



## بررسی و مقایسه تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالهای مس، اکسید آهن و هیبریدی مس (۵۰٪) - اکسید آهن (۵۰٪)

محمدحسین طالبی<sup>۱</sup>، ولی کلانتر<sup>۲\*</sup>، محمدرضا نظری<sup>۳</sup> و هادی کارگر شریف آباد<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

<sup>۴</sup> استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۷/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۸

### چکیده

در این مقاله انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالهای مس و اکسید آهن به صورت جداگانه بررسی و سپس در شرایط مشابه تاثیر استفاده از نانوسیال هیبریدی مس/اکسید آهن در رژیم آرام تحت شرایط شار حرارتی ثابت در جداره به صورت تجربی بررسی شده است. آزمایش‌ها در سه کسر حجمی ۱، ۲ و ۴ درصد حجمی و سه عدد رینولدز ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ انجام و عدد ناسلت محلی اندازه گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد، برای نانوسیال در حالت ساده و هیبریدی، با افزایش درصد حجمی نانوذرات و عدد رینولدز جریان، عدد ناسلت محلی افزایش می‌یابد. بررسی عدد ناسلت محلی برای نانوسیالهای مس، اکسید آهن و ترکیب آنها نشان می‌دهد، در حالت نانوسیال هیبریدی میزان افزایش عدد ناسلت محلی، بیشتر از حالت نانوسیال ساده است. در حالت نانوسیال مس/آب، بیشترین افزایش انتقال حرارت جابجایی نسبت به آب خالص ۷/۸ درصد و در حالت نانوسیال هیبریدی، ۱۱/۹ درصد است؛ همچنین درصد حجمی نانوسیال هیبریدی در میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی تاثیر زیادی دارد. در حالت استفاده از نانوسیال هیبریدی، در ۲ درصد حجمی، افزایش بیشتری نسبت به نانوسیال ساده مشاهده می‌شود.

**کلمات کلیدی:** انتقال حرارت جابجایی؛ نانوسیال؛ نانوسیال هیبریدی؛ درصد حجمی.

## Experimental Investigation of the Forced Convective Heat Transfer of hybrid Cu / Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanofluids

M. H. Talebi<sup>1</sup>, V. Kalantar<sup>2\*</sup>, M. R. Nazari<sup>3</sup>, H. Kargarsharifabad<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

<sup>3</sup> Assis. Prof., School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

<sup>4</sup> Assis. Prof., Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

### Abstract

In this paper the forced convection of Cu and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Cu/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> hybrid nanofluid in the laminar regime under constant heat flux condition is investigated experimentally. Experiments are carried out in three volume fractions of 1, 2, 4 % and three Re number of 600, 1200 and 1800, and local Nusselt number is measured. The results show that for nanofluid in simple and hybrid mode, with increasing the volume fraction of nanoparticles and Re number, the heat transfer coefficient is increased. results revealed that the heat transfer rate is augmented for both cases of simple and hybrid nanofluids with a rise in the particle volume fractions or the Re number. In addition, the comparison of the experimental data of Cu, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and hybrid nanofluids indicated that the heat transfer enhancement is more remarkable in the case of hybrid nanofluid. In the case of Cu/Water nanofluid, the greatest increase in the heat transfer vs. pure Water is 7.8% and in the hybrid nanofluid 11.9%. Also, the volume fraction of hybrid nanofluids is very effective in increasing the coefficient of heat transfer, so that in a 2% volume state, an increase is observed over other simple nanofluid volumetric fraction.

**Keywords:** Convective Heat Transfer; Nanofluid; Hybrid Nanofluid; Particle Volume Fraction.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۳۵-۳۱۲۳۲۴۹۲، فکس: ۰۳۵-۳۸۲۱۲۷۸۱

آدرس پست الکترونیک: [vkalantar@yazd.ac.ir](mailto:vkalantar@yazd.ac.ir)

## ۱- مقدمه

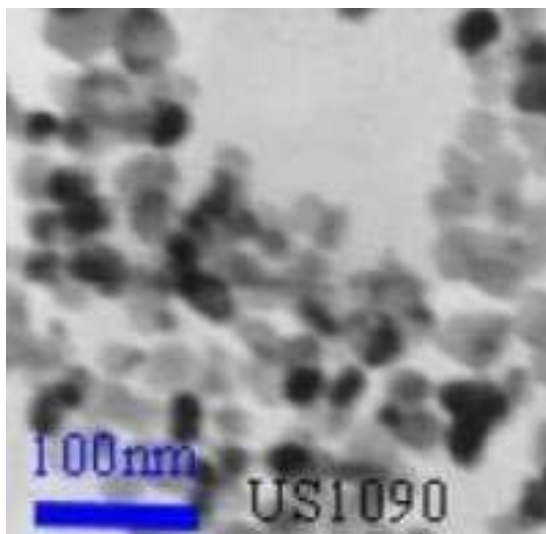
سیر صعودی در پیشرفت صنایع مختلف از جمله هوافضا، اتومبیل، الکترونیک و... با افزایش حرارت تولیدی در حجم‌های کوچک‌تر نسبت به گذشته همراه بوده است که حاکی از نیاز روزافزون به خنک‌کاری در حجم کمتر و به صورت بهینه است. با این وجود، خواص حرارتی پایین سیالات متعارف، یکی از موانع اصلی در برطرف سازی این نیاز اساسی به صورت مؤثر است. در حال حاضر راه‌های مختلفی برای بهبود خنک‌سازی موجود است که می‌توان به چاه‌های حرارتی متشکل از میکروکانال و تکنولوژی سیالات خنک‌کن جریان‌های دوفاز مانند لوله‌های حرارتی، غوطه‌وری مستقیم و خنک‌سازی به وسیله پاشش اشاره کرد. در این میان، تکنولوژی نانوسیالات قابلیت بالایی برای بهبود خواص انتقال حرارت با بازدهی و کارایی بیشتر و نیز هزینه کمتر از خود نشان داده است [۱].

