطرهای هیدرولیکی بزرگ‌تر و مساوی ۱۰۰ میکرومتر، قوانین و روابط جریان و انتقال حرارت جابجایی (ناویر – استوکس) قابل استفاده است.

با توجه به پراکندگی نتایج موجود در زمینه‌ی میکرو کانال، محققان مختلف به بررسی و تحلیل نتایج موجود مقالات تجربی پرداخته و با بحث در زمینه‌ی دلایل انحرافات دیده شده، به مقایسه توجیه‌های متعدد ارائه شده در این مقالات پرداختند.

## ۲-۲ نانو سیال

در زمینه‌ی جریان و انتقال حرارت نانو سیال نیز تحقیقات تجربی و عددی مختلفی صورت گرفته است. لازم به ذکر است که کارهای تجربی و عددی محدودی در مورد جریان در کانال مستطیلی وجود دارد و بیشتر مقالاتی که در این بخش به آن‌ها اشاره خواهد شد، در مورد هندسه دایروی می‌باشند. ژوان و روتزل [۵۰] بر این اساس که نانو سیال بیشتر شبیه به یک سیال تک فاز عمل می‌کند تا یک مخلوط جامد – مایع، دو مدل مختلف برای تحلیل انتقال حرارت آن ارائه دادند. آن‌ها اثر خصوصیات انتقال و پراکندگی گرمایی را بر نانو سیال در نظر گرفتند. مدل اول آن‌ها یک مدل تک فازی و مدل دوم مدل چند فازی و پراکندگی بود.

ژوان و لی [۵۱] یک الگو برای تولید نانو سیال ارائه داده و چند نانو سیال را به این روش تولید کردند. آن‌ها همچنین یک مدل برای توصیف کارایی حرارتی جریان نانو سیال در درون یک لوله ارائه دادند که پخش نانو ذرات را نیز در نظر می‌گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن نانو ذرات باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال می‌شود. به عنوان مثال افزایش کسر حجمی از ۲/۵٪ به ۷/۵٪ باعث



افزایش نسبت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به سیال پایه از ۱/۲۴ به ۱/۷۸ می‌شود.

ژوان و لی [۵۱] به بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی نانو سیال آب - مس در یک لوله در رژیم جریان مغشوش پرداختند. محدوده اعداد رینولدز در نظر گرفته‌شده، ۱۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰۰ و کسرهای حجمی بین ۰ تا ۲ درصد بود. نتایج حاکی از بهبود چشمگیر در عدد ناسلت و تغییر بسیار ناچیز ضریب اصطکاک در اثر افزودن نانو ذرات بود. آن‌ها با در نظر گرفتن عوامل مختلف مؤثر بر بهبود عدد ناسلت، یک رابطه نیمه تجربی برای عدد ناسلت ارائه دادند.

دینگ و همکاران [۵۲] به بررسی تجربی نانو سیال‌های مختلف پرداختند. نانو سیال‌های در نظر گرفته‌شده عبارت بودند از: نانو ذرات تیتانیوم در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول، نانولوله‌های تیتانیوم و همچنین کربن در آب و نانو ذرات الماس در آب. نتایج نشان دادند که به جز نانو سیال تیتانیوم - اتیلن گلیکول مابقی نانو سیال‌ها غیر نیوتنی رفتار می‌کنند. در تمامی نانو سیال‌ها بهبود قابل توجهی در ضریب انتقال حرارت هدایتی و جابجایی مشاهده شد. در نانو سیال تیتانیوم و نانولوله کربن و تیتانیوم در آب، بهبود در ضریب انتقال حرارت جابجایی بسیار بیشتر از بهبود در انتقال حرارت هدایتی بود. آن‌ها در مورد مکانیزم‌های ممکن برای توجیه ناهمخوانی بین نتایج بحث کردند و در بین مکانیزم‌های موجود، اثر جابه‌جایی نانو ذرات بر ضخامت لایه مرزی و ضریب هدایت حرارتی مهم‌ترین عوامل از دیدگاه نتایج تجربی شناخته شدند.

لازم به ذکر است در دهه گذشته تلاش‌های زیادی برای درک چگونگی بهبود ضریب انتقال حرارت هدایتی در نانو سیال صورت گرفت، یکی از ایده‌هایی که توسط برخی محققان مورد تأیید قرار گرفته است، این است که خوشه‌ای (کلوخه‌ای) شدن نانو ذرات عامل اصلی این بهبود است [۵۳].

لای و همکاران [۵۴] به بررسی تجربی کارایی نانو سیال در انتقال حرارت جابجایی پرداختند. آن‌ها ضریب انتقال حرارت را در هر دو ناحیه در حال توسعه و توسعه‌یافته جریان آرام نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم مورد بررسی قرار دادند. مقطع جریان، یک لوله تنها به قطر ۱/۰۲ میلی‌متر بود که به‌وسیله جریان الکتریسیته شار حرارتی ثابت برای آن تأمین می‌شود. آن‌ها خصوصیات نانو سیال

همانند مقدار PH، هدایت الکتریکی، ابعاد ذره و پتانسیل زتای آن را نیز مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از مناسب بودن نانو سیال برای سینک های گرمایی مدرن بود. نتایج همچنین نشان داد که در کسر حجمی های بالاتر طول ورودی افزایش می یابد.

ایزدی و همکاران [۵۵] جریان آرام نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم را در فضای بین دو استوانه به صورت دوبعدی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده، پروفیل سرعت محوری بدون بعد با افزایش کسر حجمی نانو ذرات چندان تغییر نمی کند. آن ها ادعا کردند که هرگاه اندازه بزرگی انرژی گرمایی بزرگ تر از انرژی ممنتوم افزایش می یابد، این وابستگی به کسر حجمی کاهش می یابد.

هریس و همکاران [۵۶] جریان آرام نانو سیال اکسید آلومینیوم - آب را در یک کانال با مقطع مثلثی بررسی کردند. آن ها از روش اجزاء محدود استفاده کردند. نتایج، حاکی از بهبود انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی و کاهش قطر بود و همچنین در اعداد رینولدز بالاتر میزان بهبود افزایش یافت.

## ۲-۳ نانو سیال در چاه حرارتی

با توجه به این که موضوع این پایان نامه بررسی جریان نانو سیال در چاه حرارتی است، مقالاتی مختص این موضوع در این بخش به صورت مجزا مورد مطالعه قرار می گیرند.

مشکل عمده کامپیوترهای بزرگ تولید گرمای زیاد در حین کار کردن است که باید از یک مکانیزم مناسب که قابلیت جذب متناسب گرما را دارد استفاده کرد [۵۷].

بر اساس مطالعات انجام شده توسط آقای رفعتی و همکاران [۵۸] در زمینه ی خنک کاری قطعات کامپیوتری، استفاده از مایعات روش مناسبی است که علاوه بر افزایش انتقال حرارت نسبت به فن کاهش صدای فن را به همراه دارد. خنک کاری با مایعات می تواند همزمان برای خنک کاری CPU، کارت گرافیک و مدارات و... استفاده شود. نانو سیال یک مخلوط همگن از نانو ذرات و مایعات پایه است. نانو سیال ها نوع جدیدی از ترکیب مواد در صنعت نانو فناوری می باشند که تا حد زیادی در دهه گذشته برای افزایش هدایت حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است. پژوهش ها نشان می دهد که استفاده از این سیالات تأثیر بسزایی بر انتقال حرارت جابه جایی سیال خواهد داشت، خواص نانو سیال در

مقایسه با سیال پایه برای طراحی سیستم‌های انتقال حرارت به مراتب بهبود می‌یابد که اندازه این نانو ذرات معمولاً کمتر از ۱۰۰ نانومتر است [۵۹].

مطالعات کمی بر روی تأثیر نانو سیال بر بهبود انتقال حرارت در CPU انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به رفعتی و همکاران [۵۸] اشاره کرد. آن‌ها از نانو سیال مس بجای سیال پایه استفاده کردند.

کوربیز و همکاران [۴۴] نیز تأثیر نانو سیال آب-آلومینا را در خنک کاری چیپست‌های کامپیوتری مورد بررسی قرار دادند، نتایج آن‌ها حاکی از افزایش انتقال حرارت درازای مصرف بیشتر انرژی پمپ بود.

یکی از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در این زمینه توسط نظری و همکاران [۱۲] انجام شده است، این محققین نشان دادند که استفاده از نانو سیالاتی نظیر CNT و آلومینا تأثیر بسزایی بر انتقال حرارت در CPU نسبت به اتیلن گلیکول داشته است.

عرض پره‌های شش‌ضلعی بر مقاومت در برابر حرارت و افت فشار توسط آقای یاقوت و همکارانش [۶۰] مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی انتقال حرارت و خصوصیات جریان سیال در سطوح پره دار توسط آقای دیدارول انجام شده است [۶۱].

## ۲-۴ جمع‌بندی

با بررسی کارهای انجام شده می‌توان نکات زیر را برداشت کرد:

۱- عموم مقالات موجود در زمینه‌ی مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت نانو سیال در یک هندسه محدود هست.

۲- بیشتر مقالات به ابعاد خاصی از کانال اختصاص دارند و اثر هندسه را در نظر نمی‌گیرند.

۳- با بررسی مقالات موجود در هیچ هندسه‌ای از محیط متخلخل<sup>۱</sup> برای بهبود عمل خنک کاری استفاده نشده است.

با توجه به مطالعات انجام شده و اهمیت خنک کاری سیالات در چاه حرارتی‌ها، در این پایان‌نامه به بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی در قطعات الکترونیکی، سی پی یو و... توسط نانو سیال آب-آلومینا و سیال آب مقطر پرداخته شده است. به صورتی که از سه هندسه متفاوت در شرایط یکسان استفاده شده است که برای مقایسه پارامترهای انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرند. نانو سیال مورد آزمایش با دو کسر حجمی ۰/۱ و ۰/۲ درصد با روش دومرحله‌ای ساخته شده است. در نهایت عدد ناسلت، دمای دیواره چاه حرارتی، LMTD و مقاومت حرارتی سیالات مختلف و هندسه‌های مختلف رو باهم مقایسه کرده‌ایم.

## ۲-۵ توصیف مساله

هدف این تحقیق مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر بهبود انتقال حرارت در چاه حرارتی که جهت خنک کاری قطعات الکترونیکی استفاده می‌شوند، است. به این منظور سعی می‌شود از تغییر در ساختار عملکردی چاه حرارتی (از جمله تغییر هندسه و یا تغییر سیال خنک‌کار) جهت بهبود راندمان آن استفاده شود. آرایش درونی چاه حرارتی با استفاده از روشی مانند پرکردن با ماده متخلخل و آرایش‌های مختلف تغییر می‌کند، می‌دانیم که استفاده از مواد متخلخل جهت افزایش انتقال حرارت در کنار روش‌هایی همچون استفاده از سیالات جایگزین مثل نانوسیالات به تازگی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. این تحقیق به صورت ویژه بر روی استفاده از نانوسیال بعنوان سیال جایگزین خنک‌کار تمرکز خواهد داشت. نانوسیال مورد استفاده نانو سیال آب-آلومینا می‌باشد، سیکل انجام آزمایش شامل یک هیتر (که عملکرد شبیه سازی قطعه الکترونیکی را انجام می‌دهد)، یک چاه حرارتی بعنوان قطعات اصلی می‌باشد، که سیال درون چاه حرارتی جریان یافته و دمای آن در ورودی و خروجی اندازه

---

<sup>۱</sup> porous

گیری خواهد شد، از طرف دیگر دمای سطح هیتر با گذشت زمان اندازه گیری و بعنوان یکی از پارامترهای اصلی گزارش خواهد شد. از اطلاعات بدست آمده ضریب جابه‌جایی و عدد ناسلت سیال برای هر سیال مورد استفاده و دبی های متفاوت نیز مورد توجه قرار خواهد گرفت، که می‌تواند بیانگر مناسبی از تغییرات میزان انتقال حرارت در اثر تغییر پارامترهای مختلف باشد.

## ۶-۲ نوآوری

بررسی های انجام شده نشان می دهد که توجه به راندمان جاذب حرارتی و مصرف انرژی آنها بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

- در این پژوهش استفاده از نانوسیال بعنوان یکی از ایده‌های جدید استفاده می‌شود.
- در این پژوهش سعی خواهد شد از تغییرات در هندسه و مواد متخلخل بعنوان ایده‌های جدید بهره برداری شود.

## ۷-۲ روند عملکرد در این پایان نامه

در این پایان‌نامه، ابتدا کارهای انجام شده در این رساله مورد بررسی قرار گرفت. ( فصل دوم) سپس به بررسی تعیین خواص نانو سیال (در فصل سوم) و در ادامه به معرفی تجهیزات آزمایشگاهی، روش آزمایش، معرفی چاه‌های حرارتی و معادلات مربوط به آن و آماده سازی نانوسیال (در فصل چهارم) پرداخته می‌شود. فصل پنجم به نتایج و تحلیل نمودارها پرداخته و نهایتاً فصل ششم به نتیجه گیری و ارائه پیشنهادها اختصاص دارد.

## فصل ٣ : تعیین خواص نانوسیال

## مقدمه

یکی از زمینه‌های مرتبط با نانوسیال که محققان زیادی را به سمت خود جلب کرده است، تعیین خواص تغییر یافته سیال در اثر حضور نانو ذرات است. در جدول ۱-۳ خواص برخی سیال ها و نانو ذرات آورده شده است. همانطور که در فصل‌های قبلی نیز اشاره شد، با توجه به تغییر غیر طبیعی خواص نانوسیال، بخصوص ضریب انتقال حرارت هدایتی و لزجت دینامیکی، تلاش‌های زیادی در جهت شناخت مکانیزم‌هایی که باعث این اختلاف‌ها می‌شوند؛ و دستیابی به رابطه مناسب برای تعیین این خصوصیات صورت گرفته است. در این فصل به بررسی برخی از اهم روابط ارائه شده در مقالات موجود پرداخته می‌شود.

جدول ۱-۳: خواص بعضی سیال‌ها و نانوذرات [۶۲] و [۱۲]

خاصیت	فاز مایع (آب)	فاز مایع (اتیلن گلیکول)	فاز جامد ( $Al_2O_3$ )	فاز جامد (Cu)	فاز جامد (CuO)	فاز جامد ( $TiO_2$ )
$C_p(J/kgK)$	۴۱۷۹	۲۴۱۵	۷۶۵	۳۸۳	۵۴۰	۶۸۶/۲
$\rho(kg/m^3)$	۹۹۷/۱	۱۱۱۴	۳۹۷۰	۸۹۵۴	۶۵۱۰	۴۲۵۰
$K(W/mK)$	۰/۶	۰/۲۵۲	۳۶	۴۰۰	۱۸	۸/۹۵۴
$\beta \times 10^{-5} (K^{-1})$	۲۱	۴۸/۳۶	۰/۶۳	۱/۶۷	۰/۲۷	۰/۹
$\mu \times 10^{-4} (kg/ms)$	۸/۹	۱۵۷	-	-	-	-

## ۱-۳ چگالی

بر اساس فیزیک حاکم بر مخلوط دو ماده رابطه زیر برای چگالی مخلوط بدست خواهد آمد:

$$\rho_{nf} = \left( \frac{m}{v} \right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{v_f + v_p} = \frac{\rho_f v_f + \rho_p v_p}{v_f + v_p} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_p \quad (1-3)$$

بنابراین:

$$(\rho)_{nf} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_p \quad (2-3)$$

که در آن  $m$ ،  $v$  و  $\varphi$  به ترتیب جرم، حجم مخصوص و کسر حجمی می‌باشد، و اندیس‌های  $nf$ ،  $f$  و

$P$  به ترتیب بیانگر خصوصیات مربوط به نانوسیال، سیال و نانوذره است.

### ۲-۳ ظرفیت گرمای ویژه

برای تعیین ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال از دو روش مختلف استفاده شده است. روش اول رابطه ای مشابه با رابطه فوق برای چگالی نانوسیال براساس تئوری مخلوط است که توسط پک و چو [۶۲] پیشنهاد شده است :

$$(C_p)_{nf} = (1-\varphi)c_{pf} + \varphi c_{pp} \quad (۳-۳)$$

و مدل دیگر مدل پیشنهادی توسط ژوان و روتزل [۵۰] است که با فرض تعادل گرمایی بین نانو ذرات و سیال پایه استخراج شده است :

$$\begin{aligned} (\rho c_p)_{nf} &= \rho_{nf} \left( \frac{Q}{m\Delta T} \right)_{nf} = \rho_{nf} \frac{Q_f + Q_p}{(m_f + m_p)\Delta T} \\ &= \frac{(\rho c_p)_f v_f + (\rho c_p)_p v_p}{\rho_f v_f + \rho_p v_p} = (1-\varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_p \end{aligned} \quad (۴-۳)$$

و بنابراین:

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_p \quad (۵-۳)$$

و لذا:

$$C_{p,nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_p}{\rho_{nf}} \quad (۶-۳)$$

که در این معادلات،  $\varphi$  کسر حجمی نانو ذرات و زیر نویس های  $f$ ،  $nf$  و  $p$  به ترتیب بیانگر خصوصیات مربوط به سیال، نانو سیال و نانو ذرات هستند. برخی مقالات به بررسی و مقایسه دو مدل تعیین گرمای ویژه پرداخته و برخی مدل‌های جدیدی ارائه دادند.

### ۳-۳ ضریب انبساط حرارتی

مشابه ظرفیت گرمایی ویژه با رابطه زیر تعیین می شود:

$$\beta_{nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho\beta)_p + \varphi(\rho\beta)_f}{\rho_{nf}} \quad (۷-۳)$$



### ۳-۴ ضریب هدایت حرارتی

در زمینه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، یکی از روابط پر کاربرد برای ذرات کروی، رابطه ماکسول [۱] است که براساس تئوری محیط موثر<sup>۱</sup> بنا نهاده شده است:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} \quad (۸-۳)$$

که در آن  $k_f$  ضریب هدایت حرارتی سیال،  $k_p$  ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات و  $k_{nf}$  ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می باشند. با وجود آنکه این رابطه تنها ضریب هدایت را بصورت تابعی از کسر حجمی و ضریب هدایت اجزا تعیین می کند، اما واضح است که با افزایش نسبت سطح به حجم ذره، باید ضریب هدایت مخلوط افزایش یابد. بعنوان مثال، برای ذره‌ای با قطر کوچک تر از ۲۰ نانومتر حدود ۲۰٪ از اتم‌ها در سطح آن قرار می گیرند و این امر باعث انتقال آسان تر حرارت بین ذره و سیال می شود، این در حالی است که رابطه ماکسول قادر به بررسی این اثر نیست. همیلتون و کروسر [۶۳]، رابطه جامعتری را ارائه دادند که قادر به بررسی اثر شکل ذره بر ضریب هدایت مخلوط می باشد:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f + (n-1)(k_p - k_f)\phi}{k_p + (n-1)k_f - (k_p - k_f)\phi} \quad (۹-۳)$$

که در آن  $n$ ، ضریب شکل نانو ذرات بوده و از رابطه زیر بدست می آید:

$$n = \frac{3}{\Psi} \quad (۱۰-۳)$$

$\Psi$  نسبت مساحت سطح کره ای با حجم معادل حجم نانو ذره به مساحت سطح ذره است. برای نانو ذرات کروی  $n=3$  می شود و رابطه فوق معادل رابطه ماکسول خواهد شد. دو رابطه فوق این عیب بزرگ را دارند که اثر ابعاد یا قطر ذرات را در نظر نمی گیرند. مقدار ضریب هدایت حرارتی که از مدل های فوق بدست می آید نسبت به مقادیر تجربی کمتر بوده و مقدار خطا با افزایش کسر حجمی افزایش می یابد. بیشتر بررسی های انجام شده برای یافتن دلایل این اختلاف ها، بیانگر وجود مکانیزم

<sup>۱</sup> Effective medium theory

هایی برای انتقال حرارت در نانوسیال است که در ابعاد بزرگ چندان اهمیت نداشته است. از آن جمله می توان به حرکت براونی، خوشه‌ای شدن ذرات با هم چسبیدن آنها، تشکیل لایه نازک سیال در اطراف نانو ذره و تقویت ضریب هدایت حرارتی آن اشاره کرد.

### ۳-۴-۱ مدل‌های مبتنی بر حرکت براونی

جنگ و چوی [۴۲] اثر حرکت براونی بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را بررسی کردند. مدل ارائه شده، تابعی از ضریب هدایت سیال و ذره و ابعاد ذره بود. آنها چهار روش برای انتقال انرژی در نانوسیال معرفی کردند: انتقال حرارت هدایتی در سیال پایه، انتقال حرارتی هدایتی در نانو ذره، برخورد نانو ذرات بر اثر حرکت براونی و انتقال حرارت جابجایی در ابعاد میکرو<sup>۱</sup> به علت حرکت تصادفی نانو ذرات، آنها با بررسی ابعادی این پارامترها به این نتیجه رسیدند که در بین این روشها، برخورد بین نانو ذرات قابل صرفنظر بوده و با در نظر گرفتن این سه روش، معادله نهایی ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال بصورت زیر تعریف می شود:

$$k_{nf} = k_f (1 - \varphi) + k_p^* \varphi + 3c_1 \frac{d_f}{d_p} k_f Re_d^2 Pr_f \varphi \quad (11-3)$$

که در آن  $c_1$  ضریب تناسب،  $d_f$  قطر مملکول های سیال،  $d_p$  قطر نانوذرات،  $Pr_f$  عدد پرانتل سیال پایه و ضریب هدایت حرارتی نانو ذره با در نظر گرفتن اثر مقاومت تماسی کاپیتزا<sup>۲</sup> می باشند:

$$k_p^* = \beta k_p \quad (12-3)$$

که  $\beta$  یک مقدار ثابت است عدد رینولدز بصورت زیر تعریف می شود:

$$Re_d = \frac{\bar{C}_{R.M.} \cdot d_p}{\nu_f} \quad (13-3)$$

که  $\bar{C}_{R.M.}$  سرعت حرکت تصادفی نانو ذرات و  $\nu_f$  لزجت سینماتیکی سیال پایه می باشند.

با استفاده از معادله زیر تعیین می شود:

$$\bar{C}_{R.M.} = \frac{D_o}{\lambda_f} \quad (14-3)$$

<sup>۱</sup> Micro-convection

<sup>۲</sup> kapitza

که  $\lambda_f$  فاصله آزاد میانگین ملکول های سیال پایه بوده و  $D_0$  ضریب نفوذ نانو ذرات است که با استفاده از رابطه زیر قابل تعیین است (انیشترین [۶۴])

$$D_0 = \frac{k_B T}{3\pi\mu_f d_p} \quad (۱۵-۳)$$

که  $k_B$  ثابت بولتزمن،  $T$  دما بر حسب کلوین و  $\mu_f$  لزجت دینامیکی سیال پایه می باشند. در بدست آوردن معادله فوق، آنها ضخامت لایه مرزی حرارتی حول نانو ذره را برابر  $3d_f/Pr$  در نظر گرفتند که  $d_f$  قطر ملکول های سیال پایه است.

پریشر و همکاران [۳۷] انتقال حرارت جابجایی که به علت حرکت براونی، نانو ذرات ایجاد می شود را عامل اصلی بهبود ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال معرفی کردند. آن ها با استفاده از این تئوری، یک مدل ماکسول توسعه یافته را ارائه دادند که اثر جابجایی سیال به علت حرکت براونی را در نظر می گیرد:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = (1 + ARe^m Pr^{0.333} \varphi) \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\varphi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\varphi} \quad (۱۶-۳)$$

که  $A$  و  $m$  ثابت هایی هستند که از نتایج تجربی بدست می آیند. عدد رینولز در رابطه فوق بصورت زیر تعریف می شود:

$$Re = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{18k_b T}{\pi\rho_p d_p}} \quad (۱۷-۳)$$

در مقایسه نتایج بدست آمده از مدل با نتایج تجربی برای آب نشان داده شد که با استفاده از  $m = 2/6$  برای کسر حجمی  $\varphi = 4\%$   $m = 2/4$  برای کسر حجمی  $\varphi = 1$ ،  $A = 40000$  برای هر دو حالت، در دماهای مختلف سازگاری مناسبی بین نتایج وجود دارد. برای سیال اتیلن گلیکول، مقدار  $A$  تغییر نکرده و مناسب ترین مقدار برای  $m$  توسط نگارندگان مقاله  $m = 1/6$  پیشنهاد شده است. البته این مقادیر با تغییر قطر نانو ذره تغییر می کنند. پریشر و همکاران [۳۷] در مقاله دیگر به بررسی این اثرات پرداخته و نشان دادند که بعنوان مثال برای نانوسیال اتیلن گلیکول و ذرات اکسید آلومینیم، با قطر نانو ذرات از ۱۵ نانومتر تا ۳۰۲ نانومتر مقدار  $m$  از  $1/8$  به  $1/5$  کاهش می یابد. پریشر و همکاران

[۳۷] مدل خود را مدل براونی چند کره‌ای<sup>۱</sup> نامیدند.

