

# مطالعه تجربی و آزمایشگاهی خواص ترموفیزیکی و بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب- هیدروکسید منیزیم تحت جریان مغشوش

کوروش حسن زاده<sup>1\*</sup>، مصطفی سفیدگر<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس، شهر جدید پردیس، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس، شهر جدید پردیس، ایران

\* شهر، صندوق پستی، پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات

## چکیده

در این پژوهش نتایج تجربی و آزمایشگاهی هدایت حرارتی، ویسکوزیته دینامیکی و رفتار انتقال حرارتی نانوسیال آب- هیدروکسید منیزیم درون یک لوله‌ی دایروی تحت رژیم جریان مغشوش و در کسرهای حجمی زیر 1 درصد ارائه شده است. نانوسیال با کسرهای حجمی 1%، 0/5%، 0/25%، 0/125% و 0/0625% به عنوان سیال عامل در سیکل استفاده شده است. آزمایشات تحت جریان مغشوش توسعه یافته انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن مقدار کمی از نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش قابل توجه انتقال حرارت می‌گردد. همچنین اندازه گیری‌ها نشان می‌دهد که افت فشار کمی بیشتر از سیال پایه می‌باشد و با افزایش کسر حجمی نانوذرات افت فشار افزایش نمی‌یابد. در این مقاله، نتایج تجربی ضریب انتقال حرارت جابجایی تحت جریان آشفته با مدل‌های ارائه شده‌ی پیشین مقایسه گردیده است. همچنین نتایج بیانگر این موضوع هستند که با افزایش دما، ضریب هدایت حرارتی در تمامی کسرهای حجمی افزایش می‌یابد.

## کلیدواژگان

هدایت حرارتی، انتقال حرارت جابجایی، نانوسیال هیدروکسید منیزیم-آب، ویسکوزیته دینامیکی، افت فشار

## Experimental investigation on thermophysical properties and convective heat transfer of Mg(OH)<sub>2</sub>-water under turbulent flow

Kourosh Hasanzade<sup>1\*</sup>, Mostafa Sefidgar<sup>2</sup>

1- Master student, Department of mechanical engineering, Islamic Azad University, Pardis branch, Pardis, Iran

2- Associate professor, Department of mechanical engineering, Islamic Azad University, Pardis branch, Pardis, Iran

\*Tehran, P.O.B 94418-45978; kourosh\_hasanzadeh68@yahoo.com

## Abstract:

The aim of the present study is to investigate the thermal conductivity, dynamic viscosity, and convective heat transfer of Mg(OH)<sub>2</sub>-water nanofluid inside a circular tube under turbulent flow. The experiments have been carried in solid volume fractions of 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, and 1%. The results indicated that adding nanoparticles to the base fluid result in noticeable increase in heat transfer rate. Moreover, the results showed that the thermal conductivity is increased while the temperature and solid volume fraction increased.

## Keywords:

Thermal conductivity, Convective heat transfer, Mg(OH)<sub>2</sub>-water nanofluid, Dynamic viscosity, Pressure drop

فولادی با قطر داخلی 10,66 میلی‌متر و 4,8m طول پرداختند. در آزمایشات آن‌ها دو نانوسیال  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با قطر متوسط نانوذرات 13 نانومتر و TiO<sub>2</sub> با قطر متوسط نانوذرات 27 نانومتر، بکارگرفته شده است. آن‌ها دریافتند که انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوسیال، بجز برای کسر حجمی 3% که به مقدار 12% کمتر از آب خالص می‌باشد، افزایش می‌یابد. لی و ژوان [3] ژوان و لی [4] به مطالعه تجربی ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک نانوسیال در جریان‌های آرام و مغشوش نانوسیال آب دی‌یونیزه شده-مس با قطر نانوذرات کمتر از 100 نانومتر درون لوله برنجی پرداختند. لوله به طول 800 میلی‌متر و قطر داخلی 10 میلی‌متر بوده که با یک هیتر برقی با حداکثر توان 3,5 کیلووات تحت شار حرارتی ثابت قرار می‌گیرد. به‌منظور جلوگیری از توده‌ای شدن<sup>1</sup> نانوذرات در سیال پایه، از اسید چرب

## 1- مقدمه

سیالاتی مانند آب و اتیلن گلیکول نقش مهمی را در انتقال حرارت جابجایی بیشتر سیستم‌های صنعتی از خود ایفا می‌کنند. فرآیند گرمایش و سرمایش در شارهای حرارتی بالا در سیستم‌هایی از قبیل راکتورهای هسته-ای ریزتراشه‌های الکترونیکی مشکل بزرگی می‌باشد. راه‌های مختلفی برای رفع این مشکل توسط محققین ارائه شده است. یکی از این روش‌ها پخش کردن ذراتی با ابعاد نانومتر در سیالات می‌باشد. این نوع از سیالات نانوسیال نام دارد و اولین بار بوسیله جوی [1] پیشنهاد گردیده است. از مدتها پیش محققین بسیاری بر روی خواص مختلف نانوسیال مطالعه کرده‌اند. در این میان مطالعات متعددی در مورد ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در تجهیزات گوناگونی صورت گرفته است.