چو<sup>۱</sup> و ایستمن<sup>۲</sup> با تعلیق نانوذرات فلزی در آب هدایت حرارتی سیال را بهبود دادند و در حقیقت اولین کسانی بودند که از لفظ سیال نانو برای سوسپانسیون‌های ذرات نانو استفاده کردند [۲]. پس از آن تحقیقات زیادی در زمینه ضریب انتقال حرارت هدایتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال‌های مختلف انجام شده است و همگی بر افزایش انتقال حرارت نانوسیال‌ها نظر یکسانی را دارند [۳-۶]. برخی از محققان دیگر تحقیقاتی در زمینه انتقال حرارت جابجایی با نانوسیال‌های گوناگون تحت شرایط جریان آرام انجام داده‌اند و همه به اتفاق، افزایش انتقال حرارت را مشاهده کردند [۷-۹]؛ همچنین تاثیر استفاده از نانوسیال‌ها در رژیم جریان آشسته نیز، توسط محققین بررسی شده و افزایش انتقال حرارت مشاهده شده است [۱۰، ۱۱، ۸]. مطالعات جامعی درباره نانو سیال‌های هیبریدی شامل، ترکیب ذرات مختلف، سیال‌های پایه مختلف، تاثیر درصد حجمی نانو ذرات و دما انجام شده است [۱۵-۱۲]. همت اسفه و همکاران [۱۶]، نانوسیال هیبریدی  $CNTs-Al_2O_3$  بر پایه آب را بررسی و تاثیر درصد حجمی نانو ذرات و دما را بر ضریب انتقال حرارت هدایتی بررسی کردند و در نهایت بر مبنای داده‌های

آزمایشگاهی، رابطه‌ای برای محاسبه ضریب انتقال حرارت هدایتی ارائه دادند. در این تحقیق برای هر درصد حجمی جزء جامد، از حجم مساوی  $CNTs$  و  $Al_2O_3$  استفاده شده است. در تحقیقی دیگر ضریب انتقال حرارت هدایتی نانو سیال هیبریدی  $Ag-MgO$  با اندازه حجمی مساوی برای هر جزء اندازه‌گیری شده است [۱۷]. در این تحقیق، تاثیر درصد حجمی نانو ذرات در ضریب انتقال حرارتی دیده شده، در نهایت رابطه‌ای برای پیش بینی آن استخراج شده است. نتایج مطالعه دیگر در رابطه با بررسی ویسکوزیته نانوسیال  $CuO$ -MWCNT (85% -15%)/10W-40 نشان می‌دهد با افزودن نانو ذرات ترکیبی ویسکوزیته روغن افزایش یافته و دارای خواص غیر نیوتنی می‌شود [۱۸]. همت اسفه و همکاران، ضریب انتقال حرارت هدایتی  $Cu/TiO_2$ -water/EG را بصورت تجربی با نسبت ۶۰٪ آب و ۴۰٪ اتیلن گلیکول بررسی کردند [۱۹]. در این تحقیق تاثیر دما و درصد حجمی نانو ذرات بررسی شده و در نهایت رابطه‌ای استخراج شده است که بخوبی می‌تواند ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال هیبریدی را در درصدهای حجمی مختلف و دماهای مشخصی پیش بینی کند.

تحقیقات تجربی در افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان‌های آرام و آشسته با موضوعات مختلف مانند، اثر نوع ذرات، غلظت ذرات و غیره وجود دارد که نتایج آنها منجر به افزایش قابل توجه در ضریب انتقال حرارت شده است [۲۰-۲۶]؛ اما مطالعات انتقال حرارت جابجایی نانو سیال‌های هیبریدی اندازه کافی، مورد بررسی قرار نگرفته است. روند انتقال حرارت نانو سیال‌های هیبریدی، پیچیده بوده و یک تحقیق تجربی می‌تواند کمک شایانی به مطالعه این پدیده کند. با توجه به مبهم بودن انتقال حرارت جابجایی جریان کاملاً توسعه یافته نانو سیال‌های هیبریدی و در راستای اهمیت نانو سیال‌ها در سیستم‌های خنک کاری و خواص حرارتی آنها بایستی تحقیقات گسترده‌ای در زمینه خواص ترموفیزیکی و مکانیزم‌های انتقال حرارت آنها صورت گیرد. هدف اصلی از این تحقیق پس از تهیه دستگاه آزمایش و صحت سنجی آن، بررسی انتقال حرارت جابجایی جریان کاملاً توسعه یافته نانو سیال‌های هیبریدی در اعداد رینولدز و حالت‌های مختلف نانوسیال‌های مس، اکسید آهن و هیبریدی مس (۵۰٪) - اکسید آهن (۵۰٪) است.