کو و کلینستروئر [۳۶] یک معادله برای ضریب هدایت نانوسیال ارائه دادند که اثر ابعاد ذره، حجم ذره و وابستگی به دما را در کنار جنس ذره و سیال لحاظ می‌کند. مدل آنها یک مدل دینامیکی است که ضریب هدایت را به دو بخش استاتیکی و مکمل تقسیم می‌کند:

$$k_{nf} = k_{static} + k_{brownian} \quad (۱۸-۳)$$

بخش استاتیکی با استفاده از مدل ماکسول محاسبه می‌شود:

$$\frac{k_{static}}{k_f} = 1 + \frac{3 \left( \frac{k_p}{k_f} - 1 \right) \varphi}{\left( \frac{k_p}{k_f} + 2 \right) - \left( \frac{k_p}{k_f} - 1 \right) \varphi} \quad (۱۹-۳)$$

با در نظر گرفتن دو ذره که در دماهای  $T_1, T_2$  در تعادل گرمایی باشند  $\Delta T = T_2 - T_1$  این

ذرات با حرکت به سمت ذرات همسایه مقداری انرژی با خود حمل می‌کنند:

$$q_{net} = \frac{\Delta Q}{A \Delta T} \approx -\gamma \varphi \rho_p c_v \bar{v} D \Delta T = -k_{brownian} \Delta T \quad (۲۰-۳)$$

که  $A$  مساحت،  $\gamma$  احتمال حرکت ذره در هر جهت  $c_v$  گرمای ویژه ذره در حجم ثابت و

$k_{brownian}$  مقدار ضریب هدایت اضافه شده به علت حرکت براونی یک نانو ذره کروی می‌باشند. با

استفاده از سرعت متوسط زمانی حرکت براونی و بررسی اثر حرکت براونی بر سیال ضریب هدایت

حرارتی حرکت براونی بصورت زیر ارائه شد [۳۶]:

$$k_{brownian} = 5 \times 10^4 \beta \varphi \rho_f c_{pf} \sqrt{\frac{k_b T}{\rho_p d_p}} f(T, \varphi) \quad (۲۱-۳)$$

توابع  $f, \beta$  با استفاده از نتایج تجربی استخراج می‌شوند و به این منظور در معادله قرار داده شده

اند که اثر تقابل ذرات سیال و نانو ذرات بر اثر حرکت براونی و در نتیجه وابستگی شدید به دما لحاظ

شود. در ادامه کار آنها، لای [۶۵] مدل را تغییر داد تا اثر مقاومت حرارتی سطح مشترک بین نانو ذره و

سیال را در نظر بگیرد. براساس نتایج تجربی ویلسون و همکاران [۶۶] مقدار این مقاومت برای نانو

<sup>۱</sup> Multi-sphere Brownian model

ذرات و سیال های مختلف بین دو مقدار پایین ( $R_f \approx 0.77 \times 10^{-8} kmw^{-1}$ ) و بالای ( $R_f \approx 20 \times 10^{-8} km^r w^{-1}$ ) تغییر می کند. لای [۶۷] از مقدار  $4 \times$  ( $R_f \approx 4 \times 10^{-8} km^r w^{-1}$ ) استفاده کرد. برای در نظر گرفتن اثر این مقاومت، لای در بخش ضریب هدایت استاتیک از مقدار تغییر یافته ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات استفاده کرد که با معادله زیر محاسبه می شود:

$$R_f + \frac{d_p}{k_p} = \frac{d_p}{k_{p,eff}} \quad (22-3)$$

همچنین با ترکیب دو تابع  $f, \beta$ ، تابعی جدید به نام  $g$  جایگزین کرد که اثر قطر ذره، دما و کسر

حجمی را در نظر می گیرد. در نهایت برای سیال پایه آب، تابع فوق بصورت زیر تعریف شده است:

$$g = (a + b \ln(d_p) + e \ln(\varphi) + d \ln(\varphi) \ln(d_p) + e \ln(d_p)^2) \ln(T) + (h + i \ln(d_p) + j \ln(\varphi) + k \ln(\varphi) \ln(d_p) + l \ln(d_p)^2) \quad (23-3)$$

که مقادیر ثابت های فوق براساس نتایج تجربی طبق جدول زیر مورد استفاده قرار می گیرند:

جدول ۳-۲: جدول ضرایب ثابت برای مدل کو و کلینستروتر [۳۶]

ضریب	آب - اکسید آلومینیوم	آب - اکسید مس
a	52.813488759	-26.593310846
b	6.115637295	-0.403818333
c	0.6955745084	-33.3516805
d	0.04174555528	-1.915825591
e	0.176919300241	0.0642185846658
h	-298.19819084	48.40336955
i	-34.532716906	-9.787756683
j	-3.9225289283	190.245610009
k	-0.2354329626	10.9285386565
l	-0.999063481	-0.72009983664

واجها و داس [۶۷] براساس مدل کو و کلینستروتر [۳۶] و داده های تجربی خود برای نانو ذرات

مختلف در قطرها و دماهای مختلف در مخلوط ۶۰٪ اتیلن گلیکول و ۴۰٪ آب، مدل جدید را بنا نهادند

که از لحاظ ساختار دقیقاً با مدل کو و کلینستروتر [۳۶] یکسان است:

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\varphi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\varphi} k_f + 5 \times 10^4 \beta \varphi \rho_f c_{pf} \sqrt{\frac{k_b T}{\rho_p d_p}} f(T, \varphi) \quad (24-3)$$

$$f(T, \varphi) = (2.8217 \times 10^{-2} \varphi + 3.917 \times 10^{-3}) \left( \frac{T}{T_0} \right) + (-3.0669 \times 10^{-2} \varphi - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (25-3)$$

و مقادیر ضریب ثابت  $\beta$  برای نانو ذراتی در قطرهای بین ۲۹ تا ۷۷ نانومتر مطابق جدول زیر بدست

می آید:

جدول ۳-۳: ضریب ثابت  $\beta$  برای مدل ضریب هدایت حرارتی واجها و داس [۶۷]

ماده	$\beta$	غلظت	دما
$Al_2O_3$	$8.4407(100\varphi)^{-1/07304}$	$\%1 \leq \varphi \leq \%10$	$298 \leq T \leq 363K$
ZnO	$8.4407(100\varphi)^{-1/07304}$	$\%1 \leq \varphi \leq \%7$	$298 \leq T \leq 363K$
CuO	$9.881(100\varphi)^{-1/9446}$	$\%1 \leq \varphi \leq \%6$	$298 \leq T \leq 363K$

مدل دیگر، مدل چون و همکاران [۶۸] است که توسط برخی مقالات مورد تایید قرار گرفته است [۲۴]:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7 \varphi \left( \frac{d_f}{d_p} \right)^{0.369} \left( \frac{k_f}{k_p} \right)^{0.7476} pr^{0.9955} Re^{1.2321} \quad (26-3)$$

در معادلات فوق،  $d_f$  و  $d_p$  قطر متوسط نانو ذرات و قطر ملکول های سیال پایه هستند.

$$Re = \frac{\rho_f k_b T}{3\pi \mu_f^2 \lambda_f} \quad \text{و} \quad pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \quad K_B$$

ثابت بولتزمن و  $\lambda_f$  مسافت آزاد میانگین مولکول های آب است که در این مقاله طبق پیشنهاد چون

وهمکاران [۶۸]، ۱۷ نانومتر در نظر گرفته می شود. آنها این مدل را برای نانوسیال آب-اکسید

آلومینیوم و آب-اکسید مس ارائه دادند. برای آب، لزجت دینامیکی بصورت تابعی از دما به شکل زیر

مورد استفاده قرار می گیرد:

$$\mu_f = A \times 10^{B/(T-C)} \quad (27-3)$$

که مقادیر ثابت  $C, B, A$  به ترتیب عبارتند از  $10^{-5} \times 2/414$ ،  $247/8$  و  $140$  و دمای  $T$  بر حسب

کلوین است. سرعت براونی ذرات با استفاده از رابطه زیر تعیین می شود (انیشیتین [۶۴]):

$$V_{Br} = \frac{k_B}{3\pi \mu_f d_p \lambda_f} = \frac{k_B}{3\pi d_p \lambda_f} \cdot \frac{T}{A \cdot 10^{B/(T-C)}} \quad (28-3)$$

پتل و همکاران [۶۹] نیز مدل دیگری را براساس حرکت براونی بنا نهادند. در مدل آنها ضریب

هدایت حرارتی نانوسیال با رابطه زیر تعیین می شود:

$$k_{nf} = k_f \left[ 1 + \frac{k_p A_p}{k_f A_f} + ck_p pe \frac{A_p}{k_f A_f} \right] \quad (29-3)$$

که در آن:

$$\frac{d_f}{d_p} = \frac{\varphi}{1-\varphi} \quad (30-3)$$

و عدد پکله نانو ذرات بصورت زیر تعریف می شود:

$$pe = \frac{u_p d_p}{\alpha_f} = \frac{u_p d_p \rho_f c_{pf}}{k_f} \quad (31-3)$$

و سرعت براونی نانو ذرات بصورت زیر تعریف می شود:

$$u_p = \frac{2k_b T}{\pi \mu_f d_p^2} \quad (32-3)$$

C یک مقدار ثابت بوده و براساس داده های تجربی تعیین می شود. پتل و همکاران [۶۹]، مقدار

۲۵۰۰۰ را بصورت کلی پیشنهاد داده اند.

### ۳-۴-۲ مدل مبتنی بر خوشه‌ای شدن نانوذرات

نانو ذرات در نانوسیال ممکن است با کنار هم قرار گرفتن خوشه هایی از نانو ذرات را تشکیل دهند (پریشر و همکاران [۲۶] و هی و همکاران [۷۰])، اوانز و همکاران [۴۱] این فرضیه را مطرح کردند که با تشکیل این خوشه ها، سرعت انتقال حرارت بیشتر می شود زیرا گرما می تواند از طریق این نواحی جامد سریعتر از زمانی که در سیال در حال عبور بود، حرکت کند. آنها وابستگی ضریب هدایت حرارتی به خوشه ای شدن و مقاومت حرارتی ناحیه تماس را بررسی کردند. اثر خوشه‌ای شدن را در سه مرحله با استفاده از مدل براگمن [۷۱]، مدل نان و همکاران [۷۲] و مدل ماکسول گارنت مورد ارزیابی قرار دادند. در نهایت معادله ضریب هدایت حرارتی بصورت زیر درآمد:

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_{cl} + 2K_f + 2(K_{cl} - K_f)\varphi_{cl}}{K_{cl} + 2K_f - (K_{cl} - K_f)\varphi_{cl}} \quad (33-3)$$

که زیر نویس  $cl$  نشان دهنده خوشه نانو ذرات است. آنها با استفاده از روش مونت کارلو<sup>۱</sup> نیز به

<sup>۱</sup> Monte carlo

تعیین ضریب هدایت حرارتی پرداختند.

نتایج شبیه سازی آنها با نتایج نظری همخوانی خوبی داشت. نتایج نشان داد که با افزایش ابعاد خوشه، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می یافت. البته با افزایش کسر حجمی این اثر متفاوت می شد و با افزایش ابعاد خوشه، ضریب هدایت حرارتی کاهش پیدا می کرد. نتیجه دیگر این بود که نانو ذرات به شکل فیبر (رشته) ضریب هدایت حرارتی بیشتر نسبت به انواع کروی داشتند. باید دقت داشت که نانوسیال با نانو ذراتی به این شکل دارای لزجت بسیار بیشتری نیز هست. نکته قابل توجه این است که افزایش ابعاد خوشه ممکن است باعث ته نشین شدن نانو ذرات نیز شود و لذا یک مقدار بهینه برای ابعاد خوشه به منظور دستیابی به حداکثر ضریب حرارتی وجود دارد.

فنگ و همکاران [۲۷] نیز به مدل سازی اثر خوشه‌ای شدن با در نظر گرفتن اثر ابعاد نانو ذره پرداختند. نتایج نشان داد که خوشه‌ای شدن باعث بهبود ضریب انتقال حرارت هدایتی می‌شود و در نانوسیال هایی با نانو ذرات کوچک تر به وقوع پیوستن این پدیده مشهودتر است زیرا در این نانوسیال ها در یک کسر حجمی معین با کاهش قطر، فاصله بین نانو ذرات کم تر بوده و نیروهای جذبی وان دروالس<sup>۱</sup> بین ذرات تشدید می‌شود. با افزایش قطر، در قطرهای بالاتر از ۲۰ نانومتر ضریب هدایت حرارتی وابستگی زیادی به قطر نداشته و این نشان دهنده این است که کار کردن با قطرهای کوچکتر از این مقدار مناسب تر است. همچنین در قطرهای بزرگتر چون نسبت ابعاد ذره به ضخامت لایه بیشتر می‌شود، اثر لایه حایل کمتر خواهد بود.

ژوان و همکاران [۷۳] اثر حرکت براونی و خوشه‌ای شدن ذرات را بر ضریب هدایت ذرات بصورت

یک جمله اضافی که به معادله همپلتون - کروسر اضافه می شود در نظر گرفتند:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{K_p + (N-1)K_f + (n-1)(k_p - k_f)\varphi}{k_p + (n-1)k_f - (k_p - k_f)\varphi} + \frac{\rho_p \varphi c_{p_p}}{2k_f} \sqrt{\frac{k_b T}{3\pi r_c \mu_f}} \quad (3-34)$$

که در آن  $k_b = 1.38066 \times 10^{-23} J / K$  ثابت بولتزمن،  $\rho_p$  لزجت سیال،  $c_{p_p}$  گرمای ویژه ذرات و

<sup>۱</sup> Van der waals



$\Gamma_c$  شعاع ذره یا خوشه‌ای از ذرات می باشند. در واقع در رابطه فوق، اثر خوشه‌ای شدن ذرات بصورت بیشتر شدن مقدار  $\Gamma_c$  از شعاع واقعی ذره نشان داده شده است.

برای درک بهتر سهم هر جمله در عبارت فوق می توان به موارد زیر اشاره کرد. برای نانو ذرات مس به قطر ۵۰ نانومتر در آب، در کسر حجمی ۰/۰۳٪ سهم جمله دوم هرگاه خوشه‌ای شدن اتفاق بیفتد ۱۱٪ و اگر اتفاق نیفتد، ۱۷٪ است. در کسر حجمی ۰/۰۴٪ سهم جمله دوم هرگاه خوشه‌ای شدن اتفاق بیفتد ۱۴٪ و اگر اتفاق نیفتد، ۲۴٪ است. اثر حرکت براونی با دما به علت افزایش حرکت تصادفی شدید شده و با افزایش قطر نانو ذرات به علت کند شدن حرکت آنها کاهش می‌یابد. شایان ذکر است که با بعد بودن جمله دوم در این معادله، بیانگر خطا در انجام تحلیل ها در رسیدن به این معادله است.

چن و همکاران [۷۴] به اندازه گیری لزجت نانوسیال آب - دی اکسیدتیتانیوم و اتیلن گلیکول - دی اکسید تیتانیوم روشی برای تعیین ضریب هدایت حرارتی آنها ابداع کرد. آنها از دو نوع نانو ذره استفاده کردند، ذرات کروی به قطر ۲۵ نانومتر و ذرات استوانه ای یا نانو لوله به قطر ۱۰ نانومتر و طول ۱۰۰ نانومتر. مدل کریگر و دوپرتی [۷۵] برای لزجت نانوسیال، با تغییر برای در نظر گرفتن اثر خوشه ای شدن، مورد استفاده قرار گرفت؛ بنابراین لزجت نوسیال تابعی از قطر خوشه‌ها شد، با تعیین تجربی مقدار لزجت نانوسیال و قرار دادن در رابطه، آنها مقدار قطر خوشه ها را استخراج کردند.

این مقدار بدست آمده برای تعیین ضریب هدایت حرارتی که یک مدل همپلتون کروسر [۶۳] تغییر یافته بود، مورد استفاده قرار گرفت:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{K_{cl} + (N-1)K_f + (n-1)(k_{cl} - k_f)\varphi_{cl}}{k_{cl} + (n-1)k_f - (k_{cl} - k_f)\varphi_{cl}} \quad (35-3)$$

که مشابه مدل اوآنز [۴۱] بوده و در آن زیر نویس  $Cl$  نشان دهنده خوشه نانو ذرات است.  $n$  در

مقاله آنها، برای کره ۳ و برای استوانه ۵ در نظر گرفته شد.

$$\varphi_{cl} = \varphi \left( \frac{r_{cl}}{r_p} \right)^{3-D} \quad (36-3)$$

که در آن،  $r_p$  و  $r_{cl}$  به ترتیب، شعاع نانو ذرات و خوشه‌ها هستند. برای توان  $D$  با توجه به مدل ویسکوزیته کریگر و دوقرتی [۷۵]، مقدار ثابت  $1/8$  در نظر گرفته می‌شود. نسبت  $r_{cl}/r_p$  برای نانوسیال‌های آب - دی اکسید تیتانیوم (کروی) و اتیلن گلیکول - دی اکسید تیتانیوم (کروی) به ترتیب  $2/75$  و  $3/34$  می‌باشد.

### ۳-۴-۳ دیگر مدل‌ها

کورسیونه [۷۶] با بررسی نتایج تجربی موجود، مدل جدیدی را بر اساس اعداد بدون بعد، استخراج نمود:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 4.4 \text{Re}^{0.4} \text{Pr}^{0.66} \left( \frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left( \frac{K_p}{K_f} \right)^{0.03} \phi^{0.66} \quad (37-3)$$

که در آن،  $\text{Pr}$  عدد پرانتل سیال پایه،  $T$  دمای نانوسیال،  $T_{fr}$  دمای انجماد سیال پایه،  $K_p$  ضریب هدایت نانو ذرات و  $\text{Re}$  عدد رینولدز نانو ذرات می‌باشند. عدد رینولدز نانو ذرات بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Re} = \frac{2P_f K_b T}{\pi \mu_f^2 d_p} \quad (38-3)$$

که  $K_b$  ثابت بولتزمن بوده و تمام خصوصیات در دمای نانوسیال محاسبه شده‌اند.

دوانگدونسوک و وونگویس [۷۷] بر اساس نتایج تجربی خود رابطه زیر را برای نانوسیال آب - دی اکسید تیتانیوم پیشنهاد دادند:

$$\frac{k_{nf}}{K_f} = a + b\phi \quad (39-3)$$

که  $a$  و  $b$  ثابت‌هایی هستند که با توجه به داده‌های تجربی مطابق جدول ۳-۴ محاسبه شده‌اند.

جدول ۳-۴: ضرایب ثابت مدل هدایت حرارتی دوانگدونسوک و وونگویس [۷۷]

دما (°C)	a	b
۱۵	۱/۰۲۲۵	۰/۰۲۷۲
۲۵	۱/۰۲۰۴	۰/۰۲۴۹
۳۲	۱/۰۱۳۹	۰/۰۲۵۰

## ۳-۵ لزجت دینامیکی

نسبت به ضریب هدایت حرارتی، روابط کمتری برای تعیین لزجت نانو سیال دارد. اولین رابطه‌ای که برای مخلوط معلق ذرات جامد در مایع استخراج شد، رابطه انیشتین [۶۴] است و لزجت را تنها به صورت تنها تابعی خطی از کسر حجمی تعیین می‌کند:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\varphi) \quad (۴۰-۳)$$

که در آن  $\varphi$  کسر حجمی نانو ذرات نسبت به سیال پایه  $\mu_f$  ویسکوزیته سیال است. رابطه انیشتین تنها برای کسرهای حجمی کوچک‌تر از ۲٪ تأیید شده است و برای مقادیر کسر حجمی بزرگ‌تر از مقدار لزجت را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. برینکمن [۷۸] رابطه فوق را برای استفاده در کسرهای حجمی بالاتر توسعه داد:

$$\mu_{nf} = \mu_f \frac{1}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (۴۱-۳)$$

لانگرن [۷۹] رابطه زیر را به شکل یک بسط تیلور ارائه داد:

$$\mu_{nf} = \mu_f \left( 1 + 2.5\varphi + \frac{25}{4}\varphi^2 + O(\varphi^3) \right) \quad (۴۲-۳)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هرگاه ترم‌های مرتبه دوم و بالاتر حذف شوند، رابطه فوق به رابطه انیشتین تبدیل می‌شود.

بچلور [۸۰] با در نظر گرفتن اثر حرکت براونی بر تنش اعمالی بر یک خط مخلوط معلق تقریباً

ایزوتروپ ذرات کروی در سیال دلخواه، رابطه جدیدی برای لزجت پیشنهاد داد:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2) \quad (۴۳-۳)$$

همچنین فرانکل و آکروویس [۸۱] معادله زیر را ارائه دادند:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{9}{8} \left[ \frac{(\varphi / \varphi_m)^{1/3}}{1 - (\varphi / \varphi_m)^{1/3}} \right] \quad (۴۴-۳)$$

که در آن  $\varphi_m$  حداکثر کسر ذره است و باید از طریق تجربی محاسبه شود.

گراهام [۸۲] یک‌شکل کلی‌تر از معادله بالا را ارائه داد که با هم با حذف جملات مرتبه بالاتر به

معادله اینشتین تبدیل می‌شود:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi + 4.5 \left[ \left( \frac{h}{d_p} \right) \left( 2 + \frac{h}{d_p} \right) \left( 1 + \frac{h}{d_p} \right)^2 \right] \quad (45-3)$$

که در آن شعاع نانوذره و  $h$  فاصله بین ذرات است.

نگوین و همکاران [۸۳] به‌طور تجربی به بررسی اثر دما و کسر حجمی بر لزجت دینامیکی نانو سیال آب اکسید آلومینیم پرداختند. اثرات دما و ابعاد ذره در محدوده‌های دما بین ۲۲ تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی بین ۱ تا ۹/۴٪ به دقت بررسی شد. آن‌ها ثابت کردند که رابطه اینشتین و مشتقات آن فقط در رابطه خاص برای لزجت نانو سیال پیشنهاد دادند. برای ذرات اکسید آلومینیم با قطرهای به ترتیب ۴۷ و ۳۶ نانومتر روابط زیر پیشنهاد شد:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 0.904e^{14.83\phi} \quad (46-3)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = [1 + 2.5\phi + 150\phi^2] \quad (47-3)$$

و برای در نظر گرفتن اثر دما نیز روابط زیر به ترتیب برای کسرهای حجمی ۱ و ۴٪ ذرات اکسید

آلومینیم پیشنهاد شد:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1.125 - 0.0007T \quad (48-3)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 2.1275 - 0.0215T + 0.0027T^2 \quad (49-3)$$

که  $T$  دمای سیال برحسب °C است.

مایگا و همکاران [۸۴] با برازش یک منحنی برداده‌های تجربی ونگ و همکاران [۸۵] به رابطه

زیر دست یافتند:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \quad (50-3)$$

هیچ‌کدام از روابط فوق قادر نیستند تا لزجت نانو سیال را در محدوده وسیعی از کسرهای حجمی

تخمین بزنند. کولکارنی و همکاران [۸۶] یک مدل جدید ارائه دادند که به‌وسیله آن می‌توان لزجت نانو

ذرات مس معلق شده در آب را در محدوده دمای بین ۵ تا ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تعیین کرد:

$$\ln(\mu_{nf}) = A \left( \frac{1}{T} \right) - B \quad (51-3)$$

جدول ۳-۵: ضرایب ثابت در ناحیه دمایی مدل لزجت نامبورو و همکاران [۸۷, ۸۶]

کسر حجمی (%)	0	1	2	3	4	5	6/12
A	162.76	139.27	121.77	86.22	75.27	63.02	55.32
B	0.0185	0.0177	0.0171	0.0154	0.0146	0.0137	0.0129

آن‌ها بر اساس نتایج خود یک مدل تجربی از نوع آرنیوس<sup>۱</sup> به صورت زیر ارائه کردند که لزجت را با کسر حجمی و دمای نانوسیال مرتبط می‌سازد:

$$\log(\mu_{nf}) = Ae^{-BT} \quad (52-3)$$

که  $\mu_{nf}$  لزجت نانو سیال اکسید مس بر حسب CP (سانتی پویز)، T دما بر حسب کلون و A و B توابعی از کسر حجمی نانو سیال هستند:

$$A = 1.8375\phi^2 - 29.643\phi + 165.56 \quad (53-3)$$

$$A = 4 \times 10^{-6} \phi^2 - 0.001\phi + 0.0186 \quad (54-3)$$

در رابطه بالا،  $\phi$  بین ۰ تا ۶/۱۲٪ تغییر می‌کند. آن‌ها نشان دادند که در محدوده مورد بررسی آن‌ها، نانو سیال نیوتنی رفتار می‌کند.

در ادامه کار نامبورو و همکاران [۸۷]، ساهو و همکاران [۸۸] به بررسی تجربی رفتار نانو سیال اکسید آلومینیم و مخلوطی از اتلین گلیکول - آب پرداختند. قطر نانو ذرات ۵۲ نانومتر بود و کسرهای حجمی بین ۱ تا ۱۰٪ در محدوده وسیعی از دما مورد بررسی قرار گرفت. نانو سیال در دماهای زیر صفر درجه یعنی محدوده بین ۳۵- تا ۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رفتار غیر نیوتنی داشت. آن‌ها بر اساس نتایج تجربی معادله زیر را برای لزجت در این دو محدوده دما ارائه دادند:

$$\mu_{nf} = Ae^{(B/T+C\phi)} \quad (55-3)$$

که مقادیر A، B و C برای این دو ناحیه دما در جدول زیر آمده است.

<sup>۱</sup> Arrhenius

جدول ۳-۶: ضرایب ثابت در دو ناحیه دمایی مدل لزجت نامبورو و همکاران [۸۷]

مقادیر ضرایب	ناحیه دمایی پایین (238K – 273K)	ناحیه دمایی بالا (273K – 363K)
A	$1.2200 \times 10^{-6}$	$2.3920 \times 10^{-4}$
B	4285	2903
C	0.1448	0.1265
R <sup>2</sup>	0.9984	0.9958

در ادامه کار این گروه، واجها [۸۹] مدل کامل تری را برای نانو ذرات اکسید آلومینیم و اکسید مس در مخلوط ۴۰:۶۰ اتیلن گلیکول / آب ارائه دادند:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = A e^{B\phi} \quad (۵۶-۳)$$

که ثابت‌های A و B در محدوده  $۲۹۳ < T < ۳۶۳$  درجه‌ی کلین برای نانو ذرات اکسید آلومینیم عبارت‌اند از:

$$A = 0.983, B = 12.959 \quad (۵۷-۳)$$

و برای نانو ذرات اکسید مس:

$$A = 0.9197, B = 22.8539 \quad (۵۸-۳)$$

$\mu_f$  لزجت دینامیکی سیال است که با برازش منحنی از داده‌های موجود در استاندارد ASHRAE [۹۰] به دست آمده است.

$$\mu_f = C e^{\frac{D}{T}} \quad (۵۹-۳)$$

که در آن ثابت‌های C و D در محدوده بین دماهای ۲۹۳ و ۳۶۳ کلین عبارت‌اند از:

$$C = 0.555 \times 10^{-3}, D = 2664 \quad (۶۰-۳)$$

معصومی و همکاران [۹۱] یک مدل جدید برای لزجت دینامیکی نانو سیال ارائه دادند که اثر حرکت براونی، دما و قطر نانوذره را در نظر می‌گرفت:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + \frac{P_p V_B d_p^2}{72 N \delta} \quad (۶۱-۳)$$

که در آن  $\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi}} d_p$  فاصله بین مرکز نانو ذرات از یکدیگر است،  $V_b = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18 K_b T}{\pi P_p d_p}}$  سرعت

براونی بوده و Kb ثابت بولتزمن است. N در معادله فوق، تابعی از قطر نانوذره و دما می‌باشد معادله زیر

برای آن پیشنهاد شده است:

$$N = (c_1\varphi + c_2)d_p + (c_3\varphi + c_4) \quad (62-3)$$

مقادیر زیر نیز با برازش منحنی‌های تجربی استخراج شده است:

$$c_4 = -3.93e^{-7}, c_3 = -9.0e^{-8}, c_2 = -2.771e^{-6}, c_1 = -1.133e^{06}$$

کورسیونه [۷۶] نیز با بررسی نتایج تجربی موجود، مدل جدیدی را بر اساس اعداد بدون بعد استخراج

نمود:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87(d_p/d_f)^{-0.3} \varphi^{1.03}} \quad (63-3)$$

که  $d_f$  قطر معادل مولکول سیال پایه است که با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_f = 0.1 \left[ \frac{6M}{N\pi P_{fo}} \right]^{1/3} \quad (64-3)$$

$M$  جرم مولکولی سیال پایه،  $N$  عدد آووگادرو ( $\approx 6/023 \times 10^{23}$ ) و چگالی وزنی سیال پایه در

دمای  $T_0 = 239K$  است. تمام خصوصیات در دمای نانو سیال محاسبه شده‌اند.

دوانگدونسوک و وونگویس [۷۷] بر اساس نتایج تجربی خود رابطه زیر را برای نانو سیال آب -

دی‌اکسید تیتانیوم پیشنهاد دادند:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = a + b\varphi + c\varphi^2 \quad (65-3)$$

که  $a$ ،  $b$  و  $c$  ثابت‌هایی هستند که با توجه به داده‌های تجربی مطابق جدول ۳-۷ محاسبه شده‌اند.

جدول ۳-۷: جدول ثابت‌های رابطه لزجت دینامیکی دوانگدونسوک و وونگویس [۷۷]

دما (°C)	a	b	c
۱۵	۱/۰۲۲۶	۰/۰۴۷۷	-۰/۰۱۱۲
۲۵	۱/۰۱۳	۰/۰۹۲	-۰/۰۱۵
۳۵	۱/۰۱۸	۰/۱۱۲	-۰/۰۱۷۷

ابونادا [92] نیز در مقاله خود با استفاده از داده‌های تجربی نگوین و همکاران [83] یک رابطه

جدید برای لزجت دینامیکی نانو سیال‌های آب - اکسید آلومینیم و آب - اکسید مس معرفی کردند

که به دما و کسر حجمی وابسته بود. برای نانو ذرات اکسید آلومینیم:

$$\mu = \exp(3.003 - 0.04203T - 0.5445\phi + 0.0002553T^2 + 0.0524\phi^2 - 1.622\phi^{-1}) \quad (66-3)$$

و برای اکسید مس:

$$\begin{aligned} \mu = & -0.6967 + \frac{15.937}{T} + 1.238\phi + \frac{1356.14}{T^2} - 0.295\phi^2 - 30.88\frac{\phi}{T} - \frac{19652.74}{T^3} \\ & + 0.01593\phi^3 + 4.38206\frac{\phi^2}{T} + 147.573\frac{\phi}{T^2} \end{aligned} \quad (67-3)$$

دما در روابط فوق بر حسب °C بود و لزجت به دست آمده بر حسب cp (سانتی پویز) می باشد.





## فصل ۴ : سیستم آزمایشگاهی

## ۱-۴ تجهیزات آزمایشگاهی

### ۱-۱-۴ پمپ دنده‌ای مدل WT3000-FB

پمپ دنده‌ای دارای دو حالت کار است که حالت‌های آن، یکی حالت نرخ جریان و حالت مقدار (توزیع) جریان است.

که محدوده نرخ جریان از ۸۵/۷ - ۲۵۷۱/۴ میلی‌لیتر بر دقیقه و حجم ارسالی از ۰/۱ میلی‌لیتر تا ۹۹۹ لیتر است. این پمپ دارای صفحه نمایشگر به ابعاد ۳۲×۱۲۸ میلی‌متر جهت نمایش اطلاعات است. مشخصات کلی پمپ در جدول (۱-۴) و تصویر آن در شکل (۱-۴) آورده شده است.