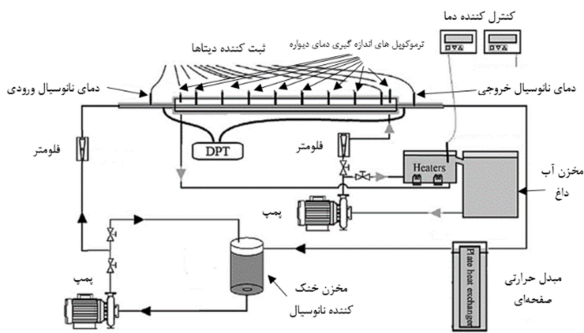
پاک و چو [2] به مطالعه ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان مغشوش نانوسیال تحت شارحرارتی ثابت درون یک لوله

<sup>1</sup> Aggregation

حرارتی و افت فشار نانوسیال رقیق آب-هیدروکسید منیزیم درون لوله‌ی مدور می باشد. همچنین چندین آزمایش بر روی هدایت حرارتی (در دماهای متفاوت) و ویسکوزیته‌ی دینامیکی این نانوسیال انجام شده است.

## 2- آزمایش‌ها 1-1- دستگاه آزمایش

تجهیزات آزمایش و دستگاه تست استفاده شده در کار حاضر به صورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1 شماتیک دستگاه آزمایش

این تجهیزات از سه سیکل بسته تشکیل شده است. سیکل نانوسیال از پمپ، مخزن جمع کننده و یک مبدل صفحه‌ای برای خنک کاری سیال عامل سیکل تشکیل شده است. بخش آزمایش انتقال حرارت از دو لوله‌ی هم مرکز تشکیل شده است. پیرو معادله  $Le/D \approx 4.4 \times Re^{1/6}$  [9]، به منظور ایجاد ناحیه توسعه یافته مغشوش در رینولدز 29000 (نزدیک رینولدز ماکزیمم) برای لوله 15 سانتی متر محاسبه شده است. طول ناحیه گرم بخش آزمایش 111 سانتی متر می باشد. بنابراین جریان برای تمامی حالات مورد مطالعه توسعه یافته مغشوش می باشد. دو عدد سنسور دمای کالیبره شده RTD-PT100 (با نمایش دهنده‌ی دیجیتالی) با دقت 0/1 درجه سانتی گراد میزان دمای جریان را در ورودی و خروجی بخش آزمایش اندازه گیری می کنند. همچنین 8 عدد ترموکوپل انعطاف پذیر مدل k با دقت 0/5 درجه سانتی گراد (بین 15 درجه تا 375 درجه) روی دیواره لوله مسی با فاصله‌ی 13 سانتی متر از یکدیگر نصب شده‌اند تا توزیع دمای دیواره را اندازه گیری کنند. ناحیه آزمایش با آب گرم که روی لوله‌ی مسی جریان دارد گرم شده است. سیکل دوم از تجهیزاتی که جریان آب گرم را در دمای مطلوب تولید و کنترل می کند تشکیل شده است. یک سنسور کنترل کننده‌ی دمای PT100 جهت کنترل دمای آب گرم استفاده شده است. دو عدد ترموکوپل مدل K دمای جریان ورودی و خروجی آب گرم در ناحیه آزمایش را اندازه گیری می کنند. به علاوه یک فلومتر جهت اندازه گیری و تنظیم میزان جریان آب گرم استفاده شده است. سیکل سوم از یک پمپ، مبدل حرارتی نانوسیال، مسیر فرعی، کندانسور و کنترل کننده‌ی دما با سنسور PT100 تشکیل شده است. این بخش دمای نانوسیال را در ورودی بخش آزمایش با تغییر قدرت کندانسور کنترل می کند. در این حلقه میزان جریان بوسیله‌ی دو شیر کنترل کننده که یکی در مسیر فرعی و دیگری در ورودی بخش آزمایش نصب شده است، کنترل می شود. به منظور اندازه گیری افت فشار استاتیکی جریان سیال در طول بخش آزمایش از یک فرستنده‌ی دیفرانسیلی فشار مدل Rosemount3051cd (Rosemount, inc, USA) با دقت 0/1% استفاده شده است. این وسیله افت فشار بین ورودی و خروجی بخش آزمایش را در هر آزمایش

استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با افزایش سرعت و کسر حجمی نانوسیال افزایش پیدا می کند و در مقایسه با سیال پایه، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با کسر حجمی 2%، 60% افزایش پیدا کرده است. در سرعت‌های ورودی یکسان، ضریب اصطکاک نانوسیال تقریباً برابر با ضریب اصطکاک آب بوده و با تغییر کسر حجمی تغییر نمی کند. به عبارتی دیگر نانوسیال، افت فشار اضافی نسبت به سیال پایه ایجاد نمی کند. در پژوهشی دیگر دوسانسوک و ونگویز [5] به بررسی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم با قطر 21 نانومتر در کسر حجمی 0,2 تا 2% در یک لوله افقی با جهت جریان مخالف در جریان مغشوش (عدد رینولدز بین 3000 تا 18000) پرداختند و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوسیال، افزایش پیدا می کنند. ویسکوزیته‌ی نانو سیالات یکی از مهمترین خواص برای کاربرد نانوسیالات به عنوان یکی از انواع سیالات انتقال حرارت در صنعت یا سیستم هایی از قبیل مبدل های حرارتی یا سیستم های خنک کاری می باشد از این رو پژوهش های زیادی در این راستا صورت گرفته است. در سال 2007، پروین و همکاران [6] مطالعه‌ای تجربی بر روی خواص رئولوژیکی نانوسیال اکسید مس در محلولی با نسبت حجمی 60:40 اتیلن گلیکول و آب انجام دادند. آنها آزمایشات خود را در محدوده کسرهای حجمی بین 0% تا 6,12% و محدوده دمایی بین 35- تا 50 درجه سانتی گراد به انجام رساندند. آنها آزمایشات خود را در محدوده کسرهای حجمی بین 0% تا 6,12% و محدوده دمایی بین 35- تا 50 درجه سانتی گراد به انجام رساندند. نتایج آنها نشان می دهد که در محدوده کسرهای حجمی مورد آزمایش، نانوسیال رفتاری نیوتنی از خود نشان می دهد. آنها دریافتند زمانیکه کسر حجمی نانوسیالات افزایش پیدا می کند، ویسکوزیته نانوسیالات نیز افزایش پیدا می کند. یو و همکاران [7] در سال 2009 برای نانوسیال اتیلن گلیکول-ZnO ویسکوزیته را مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که این نانوسیال در کسرهای حجمی پایین ( $\phi \leq 0.02$ ) رفتار نیوتنی و در کسرهای حجمی بالا ( $\phi \leq 0.03$ ) رفتار رقیق برشی از خود نشان می دهند. همچنین در کسرهای حجمی پایین با افزایش دما، ویسکوزیته بطور چشمگیری کاهش پیدا می کند. در تحقیقی دیگر اطلاعاتی در زمینه ویسکوزیته نانوسیال آب- $Al_2O_3$  توسط نگوین و همکاران [8] ارائه گردید. آنها تاثیر دما و کسر حجمی نانوذرات را بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال ذکر شده به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها تاثیر دما و کسر حجمی نانوذرات را بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال ذکر شده به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق از نانوذره  $Al_2O_3$  در دو اندازه متفاوت 36 و 47 نانومتر و در شرایط دمایی بین دمای محیط تا دمای 75 درجه سانتی گراد و در کسرهای حجمی از 1% تا تقریباً 13% استفاده شده است. یافته‌های این پژوهش حاکی از این واقعیت است که بطور کلی، ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال مورد مطالعه با افزایش کسر حجمی بطور چشمگیری افزایش می یابد اما با افزایش دما، ویسکوزیته دینامیکی بطور واضحی کاهش می یابد.