<sup>1</sup> Choi<sup>2</sup> Eastman



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی نانوذره مس مورد استفاده در تحقیق

جدول ۱- مقادیر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مس، اکسید آهن و هیبرید مس (۵۰٪) - اکسید آهن (۵۰٪)

نانوسیال	$\phi$ (%)	k (W/m K)	$\mu$ (kg/ms)
نانوسیال	۱	۰/۶۲۸	$۹/۳۱۷ \times ۱۰^{-۴}$
مس/آب	۲	۰/۶۴۸	$۹/۵۵۱ \times ۱۰^{-۴}$
	۴	۰/۶۶۷	$۹/۷۵۳ \times ۱۰^{-۴}$
اکسید آهن آب	۱	۰/۶۱۱	$۱۱/۵۱ \times ۱۰^{-۴}$
	۲	۰/۶۱۹	$۱۱/۶۹ \times ۱۰^{-۴}$
	۴	۰/۶۳۳	$۱۱/۸۷ \times ۱۰^{-۴}$
هیبرید	۱	۰/۶۳۴	$۱۰/۲۵ \times ۱۰^{-۴}$
مس (۵۰٪) - اکسید آهن	۲	۰/۶۷۵	$۱۰/۴۶ \times ۱۰^{-۴}$
اکسید آهن (۵۰٪) / آب	۴	۰/۶۹۷	$۱۰/۶۷ \times ۱۰^{-۴}$

یکنواخت روی جداره خارجی لوله، توسط المنت حرارتی تأمین و توسط وات‌متر اندازه‌گیری شده است. در جدول ۲، نام و مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری ارائه شده است. جهت جلوگیری از اتلاف حرارت به طرف بیرون، علاوه بر نوار نسوز از فوم الاستومر نیز استفاده شده است. با استفاده از یک مبدل حرارتی صفحه‌ای که از یک طرف توسط حمام آب سرد تغذیه می‌شود، دمای سیال ورودی به منطقه تست کاملاً ثابت نگه داشته شده است. حمام آب سرد، مدل TAMSON-TLC 15 است.

## ۲- تهیه نانوسیال و تعیین خواص

نانوسیالات به وسیله پخش یکنواخت ذرات در اندازه‌های نانومتری در سیالات متداول منتقل‌کننده گرما، به منظور افزایش هدایت گرمایی و بهبود عملکرد انتقال حرارت تهیه می‌شوند. به‌طور عمده دو روش تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای برای تولید نانوسیالات استفاده می‌شود. در این تحقیق، از روش دو مرحله‌ای استفاده شده است. در روش دو مرحله‌ای، ابتدا نانو ذره تهیه و سپس در مرحله بعد، نانو ذره داخل سیال پراکنده می‌شود. در این تحقیق از ذرات نانو مس با اندازه تقریبی ۴۰ نانومتر (شکل ۱) و ذرات اکسید آهن با اندازه تقریبی ۳۰ نانومتر استفاده شده است. جهت جلوگیری از کلوخه شدن و ته‌نشینی نیز، از لرزاننده آلتراسونیک به زمان کافی استفاده شده است و پس از آماده شدن نانوسیال، اندازه‌گیری خواص و انجام آزمایش‌ها با سرعت انجام شده است. در زمان انجام آزمایش هیچگونه ته‌نشینی نانوذرات مشاهده نشد که می‌تواند ناشی از تسریع در انجام آزمایش، جابجایی اجباری و اختلاط نانوسیال در مسیر آزمایش باشد؛ ولی بعد از گذشت یک هفته از آزمایش‌ها بترتیب نانوسیال مس و اکسید آهن با ۴٪ حجمی، تقریباً ۱۵ و ۱۰ درصد ته‌نشینی داشته‌اند. برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال (جدول ۱)، از دستگاه KD2-Pro با دقت ۵٪ استفاده شد. قابل ذکر است، تمام اندازه‌گیری‌ها در دمای محیط آزمایشگاه انجام شده است. لزجت نانوسیال‌های مورد تحقیق (جدول ۱) نیز، با استفاده از ویسکومتر راکفیلد UL Adapter با دقت ۲٪ اندازه‌گیری شده است. تمام اندازه‌گیری‌ها پس از کالیبراسیون دستگاه‌ها و با رعایت اصل تکرارپذیری جهت اطمینان از دقت اندازه‌گیری انجام شده است.

## ۳- دستگاه آزمایش

با هدف بررسی تجربی انتقال حرارت اجباری نانوسیال، دستگاه آزمایش (شکل ۲) طراحی و راه‌اندازی شده است. با توجه به شرایط رژیم جریان آرام و عدد رینولدز بحرانی ۲۳۰۰، برای لوله با قطر داخلی ۵ میلی‌متر به منظور بررسی جریان در شرایط کاملاً توسعه‌یافته، لوله با طول ۱۳۰ سانتیمتر انتخاب شده است. از ۱۰ عدد ترموکوپل نوع K، برای ثبت دما در ورودی و خروجی و دمای سطح لوله در موقعیت‌های مختلف لوله استفاده شده است. شار گرمایی



شکل ۲- تصویر دستگاه آزمایش و قسمت‌های مختلف آن

$$Re = \frac{4m}{\pi D \mu} \quad (3)$$

مقدار شار حرارتی که به سطح خارجی لوله وارد می‌شود، با استفاده از توان الکتریکی ورودی ( $P = V \times I$ ) و نرخ حرارت منتقل شده به آب ( $\dot{Q} = mc(T_o - T_i)$ ) قابل محاسبه است. با توجه به اینکه سطح خارجی لوله کاملاً عایق شده است، در حالت ایده آل بایستی این دو مقدار با هم برابر باشند. با توجه به وجود برخی تلفات ناچیز در دستگاه آزمایش با بررسی انجام شده در این تحقیق، بیشترین اختلاف این دو مقدار ۱/۶٪ بوده است. با در نظر گرفتن لوله بعنوان یک حجم کنترل و اعمال قانون بقای انرژی و در نظر گرفتن گرمای جذب شده توسط سیال بعنوان انرژی ورودی، مقدار شار حرارتی واقعی که به جداره خارجی لوله اعمال شده است، با رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$q'' = \frac{D\rho cV(T_{out} - T_{in})}{4L} \quad (4)$$

با دانستن مقدار شار حرارتی در جداره خارجی لوله، با در نظر گرفتن بقای انرژی برای هر طول ( $x$ )، با رابطه ۵ دمای متوسط در هر  $x$  بدست می‌آید.