جدول ۱-۴: مشخصات پمپ

نرخ جریان	2571.4 - 85.7 (ml/min)
حجم ارسال	0.1 (ml) - 999 (l)
زمان مکث	1(s) - 999 (h)
ویسکوزیته سیال	≤ 200(Cst)
کنترل خارجی ورودی‌ها	کنترل شروع و توقف / کنترل نرخ جریان
کنترل خارجی خروجی‌ها	پالس خروجی (0-12.5 khz) (مربوط به (0-3000(rpm)
رابط ارتباطی	RS485
ماکزیمم فشار خروجی (تست برای آب)	MS: 204 1.4 (mpa)
	MS: 209 0.9 (mpa)
	MS: 213 0.8 (mpa)
منبع تغذیه	AC 110-220 V ±20% 50-60(HZ) فرکانس
مصرف انرژی	≤ 150 (w)
شرایط عملکرد	0 - 40( c) دما
وزن دستگاه	5.1 (Kg)
ابعاد دستگاه	180×207×290 (mm)
رتبه IP	IP 31



شکل ۴-۱: تصویر پمپ دنده‌ای مدل WT3000-FB

#### ۴-۱-۲ رادیاتور

رادیاتور مورد استفاده در این آزمایش از جنس آلومینیوم است که سازنده آن کمپانی کولر مستر است. این رادیاتور مجهز به دو فن به ابعاد ۱۴ سانتی‌متر با سرعت ۸۰۰-۲۰۰۰±۱۰٪ دور بر دقیقه است؛ که فن‌ها قادر به حجم جریان تولیدی (cfm) ۵۴-۱۲۲/۵±۱۰٪ و فشار استاتیکی ۰/۷-۳/۵ میلی‌متر ستون آب تولید کنند. نويز توليدي اين فن‌های خنک‌کننده ۲۱-۳۹ دسیبل است. ولتاژ ورودی فن‌ها برق DC ۱۲ ولت و جریان مصرفی ۰/۳ آمپر و انرژی مصرفی ۳/۶ وات می‌باشد. همچنین فن‌ها عمری حدود ۴۰۰۰۰ ساعت دارند. در شکل (۴-۲) تصویر این رادیاتور نشان داده شده است.



الف) تصویر رادیاتور از نمای روبرو



ب) تصویر رادیاتور از نمای دیگر

شکل ۴-۲: رادیاتور

#### ۴-۱-۳ منبع تغذیه (اتو ترانس)

منبع تغذیه مورد استفاده در این آزمایش اتو ترانس تک فاز امگا ساخت کشور کره که ظرفیت توان خروجی آن ۵ کیلو وات و ماکزیمم جریان خروجی آن ۱۶/۷ آمپر است. در این مدل ولتاژ ورودی ۲۲۰ ولت و با فرکانس ۵۰-۶۰ هرتز و ولتاژ خروجی متغیر و قابل تنظیم بین ۰-۳۰۰ ولت است. در شکل (۴-۳) تصویر اتو ترانس نشان داده شده است.



شکل ۴-۳: اتو ترانس امگا

#### ۴-۱-۴ مخزن<sup>۱</sup>

از یک عدد بشر مخروطی شکل مدرج با ظرفیت ۱ لیتر برای استفاده به عنوان مخزن در سیستم آزمایشگاهی استفاده شده است؛ که تصویر آن در شکل (۴-۴) نشان داده شده است.

---

<sup>۱</sup> Reservoir



شکل ۴-۴: مخزن

#### ۴-۱-۵ داده نگار<sup>۱</sup>

داده نگار از نوع ADAM-4015 (شکل (۴-۵)) که قابلیت اتصال به شش حس گر<sup>۲</sup> توسط پورت‌های تعبیه شده راداراست؛ که اطلاعات داده نگار توسط مبدل<sup>۳</sup> ADAM-4561 (شکل (۴-۶)) به رایانه منتقل می شود.



شکل ۴-۵: داده نگار ADAM-4015

<sup>۱</sup> Data logger

<sup>۲</sup> Sensor

<sup>۳</sup> Converter



شکل ۴-۶: مبدل ADAM-4561

## ۴-۲ چاه حرارتی

### ۴-۲-۱ دلایل گرایش به ابعاد کوچک تر

یک کانال برای دو هدف استفاده می شود [۹۳]:

الف) ایجاد تماس مستقیم بین سیال و دیواره کانال.

ب) جایگزین کردن سیال قدیمی با سیال جدید و کامل کردن فرآیند انتقال حرارت.

فرآیند انتقال حرارت به مساحت سطح دیواره بستگی دارد که برای هندسه دایروی با قطر لوله  $D$  متناسب است، درحالی که دبی حجمی سیال عبوری با سطح مقطع سیال متناسب است که به طور خطی با  $D^2$  تغییر می کند؛ بنابراین نسبت مساحت دیواره به حجم سیال با  $1/D$  تغییر می کند. به عبارت دیگر با کاهش قطر، نسبت مساحت دیواره به حجم سیال افزایش می یابد. نسبت مساحت دیواره به حجم سیال در واقع معیاری از نسبت گرمای دفع شده توسط کانال موردنظر به دبی سیال عبوری یا حجم سیال موجود است و در طراحی مبدل های حرارتی بخصوص میکرو مبدل ها از اهمیت زیادی برخوردار است. با زیاد شدن این نسبت، کار آیی حرارتی مبدل در یک حجم معین افزایش می یابد؛ بنابراین با کاهش قطر هیدرولیکی کانال، نسبت سطح به حجم آن و در نتیجه کارآیی حرارتی آن افزایش می یابد. میکرو کانال ها مفهوم جدیدی نبوده و به عنوان مثال در بدن انسان دو فرآیند انتقال حرارت و جرم مؤثر در شش و کلیه در کانال هایی با ابعاد بسیار کوچک در ۴ میکرومتر صورت می گیرد. با توجه به رابطه انتقال حرارت جابجایی، هرگاه برای دفع شار حرارتی معینی از  $n$  کانال دایروی



استفاده شود:

$$q = hA\Delta T = h(n\pi DL)\Delta T \quad (1-4)$$

برای انتقال مقدار معینی گرما در یک اختلاف دمای متوسط لگاریتمی (LMTD)<sup>۱</sup> حاصل ضرب

مساحت سطح و ضریب انتقال حرارت باید مقدار ثابتی باشد:

$$hA = h(n\pi DL) = cte \quad (2-4)$$

$$\frac{K}{D} nDL = nkL = cte \quad (3-4)$$

بنابراین با استفاده از نانو سیال، ضریب هدایت افزایش یافته و برای انتقال شار حرارتی معین، به

تعداد کانال کمتری نیاز خواهد بود.

## ۲-۲-۴ دسته‌بندی کانال‌ها از لحاظ ابعاد

معیارهای مختلفی برای دسته‌بندی کانال‌ها وجود دارد. جدول ۱-۳ دسته‌بندی کانال‌ها را از لحاظ

ابعاد یا قطر هیدرولیکی نشان می‌دهد [۹۳].

جدول ۲-۴: دسته‌بندی انواع کانال از لحاظ قطر هیدرولیکی

$D_h > 3mm$	کانال معمولی
$200\mu m < D_h < 3mm$	مینی کانال
$10\mu m < D_h < 200\mu m$	میکرو کانال
$1\mu m < D_h < 10\mu m$	ناحیه انتقال به میکرو کانال
$0.1\mu m < D_h < 1\mu m$	ناحیه انتقال به نانو کانال
$D_h < 0.1\mu m$	نانو کانال

با توجه به اینکه امکانات ساختن کانال با ابعاد کوچک‌تر وجود ندارد. در این پایان‌نامه از کانال

معمولی استفاده شده است؛ که در هندسه‌های متفاوت عملکرد خنک کاری آن‌ها مورد بررسی قرار

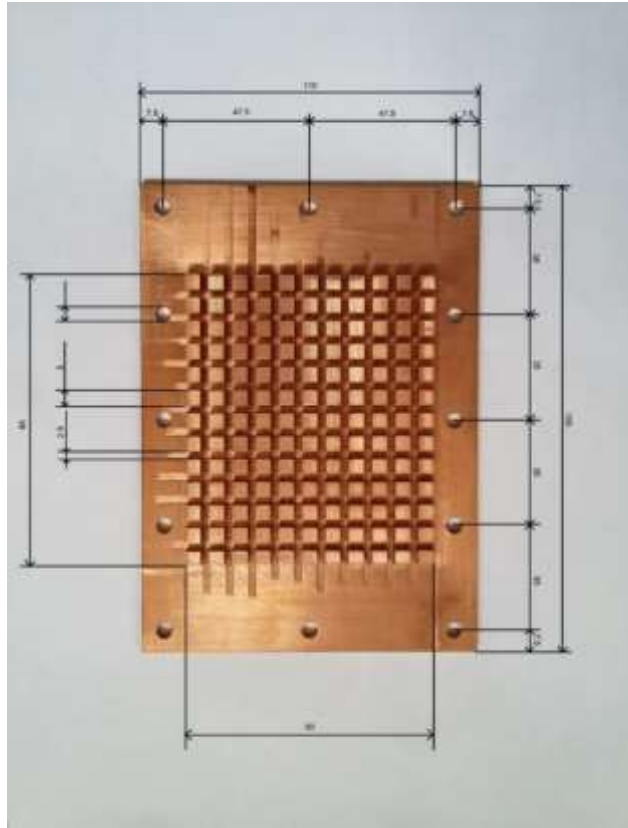
می‌گیرد.

## ۱-۲-۲-۴ چاه حرارتی شیار عمودی

چاه حرارتی مورد استفاده در این مطالعه تجربی از جنس مس است که توسط دستگاه CNC با

<sup>۱</sup> Logarithmic mean temperature

دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر در آرایش هندسی شیار عمودی و فین‌های مربعی شکل به ابعاد ۵ میلی‌متر (شکل (۷-۴)) ساخته شده است. ارتفاع تمام فین‌ها ۵ میلی‌متر است.

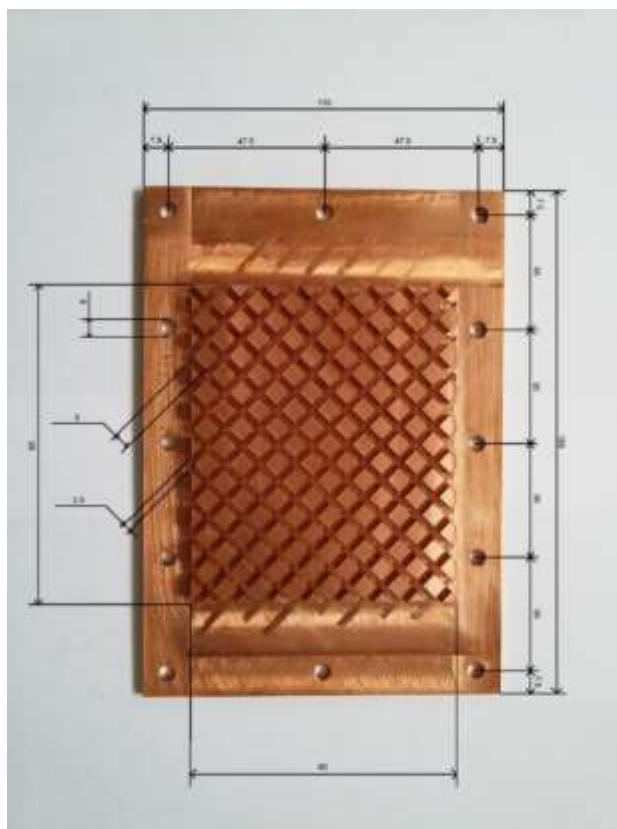


شکل ۷-۴: چاه حرارتی شیار مستقیم

#### ۲-۲-۲-۴ چاه حرارتی شیار مورب

چاه حرارتی مورد استفاده در این مطالعه تجربی از جنس مس است که توسط دستگاه CNC با

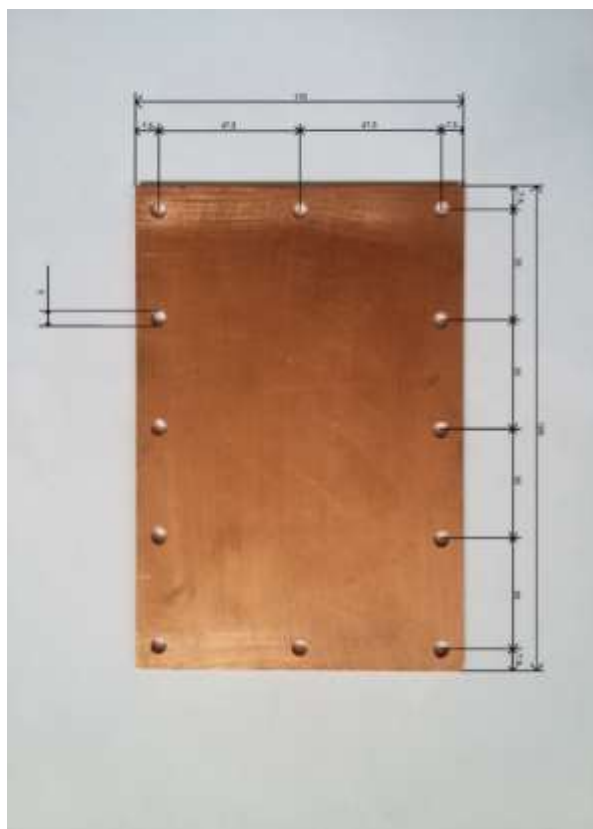
دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر در آرایش هندسی شیار مورب و فین‌های مربعی شکل به ابعاد ۵ میلی‌متر (شکل (۸-۴)) ساخته شده است. ارتفاع تمام فین‌ها ۵ میلی‌متر است.



شکل ۴-۸: چاه حرارتی شیار مورب

### ۴-۲-۲-۳ چاه حرارتی ساده برای محیط متخلخل

چاه حرارتی مورد استفاده در این مطالعه تجربی از جنس مس است که توسط دستگاه CNC با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر در آرایش هندسی ساده (شکل ۴-۹) ساخته شده است؛ که تعداد ۴۹۴ ساچمه کروی از جنس مس، به‌طور منظم در یک ردیف مانند شکل (۴-۱۰) چیده شده است.



شکل ۹-۴: چاه حرارتی ساده



شکل ۱۰-۴: چیدمان ساچمه‌ها داخل چاه حرارتی

۱-۳-۲-۲-۴ مشخصات ساچمه‌های کراسمن بی بی ۶۰۰

ساچمه‌های خریداری شده از جنس مس مدل کوپرهد که در دو بسته بندی ۶۰۰ و ۱۵۰۰ تایی

یافت می‌شود؛ که توسط کمپانی کراسمن کشور آمریکا ساخته شده، قطر این ساچمه‌ها ۴/۵ میلی‌متر و وزن هر کدام ۰/۳۳۹ گرم است.

### ۳-۴ معادلات حاکم بر هندسه‌ها

زمانی که مایع از چاه حرارتی عبور می‌کند باعث می‌شود که گرما خارج گردد. میزان انتقال گرما مابین چاه حرارتی و مایع از طریق معادله‌ی (۴-۴) محاسبه می‌گردد.

$$q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (4-4)$$

تمامی خواص سیال از قبیل چگالی، لزجت، ظرفیت گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی بر مبنای دمای میانگین سیال که به صورت رابطه (۵-۴) محاسبه می‌گردد:

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (5-4)$$

ما دمای پایه را ۲ میلی‌متر زیر دمای دیواره اندازه‌گیری کردیم. برای محاسبه‌ی دمای چاه حرارتی از قانون فوریه هدایت گرما استفاده شده است که به صورت معادله (۶-۴) ارائه می‌گردد:

$$T_w = T_{tc} - \left( \frac{qH_w}{K_{hs}A_w} \right) \quad (6-4)$$

$$A_w = w_1 l_2 \quad (7-4)$$

میزان انتقال گرمابه نسبت انتقال گرمای کلی توسط معادله (۸-۴) محاسبه می‌گردد:

$$q = hA_{eff}(LMTD) \quad (8-4)$$

که در آن مساحت  $A_{eff}$  برای هندسه‌های عمودی و مورب از رابطه (۹-۴) و برای محیط متخلخل از رابطه (۱۰-۴) محاسبه می‌گردد:

$$A_{eff} = 4tw_f h_f + w_1 l_2 \quad (9-4)$$

$$A_{eff} = N\pi d^2 + w_1 l_2 \quad (10-4)$$

که در آن  $w_1$  و  $l_2$  به ترتیب طول و عرض کانال است.  $t$ ،  $w_f$  و  $h_f$  به ترتیب تعداد فین‌ها، عرض فین و ارتفاع فین است.

و همچنین در معادله (۱۰-۴)،  $N$  و  $d$  به ترتیب تعداد کل ساچمه‌ها و قطر ساچمه است.

LMTD اختلاف دمای میانگین لگاریتمی است که می‌تواند از طریق معادله (۴-۱۱) محاسبه

گردد:

$$LMTD = \frac{(T_w - T_{in}) - (T_w - T_{out})}{\ln \frac{(T_w - T_{in})}{(T_w - T_{out})}} \quad (۴-۱۱)$$

با مقایسه معادلات (۴-۴) و (۴-۸)، ما به معادله (۴-۱۲) باهدف محاسبه انتقال گرمای همرفتی

دست می‌یابیم:

$$h = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_{eff}(LMTD)} \quad (۴-۱۲)$$

مقاومت گرمایی دیگر پارامتر مهم ارزیابی کارایی چاه حرارتی است که توسط معادله (۴-۱۳)

ارائه می‌گردد.

$$R_{th} = \frac{LMTD}{q''} \quad (۴-۱۳)$$

**اعداد بدون بعد:**

عدد رینولدز توسط معادله (۴-۱۴) محاسبه می‌گردد:

$$Re = \frac{\rho V d_h}{\mu} = \frac{V d_h}{\nu} \quad (۴-۱۴)$$

که در آن  $V$  از طریق رابطه (۴-۱۵) به دست می‌آید:

$$V = \frac{Q_f}{A} \quad (۴-۱۵)$$

$A$  برای ساختار هندسی فین‌های عمودی، محیط متخلخل و شطرنجی می‌تواند به ترتیب، توسط

معادلات (۴-۱۶)، (۴-۱۷) و (۴-۱۹) حاصل گردد: [۹۴]

$$A = A_{total} - A_{fin} \quad (۴-۱۶)$$

$$A = A_{total} - A_s \quad (۴-۱۷)$$

که در آن:

$$A_s = \frac{n\pi d^2}{4} \quad (18-4)$$

که  $n=17.77$  تعداد ساچمه‌هایی که در یک ردیف قرار دارند.

$$A = w_1 h_f \frac{w_c / \sin 45^\circ}{2s_t} + (h_c w_1) \quad (19-4)$$

قطر هیدرولیکی چاه حرارتی برای ساختار هندسی فین‌های خطی، محیط متخلخل و شطرنجی

می‌تواند به ترتیب از طریق معادلات (۲۰-۴)، (۲۰-۴) و (۲۱-۴) حاصل گردد.

$$d_h = \frac{4A}{P} \quad (20-4)$$

که به ترتیب  $A$  و  $P$  مساحت مقطع عبور سیال از کانال و محیط خیس شده مقطع عبوری سیال

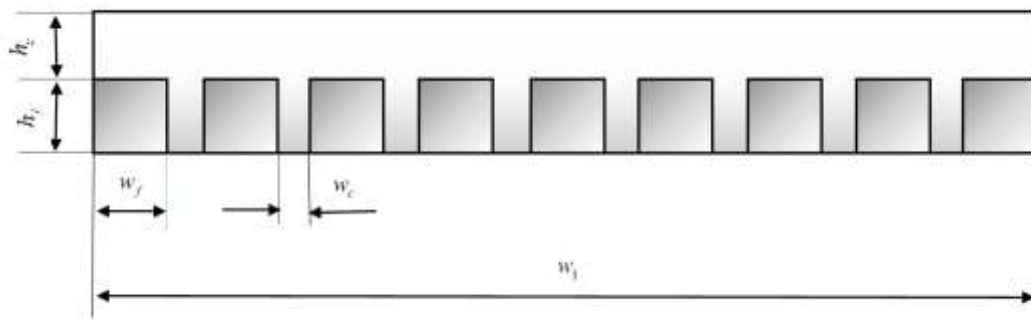
است. [۹۴]

$$d_h = \frac{4(h_f w_c / \sin 45^\circ + h_c)}{[2h_f + w_c / \sin 45^\circ + 1 + 2h_c / w_1 + (1 - w_c / 2s_t)]} \quad (21-4)$$

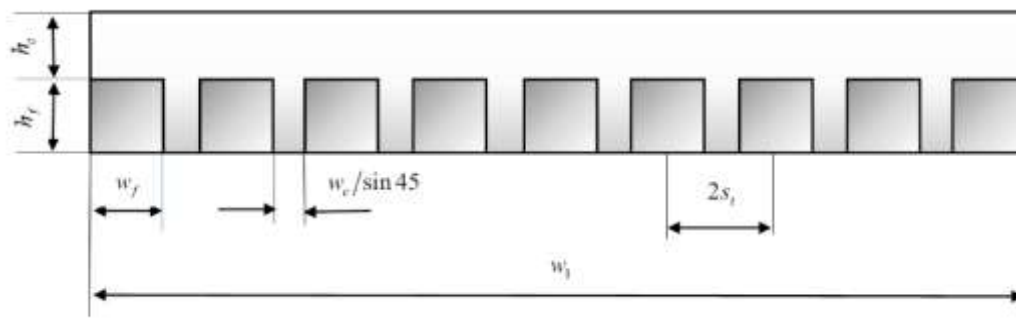
عدد ناسلت طبق معادله (۲۲-۴) قابل محاسبه است:

$$Nu = \frac{hd_h}{k} \quad (22-4)$$

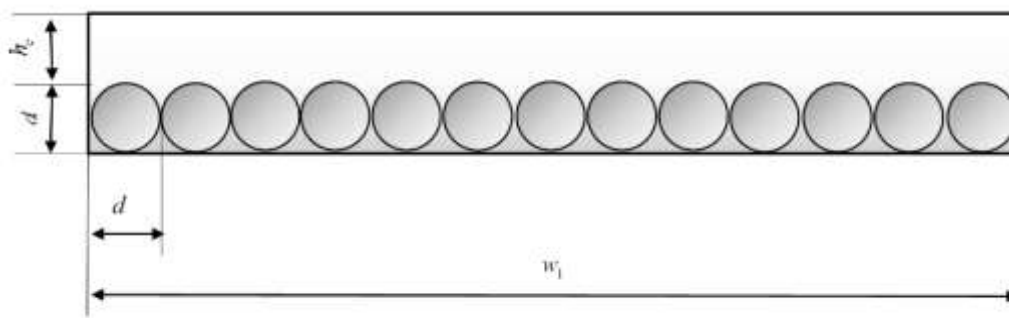
شماتیک برش خورده مقطع عبور جریان در هندسه‌ها در شکل (۱۱-۴) نشان داده شده است.



الف) هندسه شیار عمودی



(ب) هندسه شیار مورب



(ج) هندسه محیط متخلخل

شکل ۴-۱۱: شماتیک برش مقطع هندسه ها

#### ۴-۴ آماده‌سازی نانو سیال

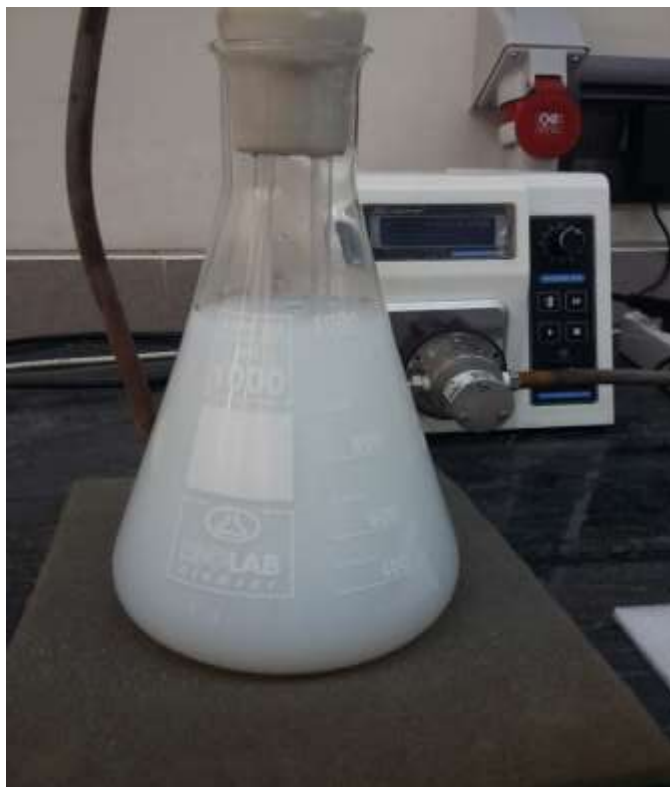
آماده‌سازی نانو سیالات اولین قدم در افزایش انتقال حرارت نانو سیالات محسوب می‌شود. در این مطالعه آزمایشگاهی برای تهیه نانو سیال آب-آلومینا از روش دومرحله‌ای استفاده شده است. در روش دومرحله‌ای نانو پودر تهیه شده به روش آلتراسونیک در سیال پایه پایدار می‌شود. نظری و همکاران [۱۲] از جمله کسانی بودند که از روش دومرحله‌ای برای تولید نانو سیال آب-آلومینا استفاده کردند. نانو ذرات دیگری همچون طلا، نقره، نانولوله‌های کربنی و سیلیکا با این روش تولید و در سیال پایه پایدار شده‌اند. بدین ترتیب که نانو پودر اکسید آلومینیوم با اندازه کمتر از ۲۰ نانومتر که از شرکت نوترینو خریداری شده، (جدول (۲-۹)) توسط دستگاه آلتراسونیک با قدرت ۴۰۰ وات و ۴۰ کیلوهرتز در سیال پایه (آب مقطر) به مدت ۱ ساعت پایدار می‌شود. در شکل (۴-۱۲) نانو سیال آب-آلومینا آماده شده نشان داده شده است. نانو سیال آماده شده با این روش، حداقل به مدت



۷۲ بدون هیچ ته‌نشینی، کلوخه شدن، تغییر رنگ و به‌صورت کاملاً یک‌رنگ پایدار می‌ماند. باید توجه داشت که برای جلوگیری از تغییر خواص نانو سیال هیچ‌گونه ماده اضافی یا پایدارکننده به سیال اضافه نشده است. نانو سیال در دو درصد حجمی ۰/۱ و ۰/۲ درصد آماده و مورد استفاده قرار گرفته است. چهار پارامتر اصلی در محاسبه سرعت انتقال حرارت نانو سیالات، شامل: ویسکوزیته، چگالی، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی، ممکن است با پارامترهای مربوط به سیال پایه متفاوت باشند. برای محاسبه خواص نانو سیال از جمله: لزجت دینامیکی، چگالی، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی به ترتیب از معادلات (۳-۴۰)، (۳-۲)، (۳-۳۳) و (۳-۶) استفاده شده است.