پژوهش حاضر به منظور بررسی نانوسیال آب-هیدروکسید منیزیم در کسرهای حجمی پایین (زیر 1%) و تحت جریان مغشوش که تا بحال گزارش نشده بود، پرداخته است. هدف انجام کار حاضر بررسی و تخمین دقیق کارایی

<sup>1</sup> Shear-thinning

یک حجم کنترل دیفرانسیلی از سیال درون لوله‌ی مسی معادله‌ی (1) حاصل می‌شود [10].

$$\frac{dT_b}{dx} = \frac{P}{mc_p} h(T_s - T_b) \quad (1)$$

با جداسازی متغیرها و انتگرال گیری داریم:

$$\ln \left( \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} \right) = \frac{-PL}{mc_p} \left( \frac{1}{L} \int_0^L h dx \right) \quad (2)$$

با ساده سازی داریم:

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \frac{T_s - T_{b,o}}{T_s - T_{b,i}} = \exp \left( \frac{-PL}{mc_p} \bar{h} \right) \quad (3)$$

با مرتب سازی معادله (3) نتیجه می‌گیریم:

$$\bar{h} = \frac{mc_p}{pL} \ln \left( \frac{T_s - T_{b,i}}{T_s - T_{b,o}} \right) \quad (4)$$

میزان دمای میانگین با رابطه زیر اندازه گیری می‌شود:

$$T_b = \frac{T_{b,i} + T_{b,o}}{2} \quad (5)$$

عدد رینولدز و ناسلت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Re} = \frac{vd}{n} \quad (6)$$

$$\text{Nu} = \frac{hd}{k}$$

#### 2-4- آنالیز عدم قطعیت

عدم قطعیت در محاسبه پارامترهای انتقال حرارت با مقادیر جدول 1، و بر پایه روش کلین و مک کلینتاک [11] انجام شده است. همچنین این روش توسط پاکدامن و همکاران [12] مورد استفاده قرار گرفته است. معادلات زیر برای محاسبه عدم قطعیت پارامتر R مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

$$U_{\text{Re}} = \left[ \left( \frac{d}{n} U_v \right)^2 + \left( \frac{V}{v} U_d \right)^2 + \left( \frac{Vd}{v^2} U_v \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

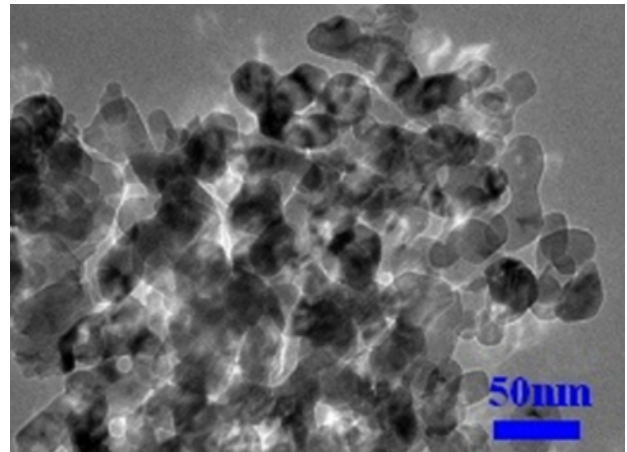
که  $U_R$  و  $U_v$  به ترتیب عدم قطعیت های مربوط با پارامتر R و

متغیر های مستقل ( $v_i$ ) می باشند. به علاوه n تعداد متغیر های مستقل مس باشد. معادلات (8)-(11) برای محاسبه عدم قطعیت عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابجایی، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده‌اند [13].

اندازه گیری می‌کند. پارامتر های ضروری که اندازه گیری می‌شوند شامل میزان جریان، دما و افت فشار آب گرم و نانوسیال می باشند. کالیبراسیون تمامی سنسورها و ترموکوپل‌ها قبل از قرارگیری در محل آزمایش امری بسیار مهم می باشد. دمای محیط نیز توسط یک دماسنج معمولی اندازه گیری می‌شود.