$$T_m = \frac{4xq''}{D\rho cV} + T_{in} \quad (5)$$

جدول ۲- نام و مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده در آزمایش

نام	واحد	محدوده اندازه‌گیری	دقت
ترموکوپل نوع k	°C	-۳۰۰-۴۰	۰/۰۱
امپر متر	A	۰-۱۰۰	۰/۰۰۱
ولت متر	V	۰-۲۲۰	۰/۰۱
کرونومتر	s		۰/۰۰۱
استوانه مدرج	cc	۰-۱۰۰	۱

#### ۴- داده‌برداری

برای تجزیه و تحلیل انتقال حرارت، با داده‌های تجربی ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $h$ ) به شرح زیر محاسبه شده است. بعد از اندازه‌گیری دبی حجمی سیال با رابطه ۱ و محاسبه نرخ گرمای جریان با رابطه ۲، عدد رینولدز از رابطه ۳ بدست می‌آید [۲۷].

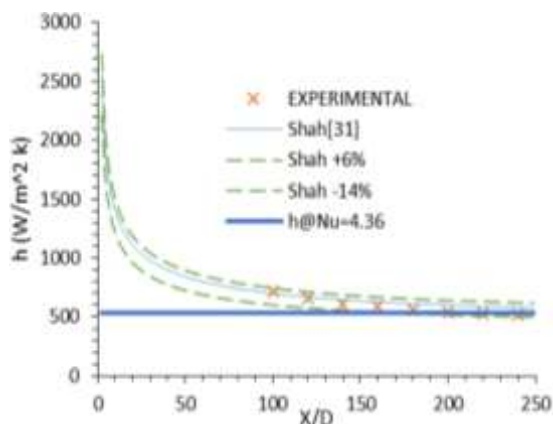
$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

$$m = \rho Q \quad (2)$$

اندازه عاری از قطعیت است. آنچه در میحث عدم قطعیت مدنظر است، خطای تصادفی است؛ اما برخی از خطاهای سیستماتیک بصورت تصادفی در اندازه‌گیری تأثیرگذار می‌باشند که بایستی در محاسبات آنها را نیز مدنظر قرارداد [۳۲]. در این تحقیق تجربی بر اساس روش کلین<sup>۱</sup> و مک کلینتوک<sup>۲</sup> [۳۳]، تحلیل عدم قطعیت انجام شده است. به همین ترتیب با استفاده از این روش عدم قطعیت برای Re و h انجام شده و بترتیب ۰/۱۷٪ و ۰/۹٪ محاسبه شده است.

### ۵-۳- نتایج

بعد از ارزیابی سیستم آزمایش با آب مقطر، آزمایش‌های مختلف برای نانوسیال‌های مس، اکسید آهن و هیبریدی مس(۵۰٪)-اکسید آهن (۵۰٪) در سه درصد حجمی مختلف ۱، ۲، ۴، سه عدد رینولدز ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ انجام شده است. با توجه به اینکه هدف بررسی رژیم کاملاً توسعه‌یافته است، اندازه‌گیری‌ها بعد از طول ورودی هیدرولیکی و حرارتی انجام شده است. به همین دلیل سنسورهای دما در فاصله ۵۰ سانتیمتری ورودی لوله و با فاصله ۱۰ سانتیمتر از یکدیگر روی سطح لوله قرار داده شده‌اند. این موضوع در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده در این بخش ارائه و تحلیل شده است.



شکل ۳- مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی آب مقطر با معادلات شاه در Re=1200

در نهایت با استفاده از رابطه ۶ عدد Nu موضعی بدست می‌آید که با استفاده از رابطه ۷، مقدار h موضعی محاسبه می‌شود.

$$Nu_{exp} = \frac{q''D}{k(T_0 - T_m)} \quad (6)$$

$$h_{exp} = \frac{k}{D} Nu_{exp} \quad (7)$$

در روابط فوق ظرفیت گرمایی نانوسیال (c) با استفاده از رابطه ۸ و ظرفیت گرمایی نانوپودر و سیال خالص محاسبه شده است [۲۹-۲۷].

$$Cp_{nf} = \frac{1}{\rho_{nf}} [(1 - \phi) \rho_f Cp_f + \phi \rho_p Cp_p] \quad (8)$$

### ۵- نتایج و بحث

#### ۵-۱- ارزیابی دستگاه

قبل از شروع آزمایش‌های اصلی، قابلیت اطمینان و دقت سیستم بررسی شده است. در این راستا نتایج اندازه‌گیری تجربی با معادله شاه [۳۱] برای جریان آرام، تحت شرایط مرزی شار ثابت با آب مقطر در رینولدزهای مختلف مقایسه شد. روابط ۹ و ۱۰ جهت محاسبه h موضعی تحت شرایط مشابه با فعالیت تجربی استفاده شده‌اند.

$$h_{theory} = \frac{k}{D} Nu_{theory} \quad (13)$$

$$Nu_{theory} = \begin{cases} 1.302x^{*-1/3} - 1 & x^* \leq 0.00005 \\ 1.302x^{*-1/3} - 0.5 & 0.00005 \leq x^* \leq 0.0015 \\ 4.364 + 8.68(10^3 x_*)^{-0.506} \exp(-41x_*), & x_* \geq 0.001 \end{cases} \quad (14)$$

$$x_* = \frac{x/D}{RePr} \quad (15)$$

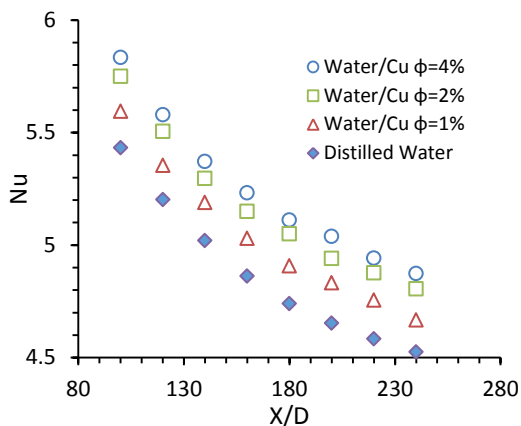
نتایج برای Re=1200 در شکل ۳ با معادله شاه همخوانی خوبی دارند که قابلیت اعتماد دستگاه آزمایش را برای بررسی حالت‌های دیگر نشان می‌دهد.