جدول ۳-۴: مشخصات نانو پودر  $Al_2O_3$  مدل  $\gamma$

مقدار	ویژگی
۱۰-۲۰	متوسط اندازه ذره (نانومتر)
۹۹/۹۹۵٪	خلوص
۳/۶۵	چگالی ( $gr/cm^3$ )
کروی	شکل ذره
سفید	رنگ
$0.4461 \pm 110.083$	مساحت سطح ( $m^3/gr$ )
۸۸۰	حرارت ویژه ( $j/kg \cdot ^\circ k$ )
۳۵	رسانایی گرمایی ( $w/m \cdot ^\circ k$ )



شکل ۴-۱۲: نانو سیال آب-آلومینا تهیه شده توسط دستگاه آلتراسونیک

#### ۴-۵ روش آزمایش

در این پایان نامه ما تمایل داریم تا دمای قطعه الکترونیکی، CPU و... را با استفاده از فرآیند خنک‌سازی سیال کنترل کنیم. یک منبع حرارتی<sup>۱</sup> مناسب در این مطالعه تجربی ساخته شده و بدین صورت حرارتی قابل تنظیم و مشابه به حرارت قطعات الکترونیکی تولید می‌کند. منبع حرارتی مورد استفاده از جنس نیکل که ابعاد آن  $80 \times 100$  (mm) و ماکزیمم توان تولیدی (w) ۳۴۰ است. که این منبع حرارتی و کل مجموعه به وسیله صفحات عایق پوشش داده شده است. ترتیب عایق بندی به این صورت است که ابتدا از صفحه‌ای به ضخامت ۳ (mm) از جنس کلینگریک (نسوز سیم‌دار) که قابلیت تحمل دمای  $600$  (°C) را دارد، بعد از آن از ورق سیلیکون به ضخامت ۱۰ (mm) پوشش دهی شده است؛ و در نهایت توسط چوب عایق بندی شده است. یک شماتیک مربوط به منبع حرارتی و عایق بندی آن در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است. منبع تغذیه مورد استفاده در این آزمایش اتو

<sup>۱</sup> Heater

ترانس امگا جهت تأمین ولتاژ برق DC منبع حرارتی برای دو شار حرارتی مختلف به ترتیب ۱۰۰ و ۱۵۰ وات با درصد خطای  $\pm 1$  وات مورد آزمایش قرار گرفت. چاه حرارتی‌های مورد استفاده در این مطالعه تجربی از جنس مس توسط دستگاه CNC با دقت  $\pm 0.1$  میلیمتر در سه آرایش هندسی شیار مستقیم (شکل (۴-۷))، شیار مورب (شکل (۴-۸)) و محیط متخلخل (شکل (۴-۹) و (۴-۱۰)) ساخته شده است. یک رادیاتور کوچک (شکل (۴-۲)) بعد از چاه حرارتی در مسیر جریان خروجی قرار دارد؛ که وظیفه آن خنک‌سازی سیال مورد استفاده است. دمای ورودی به چاه حرارتی در طی آزمایش باید ثابت نگه‌داشته شود. پمپ مورد استفاده در این آزمایش پمپ دنده‌ای مدل WT3000-FB بعد از مخزن جهت برقراری جریان و کنترل دبی قرار دارد. دو حس‌گر (PT 100) در مسیر ورودی و خروجی سیال از چاه حرارتی تعبیه شده است؛ و تعداد چهار حس‌گر بر روی کف چاه حرارتی جایگذاری شده است شکل (۴-۱۳). که بدین‌صورت دمای منبع حرارتی (قطعه الکترونیکی) گزارش داده شود. تمام حسگرها ساخت کشور آلمان است و دقت اندازه‌گیری آن‌ها  $\pm 0.1$  درجه است؛ که تمام حسگرها به بخش داده نگار متصل شده و نرخ جریان توسط پمپ قابل تنظیم است، نرخ‌های جریان مورد استفاده در این مقاله ۲۵-۲۰-۱۵-۱۰-۵ میلی‌لیتر بر ثانیه با دقت اندازه‌گیری  $\pm 1$  میلی‌لیتر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. در طی آزمایش دمای سیال ورودی چاه حرارتی در دمای ۲۳ درجه با درصد خطای  $\pm 1$  درجه سانتیگراد ثابت نگه‌داشته شد.

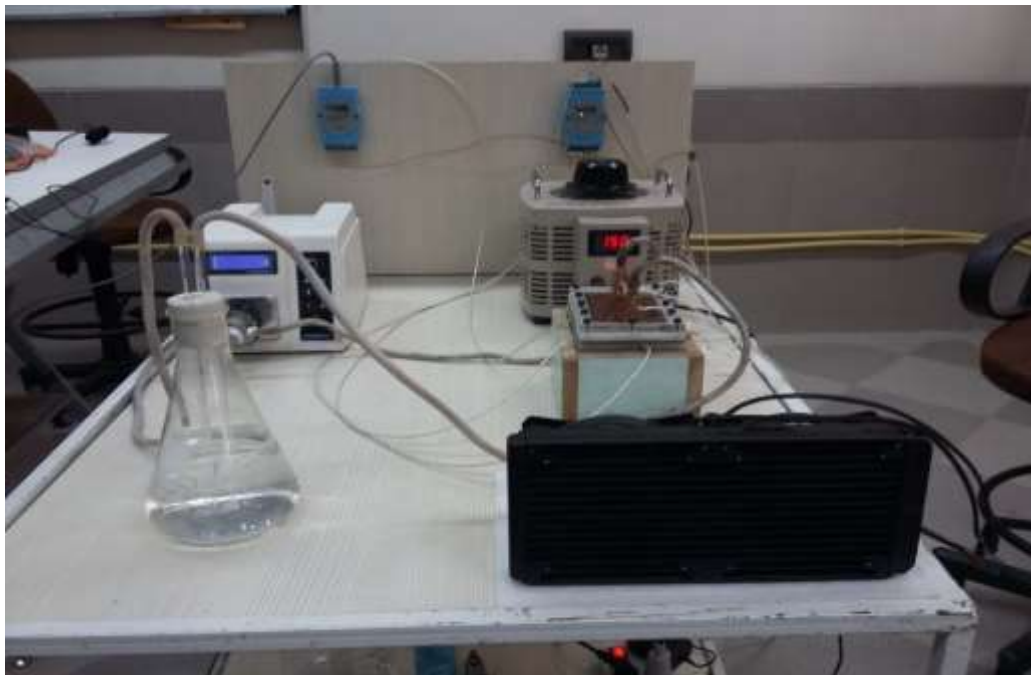
تمام آزمایش‌ها، در بازه‌ی زمانی ۱۰۰۰ ثانیه انجام شد تا بدین‌صورت، به حالت پایدار نزدیک شویم. داده‌های مربوط به دما اندازه‌گیری و به‌وسیله‌ی دستگاه ذخیره شد. به‌منظور افزایش در دقت اندازه‌گیری‌ها، سه آزمون مختلف برای هر نرخ جریان سیال و هر شار حرارتی مختلف انجام شد؛ و با اندازه‌گیری دماها، نرخ جریان و شار حرارتی نتایجی برای گزارش ناسلت و دمای میانگین دیواره چاه حرارتی در حالت‌های مختلف گزارش شد. شماتیک سیستم آزمایشگاهی در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است.



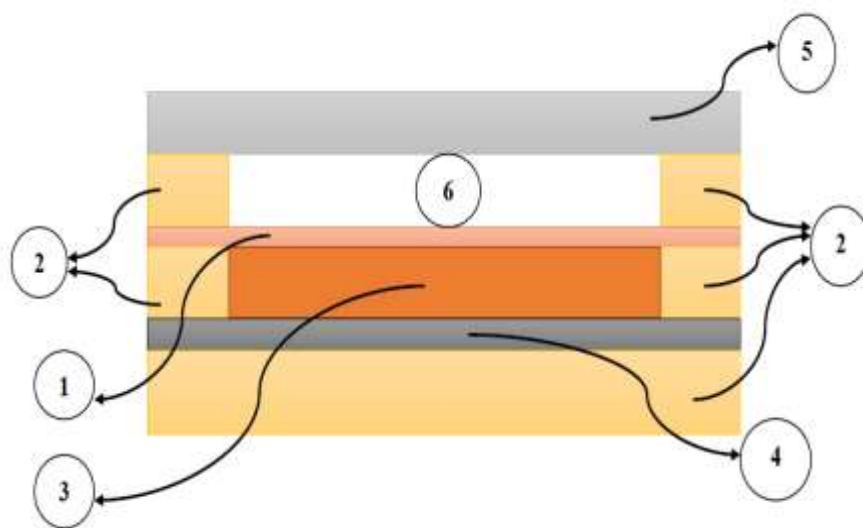
شکل ۴-۱۳: محل قرارگیری حس گرما در کف چاه حرارتی

#### ۴-۵-۱ تصویر سیستم آزمایشگاه

نمای کلی سیستم آزمایشگاهی به صورت کامل در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است.

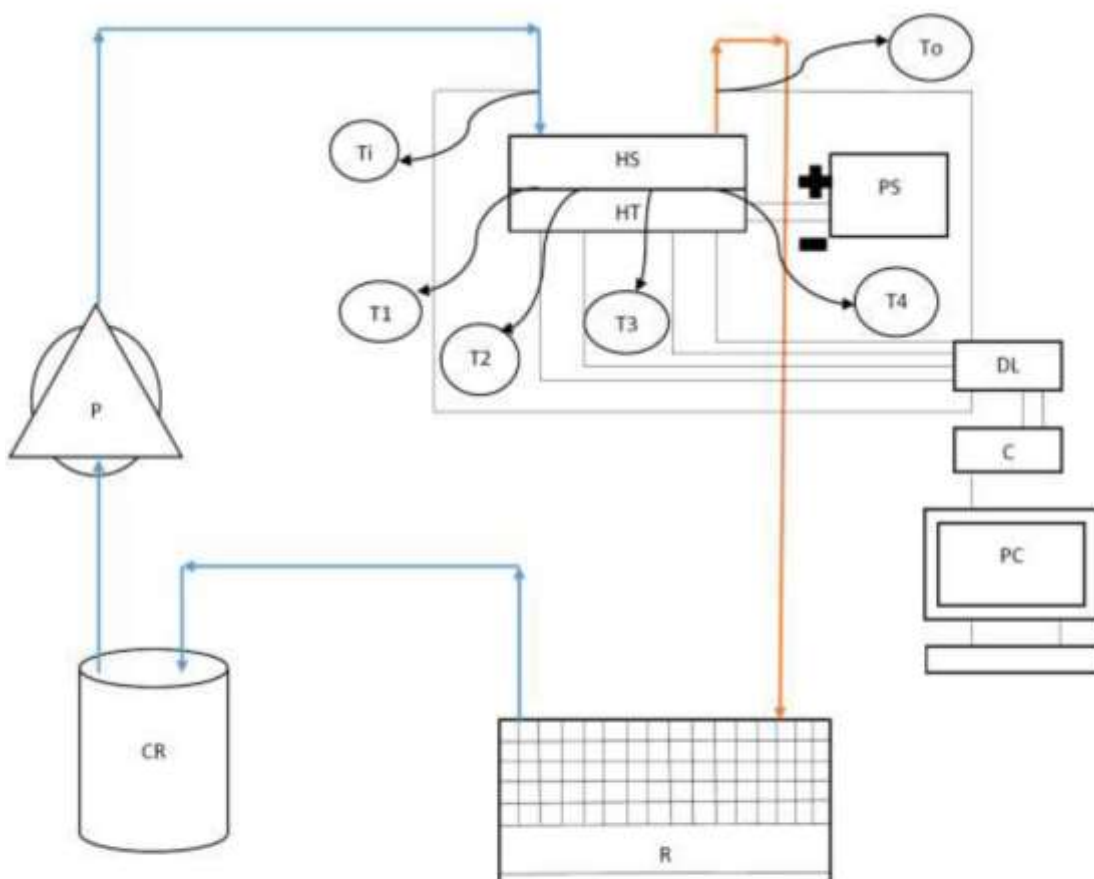


شکل ۴-۱۴: تصویر سیستم آزمایشگاهی



شکل ۴-۱۵: شماتیک نمونه چاه حرارتی مونتاز شده

- ۱- چاه حرارتی
- ۲- ورق سیلیکون
- ۳- منبع حرارتی
- ۴- ورق کلینگریک (نسوز سیم‌دار)
- ۵- پلکسی گلس
- ۶- کانال سیال (فضای عبور سیال)



P	پمپ
CR	مخزن
R	رادیاتور
PC	رایانه
T	حسگر دما
C	مبدل
DL	داده نگار
PS	اتوترانس
HS	جاذب حرارتی
HT	منبع حرارتی

شکل ۴-۱۶: شماتیک سیستم آزمایشگاهی



فصل ۵ : نتایج



## مقدمه

این فصل به سه بخش تقسیم می‌شود بطوریکه بخش اول به نتایج شار حرارتی ۱۰۰ وات اختصاص دارد و در بخش بعدی نتایج حاصل از شار حرارتی ۱۵۰ وات بررسی می‌شود؛ و نهایتاً آنالیز عدم قطعیت ارائه شده است.

### ۵-۱ نتایج حاصل از شار حرارتی ۱۰۰ وات

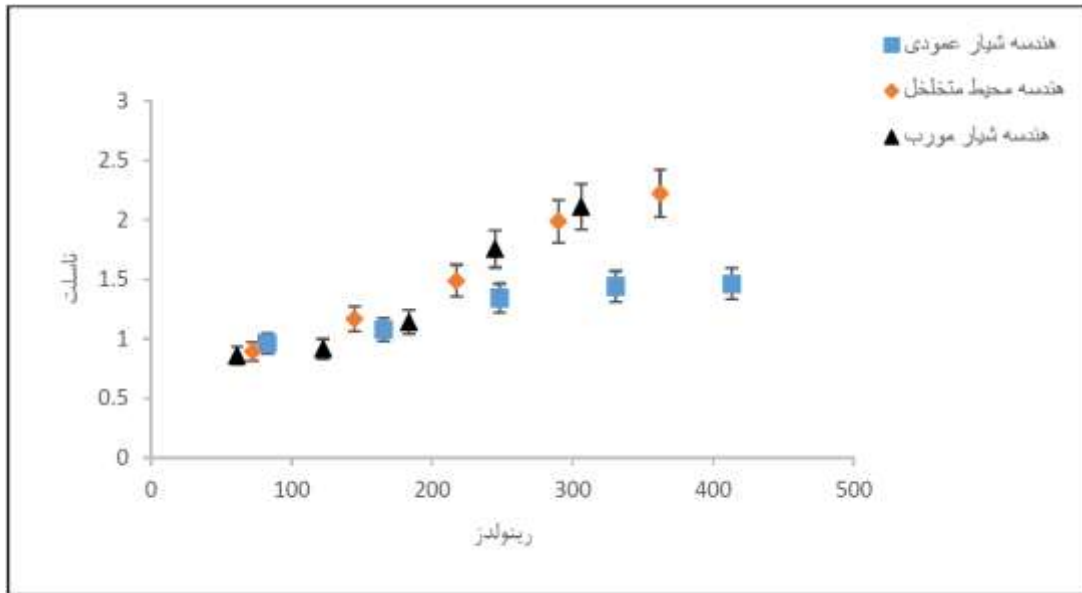
#### ۵-۱-۱ مقایسه هندسه‌های شیار عمودی، محیط متخلخل و شیار مورب

عدد ناسلت و عدد رینولدز برای آب مقطر به‌عنوان سیال مورد استفاده در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد عدد ناسلت با افزایش رینولدز برای هر سه ساختار هندسی افزایش می‌یابد. با این وجود شیب افزایش ناسلت در دو هندسه محیط متخلخل و هندسه شیار مورب نسبت به هندسه شیار عمودی بیشتر است. دلیل این موضوع تعامل بیشتر انتقال حرارت با سیال است که در هندسه شیار عمودی سیال مسیر مستقیمی تا خروجی طی کرده و مساحت درگیر با فین‌ها نسبت به دو هندسه دیگر کمتر است؛ و این امر باعث انتقال حرارت کمتر چاه حرارتی با سیال می‌شود. ناسلت در هندسه محیط متخلخل ۴۴ درصد بیشتر از هندسه شیار عمودی و ۱۱ درصد بیشتر از هندسه شیار مورب است.

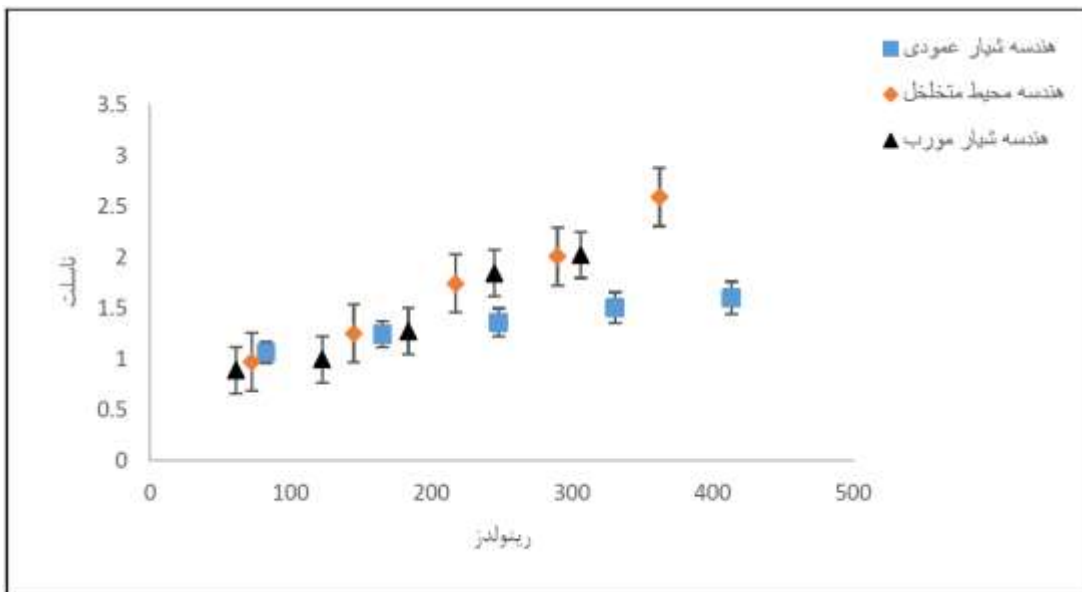
همان‌گونه که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است، ناسلت برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ درصد بیشتر از حالت آب مقطر است که دلیل آن هم انتقال حرارت بهتر نانو سیالات است. ناسلت در هندسه محیط متخلخل ۵۲ درصد بیشتر از هندسه شیار عمودی و ۲۱ درصد بیشتر از هندسه شیار مورب است.

به‌طور کلی ناسلت نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۲ درصد در مقایسه با ناسلت آب مقطر و نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ درصد افزایش یافته است. همان‌گونه که در شکل (۵-۳) نشان داده شده است ناسلت هندسه محیط متخلخل ۶۴ درصد بالاتر از هندسه شیار عمودی و ۲۳

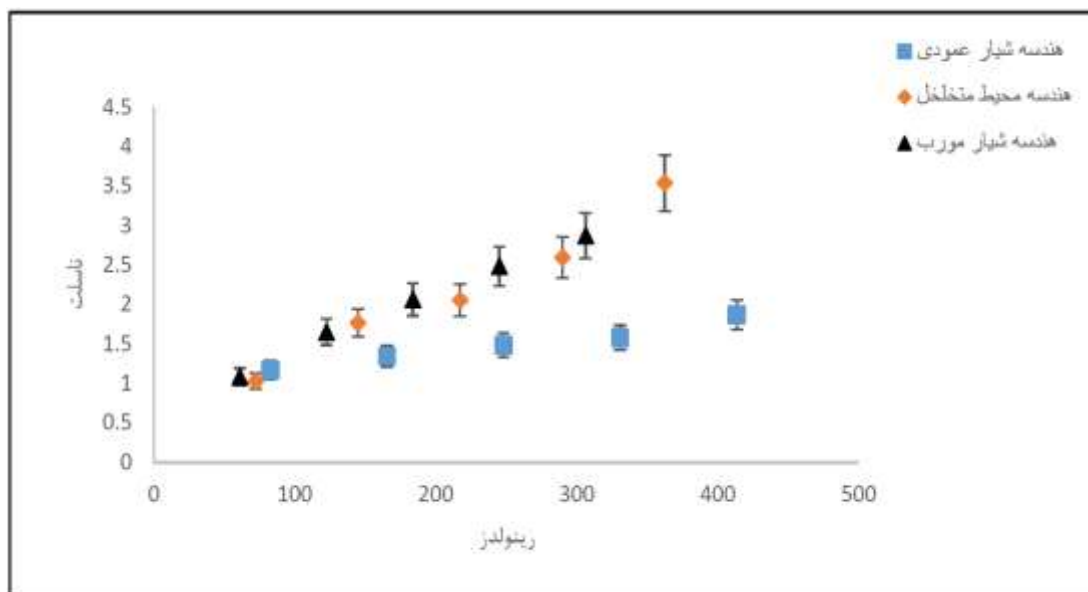
درصد بالاتر از هندسه شیار مورب است.



شکل ۵-۱: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدر برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۲: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدر برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۱٪ در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۳-۵: نمودار عدد ناسلت بر حسب رینولدز برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

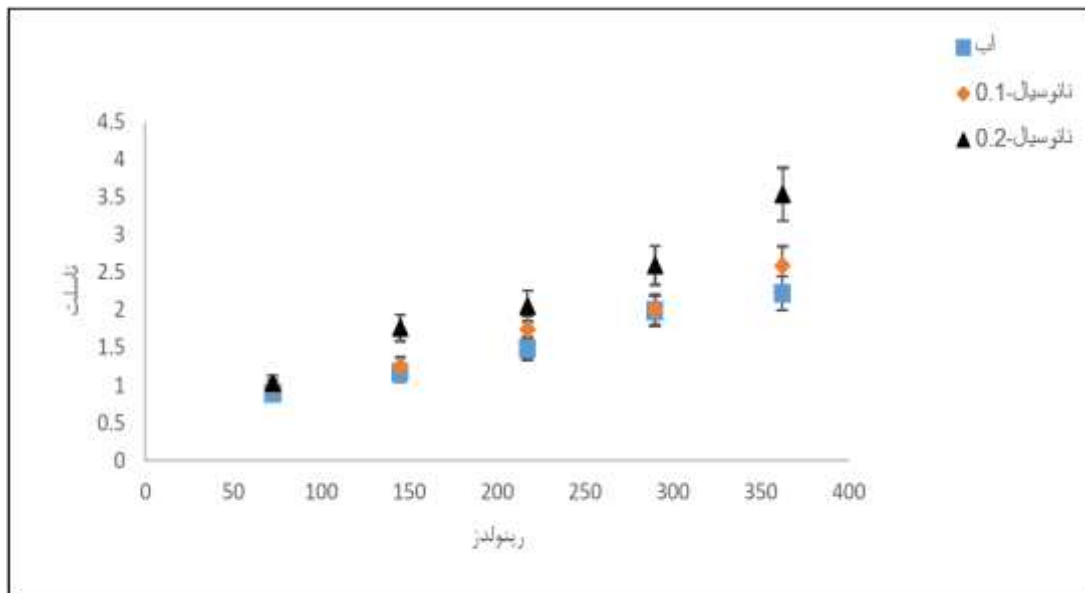
### ۵-۱-۲ مقایسه نانو سیال و آب مقطر

همان گونه که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است، مقدار عدد ناسلت در هندسه محیط متخلخل، با افزایش عدد رینولدز در هر سه مایع مورد آزمایش، افزایش می‌یابد. نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد افزایش ناسلت بیشتری را نسبت به نانو سیال با درصد حجمی ۰/۱ درصد و آب مقطر نشان می‌دهند. نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۱ درصد به ترتیب افزایش ۳۷ و ۱۶ درصدی را در میزان عدد ناسلت در مقطر نشان می‌دهند.

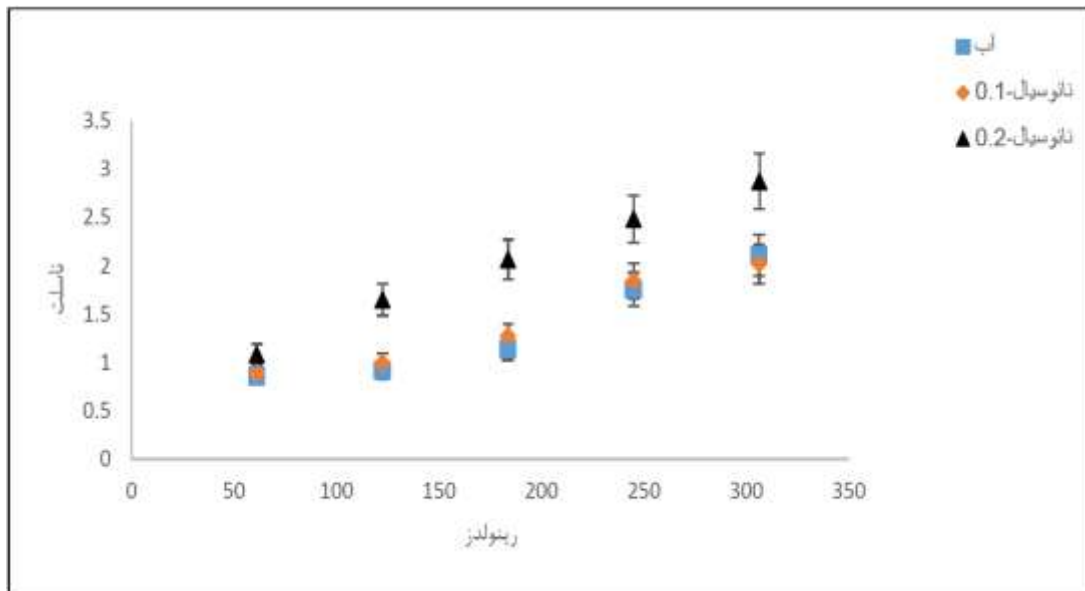
میزان افزایش عدد ناسلت در هر دو نانو سیال در ساختار هندسی شیار مورب با شیب کمتری نسبت به هندسه محیط متخلخل در حال افزایش است. با این وجود افزایش ناسلت در هندسه شیار مورب همان رفتار با هندسه محیط متخلخل را دنبال می‌کند. شیب منحنی در شکل (۵-۵) نشان داده شده است؛ که مقدار افزایش نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ و ۰/۱ به ترتیب ۳۲/۵ و ۵ درصد نسبت به آب مقطر است.

میزان افزایش عدد ناسلت با افزایش رینولدز برای هر دو نانو سیال در هندسه شیار عمودی با شیب کمتری نسبت به دو هندسه دیگر در حال افزایش است. همان گونه که در شکل (۶-۵) نشان

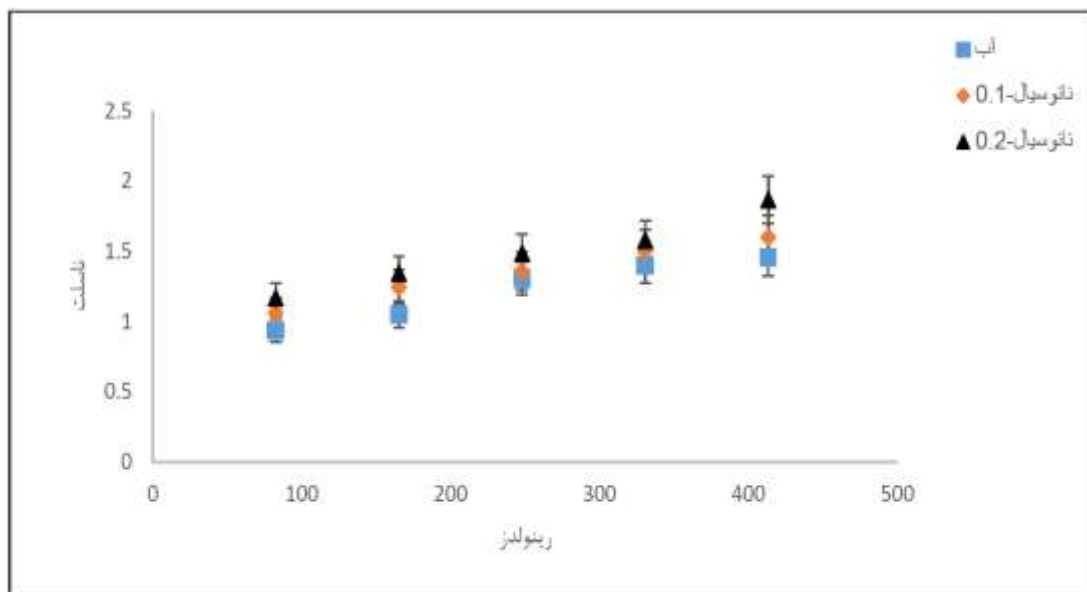
داده شده است. افزایش ناسلت برای هردو نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ و ۰/۱ درصد به ترتیب ۲۷ و ۱۴ درصد نسبت به آب مقطر است.