#### 2-2- آماده سازی نانوسیال

در تحقیق حاضر، نانوسیال آب-هیدروکسید منیزیم، با استفاده از روش دو مرحله‌ای<sup>1</sup> بدون استفاده از هیچگونه پایدارکننده، به‌عنوان نمونه آزمایشگاهی تولید شد. در خلال مراحل تولید و به‌منظور توزیع کردن<sup>2</sup> نانوذرات در کسرهای حجمی<sup>3</sup> مختلف، از یک همزن مکانیکی<sup>4</sup> استفاده شد. در مرحله بعدی، برای هر کسر حجمی مقداری معین از نانوذره هیدروکسید منیزیم به سیال پایه آب افزوده شد. همچنین به‌منظور مخلوط کردن نانوذرات در سیال پایه، از یک همزن مغناطیسی<sup>5</sup> به مدت دو ساعت استفاده شد. در مرحله نهایی، از یک پردازشگر اواتراسونیک<sup>6</sup>، با قدرتی برابر با 1200 وات و فرکانس 24 کیلوهرتز، به‌منظور از بین بردن پدیده کلوخه شدن<sup>7</sup> بین نانوذرات و همچنین جلوگیری از مشکل ته‌نشین شدن به مدت پنج ساعت استفاده شد. این روش باعث پایدار شدن نمونه برای مدت زمانی طولانی (حداقل یک هفته) می‌شود و هیچگونه اثر ته‌نشین شدن با چشم غیر مسلح مشاهده نمی‌شود. به‌منظور اطمینان از شکل و میانگین اندازه قطر نانوذرات مورد مطالعه، تصویر TEM مربوط به نانوذرات هیدروکسید منیزیم، برترتیب در شکل 2، نشان داده شده است. همان‌گونه که در این تصویر مشخص است ذرات اندازه‌های در حدود 50 نانومتر دارند.



شکل 2 تصویر TEM نانوذرات هیدروکسید منیزیم

#### 2-3- آنالیز داده‌ها

کارایی حرارتی نانوسیالات درون مجاری مدور در ترم ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت نشان داده می‌شود. با اعمال ذخیره انرژی در

<sup>1</sup> Two-step Method

<sup>2</sup> Disperse

<sup>3</sup> Solid volume fraction

<sup>4</sup> Mechanical mixture

<sup>5</sup> Magnetic stirrer

<sup>6</sup> Ultrasonic processor

<sup>7</sup> Agglomeration

سرتاسر لوله یکسان در نظر گرفته می شود. گرچه این فرض ممکن است در اثر پدیده‌های فیزیکی مانند جابجایی ذرات در شرایط واقعی درست نباشد.

### 3-1- دانسیته و ظرفیت گرمایی ویژه

دانسیته نانوسیال توسط تئوری اختلاط به شرح زیر محاسبه می شود:

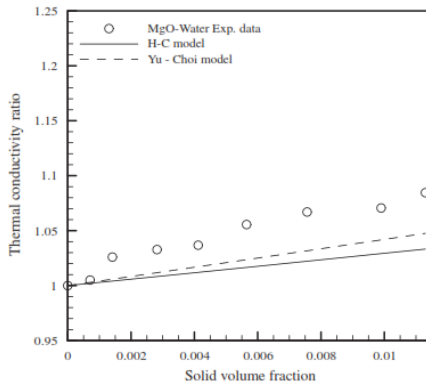
$$r_{nf} = j r_p + (1-j) r_f \quad (12)$$

ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال هیدروکسید منیزیم-آب مطابق با موازنه حرارتی مدل به شرح زیر قابل محاسبه می باشد:

$$C_{p,nf} = \frac{j (rc_p)_p + (1-j)(rc_p)_f}{r_{nf}} \quad (13)$$

### 3-2- هدایت حرارتی

مدل همیلتن- کراسر [14] یکی از مدل های پایه برای محاسبه هدایت حرارتی مخلوط های جامد- مایع می باشد. این مدل برای تخمین هدایت حرارتی مخلوط هایی که نرخ فاز جامد هدایت حرارتی نسبت به فاز مایع بزرگتر از 100 باشد مناسب است. معادله ی زیر همیلتن کراسر می باشد.



شکل 3 نسبت هدایت حرارتی در کسرهای حجمی مختلف

شکل 3 نسبت هدایت حرارتی نانوسیال هیدروکسید منیزیم-آب را به عنوان تابعی از کسر حجمی نانوذرات نشان می دهد. همچنین برای مقایسه، نرخ افزایش هدایت حرارتی با استفاده از مدل همیلتن-کراسر، معادله (14) و مدل یو و چوی، معادله (16) محاسبه و در شکل 3 نشان داده شده است. از شکل مشخص است که نرخ هدایت حرارتی برای همه ی نانوسیالات بزرگتر از 1 می باشد و با افزایش کسر حجمی نانوذرات، هدایت حرارتی افزایش می یابد. بیشترین مقدار هدایت حرارتی مربوط به بیشترین مقدار  $j$  می باشد. همچنین، نرخ افزایش هدایت حرارتی در کسرهای حجمی پایین بیشتر از کسرهای حجمی بالا می باشد به این دلیل که افزایش ویسکوزیته نانوسیال در کسرهای حجمی بالا خیلی زیادت از افزایش در هدایت حرارتی می باشد. همچنین شکل 3 نشان می دهد که مدل همیلتن-کراسر و مدل یو و چوی هدایت حرارتی نانوسیال هیدروکسید منیزیم-آب را کم تخمین می زند زیرا که هر دو مدل اثرات پارامترهای مهمی از قبیل اندازه ذرات، دما و لایه های بین سطحی را در هدایت حرارتی نانوسیال در نظر نگرفته اند.