#### ۵-۲- تحلیل خطا و عدم قطعیت

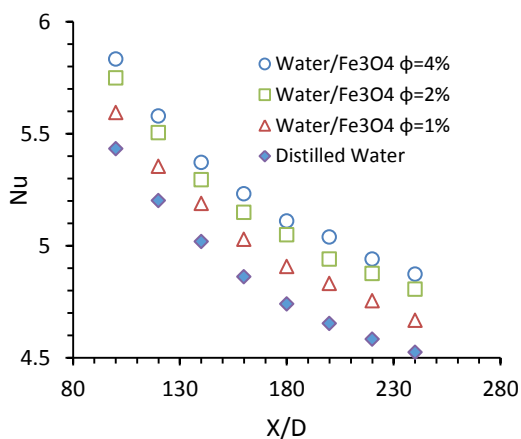
خطاهای حقیقی داده‌های تجربی آن عواملی هستند که همیشه تا حدی مبهم هستند و عدم قطعیت به دنبال دارند، پس بایستی تعیین شود، یک مشاهده معین دقیقاً تا چه

<sup>1</sup> Kline

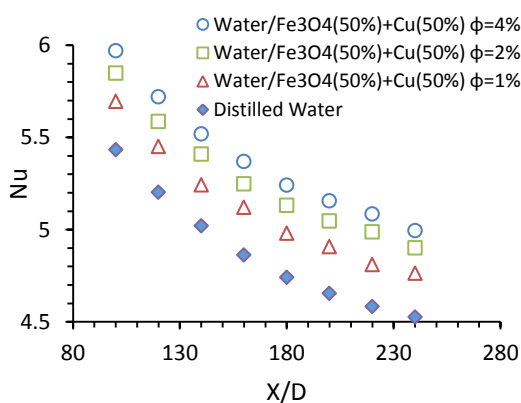
<sup>2</sup> McClintock



(الف)

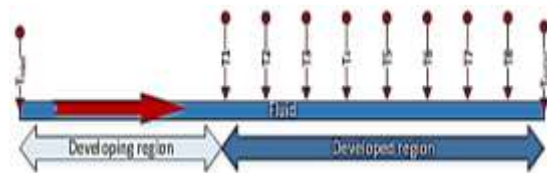


(ب)



(ج)

شکل ۵- تغییرات عدد ناسلت محلی با طول بی بعد (X/D) در Re=1200 (الف) نانوسیال مس / آب، (ب) نانوسیال اکسید آهن / آب و (ج) نانوسیال هیبریدی مس (۵۰٪) - اکسید آهن (۵۰٪) / آب



شکل ۴- موقعیت قرارگیری ترموکوپلها روی سطح لوله

### ۵-۳-۱- تأثیر درصد حجمی نانوسیال

شکل ۵ نمودار عدد ناسلت محلی را در برابر طول بی بعد (X/D) برای عدد رینولدز ۱۲۰۰ نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که استفاده از نانوسیال های مس، اکسید آهن و هیبریدی مس (۵۰٪) - اکسید آهن (۵۰٪)، انتقال حرارت جابجایی را به طور قابل توجهی بهبود می بخشد که این افزایش برای درصدهای حجمی بالاتر بیشتر است. علت این افزایش انتقال حرارت، مکانیزم هایی مانند، انتقال ذره، تغییرات گذردهی حرارتی و حرکت براونی در نانوسیال ها در نظر گرفته می شود. حرکت نامنظم نانو ذرات و جابجایی های براونی و افزایش ضریب هدایت حرارتی از دلایل اصلی برای بهبود انتقال حرارت نانوسیالها هستند. با توجه به رابطه انرژی در لایه مرزی و حل تقریبی آن، ضریب انتقال حرارت جابجایی با  $\frac{k}{\delta_t}$  متناسب است. با افزودن نانوذرات به آب خالص، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش یافته و باعث افزایش h می شود؛ در نتیجه، عوامل ذکر شده دلایل افزایش انتقال حرارت در نانوسیالها هستند.

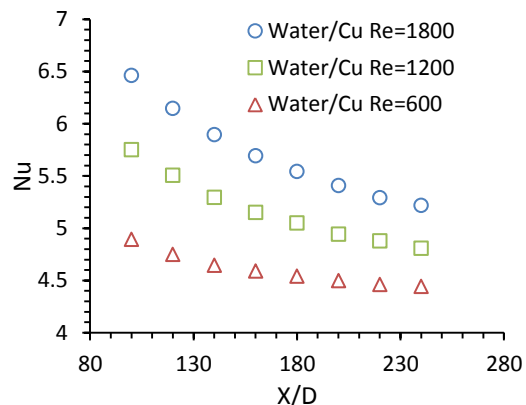
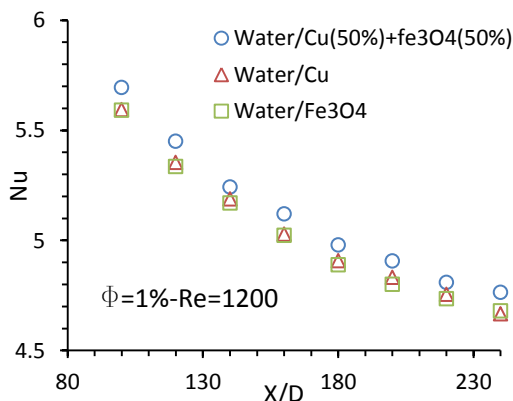
### ۵-۳-۲- تأثیر عدد رینولدز