شکل ۴-۵: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه محیط متخلخل در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



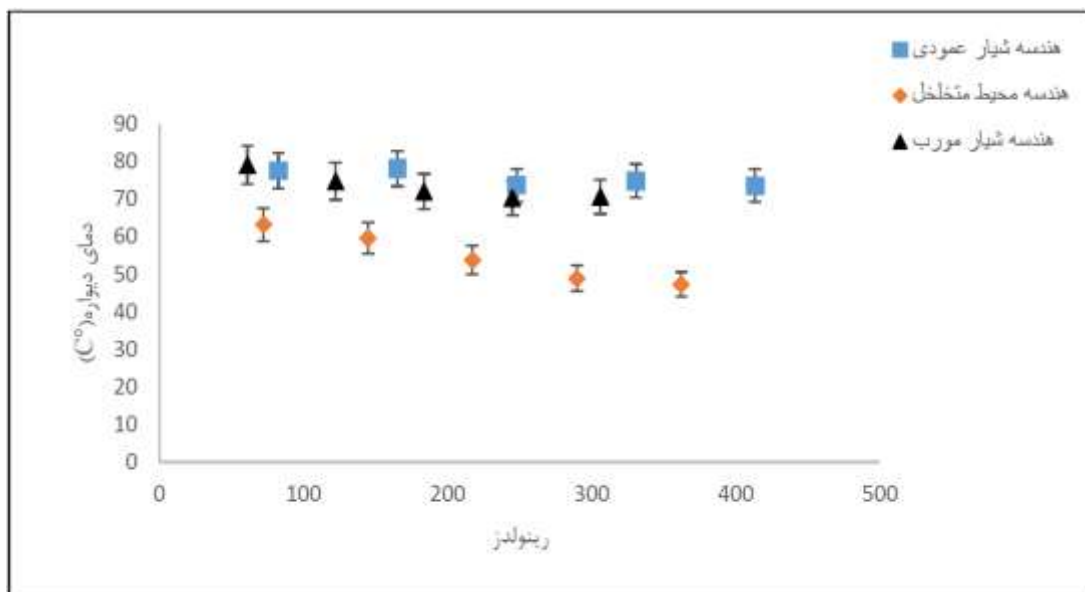
شکل ۵-۵: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه شیار مورب در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



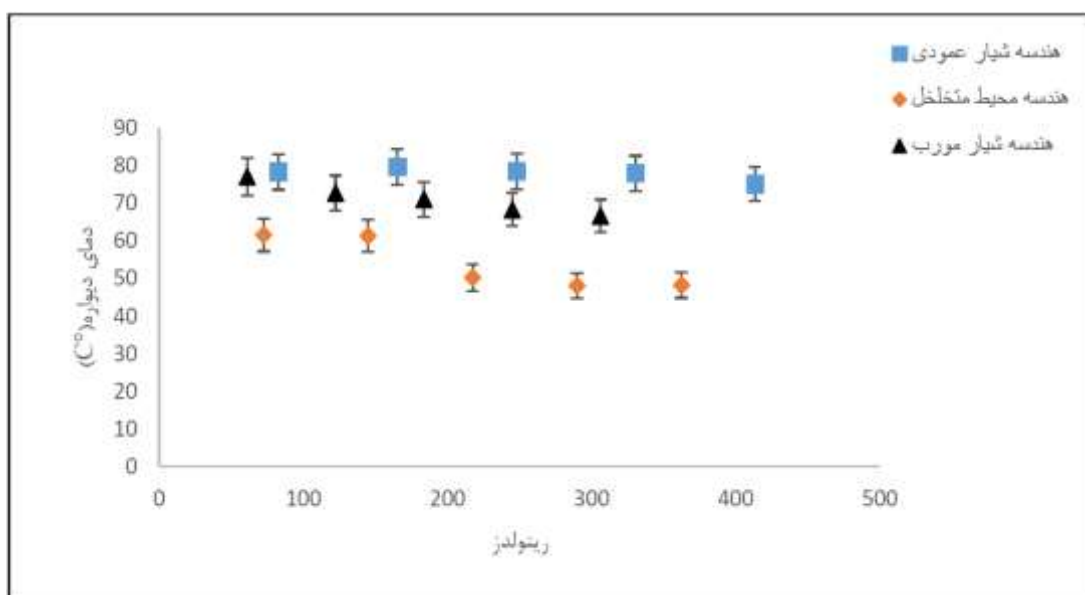
شکل ۵-۶: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه شیار عمودی در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

### ۵-۱-۳ دمای دیواره

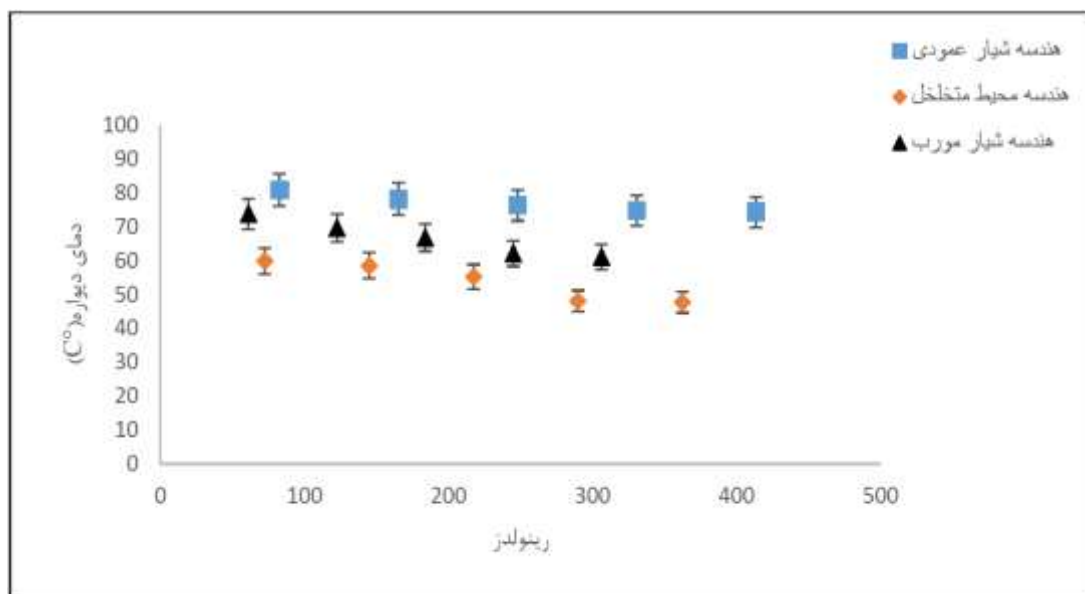
شکل‌های (۵-۷)، (۵-۸) و (۵-۹) به ترتیب برای سیال آب مقطر، نانو سیال-۰/۱ درصد و نانو سیال-۰/۲ درصد نمودار دمای دیواره برای عدد رینولدزهای مختلف را نشان می‌دهد. این گونه که دیده می‌شود دمای دیواره برای هندسه محیط متخلخل از دمای دیواره هندسه شیار مورب کمتر بوده و دمای دیواره هندسه شیار مورب کمتر از شیار عمودی است. نانو سیال-۰/۲ درصد کمترین دما را برای هر سه هندسه نشان می‌دهد. کمترین دمای دیواره در محدوده ۴۷ تا ۴۸ درجه سانتی‌گراد مربوط به عدد رینولدز ۳۶۲/۵۳ است که مربوط به نانو سیال-۰/۲ درصد در هندسه محیط متخلخل است.



شکل ۷-۵: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۸-۵: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال با درصد حجمی ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۹: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

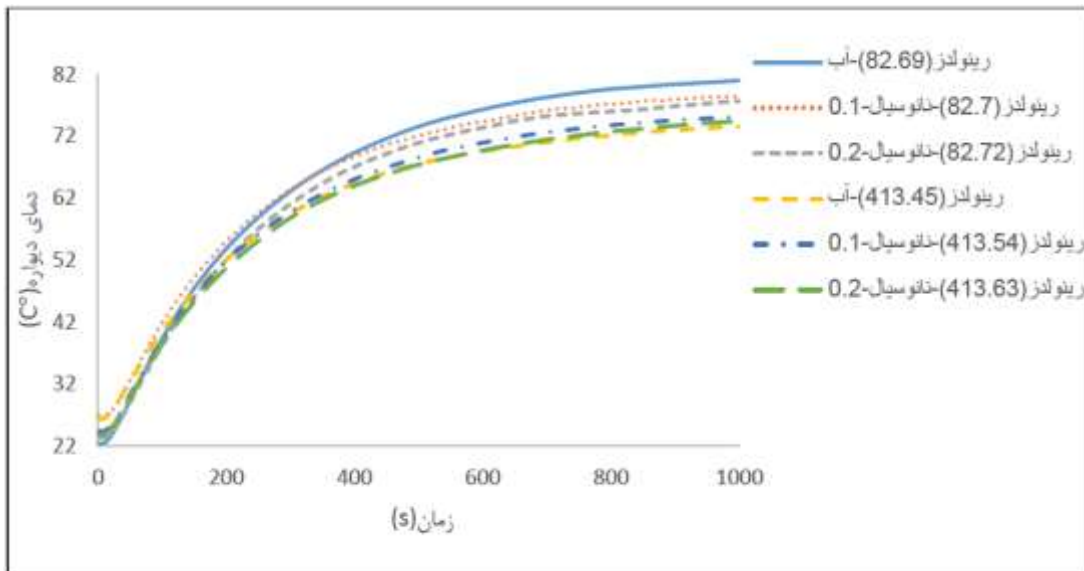
### ۵-۱-۳-۱ مقایسه سیالات مختلف در نمودارهای دمای دیواره نسبت به زمان

هدف اصلی ما از انجام این آزمایش‌ها کاهش دما و کنترل آن توسط سیال است، همان‌طور که در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است، با استفاده از چاه حرارتی در خنک کاری قطعات الکترونیکی می‌توان از افزایش خطی دما نسبت به زمان جلوگیری کرد که در نمودارها در ابتدای زمان دیده می‌شود که دما به‌طور خطی در حال افزایش است. نتایج به این صورت است که با افزایش عدد رینولدز دما کاهش پیدا کرده و کنترل دما توسط نانو سیالات نسبت به آب مقطر بهتر است. شکل (۵-۱۰) مربوط به هندسه شیار عمودی است که کمترین دما مربوط به نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد است.

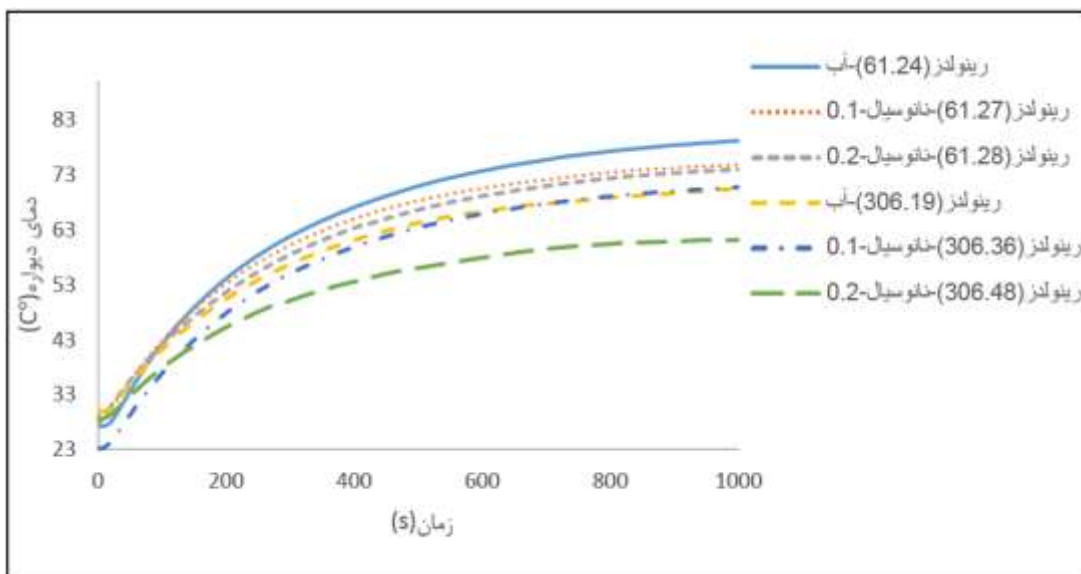
شکل (۵-۱۱) مربوط به هندسه شیار مورب است که نتایجی مشابه هندسه قبلی به ما نشان می‌دهد با این تفاوت که این هندسه عمل خنک کاری را بهتر انجام داده و انتقال حرارت بهتری دارد و دمای دیوار آن کمتر از هندسه شیار عمودی است.

شکل (۵-۱۲) مربوط به هندسه محیط متخلخل است که همان‌طور که مشاهده می‌شود دماهای کمتری را در تمام سیالات نشان می‌دهد. دلیل این امر بهتر بودن انتقال حرارت محیط متخلخل نسبت

به بقیه حالت‌هاست؛ که کمترین دما ۴۷/۳۳ درجه سانتی‌گراد مربوط به هندسه محیط متخلخل همراه با نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۲ در محدوده رینولدز ۳۶۲/۵۳ است.

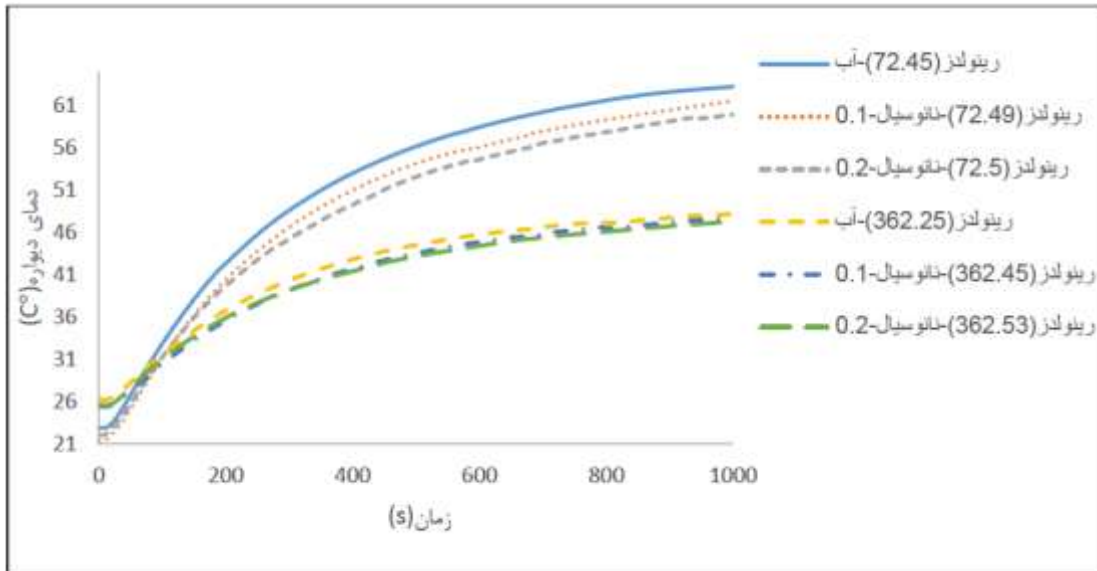


شکل ۵-۱۰: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه شیار عمودی



شکل ۵-۱۱: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه شیار مورب





شکل ۵-۱۲: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه محیط متخلخل

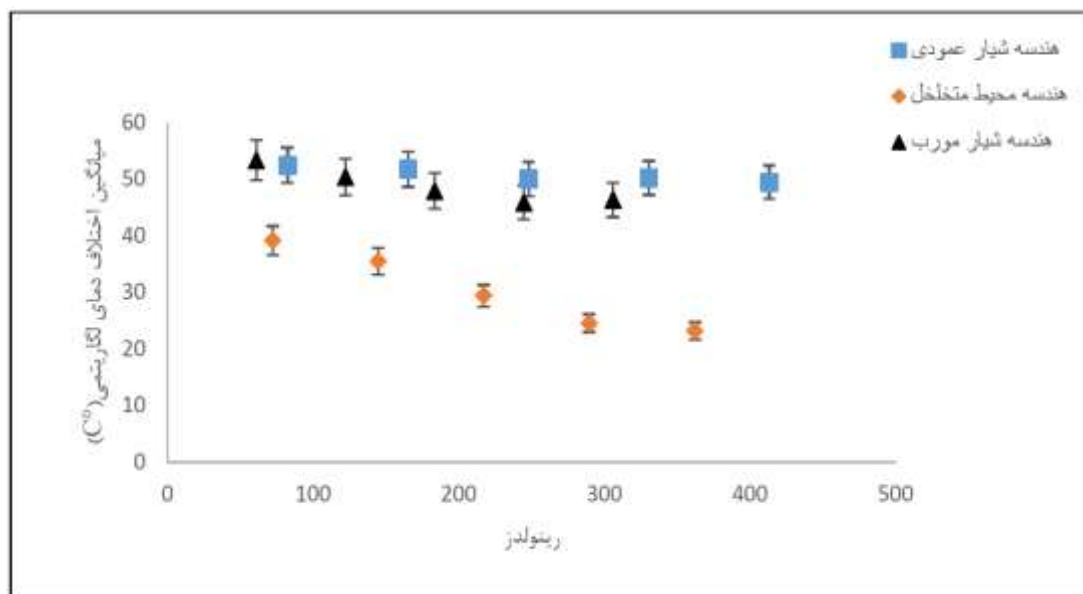
#### ۵-۱-۴ میانگین اختلاف دمای لگاریتمی (LMTD)

LMTD متوسط اختلاف درجه حرارت بین دمای دیواره و دمای سیال است که کاهش LMTD نشان‌دهنده افزایش ضریب انتقال حرارتی همرفت است؛ زیرا که آن دو بر روی هم اثر معکوس می‌گذارند. همان‌طور که در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده هنگامی آب مقطر استفاده شده است با افزایش عدد رینولدز مقدار LMTD کاهش می‌یابد برای هر سه هندسه همین روند دنبال می‌شود. با این تفاوت که شیب کاهش LMTD در هندسه محیط متخلخل بیشتر بوده و نشان‌دهنده انتقال حرارت بهتر است. به‌طور میانگین LMTD در هندسه محیط متخلخل نسبت به هندسه شیار عمودی ۴۲ درصد کاهش پیدا کرده است، این کاهش نسبت به هندسه شیار مورب کمتر بوده و مقدار آن ۱۰ درصد است.

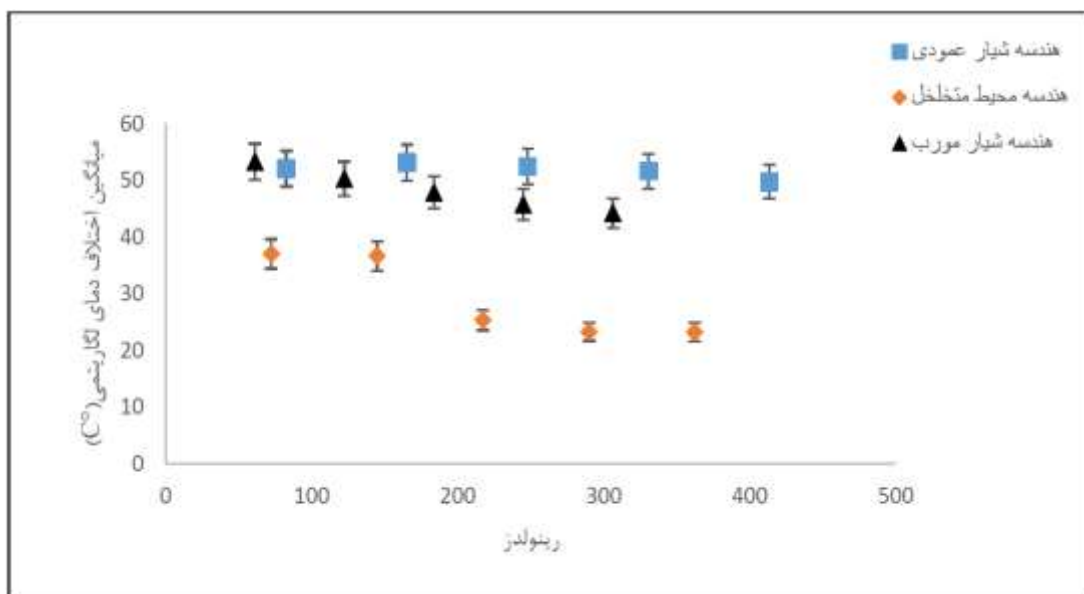
شکل (۵-۱۴) مربوط به نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ درصد است که مشاهده می‌شود انتقال حرارت بهتری نسبت به سیال آب مقطر دارد که دلیل آن هم عملکرد بهتر نانو سیال نسبت به آب است. به‌طور میانگین LMTD در هندسه محیط متخلخل نسبت به هندسه شیار عمودی ۵۱/۹ درصد کاهش پیدا کرده و این کاهش نسبت به هندسه شیار مورب ۱۳/۴۶ درصد است. در این

نمودار کمترین مقدار LMTD مربوط به هندسه محیط متخلخل است که مقدار آن  $23/28$  درجه سانتی‌گراد و در رینولدز  $362/53$  است.

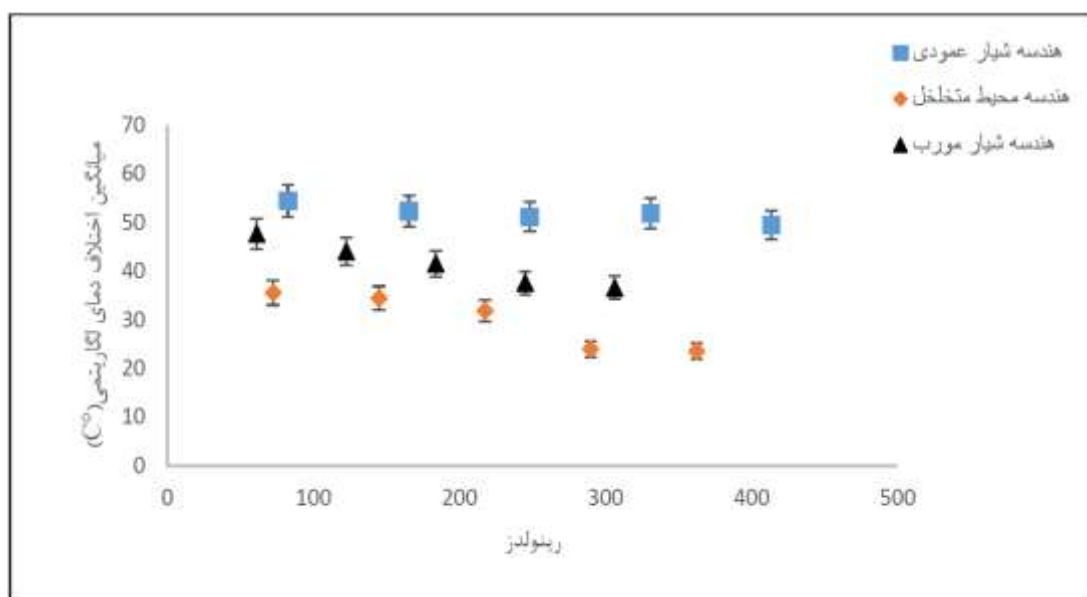
شکل (۵-۱۵) مربوط به نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی  $0/2$  درصد است که بهترین انتقال حرارت مربوط به این حالت است که شیب کاهشی نمودارها نسبت به افزایش عدد رینولدز تندتر است و به این معناست که نانو سیال با درصد  $0/2$  به علت غلظت بیشتر نانو پودر انتقال حرارت بهتری نسبت به نانو سیال با غلظت کمتر، دارد. میانگین LMTD در هندسه محیط متخلخل نسبت به هندسه شیار مورب  $27/4$  درصد و نسبت به هندسه شیار عمودی  $39/2$  درصد کاهش پیدا کرده است.



شکل ۵-۱۳: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی بر حسب رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۱۴: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی برحسب رینولدز برای نانو سیال ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۱۵: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی برحسب رینولدز برای نانو سیال ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

## ۵-۱-۵ مقاومت حرارتی

شکل (۵-۱۶) نمودار تغییرات مقاومت حرارتی را برحسب عدد رینولدز برای سیال آب مقطر نشان می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز مقدار مقاومت حرارتی برای هر سه هندسه کاهش می‌یابد، افزایش

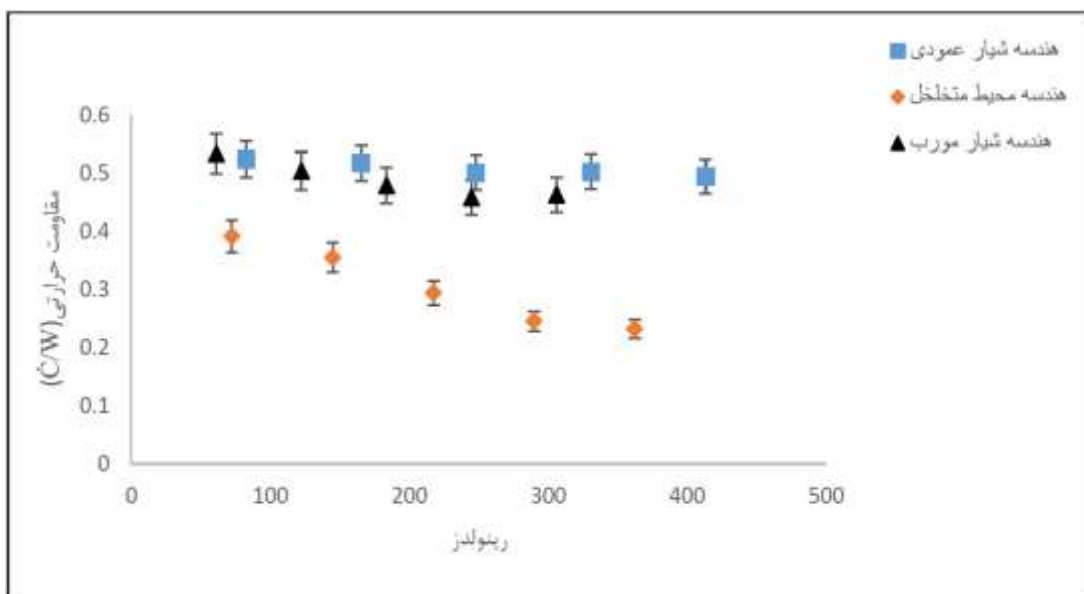
عدد رینولدز باعث تقویت پراکندگی گرمایی سیال می‌شود که این امر انتقال حرارت همرفتی را افزایش داده و در نهایت سبب کاهش مقدار مقاومت حرارتی می‌شود. در ساختار هندسه محیط متخلخل، کمترین مقدار  $0/294$  درجه سانتی‌گراد بروات در رینولدز  $362/25$  است. به‌طور کلی مقدار مقاومت حرارتی در هندسه محیط متخلخل نسبت به شیار مورب و نسبت به شیار عمودی به ترتیب  $8/5$  و  $41$  درصد کاهش می‌یابد.

برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی  $0/1$  درصد با افزایش عدد رینولدز مقدار مقاومت حرارتی برای هر سه هندسه کاهش می‌یابد (شکل (5-17)).

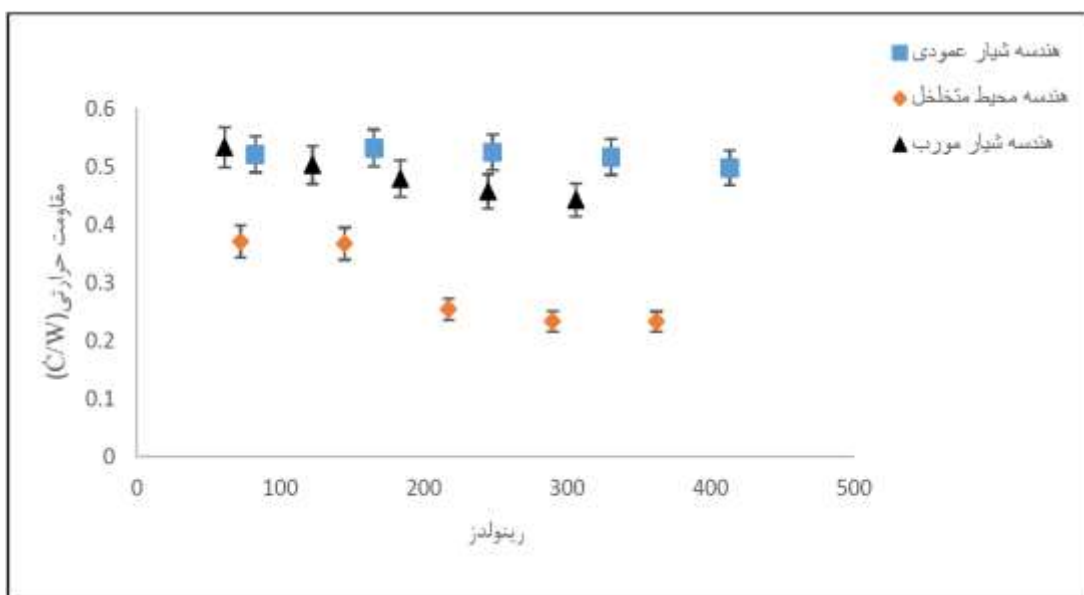
به‌طور کلی مقدار مقاومت حرارتی برای هر سه هندسه ذکر شده با مقایسه با مقاومت حرارتی آب مقطر کمتر است. در ساختار هندسی محیط متخلخل کمترین مقاومت حرارتی حاصل شده با عدد رینولدز  $362/45$  برابر است با  $0/254$  درجه سانتی‌گراد بروات است؛ و در نتیجه مقدار مقاومت حرارتی در ساختار هندسی محیط متخلخل نسبت به هندسه شیار مورب و شیار عمودی به ترتیب  $12/7$  و  $51$  درصد بیشتر کاهش پیدا می‌کند.

