



بررسی تجربی تاثیر موقعیت و شدت میدان مغناطیسی ثابت بر انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال Fe_2O_3 /آب در ناحیه در حال توسعه حرارتی

محمدحسین طالبی^{۱*}، هادی کارگر شریف آباد^{۲*}، ولی کلانتر^۳ و محمدرضا نظری^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۴ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

چکیده

در این تحقیق تجربی، انتقال حرارت جابجایی اجباری در حال توسعه حرارتی نانوسیال Fe_2O_3 /آب داخل لوله مسی تحت میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط تعدادی آهنربای دائمی تخت بررسی شده است. آزمایشات در شرایط رژیم جریان آرام و شرط مرزی شار حرارتی یکنواخت انجام شده و تاثیر موقعیت و شدت میدان مغناطیسی بررسی شده است. اهداف این تحقیق بررسی تاثیر استفاده از نانوسیال Fe_2O_3 /آب، عدد رینولدز جریان، شدت و موقعیت میدان مغناطیسی ثابت در رفتار حرارتی جریان بوده است. اعتبار سنجی دستگاه آزمایش با استفاده از آب مقطر و مقایسه با نتایج تئوری انجام شده است که در نهایت تطابق خوبی حاصل شده است. نتایج نشان می‌دهد، به علت تاثیر میدان مغناطیسی بر نانوسیال Fe_2O_3 /آب، بوجود آمدن جریان‌های ثانویه و تغییر شکل لایه مرزی، انتقال حرارت تغییر می‌کند و تغییرات آن به مشخصات جریان و شدت و موقعیت میدان مغناطیسی وابسته است. افزایش شدت میدان مغناطیسی عمود بر جریان در یک نقطه در رینولدز ثابت، باعث افزایش ناگهانی ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی می‌شود؛ در صورتی که همین میدان در نقاط مختلف تقسیم شود، افزایش کمتری نسبت به یک نقطه مشاهده می‌شود، ولی ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در حالت دوم بیشتر از حالت اول است.

کلمات کلیدی: نانوسیال Fe_2O_3 /آب؛ انتقال حرارت جابجایی؛ میدان مغناطیسی؛ مطالعه تجربی.

Experimental Study of the Effect of Position and Intensity of a Constant Magnetic Field on the Forced Convection Heat Transfer of Fe_2O_3 / Water Nanofluid in the Developing Thermal Region

M.H. Talebi^{1,*}, H. Kargarsharifabad^{2,*}, V. Kalantar³, M.R. Nazari⁴

¹ Ph.D. Student, School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

² Assis. Prof., Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

³ Assoc. Prof., School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

⁴ Assis. Prof., School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Abstract

In this experimental study, the forced convection heat transfer of thermally developing Fe_2O_3 /water nanoparticles inside a copper tube under magnetic field created by a number of permanent flat magnets is investigated. Experiments have been carried out under laminar flow regime and uniform heat flux boundary condition and the influence of magnetic field position and intensity. The objectives of this study were to investigate the effect of using Fe_2O_3 /water nanofluid, flow Reynolds number, intensity and magnetic field position on the thermal behavior of the flow. Validation of the test apparatus was performed using distilled water and compared with the theoretical results, which eventually achieved good agreement. The results show that due to the influence of the magnetic field on the Fe_2O_3 /water nanofluid, secondary flow and boundary layer deformation occur, the heat transfer changes and its variation is dependent on the flow profile and intensity and position of the magnetic field. Increasing the intensity of the magnetic field perpendicular to the flow at a single point in the constant Reynolds causes a sudden increase in the local convection heat transfer coefficient but the mean convection heat transfer coefficient in the latter case is higher than in the former case.

Keywords: Fe_2O_3 /Water Nanofluid; Convection Heat Transfer; Magnetic Field; Experimental Study.