تأثیر سرعت سیال و عدد رینولدز جریان برای درصدهای حجمی مختلف و نانوسیال های مختلف بررسی شده است. در همه حالت ها با افزایش عدد رینولدز ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت افزایش می یابد. در شکل ۶ این موضوع برای نانوسیال های مختلف در درصد حجمی ۲٪ نشان داده شده است. با افزایش عدد رینولدز و کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی، طول ورودی حرارتی افزایش و سیال پتانسیل بیشتری برای جذب حرارت خواهد داشت. نانوسیال هیبریدی نیز رفتار مشابهی در برابر افزایش عدد رینولدز داشته و با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت آن افزایش می یابد.

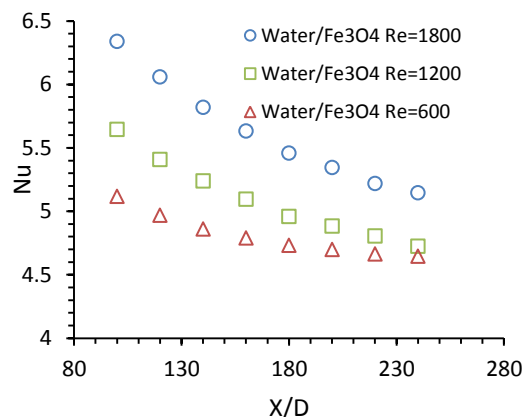


۵-۳-۳- تأثیر نوع نانوسیال

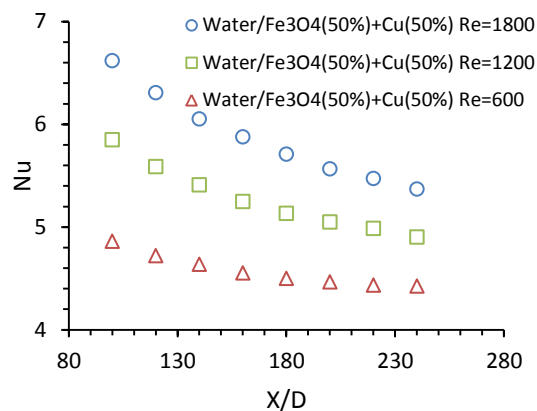
مقایسه تجربی استفاده از نانوسیال‌های مس، اکسید آهن و هیبریدی مس (۵۰٪) - اکسید آهن (۵۰٪) با پایه آب نشان می‌دهد، در عدد رینولدز و درصد حجمی مشابه، نانوسیال مس نسبت به اکسید آهن دارای ضریب انتقال حرارت جابجایی بیشتری است. نانوسیال هیبریدی در همه حالت‌ها، ضریب انتقال حرارت بزرگتری نسبت به نانوسیال ساده دارد؛ ولی میزان افزایش آن به درصد حجمی آن وابسته است. نتایج بررسی تجربی تحقیق حاضر نشان می‌دهد، در عدد های رینولدز مختلف، نانوسیال هیبریدی با درصد حجمی ۲٪ بیشترین ضریب انتقال حرارت جابجایی را نسبت به نانوسیال‌های ساده دارد. در شکل ۷ تغییرات عدد ناسلت در عدد رینولدز و درصد های حجمی مختلف برای نانوسیال‌های مختلف نشان داده شده است. افزایش قابل توجه ضریب انتقال حرارت در نانوسیال هیبریدی ۲٪، درصد حجمی بهینه را برای افزایش انتقال حرارت جابجایی مشخص می‌کند. مزیت استفاده از نانوذرات فلزی و اکسید فلزی برای افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری بر همگان روشن شده است. در برخی موارد بحث افزایش افت فشار مطرح است که محققان در حال بررسی آن می‌باشند. همین موضوع باعث شده است تا ایده استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی با هدف بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار کل با عنایت به مزایا و معایب هر جزء، شکل گرفته و بحث انتخاب ترکیب بهینه آنها مدنظر قرار بگیرد. در حالت هیبریدی، انتخاب مناسب نسبت‌ها بدلیل اثر متقابل نانوذرات، می‌تواند سبب تقویت خصوصیات مثبت و تضعیف خصوصیات منفی اجزا شود و در نهایت خصوصیات بهتری نسبت به هر جزء ایجاد کند.



(الف)

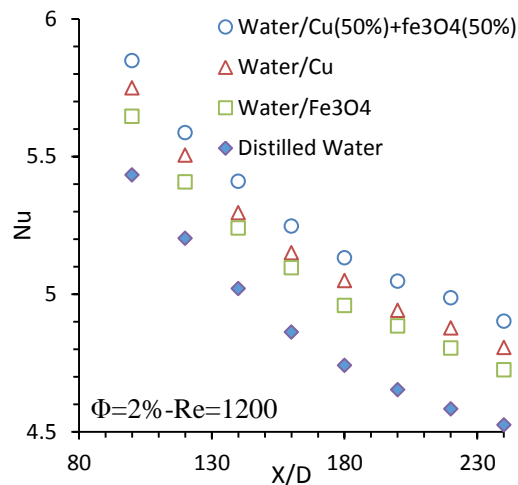
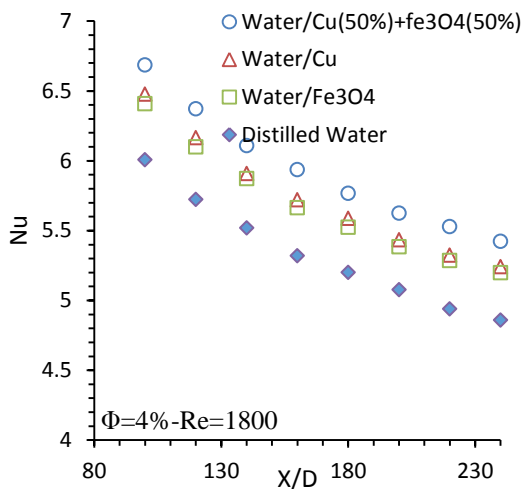