در حالت کلی مقاومت حرارتی برای نانو سیال  $0/2$  در مقایسه با آب مقطر و نانو سیال  $0/1$  کمتر است. کمترین مقدار برای مقاومت حرارتی  $0/235$  درجه سانتی‌گراد بروات در عدد رینولدز  $362/53$  است که مربوط به هندسه محیط متخلخل است (شکل (5-18)).

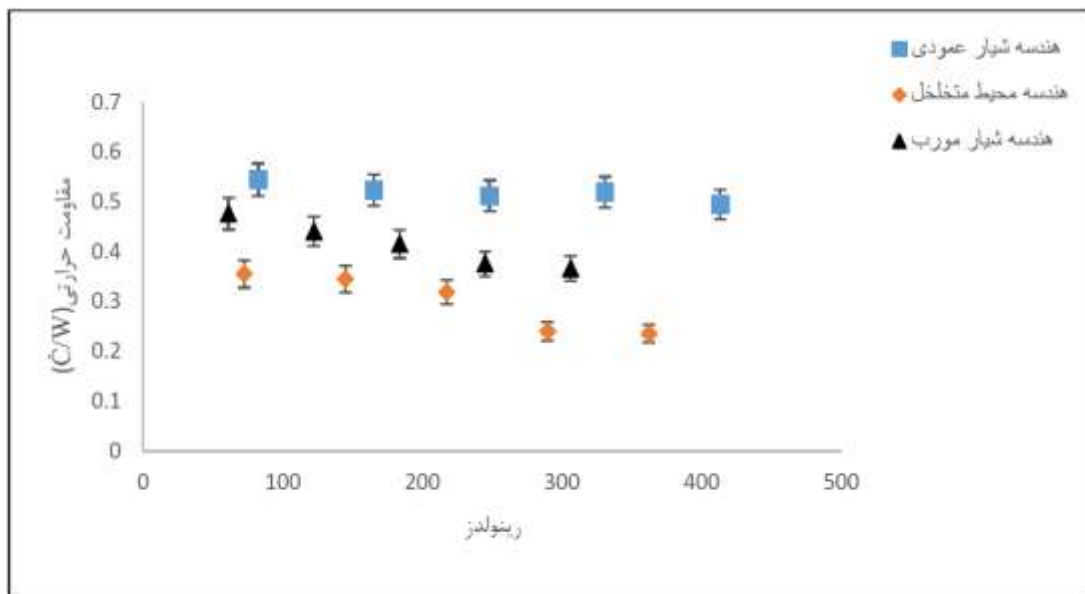
در نتیجه مقاومت حرارتی در هندسه محیط متخلخل نسبت به هندسه شیار مورب و شیار عمودی به ترتیب مقدار  $26/7$  و  $54$  درصد بیشتر کاهش پیدا کرده است.



شکل ۵-۱۶: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۱۷: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

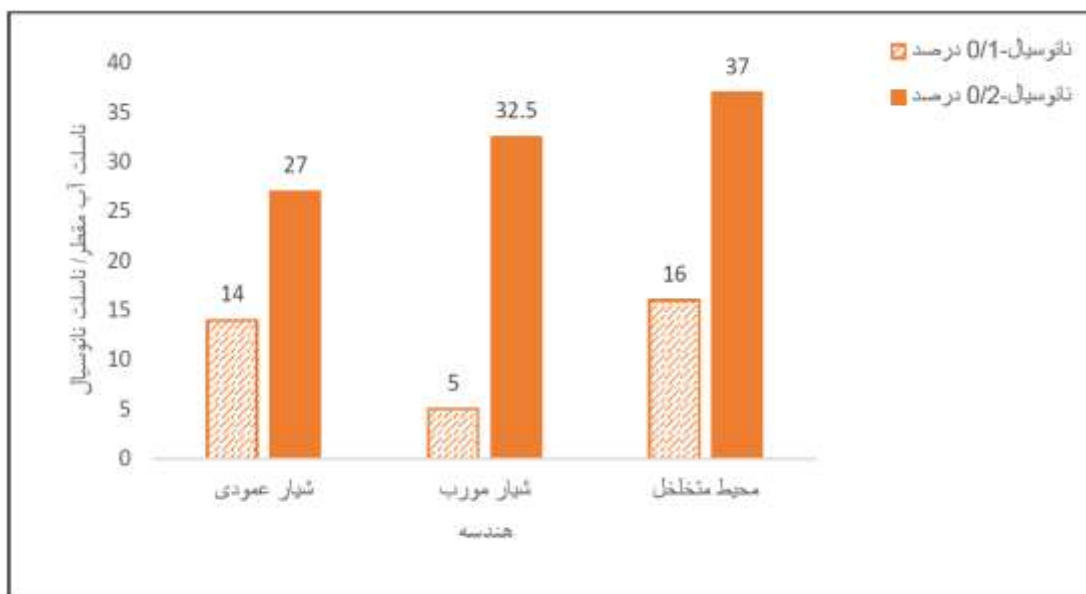


شکل ۵-۱۸: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال-۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

## ۵-۱-۶ نرخ افزایش

شکل (۵-۱۹) نمودار نرخ افزایش عدد ناسلت را برای نانو سیال-۰/۱ و نانو سیال-۰/۲ در مقایسه با آب مقطر نشان می‌دهد. نانو سیال-۰/۲ در مقایسه با نانو سیال-۰/۱ نرخ افزایش ۱۳، ۲۷/۵ و ۲۱ درصدی را به ترتیب برای هندسه شیار عمودی، هندسه شیار مورب و هندسه محیط متخلخل ارائه می‌دهد. نوع ساختار هندسی محیط متخلخل گواه بر نرخ افزایش است، در نتیجه نانو سیال-۰/۲ نرخ افزایش ۳۷ درصدی را برای هندسه محیط متخلخل نسبت به آب مقطر ارائه می‌دهد. با این وجود هنگامی که از نانو سیال-۰/۱ درصدی استفاده می‌شود ۱۶ درصد افزایش را شاهدیم.

نرخ افزایش برای ساختار هندسی شیار مورب با نانو سیال-۰/۲ و نانو سیال-۰/۱ به ترتیب ۳۲/۵ و ۵ درصد است. همچنین این مقادیر برای هندسه شیار عمودی ۲۷ و ۱۴ درصد است.



شکل ۵-۱۹: نمودار مقایسه عدد ناسلت نانو سیال نسبت به عدد ناسلت آب مقطر برای هندسه‌های متفاوت

## ۵-۲ نتایج حاصل از شار حرارتی ۱۵۰ وات

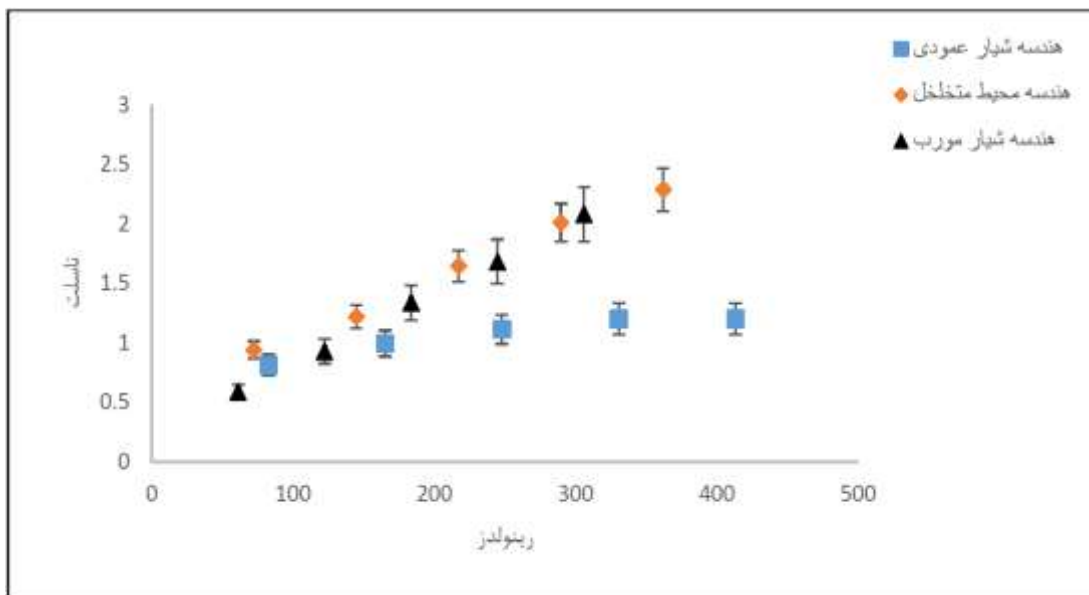
### ۵-۲-۱ مقایسه هندسه‌های شیار عمودی، محیط متخلخل و شیار مورب

عدد ناسلت و عدد رینولدز برای آب مقطر به‌عنوان سیال مورد استفاده در شکل (۵-۲۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد عدد ناسلت با افزایش رینولدز برای هر سه ساختار هندسی افزایش می‌یابد. با این وجود شیب افزایش ناسلت در دو هندسه محیط متخلخل و هندسه شیار مورب نسبت به هندسه شیار عمودی بیشتر است. دلیل این موضوع تعامل بیشتر انتقال حرارت با سیال است که در هندسه شیار عمودی سیال مسیر مستقیمی تا خروجی طی کرده و مساحت درگیر با فین‌ها نسبت به دو هندسه دیگر کمتر است؛ و این امر باعث انتقال حرارت کمتر چاه حرارتی با سیال می‌شود. ناسلت در هندسه محیط متخلخل  $47/7$  درصد بیشتر از هندسه شیار عمودی و  $16/3$  درصد بیشتر از هندسه شیار مورب است.

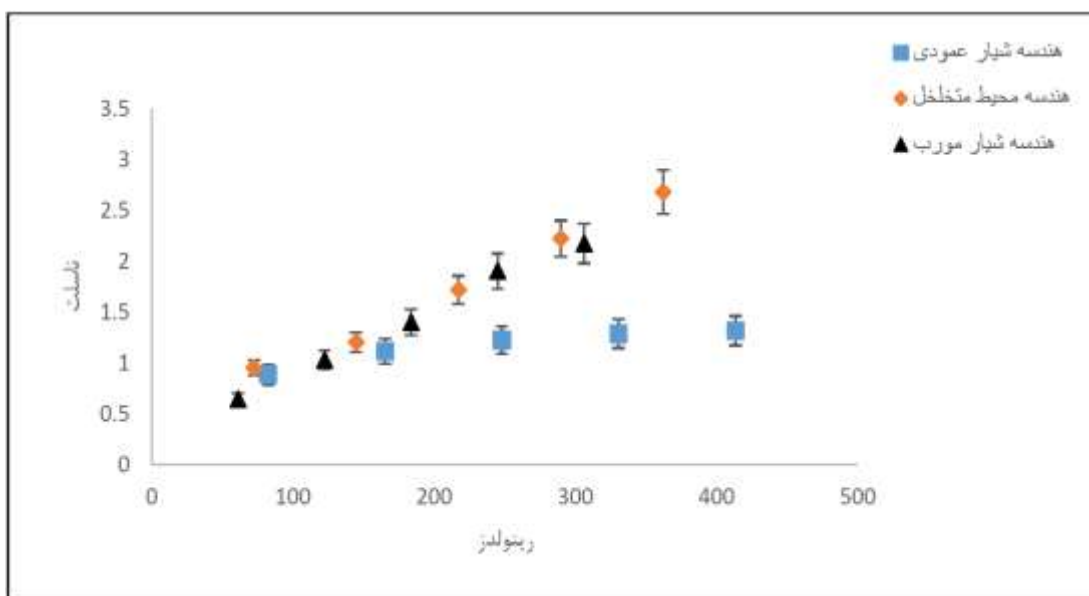
همان‌گونه که در شکل (۵-۲۱) نشان داده شده است، ناسلت برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی  $0/1$  درصد بیشتر از حالت آب مقطر است که دلیل آن هم انتقال حرارت بهتر نانو سیالات است. ناسلت در هندسه محیط متخلخل  $40$  درصد بیشتر از هندسه شیار عمودی و  $7$  درصد بیشتر از

هندسه شیار مورب است.

به‌طور کلی ناسلت نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۲ درصد در مقایسه با ناسلت آب مقطر و نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ درصد افزایش یافته است. همان‌گونه که در شکل (۵-۲۲) نشان داده شده است ناسلت هندسه محیط متخلخل ۴۶/۲ درصد بالاتر از هندسه شیار عمودی و ۱۱ درصد بالاتر از هندسه شیار مورب است.



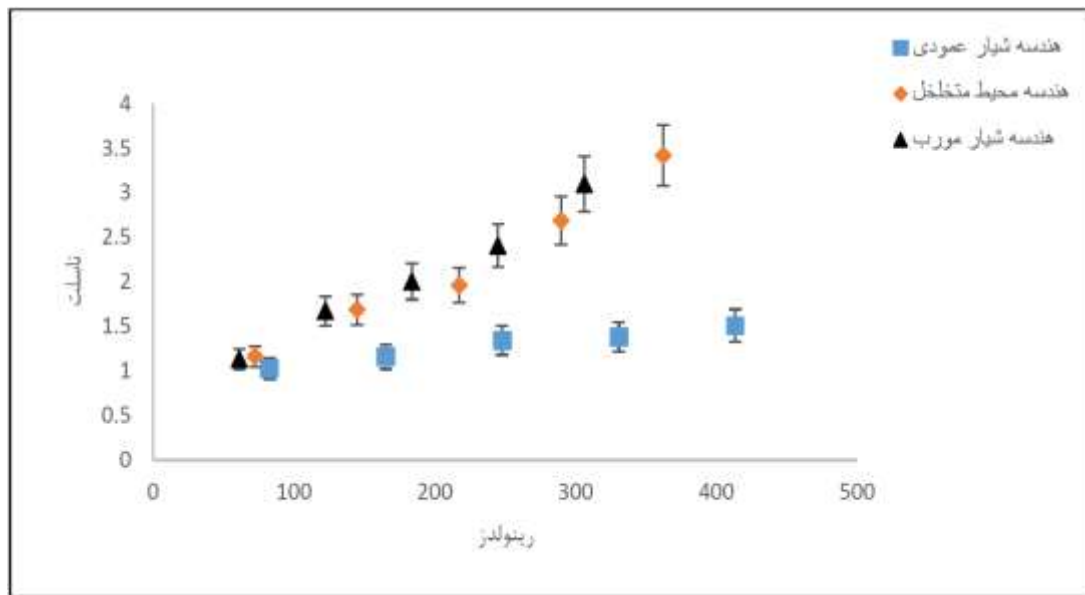
شکل ۵-۲۰: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۲۱: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ درصد در زمان



۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۲۲: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

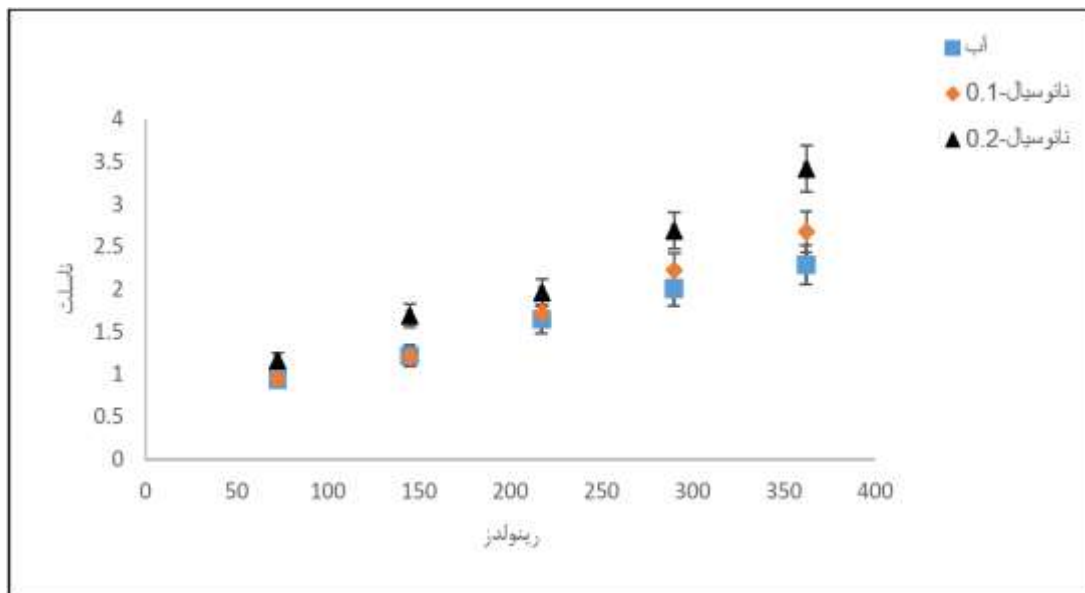
## ۵-۲-۲ مقایسه نانو سیال و آب مقطر

همان گونه که در شکل (۵-۲۳) نشان داده شده است، مقدار عدد نالت در هندسه محیط متخلخل، با افزایش عدد رینولدز در هر سه مایع مورد آزمایش، افزایش می یابد. نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد افزایش ناسلت بیشتری را نسبت به نانو سیال با درصد حجمی ۰/۱ درصد و آب مقطر نشان می دهند. نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد و ۰/۱ درصد، به ترتیب افزایش ۳۶/۲۵ و ۱۰/۹ درصدی را در میزان عدد ناسلت در مقایسه با آب مقطر نشان می دهند.

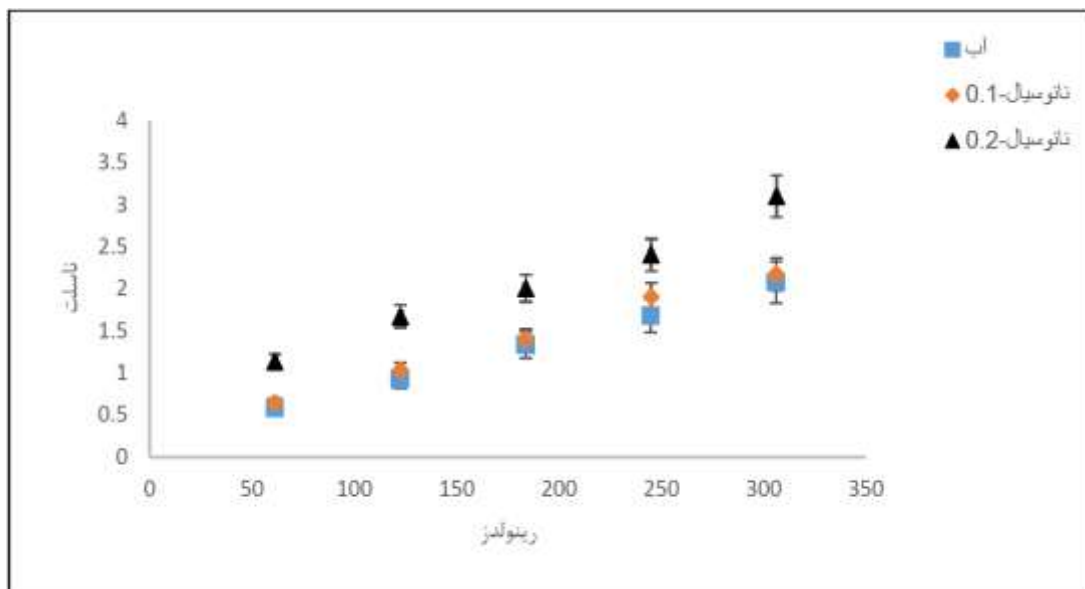
میزان افزایش عدد ناسلت در هر دو نانو سیال در ساختار هندسی شیار مورب با شیب کمتری نسبت به هندسه محیط متخلخل در حال افزایش است. با این وجود افزایش ناسلت در هندسه شیار مورب همان رفتار با هندسه محیط متخلخل را دنبال می کند. شیب منحنی در شکل (۵-۲۴) نشان داده شده است؛ که مقدار افزایش نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ و ۰/۱ به ترتیب ۳۷/۳۶ و ۸/۹ درصد نسبت به آب مقطر است.

میزان افزایش عدد ناسلت با افزایش رینولدز برای هر دو نانو سیال در هندسه شیار عمودی با

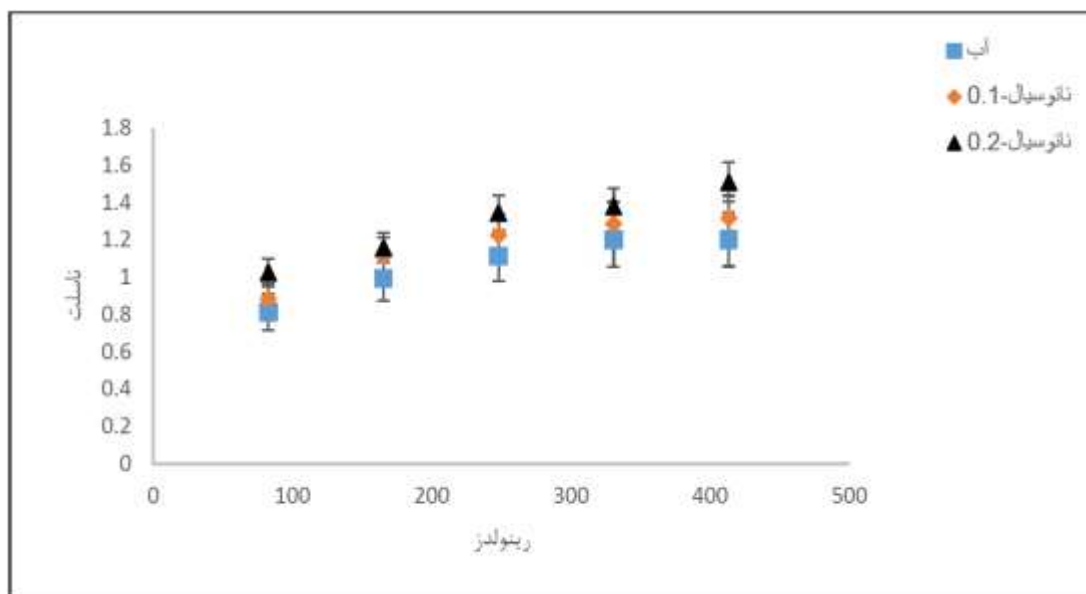
شیب کمتری نسبت به دو هندسه دیگر در حال افزایش است. همان‌گونه که در شکل (۵-۲۵) نشان داده شده است. افزایش ناسلت برای هردو نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ و ۰/۱ درصد به ترتیب ۲۰/۵۵ و ۹/۲۶ درصد نسبت به آب مقطر است.



شکل ۵-۲۳: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه محیط متخلخل در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



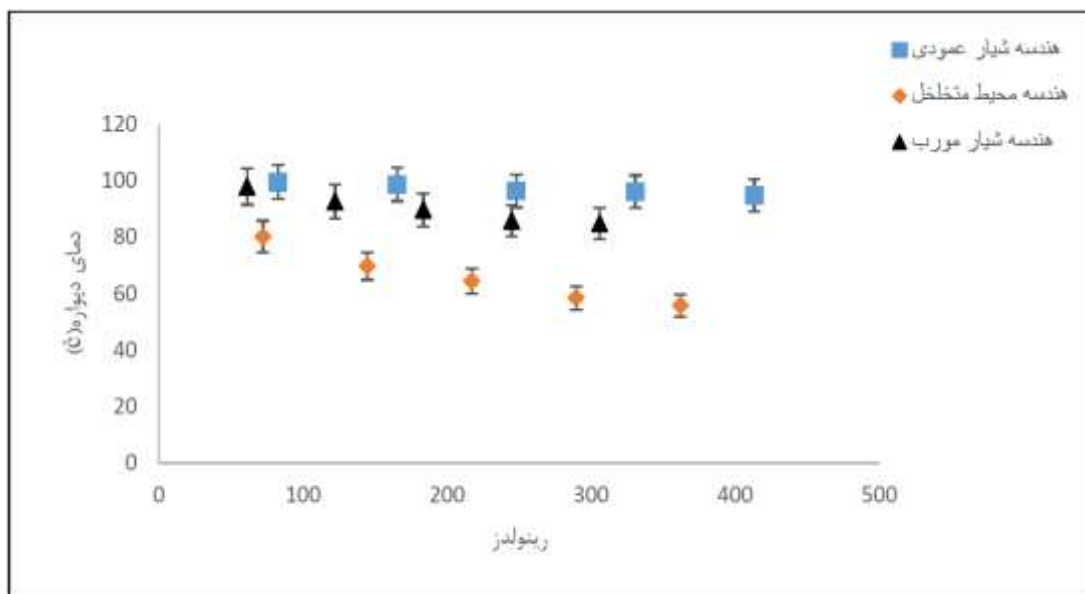
شکل ۵-۲۴: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه شیار مورب در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



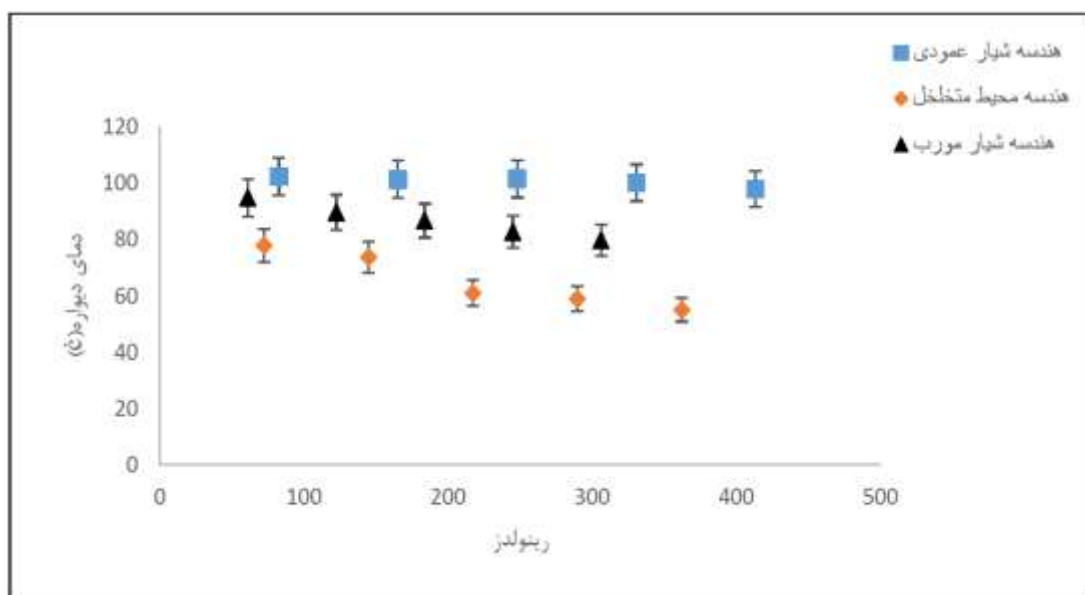
شکل ۵-۲۵: نمودار عدد ناسلت برحسب رینولدز برای هندسه شیار عمودی در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

### ۵-۲-۳ دمای دیواره

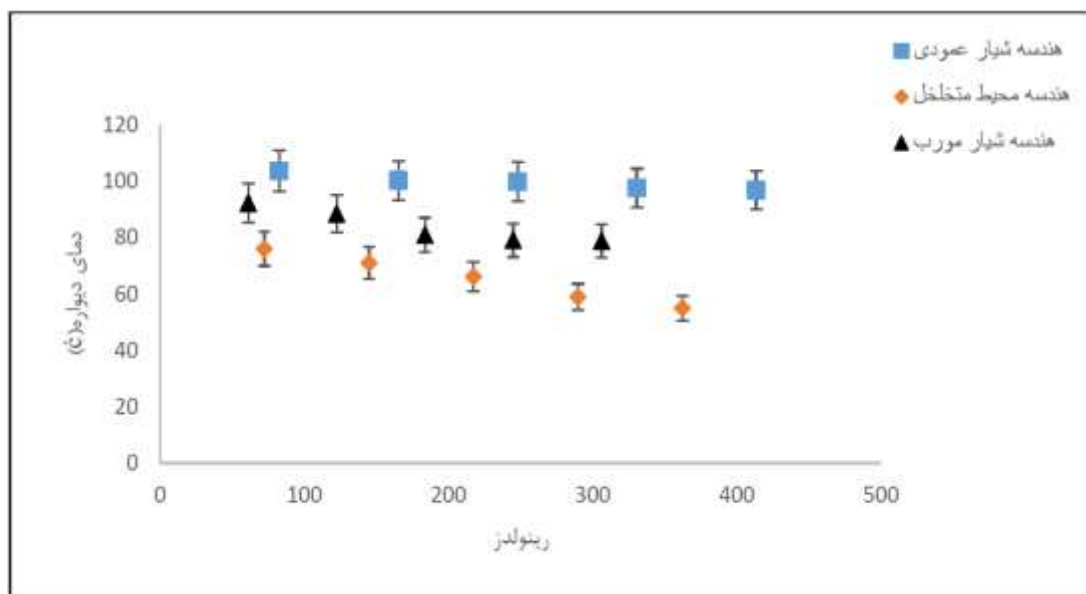
شکل‌های (۵-۲۶)، (۵-۲۷) و (۵-۲۸) به ترتیب برای سیال آب مقطر، نانو سیال-۰/۱ درصد و نانو سیال-۰/۲ درصد، نمودار دمای دیواره برای عدد رینولدزهای مختلف را نشان می‌دهد. این گونه که دیده می‌شود دمای دیواره برای هندسه محیط متخلخل از دمای دیواره هندسه شیار مورب کمتر بوده و دمای دیواره هندسه شیار مورب کمتر از شیار عمودی است. نانو سیال-۰/۲ درصد کمترین دما را برای هر سه هندسه نشان می‌دهد. کمترین دمای دیواره در محدوده ۵۵ تا ۵۶ درجه سانتی‌گراد مربوط به عدد رینولدز ۳۶۲/۵۳ است که مربوط به نانو سیال-۰/۲ درصد در هندسه محیط متخلخل است.