۱- مقدمه

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 خنک کاری در حجم کمتر و به‌صورت بهینه است. در حال حاضر راه‌های مختلفی برای بهبود خنک‌سازی موجود است که می‌توان به چاه‌های حرارتی متشکل از میکروکانال^۱ و فناوری سیالات خنک‌کن جریان‌های دوفازی مانند لوله‌های حرارتی^۲، ترموسیفون^۳، غوطه‌وری مستقیم^۴ و خنک‌سازی به‌وسیله پاشش^۵ اشاره کرد. در این میان، فناوری نانوسیالات قابلیت بالایی برای بهبود خواص انتقال حرارت با بازدهی و کارایی بیشتر و نیز هزینه کمتر از خود نشان داده است. خوشبختانه، ظهور نانوسیال و فروسیال در زمینه انتقال حرارت می‌تواند یک راه حل عملی نسبتاً قابل توجه برای مشکلات احتمالی پیش‌رو باشد [۱، ۲]. مطالعات تحقیقاتی روی انتقال حرارت اجباری نانوسیال تحت شرایط جریان آشفته و اثرات غلظت حجمی و عدد رینولدز برای افزایش انتقال حرارت جابجایی انجام شده است [۳]. انتقال حرارت اجباری نانوسیال Al_2O_3 در جریان آرام داخل یک میکروکانال استوانه‌ای بررسی شده است و ۳۲٪ افزایش در انتقال حرارت جابجایی را نشان داد [۴]. تحقیقاتی درباره اثر اندازه ذرات بر فرآیند انتقال حرارت اجباری در منطقه ورودی توسط آنوپ^۶ و همکاران [۵] انجام شده است. آنها دریافتند که کاهش اندازه نانوذرات، منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود و این افزایش در منطقه ورودی تأثیر بیشتری در مقایسه با منطقه کاملاً توسعه یافته داشته است؛ همچنین، برخی از محققان دیگر تحقیقات مشابه با نانوسیال‌های گوناگون تحت شرایط جریان آرام انجام داده‌اند و همه به اتفاق، افزایش انتقال حرارت را مشاهده کردند [۶-۱۳]. تحقیقات تجربی در افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان‌های آرام و آشفته 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. از طرفی سیالات مغناطیسی یا فروسیال‌ها^۷، سوسپانسیون‌های کلوییدی از نانو ذرات مغناطیسی هستند که نسبت به میدان مغناطیسی خارجی واکنش نشان می‌دهند. این امر سبب می‌شود که محل قرار گرفتن این محلول را از طریق به کارگیری یک میدان مغناطیسی کنترل کرد. نیروهای مغناطیسی در معادلات اساسی هیدرودینامیک برای محیط‌های شبه‌همگن مایع با قابلیت مغناطیسی، هیدرودینامیک مغناطیسی نانوسیال‌های مغناطیسی را نتیجه می‌دهد که به عنوان فروهیدرودینامیک^۸ شناخته می‌شود و افق وسیعی از پدیده‌های جدید و کاربردهای نوین را روی محققان گشوده است. استفاده از سیالات مغناطیسی و کنترل خواص مختلف آنها به وسیله میدان‌های مغناطیسی خارجی برای دهه‌های متعددی از موضوعات مورد علاقه محققان بوده است. امروزه سیالات فرو کاربرد وسیعی در ماشین آلات، سانتریفیوژها و حتی هارد دیسک‌های کامپیوتر دارند [۱۰، ۱۱].

بیولیو^۹ و اسموردین^{۱۰} [۱۴] تأثیر میدان مغناطیسی متناوب و فرکانس، قدرت میدان مغناطیسی خارجی، ضخامت لایه مرزی و درجه حرارت را در انتقال حرارت فروسیال‌ها مورد بررسی قرار دادند. بررسی تأثیر میدان‌های مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت در انتقال حرارت جابجایی فروسیال در اعداد رینولدز پایین توسط لی و ژوان [۱۵] انجام شده است. آنها نتیجه گرفتند که میدان مغناطیسی می‌تواند فرآیند انتقال حرارت را شدیداً تحت تأثیر قرار دهد. شکیبا و گرجی [۱۶]، رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیال مغناطیسی (آب و ۴٪ اکسید آهن) در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم افقی، تحت میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع با شدت‌های متفاوت به صورت عددی بررسی کردند و نشان دادند، اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع باعث ایجاد نیروی کلویین در جهت عمود بر جریان فروسیال می‌شود که پروفیل سرعت محوری را تغییر داده و در نهایت با ایجاد یک جفت گردابه، منجر به افزایش عدد ناسلت،