$$U_{Re} = \left[ \left( \frac{d}{n} U_v \right)^2 + \left( \frac{V}{v} U_d \right)^2 + \left( \frac{Vd}{v^2} U_v \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$U_h = \left[ \begin{aligned} & \left( \frac{VdC_p}{L} U_r \text{Ln} \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}} \right)^2 + \\ & \left( \frac{rdC_p}{U_v} \text{Ln} \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}} \right)^2 + \\ & \left( \frac{rVC_p}{L} U_d \text{Ln} \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}} \right)^2 + \\ & \left( \frac{rVdC_p}{L^2} U_L \text{Ln} \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}} \right)^2 + \\ & \left( \frac{rVdC_p}{L} U_{\Delta T_{i,s}} \text{Ln} \frac{1}{\Delta T_{i,s}} \right)^2 + \\ & \left( \frac{rVdC_p}{L} U_{\Delta T_{o,s}} \text{Ln} \frac{1}{\Delta T_{o,s}} \right)^2 \end{aligned} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$U_{Nu} = \left[ \left( \frac{d}{k} U_h \right)^2 + \left( \frac{h}{k} U_d \right)^2 + \left( \frac{hd}{k^2} U_k \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$U_f = \left[ \begin{aligned} & \left( \frac{2d}{rLV^2} U_{\Delta P} \right)^2 + \left( \frac{2\Delta P}{rLV^2} U_d \right)^2 \\ & + \left( \frac{2\Delta Pd}{r^2LV^2} U_r \right)^2 + \left( \frac{2\Delta Pd}{rL^2V^2} U_L \right)^2 \\ & + \left( \frac{4\Delta Pd}{rLV^3} U_v \right)^2 \end{aligned} \right]^{1/2} \quad (11)$$

بعد از محاسبه عدم قطعیت عدد رینولدز و ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک، عدم قطعیت پارامترهای  $k$  محاسبه می شوند. یافته ها در جدول 1 گزارش شده اند.

جدول 1 عدم قطعیت

میزان عدم قطعیت	پارامتر
$\pm 3.2$	رینولدز
$\pm 4.3$	ضریب انتقال حرارت جابجایی
$\pm 5.4$	ناسلت
$\pm 6.1$	ضریب اصطکاک

### 3- اندازه گیری خواص ترموفیزیکی نانوسیال

پارامترهای  $k$  برای تعیین کارایی حرارتی نانوسیالات خواص ترموفیزیکی آنها می باشند. بنابراین قبل از مطالعه ی ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات، باید خواص نانوسیال به درستی اندازه گیری شود. با فرض اینکه نانوذرات به خوبی در سیال پایه پایدار هستند، کسر حجمی نانوذرات در

بیشتر از 1 درصد بوسیله دستگاه Kd2 pro اندازه گیری شده است. نرخ افزایش هدایت حرارتی به صورت نسبت هدایت حرارتی نانوسیال به هدایت حرارتی آب تعریف می شود.

### 3-3- ویسکوزیته دینامیکی

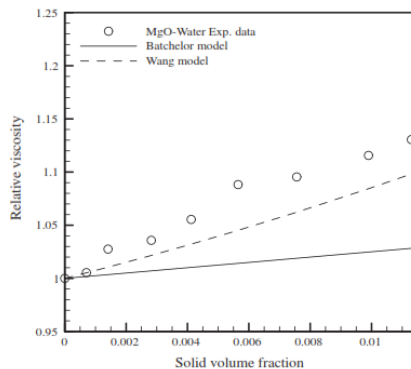
مدل های زیادی از ویسکوزیته توسط پژوهشگران به منظور تخمین ویسکوزیته موثر نانوسیالات به صورت تابعی از کسر حجمی نانوذرات استفاده شده است. در این پژوهش معادله بچلر جهت محاسبه ویسکوزیته که برای ذرات کروی و کسر حجمی کمتر از 5% مناسب می باشد، مورد استفاده قرار گرفته است. این معادله به صورت زیر بیان می شود:

$$m_{nf, Batchlor} = (1 + 2.5j + 6.2j^2)m_f \quad (17)$$

علاوه بر این وانگ و همکاران [18] مدلی برای تخمین ویسکوزیته نانوسیالات معرفی کرده اند که در زیر ارائه شده است:

$$m_{nf, wang} = (1 + 7.3j + 123j^2)m_f \quad (18)$$

که  $m_{nf}$  ویسکوزیته نانوسیال و  $m_f$  ویسکوزیته آب می باشد. ویسکوزیته نانوسیال آب- هیدروکسید منیزیم با استفاده از ویسکومتر بروکفیلد (LVVD-1 Prime+ UL adapter) اندازه گیری شده است. در شکل 5 مقایسه بین ویسکوزیته نسبی با توجه به کسر حجمی نانوذرات برای داده های تجربی، مدل های بچلر و وانگ نشان داده شده است.