شکل ۵-۲۶: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۲۷: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال با درصد حجمی ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۲۸: مقایسه هندسه‌ها در نمودار دمای دیواره بر حسب عدد رینولدر برای نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

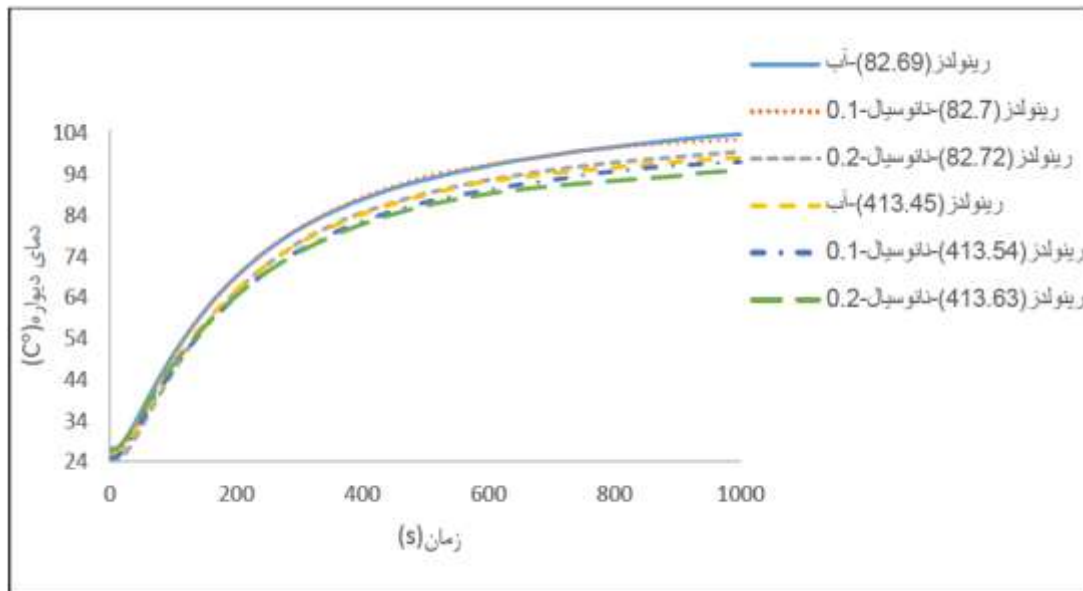
### ۵-۲-۳-۱ مقایسه سیالات مختلف در نمودارهای دمای دیواره نسبت به زمان

هدف اصلی ما از انجام این آزمایش‌ها کاهش دما و کنترل آن توسط سیال است، همان‌طور که در شکل (۵-۲۹) نشان داده شده است، با استفاده از چاه حرارتی در خنک کاری قطعات الکترونیکی می‌توان از افزایش خطی دما نسبت به زمان جلوگیری کرد که در نمودارها در ابتدای زمان دیده می‌شود که دما به‌طور خطی در حال افزایش است. نتایج به این صورت است که با افزایش عدد رینولدر دما کاهش پیدا کرده و کنترل دما توسط نانو سیالات نسبت به آب مقطر بهتر است. شکل (۵-۲۹) مربوط به هندسه شیار عمودی است که کمترین دما مربوط به نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد است.

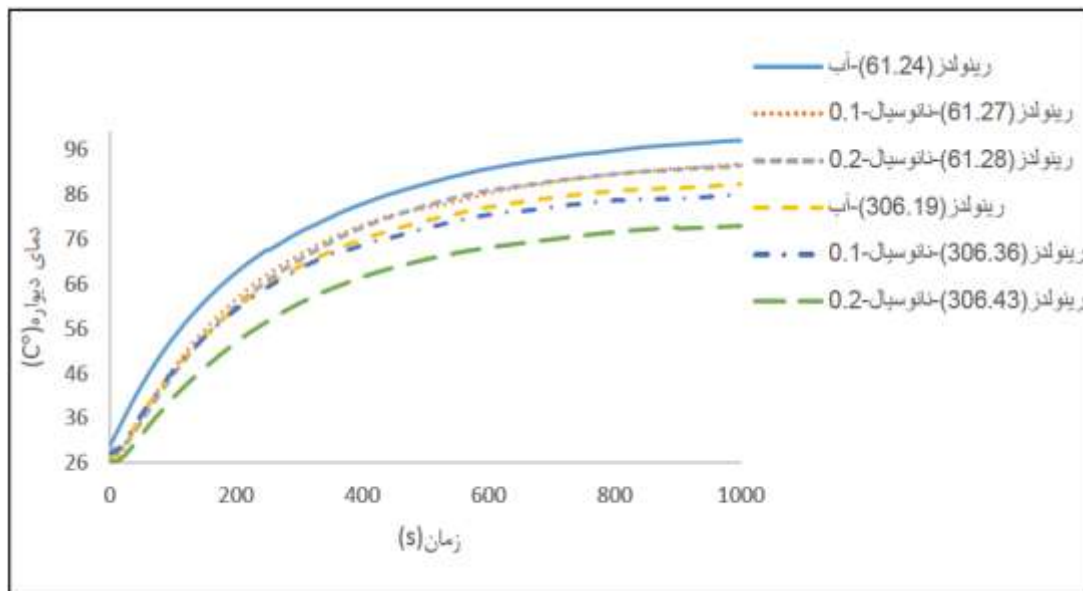
شکل (۵-۳۰) مربوط به هندسه شیار مورب است که نتایجی مشابه هندسه قبلی به ما نشان می‌دهد با این تفاوت که این هندسه عمل خنک کاری را بهتر انجام داده و انتقال حرارت بهتری دارد و دمای دیواره آن کمتر از هندسه شیار عمودی است.

شکل (۵-۳۱) مربوط به هندسه محیط متخلخل است که همان‌طور که مشاهده می‌شود دماهای کمتری را در تمام سیالات نشان می‌دهد. دلیل این امر بهتر بودن انتقال حرارت محیط متخلخل نسبت

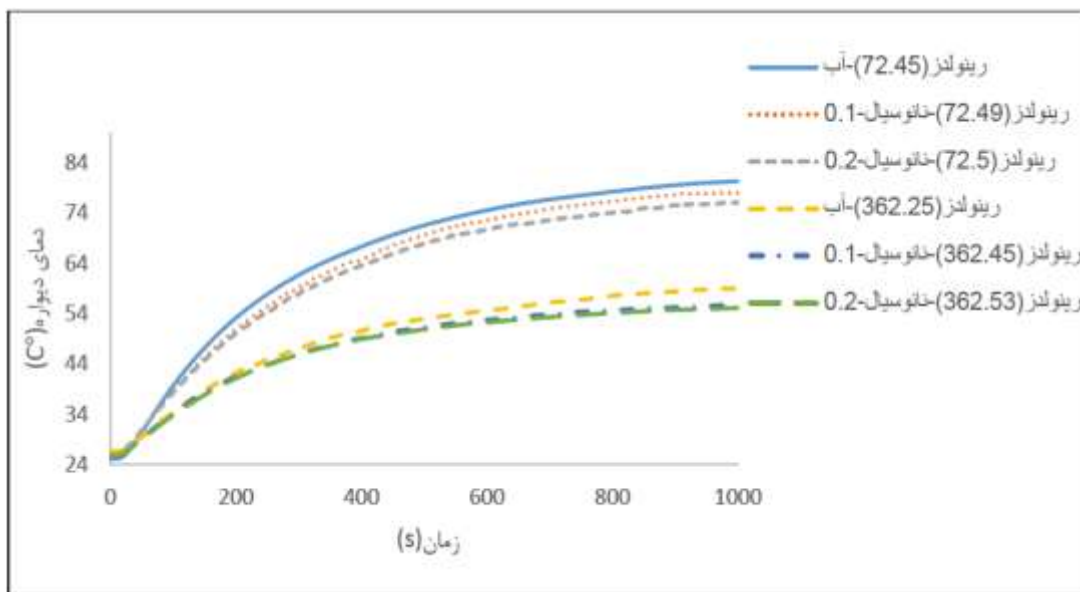
به بقیه حالت‌هاست؛ که کمترین دما ۵۵/۱۱ درجه سانتی‌گراد مربوط به هندسه محیط متخلخل همراه با نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۲ در محدوده رینولدز ۳۶۲/۵۳ است.



شکل ۲۹-۵: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه شیار عمودی



شکل ۳۰-۵: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه شیار مورب



شکل ۵-۳۱: نمودار دمای دیواره نسبت به زمان برای هندسه محیط متخلخل

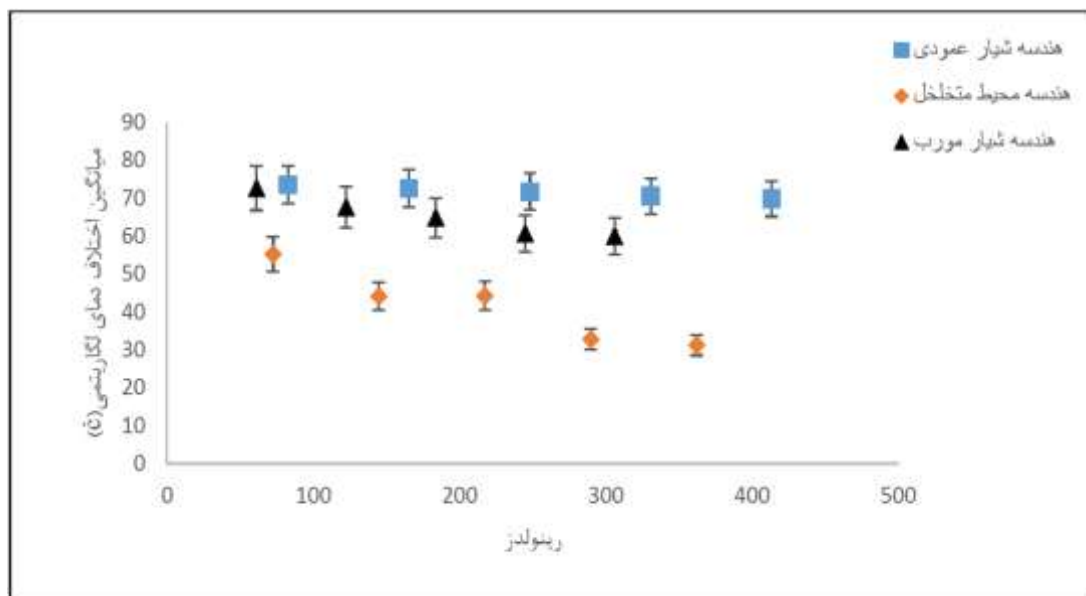
## ۵-۲-۴ میانگین اختلاف دمای لگاریتمی (LMTD)

LMTD متوسط اختلاف درجه حرارت بین دمای دیواره و دمای سیال است که کاهش LMTD نشان‌دهنده افزایش ضریب انتقال حرارتی همرفت است؛ زیرا که آن دو بر روی هم اثر معکوس می‌گذارند. همان‌طور که در شکل (۵-۳۲) نشان داده شده هنگامی آب مقطر استفاده شده است با افزایش عدد رینولدز مقدار LMTD کاهش می‌یابد برای هر سه هندسه همین روند دنبال می‌شود. با این تفاوت که شیب کاهش LMTD در هندسه محیط متخلخل بیشتر بوده و نشان‌دهنده انتقال حرارت بهتر است. به‌طور میانگین LMTD در هندسه محیط متخلخل نسبت به هندسه شیار عمودی ۵۵/۲ درصد کاهش پیدا کرده است، این کاهش نسبت به هندسه شیار مورب کمتر بوده و مقدار آن ۱۴/۱ درصد است.

شکل (۵-۳۳) مربوط به نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی ۰/۱ درصد است که مشاهده می‌شود انتقال حرارت بهتری نسبت به سیال آب مقطر دارد که دلیل آن هم عملکرد بهتر نانو سیال نسبت به آب است. به‌طور میانگین LMTD در هندسه محیط متخلخل نسبت به هندسه شیار عمودی ۵۹/۸ درصد کاهش پیدا کرده و این کاهش نسبت به هندسه شیار مورب ۱۵/۲ درصد است. در این

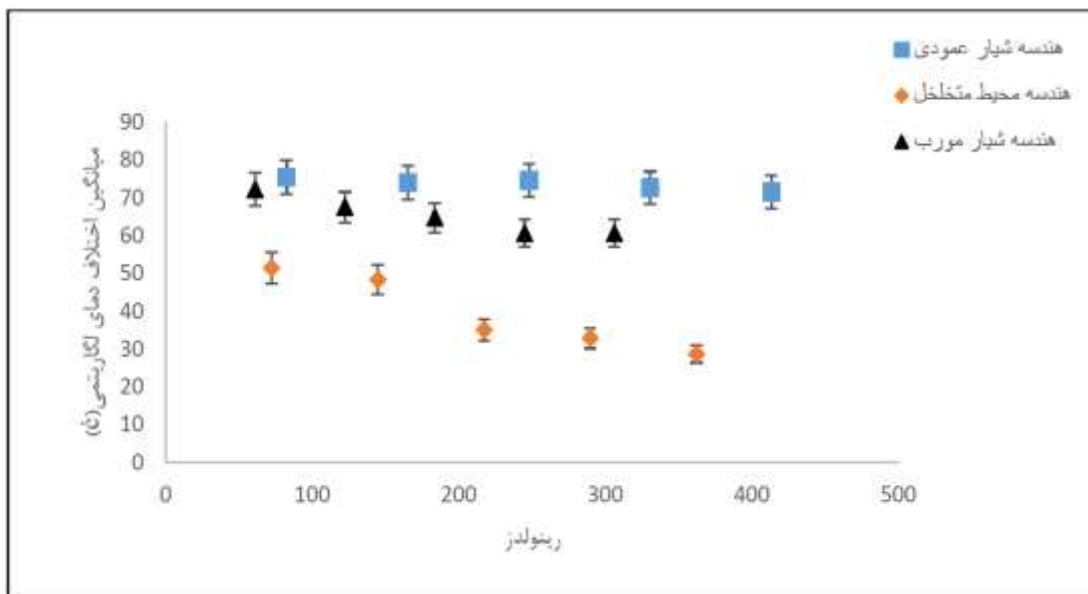
نمودار کمترین مقدار LMTD مربوط به هندسه محیط متخلخل است که مقدار آن  $28/71$  درجه سانتی‌گراد و در رینولدز  $362/45$  است.

شکل (۵-۳۴) مربوط به نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی  $0/2$  درصد است که بهترین انتقال حرارت مربوط به این حالت است که شیب کاهشی نمودارها نسبت به افزایش عدد رینولدز تندتر است و به این معناست که نانو سیال با درصد  $0/2$  به علت غلظت بیشتر نانو پودر انتقال حرارت بهتری نسبت به نانو سیال با غلظت کمتر دارد. میانگین LMTD در هندسه محیط متخلخل نسبت به هندسه شیار مورب  $24/5$  درصد و نسبت به هندسه شیار عمودی  $56/6$  درصد کمتر است.

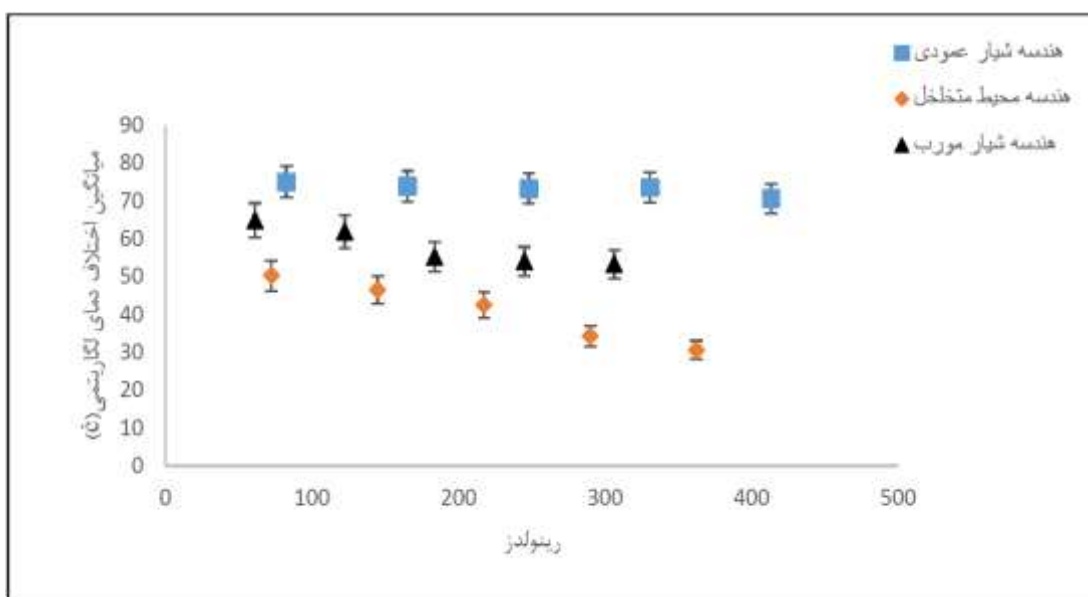


شکل ۵-۳۲: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی بر حسب رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان  $1000$  ثانیه





شکل ۵-۳۳: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی برحسب رینولدز برای نانو سیال ۰/۱- درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۳۴: مقایسه هندسه‌های مختلف در نمودار اختلاف دمای لگاریتمی برحسب رینولدز برای نانو سیال ۰/۲- درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

## ۵-۲-۵ مقاومت حرارتی

شکل (۵-۳۵) نمودار تغییرات مقاومت حرارتی را برحسب عدد رینولدز برای سیال آب مقطر نشان می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز مقدار مقاومت حرارتی برای هر سه هندسه کاهش می‌یابد،

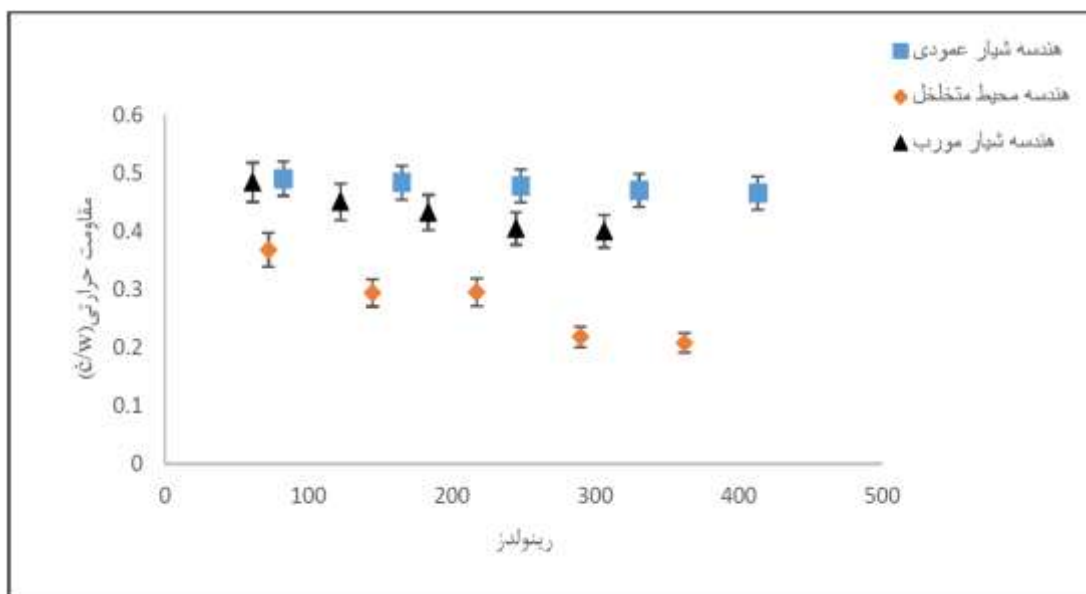
افزایش عدد رینولدز باعث تقویت پراکندگی گرمایی سیال می‌شود که این امر انتقال حرارت همرفتی را افزایش داده و در نهایت سبب کاهش مقدار مقاومت حرارتی می‌شود. در ساختار هندسه محیط متخلخل، کمترین مقدار  $0/208$  درجه سانتی‌گراد بروات در رینولدز  $362/25$  است. به‌طور کلی مقدار مقاومت حرارتی در هندسه محیط متخلخل نسبت به شیار مورب و نسبت به شیار عمودی به ترتیب  $14/1$  و  $55/3$  درصد کاهش می‌یابد.

برای نانو سیال آب-آلومینا با درصد حجمی  $0/1$  درصد با افزایش عدد رینولدز مقدار مقاومت حرارتی برای هر سه هندسه کاهش می‌یابد (شکل (۵-۳۶)).

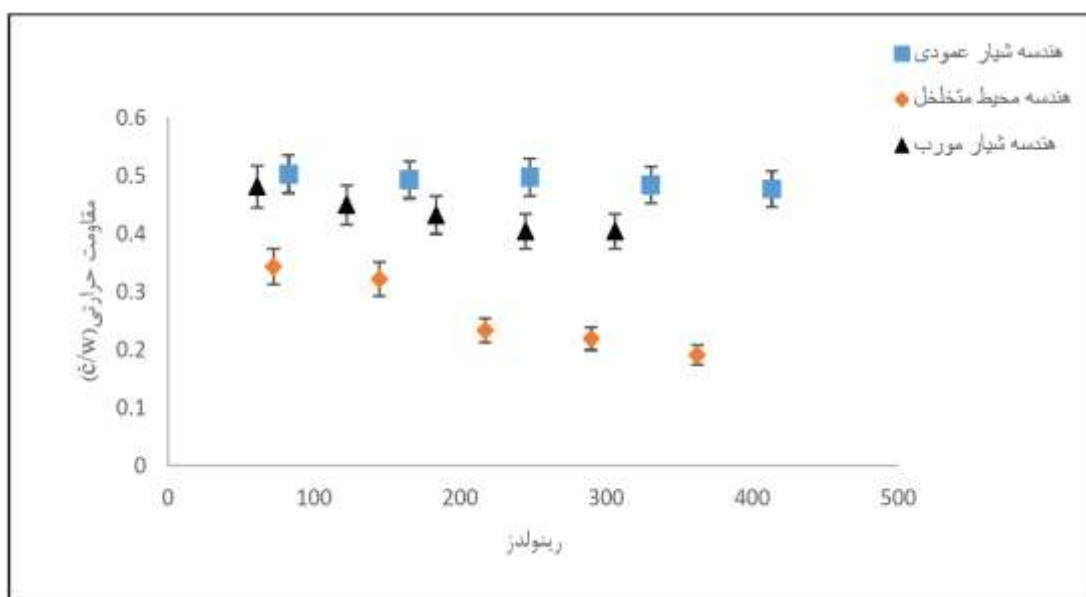
به‌طور کلی مقدار مقاومت حرارتی برای هر سه هندسه ذکر شده با مقایسه با مقاومت حرارتی آب مقطر کمتر است. در ساختار هندسی محیط متخلخل کمترین مقاومت حرارتی حاصل شده با عدد رینولدز  $362/45$  برابر است با  $0/191$  درجه سانتی‌گراد بروات است؛ و در نتیجه مقدار مقاومت حرارتی در ساختار هندسی محیط متخلخل نسبت به هندسه شیار مورب و شیار عمودی به ترتیب  $15/3$  و  $59/9$  درصد بیشتر کاهش پیدا می‌کند.

در حالت کلی مقاومت حرارتی برای نانو سیال  $0/2$  در مقایسه با آب مقطر و نانو سیال  $0/1$  کمتر است. کمترین مقدار برای مقاومت حرارتی  $0/204$  درجه سانتی‌گراد بروات در عدد رینولدز  $362/53$  است که مربوط به هندسه محیط متخلخل است (شکل (۵-۳۷)).

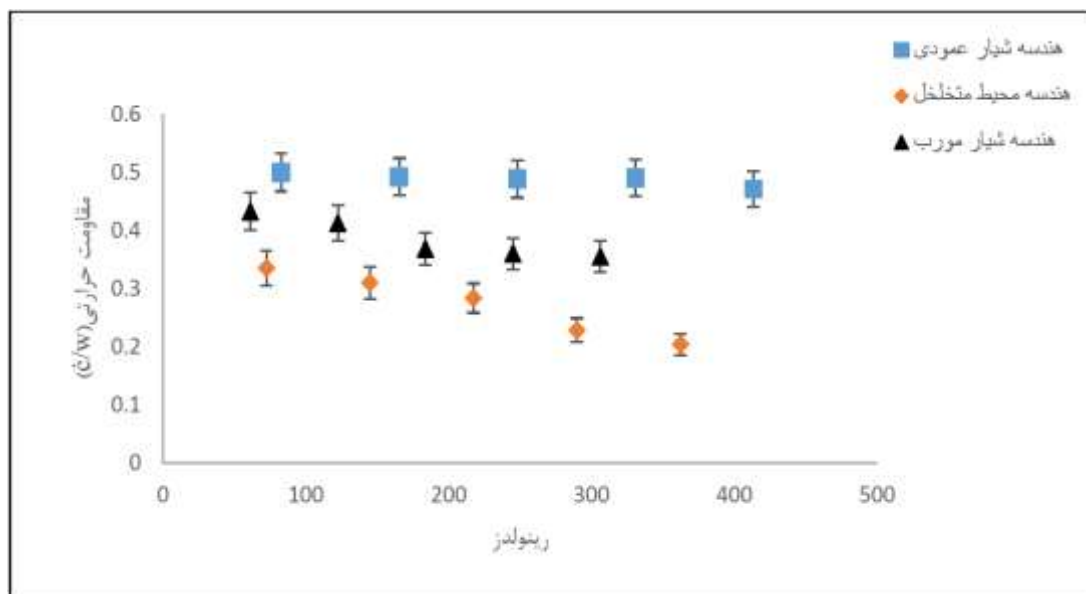
در نتیجه مقاومت حرارتی در هندسه محیط متخلخل نسبت به هندسه شیار مورب و شیار عمودی به ترتیب مقدار  $24/6$  و  $56/6$  درصد بیشتر کاهش پیدا کرده است.