¹ Microchannel heat sink

² Heat pipe

³ Thermosyphon

⁴ Direct immersion cooling

⁵ Spray cooling

⁶ Anoop

⁷ Ferrofluid

⁸ Ferrohydrodynamics

⁹ Belyaev

¹⁰ Smorodin

۲- فعالیت تجربی

مهمترین بخش بررسی تجربی یک موضوع شامل دستگاه آزمایش، تجهیزات اندازه‌گیری، داده برداری، اعتبار سنجی دستگاه، آنالیز خطا و ماده مورد نظر برای دستیابی به نتایج جدید است؛ لذا در این قسمت به ترتیب موارد فوق شرح داده شده است.

۲-۱- دستگاه آزمایش و تجهیزات اندازه‌گیری

برای بررسی تجربی تاثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت نانوسیال Fe_2O_3 / آب، دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شده است. لوله مسی با قطر داخلی ۵ میلی‌متر و طول ۱۳۰ cm بعنوان مقطع تست انتخاب شد. از ۱۰ عدد ترموکوپل نوع K همراه با ثبت کننده دما برای ثبت دما در ورودی و خروجی و قسمت های مختلف لوله استفاده شده است. به همین دلیل ۸ ترموکوپل در فاصله ۵۰ cm مقطع ورودی لوله و با فاصله ۱۰ cm از یکدیگر تا مقطع خروجی روی سطح لوله قرار داده شده‌اند. شارگرمایی یکنواخت روی جداره خارجی لوله توسط المنت نواری تخت ایجاد شده است و جهت جلوگیری از اتلاف حرارت به طرف بیرون، علاوه بر نوار نسوز از عایق حرارتی موثر نیز استفاده شده است. میزان توان حرارتی اعمال شده بوسیله اندازه‌گیری مقدار ولتاژ منبع تغذیه و جریان عبوری از المنت حرارتی و توسط قانون اهم محاسبه شده است. با استفاده از یک مبدل حرارتی صفحه ای که از یک طرف توسط حمام آب سرد تغذیه می‌شود، دمای سیال ورودی به منطقه تست کاملاً ثابت نگه داشته شده است. برای تولید میدان مغناطیسی از شش آهنربای تخت دائم با ترکیب‌های مختلف، در نقاط مختلف و با تعداد مختلف استفاده شده است. با توجه به اینکه مقطع تست از فاصله ۵۰ cm ورودی لوله شروع می‌شود و تا انتهای لوله ادامه دارد، جهت بررسی تاثیر موقعیت میدان نقطه ای آهنربای دائمی در فاصله‌های ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ سانتیمتری لوله بصورت عمود بر لوله قرار داده شد. بیشترین شدت میدان مغناطیسی آهنربا ۱۸۰۰ گوس اندازه‌گیری شده است. برای کاهش اثرات میدان مغناطیسی و ایجاد نویز روی ترموکوپل‌ها، از غلاف مناسب برای سیم‌های ترموکوپل استفاده شده است. در شکل ۱ تصویر، شماتیک و جزئیات سطح مقطع لوله دستگاه آزمایش آمده است.