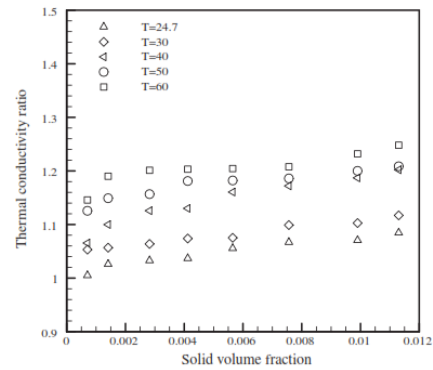
شکل 5 مقایسه نتایج تجربی ویسکوزیته نسبی نانوسیال مورد مطالعه در کسرهای حجمی مختلف با مدل های وانگ و بچلر

## 4- نتایج و بحث

### 4-1- اعتبار سنجی نتایج

به منظور اعتبار سنجی دستگاه آزمایش برای اندازه گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی و فراهم نمودن زمینه ای برای مقایسه نتایج آزمایشات نانوسیال، چندین آزمایش بر روی آب مقطر انجام شده است. مقادیر ناسلت بدست آمده از این آزمایشات برای آب مقطر با روابط ارائه شده توسط گنیلینسکی [19]، پتاخو [20] و میگا و همکاران [21] مقایسه شده است. رابطه ی گنیلینسکی برای جریان مغشوش در زیر نشان داده شده است:

$$Nu = \frac{f/8(Re-1000)Pr}{1+12.7\sqrt{\frac{f}{8}(Pr^{2/3}-1)}} \left(\frac{Pr}{Pr_f}\right)^{0.11} \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{2/3}\right] \quad (19)$$



شکل 4 نسبت هدایت حرارتی در کسرهای حجمی و دماهای مختلف

توجه به اینکه هدایت حرارتی نانوسیالات به پارامترهایی مانند هدایت حرارتی ذرات جامد و سیال پایه، کسر حجمی، شکل نانوذرات، ضخامت و هدایت حرارتی لایه نانو و دما بستگی دارد، مهم می باشد [15]. همچنین اثر دما در افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات با اندازه گیری هدایت حرارتی در کسرهای حجمی و دماهای مختلف (از 24/7 تا 60 درجه سانتی گراد) مورد مطالعه قرار گرفته شده و در شکل 4 نشان داده شده است. با افزایش دما، افزایش قابل توجهی در هدایت حرارتی در تمامی کسرهای حجمی مشهود می باشد. این روند با نتایج گزارش های قبلی مطابقت دارد [16]. در دماهای بالای سیال انباشتگی ذرات به آسانی شکسته شده و نانوذرات در آب به طور یکنواخت پخش می شوند. علاوه با افزایش دما جنبش تصادفی نانوذرات افزایش یافته و به تبع آن انرژی درون سیال سریع تر انتقال می یابد.

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f + (n-1)j(k_p - k_f)}{k_p + (n-1)k_f - j(k_p - k_f)} \quad (14)$$

که  $k_p$  و  $j$  به ترتیب هدایت حرارتی و کسر حجمی نانوذرات می باشند  $k_f$  هدایت حرارتی سیال پایه و  $n$  ضریب شکل تجربی آمده از رابطه زیر می باشد.

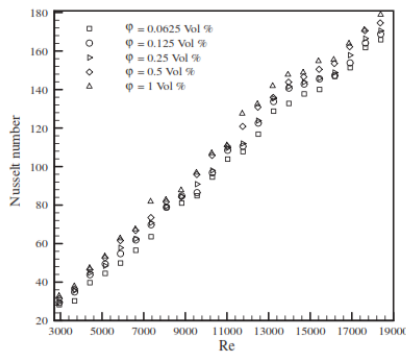
$$n = \frac{3}{Y} \quad (15)$$

که  $Y$  کروییت ذره تعریف می شود و معادل نسبت سطح به حجم ذرات می باشد. برای ذرات کروی مقدار  $n$ ، 3 می باشد. مدل اعمال شده ی دیگر برای محاسبه هدایت حرارتی نانوسیال بوسیله ی یو و چوی پیشنهاد شده است [17].

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2j(k_p - k_f)(1+b)^3}{k_p + 2k_f - j(k_p - k_f)(1+b)^3} \quad (16)$$

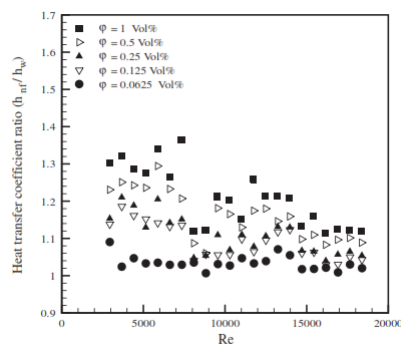
که  $b$  نسبت ضخامت لایه نانو به قطر ذرات می باشد. در اندازه گیری خواص ترموفیزیکی، هدایت حرارتی عموماً مشکل ترین خاصیت برای اندازه گیری به دلیل وجود تعدادی خطا در هنگام آزمایش می باشد. در مطالعه حاضر، هدایت حرارتی نانوسیال هیدروکسید منیزیم- آب با کسر های حجمی

مقدار کمی از نانوذرات به آب (حتی 0/0625%) کارایی حرارتی را بطور قابل توجهی بهبود می بخشد. در شکل 7 ناسلت تجربی نانوسیالات با کسرهای حجمی مختلف در مقابل رینولدز در رژیم جریان مغشوش نشان داده شده است. همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است، عدد ناسلت نانوسیالات با افزایش عدد رینولدز افزایش بیشتری نسبت به افزایش کسر حجمی نانوذرات داشته است. اضافه کردن نانوذرات هیدروکسید منیزیم هدایت حرارتی را افزایش می دهد و نیز با افزایش کسر حجمی نانوذرات شاهد افزایش بیشتر هدایت حرارتی می باشیم. از طرف دیگر، با بهبود هدایت حرارتی، انتقال حرارت جابجایی افزایش می یابد. افزایش کسر حجمی نانوذرات همچنین افزایش ویسکوزیته را به همراه داشته که منجر به افزایش ضخامت لایه مرزی می شود، بنابراین باعث کاهش در انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت می شود. همانطور که در شکل 7 و شکل 8 نشان داده شده است، با اضافه کردن نانوذرات انتقال حرارت جابجایی و ناسلت افزایش می یابد و به این موضوع اشاره می کند که تاثیر افزایش هدایت حرارتی بر تاثیر افزایش ویسکوزیته برتری دارد. همچنین این تاثیر عمده هدایت حرارتی ممکن است شامل افزایش هدایت حرارتی به دلیل فرضیهی مهاجرت ذرات باشد.