شکل ۵-۳۵: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای سیال آب مقطر در زمان ۱۰۰۰ ثانیه



شکل ۵-۳۶: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال ۰/۱ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

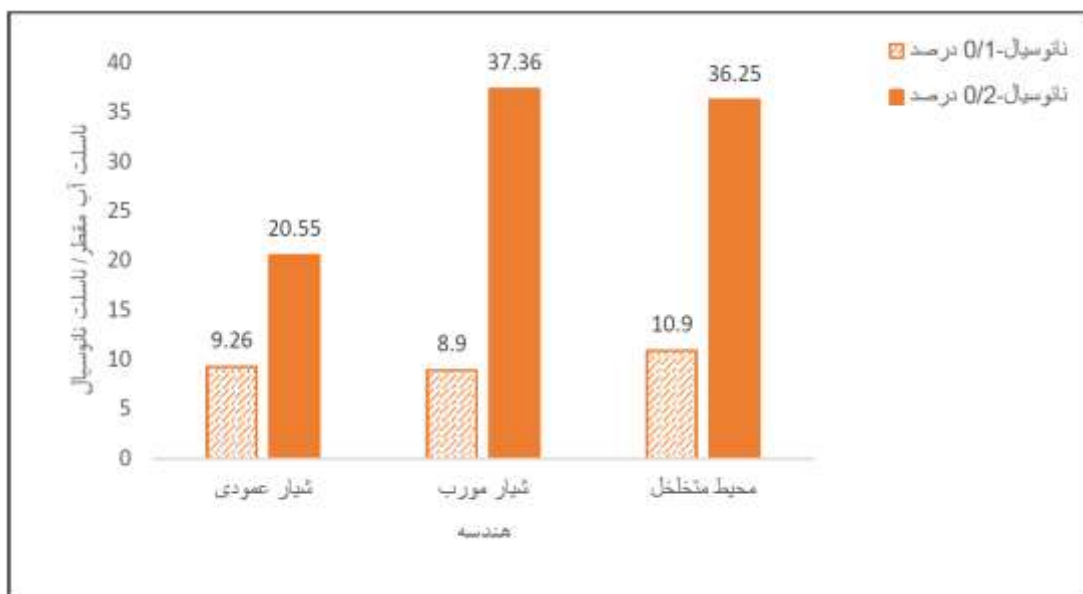


شکل ۵-۳۷: مقایسه هندسه‌ها در نمودار مقاومت حرارتی برحسب عدد رینولدز برای نانو سیال-۰/۲ درصد در زمان ۱۰۰۰ ثانیه

## ۵-۲-۶ نرخ افزایش

شکل (۵-۳۸) نمودار نرخ افزایش عدد ناسلت را برای نانو سیال-۰/۱ و نانو سیال-۰/۲ در مقایسه با آب مقطر نشان می‌دهد. نانو سیال-۰/۲ در مقایسه با نانو سیال-۰/۱ نرخ افزایش ۱۱/۲۹، ۲۸/۴۶ و ۲۵/۳۵ درصدی را به ترتیب برای هندسه شیار عمودی، هندسه شیار مورب و هندسه محیط متخلخل ارائه می‌دهد. نوع ساختار هندسی محیط متخلخل گواه بر نرخ افزایش است، در نتیجه نانو سیال-۰/۲ نرخ افزایش ۳۶/۲۵ درصدی را برای هندسه محیط متخلخل نسبت به آب مقطر ارائه می‌دهد. با این وجود هنگامی که از نانو سیال-۰/۱ درصدی استفاده می‌شود ۱۰/۹ درصد افزایش را شاهدیم.

نرخ افزایش برای ساختار هندسی شیار مورب با نانو سیال-۰/۲ و نانو سیال-۰/۱ به ترتیب ۳۷/۳۶ و ۸/۹ درصد است. همچنین این مقادیر برای هندسه شیار عمودی ۲۰/۵۵ و ۹/۲۶ درصد است.



شکل ۵-۳۸: نمودار مقایسه عدد ناسلت نانو سیال نسبت به عدد ناسلت آب مقطر برای هندسه‌های متفاوت

### ۵-۳ آنالیز عدم قطعیت نتایج

روش کلین و مک کلینتاک [۹۵] برای تخمین عدم قطعیت ناشی از تغییر میزان جریان سیال، دمای دیواره، دمای ورودی، دمای خروجی، شار حرارتی و هندسه با پارامترهای محاسبه شده نهایی در آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد که نتایج آن بصورت زیر می‌باشد.

ماکزیمم عدم قطعیت برای عدد رینولدز، دمای دیواره، انتقال گرمای همرفتی و عدد ناسلت به ترتیب بیش از ۵/۸۴ درصد، ۴/۴۹ درصد، ۱۲/۶۳ درصد و ۱۲/۷۵ درصد نمی‌باشد.

فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۶-۱ نتیجه گیری از شار حرارتی ۱۰۰ وات

در این پژوهش یک تحلیل مفهومی برای انتقال حرارت در هندسه محیط متخلخل، شیار مورب و شیار عمودی که از آب مقطر، نانو سیال آب-آلومینا - ۰/۱ درصد و نانو سیال آب-آلومینا - ۰/۲ با اعداد رینولدز مختلف ارائه گردیده است؛ و نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱- نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد نسبت به نانو سیال با درصد حجمی ۰/۱ درصد نرخ افزایش ۱۳، ۲۷/۵ و ۲۱ درصدی را به ترتیب برای هندسه‌های شیار عمودی، شیار مورب و محیط متخلخل ارائه می‌دهد.

۲- در ساختار هندسی محیط متخلخل با نانو سیال-۰/۲ درصد نرخ افزایش ۳۷ درصد نسبت به آب مقطر و نرخ افزایش با نانو سیال-۰/۱ درصد ۱۶ درصد است. در ساختار هندسی شیار مورب این مقادیر به ترتیب ۳۲/۵ و ۵ درصد است. در هندسه شیار عمودی نرخ افزایش انتقال حرارت برای نانو سیال-۰/۱ و ۰/۲ درصد به ترتیب ۱۴ و ۲۷ درصد است.

۳- کمترین دمای دیواره مربوط به هندسه محیط متخلخل با نانو سیال-۰/۲ درصد مقدار ۴۷/۳۳ درجه سانتی‌گراد است.

## ۶-۲ نتیجه گیری از شار حرارتی ۱۵۰ وات

در این پژوهش یک تحلیل آزمایشگاهی برای انتقال حرارت در هندسه محیط متخلخل، شیار مورب و شیار عمودی که از آب مقطر، نانو سیال آب-آلومینا - ۰/۱ درصد و نانو سیال آب-آلومینا - ۰/۲ با اعداد رینولدز مختلف ارائه گردیده است؛ و نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱- نانو سیال با درصد حجمی ۰/۲ درصد نسبت به نانو سیال با درصد حجمی ۰/۱ درصد نرخ افزایش ۱۱/۲۹، ۲۸/۴۶ و ۳۵/۲۵ درصدی را به ترتیب برای هندسه‌های شیار عمودی، شیار مورب و محیط متخلخل ارائه می‌دهد.

- ۲- در ساختار هندسی محیط متخلخل با نانو سیال-۰/۲ درصد نرخ افزایش ۳۶/۲۵ درصد نسبت به آب مقطر و نرخ افزایش با نانو سیال-۰/۱ درصد ۱۰/۹ درصد است. در ساختار هندسی شیار مورب این مقادیر به ترتیب ۳۷/۳۶ و ۸/۹ درصد است. در هندسه شیار عمودی نرخ افزایش انتقال حرارت برای نانو سیال-۰/۱ و ۰/۲ درصد به ترتیب ۹/۲۶ و ۲۰/۵۵ درصد است.
- ۳- کمترین دمای دیواره مربوط به هندسه محیط متخلخل با نانو سیال-۰/۲ درصد مقدار ۵۵/۱۱ درجه سانتی‌گراد است.

### ۳-۶ نتایج کلی

با بررسی موارد ذکر شده به این نتیجه می‌رسیم که هندسه محیط متخلخل کارایی بهتری نسبت به بقیه هندسه‌های مذکور دارد و دمای دیواره که در این پژوهش نشان‌دهنده دمای قطعه الکترونیکی است پایین‌تر از هندسه‌های دیگر است؛ و هرچه دمای کاری قطعات الکترونیکی پایین‌تر باشد عملکرد مناسبی در حین کار دارند.

۱- استفاده از نانوسیال می‌تواند تاثیر بسزایی (تا ۳۷٪) بر انتقال حرارت در سیستم یاد شده داشته باشد.

۲- افزایش رینولدز بخصوص در حالت مورب و محیط متخلخل باعث افزایش انتقال حرارت خواهد شد.

۳- تغییر هندسه از حالت عمودی به مورب و از حالت عمودی به هندسه محیط متخلخل افزایش قابل توجه انتقال حرارت (به ترتیب ۱۶ و ۴۷ درصد) را می‌تواند در پی داشته باشد.



## پیشنهادها

به منظور ادامه پژوهش در زمینه خنک کاری قطعات الکترونیکی توسط نانو سیال و بهینه کردن

این نوع سیستم‌ها پیشنهاد می‌شود:

- از نانو سیالات تیتانیوم، اکسید مس و اکسید آلومینا (۵/۰ درصد) با درصدهای مختلفی جهت خنک کاری استفاده شود.

- استفاده از هندسه‌های با مقطع مثلثی و دایره‌ی بجای هندسه‌های مورد استفاده در این

پژوهش

- بررسی کاهش اندازه فین‌ها و اندازه کانال جهت خنک کاری بهتر و بهبود انتقال حرارت
- استفاده هم‌زمان از آرایش هندسی فین دار همراه با محیط متخلخل جهت بهتر شدن انتقال

حرارت

- استفاده از چاه حرارتی از جنس فلز آلومینیوم و مقایسه آن با نتایج این پایان‌نامه (فلز مس)

- [1] A. Bergles, "Techniques to enhance heat transfer," Handbook of heat transfer, vol. 3, pp. 11.1-11.76, 1998.
- [2] B. Palm, "Heat transfer in microchannels," Microscale Thermophysical Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 155-175, 2001.
- [3] D. Wen, G. Lin, S. Vafaei, and K. Zhang, "Review of nanofluids for heat transfer applications," Particuology, vol. 7, no. 2, pp. 141-150, 2009.
- [4] K. V. Wong and O. De Leon, "Applications of nanofluids: current and future," Advances in Mechanical Engineering, vol. 2, p. 519659, 2010.
- [5] M. Chopkar, P. K. Das, and I. Manna, "Synthesis and characterization of nanofluid for advanced heat transfer applications," Scripta Materialia, vol. 55, no. 6, pp. 549-552, 2006.
- [6] D. Singh, J. Toutbort, and G. Chen, "Heavy vehicle systems optimization merit review and peer evaluation," Annual Report, Argonne National Laboratory, vol. 23, pp. 405-411, 2006.
- [7] M. Kao, C. Lo, T. Tsung, Y. Wu, C. Jwo, and H. Lin, "Copper-oxide brake nanofluid manufactured using arc-submerged nanoparticle synthesis system," Journal of Alloys and Compounds, vol. 434, pp. 672-674, 2007.
- [8] S.-C. Tzeng, C.-W. Lin, and K. Huang, "Heat transfer enhancement of nanofluids in rotary blade coupling of four-wheel-drive vehicles," Acta Mechanica, vol. 179, no. 1-2, pp. 11-23, 2005.
- [9] G. Donzelli, R. Cerbino, and A. Vailati, "Bistable heat transfer in a nanofluid," Physical review letters, vol. 102, no. 10, p. 104503, 2009.
- [10] C. Tsai, H. Chien, P. Ding, B. Chan, T. Luh, and P. Chen, "Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance," Materials Letters, vol. 58, no. 9, pp. 1461-1465, 2004.
- [11] C. T. Nguyen, G. Roy, C. Gauthier, and N. Galanis, "Heat transfer enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid for an electronic liquid cooling system," Applied Thermal Engineering, vol. 27, no. 8, pp. 1501-1506, 2007.
- [12] M. Nazari, M. Karami, and M. Ashouri, "Comparing the thermal performance of water, Ethylene Glycol, Alumina and CNT nanofluids in CPU cooling: Experimental study," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 57, pp. 371-377, 2014.
- [13] H. M. Ali and W. Arshad, "Thermal performance investigation of staggered and inline pin fin heat sinks using water based rutile and anatase TiO<sub>2</sub> nanofluids," Energy Conversion and Management, vol. 106, pp. 793-803, 2015.
- [14] Z. Azizi, A. Alamdari, and M. Malayeri, "Convective heat transfer of Cu-water nanofluid in a cylindrical microchannel heat sink," Energy Conversion and Management, vol. 101, pp. 515-524, 2015.
- [15] A. Jordan, R. Scholz, P. Wust, H. Föhling, and R. Felix, "Magnetic fluid hyperthermia (MFH): Cancer treatment with AC magnetic field induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 201, no. 1, pp. 413-419, 1999.
- [16] D. Bica et al., "Sterically stabilized water based magnetic fluids: synthesis, structure and properties," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 311, no. 1, pp. 17-21, 2007.
- [17] H. Masuda, A. Ebata, and K. Teramae, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>

ultra-fine particles," 1993.

[18] S. Lee, S.-S. Choi, S. Li, and J. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles," *Journal of Heat transfer*, vol. 121, no. 2, pp. 280-289, 1999.

[19] S. Murshed, K. Leong, and C. Yang, "Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>—water based nanofluids," *International Journal of thermal sciences*, vol. 44, no. 4, pp. 367-373, 2005.

[20] S. Choi, Z. Zhang, W. Yu, F. Lockwood, and E. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions," *Applied physics letters*, vol. 79, no. 14, pp. 2252-2254, 2001.

[21] M. Chopkar, S. Sudarshan, P. Das, and I. Manna, "Effect of particle size on thermal conductivity of nanofluid," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 39, no. 7, pp. 1535-1542, 2008.

[22] M.-S. Liu, M. C.-C. Lin, I.-T. Huang, and C.-C. Wang, "Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 32, no. 9, pp. 1202-1210, 2005.

[23] J. A. Eastman, S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. Thompson, "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles," *Applied physics letters*, vol. 78, no. 6, pp. 718-720, 2001.

[24] H. A. Mintsu, G. Roy, C. T. Nguyen, and D. Doucet, "New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, no. 2, pp. 363-371, 2009.

[25] M. P. Beck, T. Sun, and A. S. Teja, "The thermal conductivity of alumina nanoparticles dispersed in ethylene glycol," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 260, no. 2, pp. 275-278, 2007.

[26] R. Prasher, P. E. Phelan, and P. Bhattacharya, "Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid)," *Nano letters*, vol. 6, no. 7, pp. 1529-1534, 2006.

[27] Y. Feng, B. Yu, P. Xu, and M. Zou, "The effective thermal conductivity of nanofluids based on the nanolayer and the aggregation of nanoparticles," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, no. 10, p. 3164, 2007.

[28] H.-q. Xie, J.-c. Wang, T.-g. Xi, and Y. Liu, "Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles," *International Journal of Thermophysics*, vol. 23, no. 2, pp. 571-580, 2002.

[29] C. H. Li and G. Peterson, "Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids)," *Journal of Applied Physics*, vol. 99, no. 8, p. 084314, 2006.

[30] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids," *Journal of heat transfer*, vol. 125, no. 4, pp. 567-574, 2003.

[31] A. Turgut, I. Tavman, M. Chirtoc, H. Schuchmann, C. Sauter, and S. Tavman, "Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO<sub>2</sub> nanofluids," *International Journal of Thermophysics*, vol. 30, no. 4, pp. 1213-1226, 2009.

[32] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, and Q. Wu, "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 7, pp. 4568-4572, 2002.

[33] S. Murshed, K. C. Leong, and C. Yang, "Characterization of electrokinetic properties of nanofluids," *Journal of nanoscience and nanotechnology*, vol. 8, no. 11, pp. 5966-5971, 2008.

- [34] X.-j. Wang and D.-s. Zhu, "Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids," *Chemical Physics Letters*, vol. 470, no. 1, pp. 107-111, 2009.
- [35] S. P. Jang and S. U. Choi, "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids," *Applied physics letters*, vol. 84, no. 21, pp. 4316-4318, 2004.
- [36] J. Koo and C. Kleinstreuer, "A new thermal conductivity model for nanofluids," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 6, no. 6, pp. 577-588, 2004.
- [37] R. Prasher, P. Bhattacharya, and P. E. Phelan, "Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluids)," *Physical review letters*, vol. 94, no. 2, p. 025901, 2005.
- [38] C. Li and G. Peterson, "Mixing effect on the enhancement of the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids)," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 23, pp. 4668-4677, 2007.
- [39] P. Keblinski, S. Phillpot, S. Choi, and J. Eastman, "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 45, no. 4, pp. 855-863, 2002.
- [40] W. Evans, J. Fish, and P. Keblinski, "Role of Brownian motion hydrodynamics on nanofluid thermal conductivity," *Applied Physics Letters*, vol. 88, no. 9, p. 093116, 2006.
- [41] W. Evans, R. Prasher, J. Fish, P. Meakin, P. Phelan, and P. Keblinski, "Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 5, pp. 1431-1438, 2008.
- [42] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*. Clarendon press, 1881.
- [43] J. Buongiorno, "Convective transport in nanofluids," *Journal of Heat Transfer*, vol. 128, no. 3, pp. 240-250, 2006.
- [44] M. Korpyś, M. Al-Rashed, G. Dzido, and J. Wójcik, "CPU heat sink cooled by nanofluids and water: experimental and numerical study," in *Proceedings of the 23rd European Symposium on Computer Aided Process Engineering—ESCAPE*, 2013, vol. 23.
- [45] D. B. Tuckerman and R. Pease, "High-performance heat sinking for VLSI," *IEEE Electron device letters*, vol. 2, no. 5, pp. 126-129, 1981.
- [46] P. Gao, S. Le Person, and M. Favre-Marinet, "Scale effects on hydrodynamics and heat transfer in two-dimensional mini and microchannels," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 41, no. 11, pp. 1017-1027, 2002.
- [47] R. Bavière, M. Favre-Marinet, and S. Le Person, "Bias effects on heat transfer measurements in microchannel flows," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, no. 19, pp. 3325-3337, 2006.
- [48] P.-S. Lee, S. V. Garimella, and D. Liu, "Investigation of heat transfer in rectangular microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, no. 9, pp. 1688-1704, 2005.
- [49] O. Mokrani, B. Bourouga, C. Castelain, and H. Peerhossaini, "Fluid flow and convective heat transfer in flat microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 5, pp. 1337-1352, 2009.
- [50] Y. Xuan and W. Roetzel, "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids," *International Journal of heat and Mass transfer*, vol. 43, no. 19, pp. 3701-3707, 2000.
- [51] C. Nie, W. Marlow, and Y. Hassan, "Discussion of proposed mechanisms of thermal conductivity enhancement in nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 5, pp. 1342-1348, 2008.
- [52] Y. Ding et al., "Forced convective heat transfer of nanofluids," *Advanced Powder Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 813-824, 2007.
- [53] R. Prasher, W. Evans, P. Meakin, J. Fish, P. Phelan, and P. Keblinski, "Effect of

- aggregation on thermal conduction in colloidal nanofluids," *Applied Physics Letters*, vol. 89, no. 14, p. 143119, 2006.
- [54] W. Lai, P. Phelan, S. Vinod, and R. Prasher, "Convective heat transfer for water-based alumina nanofluids in a single 1.02-mm tube," in *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, 2008. ITherm 2008. 11th Intersociety Conference on, 2008, pp. 970-978: IEEE.
- [55] M. Izadi, A. Behzadmehr, and D. Jalali-Vahida, "Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus," *International journal of thermal sciences*, vol. 48, no. 11, pp. 2119-2129, 2009.
- [56] S. Z. Heris, S. H. Noie, E. Talaii, and J. Sargolzaei, "Numerical investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid laminar convective heat transfer through triangular ducts," *Nanoscale research letters*, vol. 6, no. 1, pp. 1-10, 2011.
- [57] C. Lefurgy, X. Wang, and M. Ware, "Server-level power control," in *Fourth International Conference on Autonomic Computing (ICAC'07)*, 2007, pp. 4-4: IEEE.
- [58] M. Rafati, A. Hamidi, and M. S. Niaser, "Application of nanofluids in computer cooling systems (heat transfer performance of nanofluids)," *Applied Thermal Engineering*, vol. 45, pp. 9-14, 2012.
- [59] S. Choi, "Enhancing conductivity of fluids with Nanoparticles, ASME Fluid Eng," *Division*, vol. 231, pp. 99-105, 1995.
- [60] K. Yakut, N. Alemdaroglu, I. Kotcioglu, and C. Celik, "Experimental investigation of thermal resistance of a heat sink with hexagonal fins," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 17, pp. 2262-2271, 2006.
- [61] I. M. Didarul, O. Kenyu, Y. Minoru, and S. Izuru, "Study on heat transfer and fluid flow characteristics with short rectangular plate fin of different pattern," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, no. 4, pp. 367-379, 2007.
- [62] B. C. Pak and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," *Experimental Heat Transfer an International Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 151-170, 1998.
- [63] R. Hamilton and O. Crosser, "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems," *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, vol. 1, no. 3, pp. 187-191, 1962.
- [64] A. Einstein, "Investigations on the Theory of Brownian Motion, reprint of the 1st English edition (1926)," ed: Dover, New-York, 1956.
- [65] J. Li, *Computational Analysis of Nanofluid Flow in Microchannels with Applications to Micro-heat Sinks and Bio-MEMS*. ProQuest, 2008.
- [66] O. M. Wilson, X. Hu, D. G. Cahill, and P. V. Braun, "Colloidal metal particles as probes of nanoscale thermal transport in fluids," *Physical Review B*, vol. 66, no. 22, p. 224301, 2002.
- [67] R. S. Vajjha and D. K. Das, "Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 21, pp. 4675-4682, 2009.
- [68] C. Chon and K. Kihm, "Thermal conductivity enhancement of nanofluids by Brownian motion," *Journal of Heat Transfer*, vol. 127, no. 8, pp. 810-810, 2005.
- [69] H. E. Patel, K. Anoop, T. Sundararajan, and S. K. Das, "A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids," in *International Heat Transfer Conference 13*, 2006: Begel House Inc.
- [70] Y. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang, and H. Lu, "Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 11,

pp. 2272-2281, 2007.

- [71] D. Bruggemann, "The calculation of various physical constants of heterogeneous substances. I. The dielectric constants and conductivities of mixtures composed of isotropic substances," *Annalen Der Physik*, vol. 24, p. 636, 1935.
- [72] C.-W. Nan, R. Birringer, D. R. Clarke, and H. Gleiter, "Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance," *Journal of Applied Physics*, vol. 81, no. 10, pp. 6692-6699, 1997.
- [73] Y. Xuan, Q. Li, and W. Hu, "Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids," *AIChE Journal*, vol. 49, no. 4, pp. 1038-1043, 2003.
- [74] H. Chen, S. Witharana, Y. Jin, C. Kim, and Y. Ding, "Predicting thermal conductivity of liquid suspensions of nanoparticles (nanofluids) based on rheology," *Particuology*, vol. 7, no. 2, pp. 151-157, 2009.
- [75] I. M. Krieger and T. J. Dougherty, "A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres," *Transactions of The Society of Rheology (1957-1977)*, vol. 3, no. 1, pp. 137-152, 1959.
- [76] M. Corcione, "Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 1, pp. 789-793, 2011.
- [77] W. Duangthongsuk and S. Wongwises, "Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids," *Experimental thermal and fluid science*, vol. 33, no. 4, pp. 706-714, 2009.
- [78] H. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 20, no. 4, pp. 571-571, 1952.
- [79] T. S. Lundgren, "Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 51, no. 02, pp. 273-299, 1972.
- [80] G. Batchelor, "The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 83, no. 01, pp. 97-117, 1977.
- [81] N. Frankel and A. Acrivos, "On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres," *Chemical Engineering Science*, vol. 22, no. 6, pp. 847-853, 1967.
- [82] A. L. Graham, "On the viscosity of suspensions of solid spheres," *Applied Scientific Research*, vol. 37, no. 3-4, pp. 275-286, 1981.
- [83] C. Nguyen et al., "Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids—hysteresis phenomenon," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 28, no. 6, pp. 1492-1506, 2007.
- [84] S. E. B. Maïga, C. T. Nguyen, N. Galanis, and G. Roy, "Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube," *Superlattices and Microstructures*, vol. 35, no. 3, pp. 543-557, 2004.
- [85] X. Wang, X. Xu, and S. U. S. Choi, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture," *Journal of thermophysics and heat transfer*, vol. 13, no. 4, pp. 474-480, 1999.
- [86] D. P. Kulkarni, D. K. Das, and G. A. Chukwu, "Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension (nanofluid)," *Journal of nanoscience and nanotechnology*, vol. 6, no. 4, pp. 1150-1154, 2006.
- [87] P. K. Namburu, D. P. Kulkarni, D. Misra, and D. K. Das, "Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 32, no. 2, pp. 397-402, 2007.
- [88] B. C. Sahoo, R. S. Vajjha, R. Ganguli, G. A. Chukwu, and D. K. Das, "Determination of rheological behavior of aluminum oxide nanofluid and development of new viscosity correlations," *Petroleum Science and Technology*, vol. 27, no. 15, pp. 1757-1770, 2009.
- [89] R. S. Vajjha, Measurements of thermophysical properties of nanofluids and

computation of heat transfer characteristics. 2008.

[90] A. Fundamentals, "ASHRAE Handbook-2005 ASHRAE Fundamentals, American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers Inc, 2005.

[91] N. Masoumi, N. Sohrabi, and A. Behzadmehr, "A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 42, no. 5, p. 055501, 2009.

[92] E. Abu-Nada, "Effects of variable viscosity and thermal conductivity of CuO-water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection: mathematical model and simulation," *Journal of Heat Transfer*, vol. 132, no. 5, p. 052401, 2010.

[93] S. Kandlikar, S. Garimella, D. Li, S. Colin, and M. R. King, *Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels*. elsevier, 2005.

[94] M. Liu, D. Liu, S. Xu, and Y. Chen, "Experimental study on liquid flow and heat transfer in micro square pin fin heat sink," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 25, pp. 5602-5611, 2011.

[95] S. J. Kline and F. McClintock, "Describing uncertainties in single-sample experiments," *Mechanical engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 3-8, 1953.

**Abstract:**

The purpose of this study is laboratory evaluation of cooling and heat transfer of the electronic components by the use of different fluids in slow flowing regime in heat sinks of copper made of CNC machine with the accuracy of  $\pm 0.01$  mm in three geometries of vertical, porous environment, and oblique. Regarding the previous studies, there has been no special attention to researches about the geometry changes of heat sink and comparing those changes in the electronic components cooling and by the use of nanofluids. In this study, the three mentioned geometries have been tested and the final results have been compared to each other. The tested fluids were distilled water and water-alumina nanofluids used with the volume percentages of 0.1 and 0.2 respectively. All of the experiments were done in different discharges and two fixed heat flux of 100 and 150 watts and the results were compared with each other. In order to increase the experiments' accuracy and the reliability of the results, each experiment was replicated three times in the intended discharge and the fixed hear flux and the gathered data have been analyzed in accordance to statistical tables. The coefficients of convection heat transfer, final temperatures, the mean of the difference of logarithmic temperatures and heat resistance of the electronic component have been reported for a range of parameters. The results show the maximum increase of 16.3% of heat transfer in the heat sink of the porous environment geometry than the state of oblique groove geometry and the increase of 47.7% in compared with the state of vertical groove geometry. In addition, maximum increase of 37.36% related to the heat transfer of 0.2 % nanofluids has been observed in compared to the base fluid (distilled water) in the heat sink with the porous environment geometry. Consequently, the degree of heat transfer in the porous environment geometry is much better than the other used geometries in this study.

**Keywords:** nanofluids, heat sink, geometry, vertical, porous environment, oblique





Faculty of Mechanical and mechatronics Engineering

MSc Thesis in energy conversion Engineering

**Experimental Investigation of electronic cooling by  
nanofluids**

by

**Mahmood neyestani**

Supervisors

**Dr. mohammad Mohsen shahmardan**

**Dr. Mohsen nazari**

Advisor

**Mojtaba ashori**

February 2017