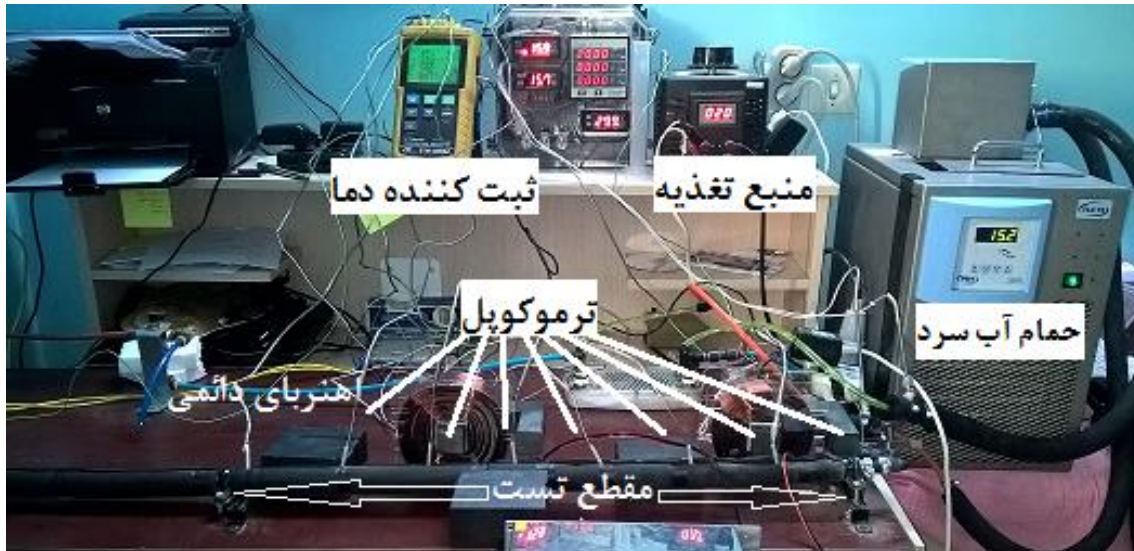
ضریب اصطکاک پوسته‌ای و افت فشار فروسیال می‌شود. در تحقیق دیگری رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی یک نانوسیال غیر نیوتونی مغناطیس شونده در یک کانال مستطیلی عمودی و در حضور میدان‌های مغناطیسی مختلف، به صورت عددی بررسی شده است [۱۷]. در این مطالعه مشخص شده است که روند کلی تغییرات برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای سیال غیرنیوتونی همانند حالت نیوتونی است با این تفاوت که در حالت غیر نیوتونی و با کاهش شاخص توانی، تاثیر پذیری پروفیل سرعت، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک از میدان محوری، بیشتر می‌شود. انتقال حرارت جابجایی در یک کانال سینوسی شکل حاوی نانوسیال تحت میدان مغناطیسی نیز بررسی شده است [۱۸]. در این تحقیق تغییر پارامترهایی نظیر اثر شکل هندسی، درصد حجمی نانوسیال، عدد بی‌بعد هارتمن و عدد بی‌بعد رینولدز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده است، با افزایش تمام پارامترهای ذکر شده، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. شیخ الاسلامی و گرجی بندپی [۱۹]، انتقال حرارت جابجایی طبیعی کبالت-نفت سفید درون محفظه بسته تحت میدان مغناطیسی را با روش عددی لیتیس بولتزمن^۱ بررسی کردند. تاثیر پارامترهایی مانند، عدد رایلی، ضریب مغناطیس، درصد حجمی نانو ذره و غیره مطالعه شده است.

مطالعات تجربی در مورد انتقال حرارت اجباری فروسیال، تحت یک میدان مغناطیسی متناوب و ثابت برای جریان کاملاً توسعه یافته انجام شده است، ولی تاثیر موقعیت و شدت میدان مغناطیسی در ناحیه در حال توسعه حرارتی، بررسی نشده است. علاوه بر آن خصوصیات فیزیکی فروسیال و روند انتقال حرارت فروسیال تحت یک میدان مغناطیسی، بسیار پیچیده است و هر تحقیقی می‌تواند به روشن کردن حقایق موجود در این پدیده فیزیکی کمک شایانی نماید؛ لذا هدف اصلی در این تحقیق، مطالعه انتقال حرارت جابجایی اجباری فروسیال در ناحیه در حال توسعه حرارتی و تحت میدان مغناطیسی به صورت تجربی و شناسایی تاثیر عوامل مختلف بر این رفتار پیچیده است.