شکل 8 ناسلت تجربی نانوسیال در رینولدزهای مختلف

نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوذرات به سیال پایه در رینولدز یکسان (و در یک کسر حجمی) با توجه به اعداد رینولدز در شکل 9 مشاهده می شود.



شکل 9 نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوذرات به سیال پایه در رینولدز یکسان (و در یک کسر حجمی)

همانطور که مشاهده می شود تمامی دادهها بیشتر از 1 می باشند بنابراین افزایش قابل توجه ضریب انتقال حرارت جابجایی با پراکنده سازی نانوذرات هیدروکسید منیزیم در کسرهای حجمی پایین درون آب بدست می آید. برای مثال، در عدد رینولدز حدود 11700، افزایش عدد ناسلت نانوسیالات آب- هیدروکسید منیزیم در کسرهای حجمی 0/0625، 0/125، 0/25 و 0/5

که برای محدودهی پراتنل  $0.5 < Pr < 10^6$  و رینولدز  $2300 < Re < 5 * 10^6$  اعمال شده است. در فرمول ارائه شدهی بالا ضریب دارسی به صورت زیر ارائه شده است:

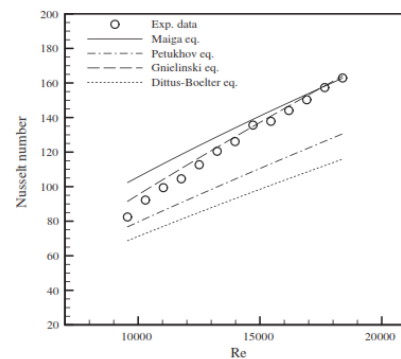
$$f = \frac{1}{(1.821 \log_{10} Re - 1.64)^2} \quad (20)$$

همچنین روابط پتاخوو و میگا به صورت زیر می باشد:

$$Nu = \frac{(f/8) Re Pr}{1.07 + 12.7 (f/8)^{0.5} (Pr^{1/3} - 1)} \quad (21)$$

$$Nu = 0.085 Re^{0.71} Pr^{0.35} \quad (22)$$

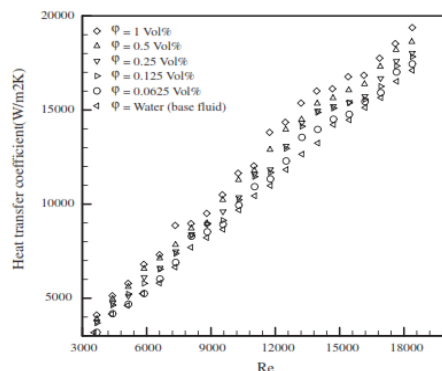
شکل 6 مقایسهی بین دیتاهای آزمایشی و دیتاهای بدست آمده از روابط بالا را در رینولدزهای بالا نشان می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می شود، تطابق خوبی بین نتایج تجربی و نتایج بدست آمده از این روابط وجود دارد. با توجه به شکل رابطهی گنیلینسکی مقادیر ناسلت را برای آب بهتر از سایر روابط پیش‌بینی می کند.



شکل 6 مقایسهی بین دیتاهای آزمایشی و دیتاهای بدست آمده از روابط

#### 2-4- ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت نانوسیال

در کار حاضر نانوسیال آب- هیدروکسید منیزیم در 5 کسر حجمی (1، 0/5، 0/25، 0/125 و 0/0625%) مورد بررسی قرار گرفت. عدد رینولدز بین 3200 و 19000 متغیر می باشد.



شکل 7 متوسط ضریب انتقال حرارت جابجایی با توجه به عدد رینولدز برای کسرهای حجمی مختلف

متوسط ضریب انتقال حرارت جابجایی با توجه به عدد رینولدز برای کسرهای حجمی مختلف در شکل 7 نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می شود که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات بطور قابل توجهی بیشتر از سیال پایه می باشد. نتایج تجربی نشان می دهد که با اضافه کردن

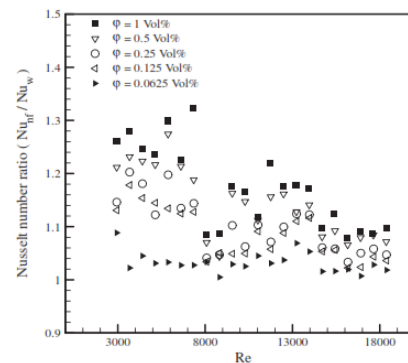
و افت فشار در جریان مغشوش بوده است. برای تمامی کسرهای حجمی هدایت حرارتی بیشتر از 1 می باشد. ماکزیمم هدایت حرارتی مربوط به بیشترین کسر حجمی می باشد. همچنین نرخ افزایش هدایت حرارتی در کسرهای حجمی پایین بیشتر از کسرهای حجمی بالا است. از طرف دیگر با افزایش دما، افزایش قابل توجهی در هدایت حرارتی برای تمامی کسرهای حجمی قابل مشاهده است.