(ب)



(ج)

شکل ۶- تغییرات عدد ناسلت محلی با عدد رینولدز در درصد حجمی ۲٪ (الف) نانوسیال مس/آب، (ب) نانوسیال اکسید آهن/آب و (ج) نانوسیال هیبریدی مس (۵۰٪) - اکسید آهن (۵۰٪) آب

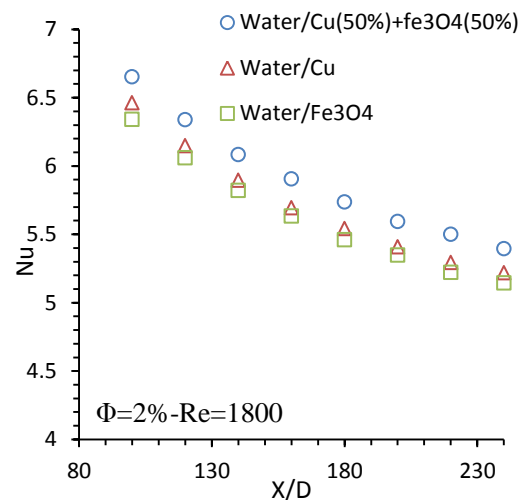
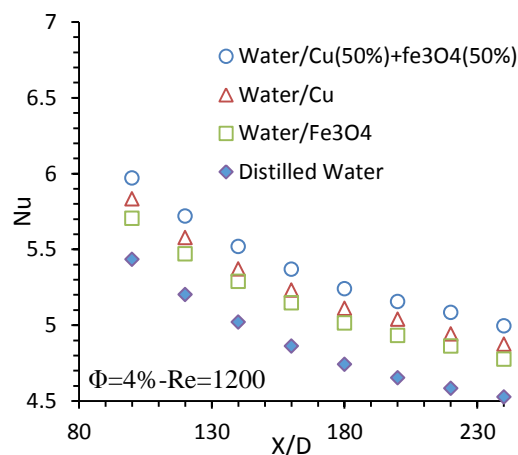


شکل ۷- تغییرات عدد ناسلت محلی برای نانوسیالهای مختلف ( نانوسیال مس/آب، نانوسیال اکسید آهن/آب و نانوسیال هیبریدی مس (۵۰٪) - اکسید آهن (۵۰٪) /آب) در عدد رینولدز و درصدهای حجمی متفاوت

### ۶- نتیجه گیری

انتقال حرارت جابجایی نانوسیال نسبت به انتقال حرارت جابجایی سیال پایه بیشتر است که البته به دلیل تغییر در خواص سیال، قابل انتظار بوده است. درصد حجمی نانوسیال، نقش بسزایی در میزان بهبود انتقال حرارت دارد؛ به نحوی که با افزایش درصد حجمی بهبود انتقال حرارت نیز بیشتر می‌شود؛ زیرا تغییرات بیشتری در خواص سیال با افزایش درصد حجمی سیال مشاهده می‌شود. ضریب انتقال حرارت جابجایی متناسب با  $\frac{k}{\delta_t}$  است. که در آن  $k$  رسانایی گرمایی و  $\delta_t$  ضخامت لایه مرزی حرارتی است. همزمان با افزودن نانوذرات به آب و تشکیل نانوسیال، ضمن افزایش ضریب انتقال حرارت سیال، حرکات براونی و جابجایی‌های سیال،  $h$  افزایش می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد، برای نانوسیال در حالت ساده و هیبریدی، با افزایش عدد رینولدز جریان، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی برای نانوسیالهای مس، اکسید آهن و ترکیب آنها نشان می‌دهد، در حالت نانوسیال هیبریدی میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی بیشتر از حالت نانوسیال ساده است. در حالت نانوسیال مس/آب، بیشترین