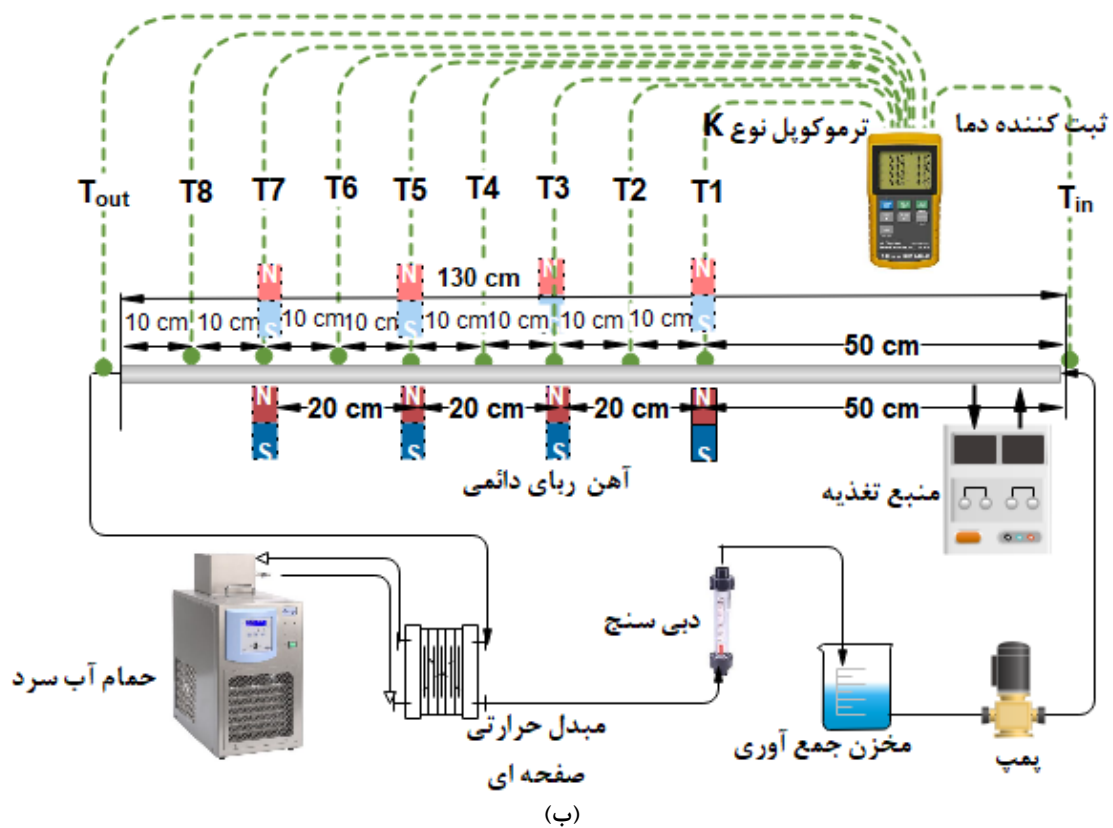
¹ Lattice Boltzman

بعد از اندازه‌گیری دبی حجمی سیال با رابطه ۱ و محاسبه نرخ جرمی جریان با رابطه ۲، عدد رینولدز از رابطه ۳ بدست می‌آید [۲۰].

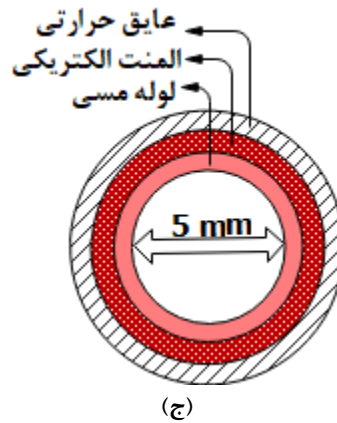
۲-۲- ثبت و تحلیل داده‌ها
برای تجزیه و تحلیل انتقال حرارت، با داده‌های تجربی ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) به شرح زیر محاسبه شده است.