نتایج تجربی نشان می دهد که اضافه کردن نانوذرات و افزایش رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت در جریان مغشوش می شود. برای نانوسیال آب- هیدروکسید منیزیم با کسر حجمی 0/5% عدد ناسلت 21/8% در رینولدز 6700 افزایش می یابد. بعلاوه ماکزیمم افزایش در ضریب انتقال حرارت جابجایی در حدود 39/93% برای کسر حجمی 1% و در رینولدز 7331 می باشد. فاکتور کارایی حرارتی برای همه موارد قابل توجه و بزرگتر از 1 می باشد و افزایش انتقال حرارت با به کار بردن نانوسیال بدون تلفات خیلی زیاد در توان پمپاژ را نشان می دهد.

## 6- مراجع

- [1] S. Chol, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," *ASME-Publications-Fed*, vol. 231, pp. 99-106, 1995.
- [2] 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, pp. 151-170, 1998.
- [3] Q. Li and Y. Xuan, "Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid," *Science in China Series E: Technological Science*, vol. 45, pp. 408-416, 2002.
- [4] Y. Xuan and Q. Li, "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids," *Journal of Heat transfer*, vol. 125, pp. 151-155, 2003.
- [5] W. Duangthongsuk and S. Wongwises, "An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 334-344, 2010.
- [6] 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, pp. 397-402, 2007.
- [7] W. Yu, H. Xie, L. Chen, and Y. Li, "Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid," *Thermochimica Acta*, vol. 491, pp. 92-96, 2009.
- [8] 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, pp. 1501-1506, 2007.
- [9] F. M. White and I. Corfield, *Viscous fluid flow* vol. 3: McGraw-Hill New York, 2006.
- [10] T. L. Bergman, F. P. Incropera, and A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*: John Wiley & Sons, 2011.
- [11] S. Kline and F. McClintock, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, "1953.
- [12] M. F. Pakdaman, M. Akhavan-Behabadi, and P. Razi, "An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 40, pp. 103-111, 2012.
- [13] J. Buongiorno, "Convective transport in nanofluids," *Journal of Heat Transfer*, vol. 128, pp. 240-250, 2006.
- [14] R. Hamilton and O. Crosser, "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems," *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, vol. 1, pp. 187-191, 1962.
- [15] S. Murshed, K. Leong, and C. Yang, "Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 47, pp. 560-568, 2008.
- [16] 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, pp. 4675-4682, 2009.
- [17] W. Yu and S. Choi, "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 5, pp. 167-171, 2003.

به ترتیب 2/8%، 6/4%، 7/8% و 16/7% می باشد. این مقادیر برای رینولدز حدود 6700، به ترتیب 2/9%، 13/1%، 14% و 21/8% می باشد. در آزمایش حاضر ماکزیمم افزایش انتقال حرارت در حدود 1/36 برای کسر حجمی 1 درصد نانوذرات هیدروکسید منیزیم درون آب در رینولدز 7331 می باشد. علاوه بر این وقتی کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد، پارامتر  $h_{nf}/h_w$  با تغییر رینولدز تغییری نمی کند. همانطور که پاک و چو [2] و ژوان و لی [4] ادعا کرده بودند، این نسبت می تواند از عدد رینولدز مستقل در نظر گرفته شود. به طور مشابه، شکل 10 افزایش عدد ناسلت نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف را در مقابل عدد رینولدز نشان می دهد. به طور مشابه، شکل 10 افزایش عدد ناسلت نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف را در مقابل عدد رینولدز نشان می دهد.



شکل 10 افزایش عدد ناسلت نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف را در مقابل عدد رینولدز

در آزمایش‌های حاضر ماکزیمم مقدار  $Nu_{nf} / Nu_w$  در حدود 1/32 برای کسر حجمی 1 درصد نانوذرات هیدروکسید منیزیم درون آب در رینولدز 7331 می باشد. مطابق با افزایش مقدار  $j$  مقدار پارامتر  $Nu_{nf} / Nu_w$  با افزایش عدد رینولدز برای تمامی کسرهای حجمی هیدروکسید منیزیم مطالعه شده در این پژوهش تغییری نمی کند. ضمناً دوسانوسوک و وانگوایز [5] این بهبود را با افزایش در عدد رینولدز را قبلاً گزارش کرده بودند.

## 4-3- افت فشار نانوسیال

اندازه گیری افت فشار نانوسیال در کنار کارایی انتقال حرارت به منظور بکارگیری نانوسیال در واحدهای صنعتی امری ضروری می باشد. افت فشار نانوسیال در طول ناحیه آزمایش به صورت تجربی بوسیله فرستنده فشار دیفرانسیلی (DPT Rosemount 3051 cd) اندازه گیری شده است. افت فشار اندازه گیری شده در طول لوله جهت محاسبه ضریب اصطکاک طبق رابطه- ی زیر می باشد.

$$f = \frac{\Delta P}{1/2 \rho v^2} \frac{d}{L} \quad (23)$$

## 5- نتیجه گیری

یک بررسی تجربی بر روی نانوسیال آب-هیدروکسید منیزیم درون یک لوله انجام شده است. موضوع اصلی این پژوهش ارزیابی تاثیر وجود نانوذرات بر روی هدایت حرارتی، ویسکوزیته دینامیکی، خواص انتقال حرارت جابجایی

- [۱۸] X. Wang, X. Xu, and S. U. S. Choi, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture," *Journal of thermophysics and heat transfer*, vol. 13, pp. 474-480, 1999.
- [۱۹] V. Gnielinski, "New equations for heat and mass-transfer in turbulent pipe and channel flow," *International chemical engineering*, vol. 16, pp. 359-368, 1976.
- [۲۰] B. Petukhov, "Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties," *Advances in heat transfer*, vol. 6, p. i565, 1970.
- [۲۱] S. E. B. Maiga, C. T. Nguyen, N. Galanis, and G. Roy, "Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube," *Superlattices and Microstructures*, vol. 35, pp. 543-557, 2004.