- based composite nanofluids. *Renew Sust Energ Rev* 66: 654-678.
- [13] Ranga Babu JA, Kumar KK, Srinivasa Rao S (2017) State-of-art review on hybrid nanofluids. *Renew Sust Energ Rev* 77: 551-565.
- [14] Das PK (2017) A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nano fluids and hybrid nano fluids. *J Mol Liq* 240: 420-446.
- [15] Sarkar J, Ghosh P, Adil A (2015) A review on hybrid nanofluids: Recent research, development and applications. *Renew Sust Energ Rev* 43: 164-177.
- [16] Hemmat Esfe M, Saedodin S, Yan WM, Afrand M, Sina N (2016) Erratum to: Study on thermal conductivity of water-based nanofluids with hybrid suspensions of CNTs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. *J Therm Anal Calorim* 125: 565.
- [17] Hemmat Esfe M, Abbasian Arani AA, Rezaie M, Yan WM, Karimipour A (2015) Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag-MgO/water hybrid nanofluid. *Int Commun Heat Mass* 66: 189-195.
- [18] Hemmat Esfe M, Sarlak MR (2017) Experimental investigation of switchable behavior of CuO-MWCNT (85%-15%)/10W-40 hybrid nanolubricants for applications in internal combustion engines. *J Mol Liq* 242: 326-335.
- [19] Hemmat Esfe M, Wongwises S, Naderi A, Asadi A, Safaei MR, Rostamian H (2015) Thermal conductivity of Cu/TiO<sub>2</sub>-water/EG hybrid nanofluid: Experimental data and modeling using artificial neural network and correlation. *Int Commun Heat Mass* 66: 100-104.
- [20] Rashidia S, Bovand M, Esfahania JA (2016) Opposition of Magnetohydrodynamic and AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid flow around a vertex facing triangular obstacle. *J Mol Liq* 215: 276-284.
- [21] Ganguly R, Sen S, Puri IK (2004) Heat transfer augmentation using a magnetic fluid under the influence of a line dipole. *J Magn Magn Mater* 271: 63-73.
- [22] Li Q, Xuan Y (2002) Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid. *Sci China Ser E* 45: 408-416.
- [23] Heidary H, Hosseini R, Pirmohammadi M, Kermani MJ (2015) Numerical study of magnetic field effect on nano-fluid forced convection in a channel. *J Magn Magn Mater* 374: 11-17.
- [24] Chamkha A, Ismael M, Kasaeipoor A, Armaghani T (2016) Entropy generation and natural convection of CuO-water nanofluid in C-shaped cavity under magnetic field. *Entropy* 18.
- [25] Dibaei M, Kargarsharifabad H (2016) New achievements in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid fully developed forced convection heat transfer under the effect of a magnetic field: An experimental study. *Int J Heat Mass Tran* 4(1): 1-11.
- افزایش انتقال حرارت جابجایی نسبت به آب خالص ۷/۸ درصد و در حالت نانوسیال هیبریدی ۱۱/۹ درصد است؛ همچنین درصد حجمی نانوسیال هیبریدی در میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی تأثیر زیادی دارد؛ به طوری که در حالت ۲ درصد حجمی، افزایش بیشتری نسبت به نانوسیال ساده مشاهده می‌شود.

#### ۷- منابع

- [1] Zhang ZM (2007) Nano/microscale heat transfer. McGraw-Hill New York.
- [2] Choi SUS, JA Eastman (1995) Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Argonne National Lab, IL (United States).
- [3] Keblinski P, Phillpot R, Choi S, Eastman A (2002) Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). 45: 855-863.
- [4] Jung JY, Yoo JY (2009) Thermal conductivity enhancement of nanofluids in conjunction with electrical double layer (EDL). *Int J Heat Mass Transfer* 52: 525-528.
- [5] Krichler M, Odenbach S (2013) Thermal conductivity measurements on ferrofluids with special reference to measuring arrangement. *J Magn Magn Mater* 326: 85-90.
- [6] Xie HQ, Wang JC, Xi TG, Liu Y, Ai F (2002) Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *J Appl Phys* 91(7): 4568-4572.
- [7] Noie SH, Heris SZ, Kahani M, Nowee SM (2009) Heat transfer enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in a two-phase closed thermosyphon. *Int J Heat Fluid Flow* 30: 700-705.
- [8] Kim D, Kwon Y, Cho Y, Li C, Cheong S, Hwang Y (2009) Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions. *Curr Appl Phys* 9: e119-e123.
- [9] Hwang KS, Jang SP, Choi SUS (2009) Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in fully developed laminar flow regime. *Int J Heat Mass Tran* 52: 193-199.
- [10] Aghabozorg MH, Rashidi A, Mohammadi S (2016) Experimental investigation of heat transfer enhancement of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CNT/water magnetic nanofluids under laminar, transient and turbulent flow inside a horizontal shell and tube heat exchanger. *Exp Therm Fluid Sci* 72: 182-189.
- [۱۱] هوشمند ا، صداقت، سلیم پور م ر، زرگوشی ع، محسنی ع (۱۳۹۴) بررسی تجربی انتقال حرارت جریان نانوسیال آب/TiO<sub>2</sub> در لوله افقی با نوار پیچیده تحت شرایط دمایی ثابت دیواره. مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها ۱۷۲-۱۶۵: ۵(۳).
- [12] Akilu S, Sharma KV, Baheta AT, Mamat R (2016) A review of thermophysical properties of water

- [۲۹] زندیان ع، خورشیدی مال احمدی ج (۱۳۹۲) انتقال حرارت جابجایی اجباری و رفتار هیدرودینامیکی نانوسیال آب CuO در فضای بین استوانه های هم محور چرخان. مکانیک سازه ها و شماره ها ۱۳۶-۱۲۱: ۳(۳).
- [30] Sundar LS, Singh MK, Sousa ACM (2014) Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water hybrid nanofluids. *Int Commun Heat Mass* 52: 73-83.
- [31] Bejan A, Kraus AD (2003) *Heat transfer handbook*. John Wiley & Sons.
- [32] Eckert ERG, Goldstein RJ (1976) *Measurements in heat transfer*. Taylor & Francis.
- [33] Kline SJ, McClintock FA (1953) Describing uncertainties in single-sample experiments. *MECH ENG* 75: 3-8.
- [26] Kargarsharifabad H, Falsafi M (2015) Numerical study of ferrofluid forced convection heat transfer in tube with magnetic field. *Journal of Computational Method in Engineering* 34(1): 11-25.
- [27] Sundar LS, Naik MT, Sharma KV, Singh MK, Siva Reddy TC (2012) Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanofluid. *Exp Therm Fluid Sci* 37: 65-71.
- [28] Ho CJ, Chen MW, Li ZW (2008) Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity. *Int J Heat Mass Tran* 51: 4506-4516.