(الف)



(ب)



شکل ۱- دستگاه آزمایش مورد استفاده در این تحقیق؛ الف) عکس، ب) شماتیک و ج) مشخصات لوله و لایه‌های روی آن

$$Nu_{exp} = \frac{q''D}{k(T_0 - T_m)} \quad (۶)$$

$$h_{exp} = \frac{k}{D} Nu_{exp} \quad (۷)$$

در روابط فوق C_p ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال، k ضریب هدایت حرارتی و ρ دانسیته نانوسیال است که به صورت تجربی اندازه گیری و تعیین شده‌اند.

۲-۳- ارزیابی دستگاه

قبل از شروع آزمایش‌های اصلی، قابلیت اطمینان و دقت سیستم بررسی شده است. در این راستا نتایج اندازه‌گیری تجربی با معادله شاه [۲۱] برای جریان آرام، تحت شرایط مرزی شار ثابت با آب مقطر در رینولدزهای مختلف مقایسه شد. روابط ۸ و ۹ جهت محاسبه h موضعی تحت شرایط مشابه با فعالیت تجربی استفاده شده‌اند.

$$h_{theory} = \frac{k}{D} Nu_{theory} \quad (۸)$$

Nu_{theory}

$$= \begin{cases} 1.302x^{*-1/3} - 1 & x^* \leq 0.00005 \\ 1.302x^{*-1/3} - 0.5 & 0.00005 \leq x^* \leq 0.0015 \\ 4.364 + 8.68(10^3 x_*)^{-0.506} \exp(-41x_*), & x_* \geq 0.001 \end{cases} \quad (۹)$$

$$x_* = \frac{x/D}{RePr} \quad (۹)$$

نتایج ارزیابی دستگاه آزمایش برای $Re=1620$ در شکل ۲ ارائه شده است که نشان می‌دهد، حداکثر با مقدار تئوری

$$Q = \frac{V}{t} \quad (۱)$$

$$m = \rho Q \quad (۲)$$

$$Re = \frac{4m}{\pi D \mu} \quad (۳)$$

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 ($\dot{Q} = \dot{m}c(T_o - T_i)$) 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 ۳٪ 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.

$$q'' = \frac{D\rho C_p V(T_{out} - T_{in})}{4L} \quad (۴)$$

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 طولی از لوله بدست می‌آید.

$$T_m = \frac{4xq''}{D\rho C_p V} + T_{in} \quad (۵)$$

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

$$\frac{w_{Re}}{Re} = \sqrt{\left(\frac{w_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{w_\mu}{\mu}\right)^2} \quad (10)$$

$$\frac{w_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{w_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{w_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{T_s - T_m}{T_s^2} w_{T_s}\right)^2 + \left(\frac{T_s - T_m}{T_m^2} w_{T_m}\right)^2} \quad (11)$$

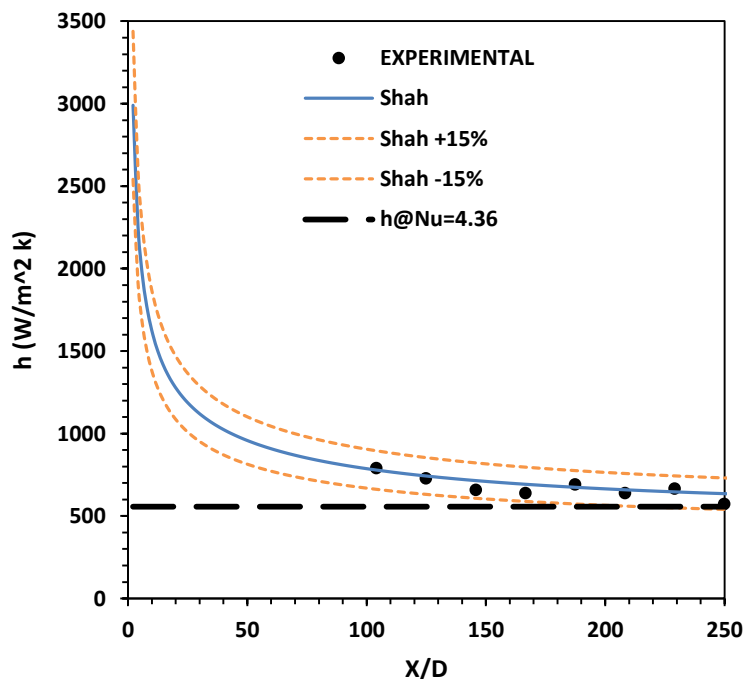
کمتر از ۱۵٪ اختلاف دارد و قابلیت اعتماد دستگاه آزمایش را برای بررسی حالت‌های دیگر نشان می‌دهد.

۲-۴- تحلیل خطا و عدم قطعیت

مهمترین اقدام لازم در بررسی تجربی، آنالیز خطا است؛ چون آزمایش‌ها با تجهیزات واسنجی شده انجام می‌شوند، خطاهای موجود در آزمایش‌ها از نوع تصادفی می‌باشند. آنچه در مبحث عدم قطعیت مدنظر است، خطای تصادفی است، اما برخی از خطاهای سیستماتیک بصورت تصادفی در اندازه‌گیری تاثیر گذار می‌باشند که بایستی در محاسبات آنها را نیز مدنظر قرار داد [۲۲]. در مطالعه تجربی حاضر، عدم قطعیت تمام پارامترهای مستقل اندازه‌گیری شده با در نظر گرفتن نوع B عدم قطعیت و بر اساس مشخصات ذکر شده در جدول ۱ محاسبه شده‌اند و برای تعیین عدم قطعیت مرکب متغیرهای وابسته از روش کلین و مک کلینتوک [۲۳] استفاده شده است. با استفاده از این روش عدم قطعیت نسبی برای Re و h مطابق با روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه شده و بترتیب ۳/۴٪ و ۴/۱٪ بدست آمده است.

جدول ۱- نام و مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده در آزمایش

نام	واحد	محدوده اندازه‌گیری	دقت
ترموکوپل نوع k	°C	۳۰-۴۰	۰/۰۱
آمپر متر	A	۱۰۰-۰	۰/۰۰۱
ولت متر	V	۲۲۰-۰	۰/۰۱
کرنومتر	s	-	۰/۰۰۱
استوانه مدرج	cc	۱۰۰-۰	۱



شکل ۲- مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی آب مقطر با معادلات شاه در Re=1620

برای اندازه‌گیری ویسکوزیته از دستگاه ویسکومتر Ostwald استفاده شده است. قبل از شروع اندازه‌گیری خواص نانوسیال در حالت‌های مختلف، صحت عملکرد تجهیزات اندازه‌گیری با استفاده از سیال‌های خالص مثل آب و اتیلن گلیکول انجام شده است که نتایج به مقادیر مرجع نزدیک بودند. لازم بذکر است که برای اندازه‌گیری‌ها تمام اصول لازم از جمله دقت، صحت، تجدید پذیری و کالیبراسیون تجهیزات در آزمایشگاه‌های معتبر رعایت شده است. قبل از شروع اندازه‌گیری خواص نانوسیال در حالت‌های مختلف، صحت عملکرد تجهیزات اندازه‌گیری با استفاده از سیال‌های خالص مثل آب و اتیلن گلیکول انجام شده است که نتایج به مقادیر مرجع نزدیک بودند. جهت بررسی تکرارپذیری تجهیزات اندازه‌گیری، هر آزمایش حداقل چهار دفعه تکرار شده است. عدد پرانتل نانوسیال نیز با استفاده از خواص اندازه‌گیری شده و رابطه ۱۲ محاسبه شده است.

$$Pr = \frac{\rho}{\alpha} \quad (12)$$



شکل ۳- عکس نانوسیال آماده شده برای آزمایش با درصدهای حجمی ۵، ۲/۵ و ۱/۲۵ درصد

جدول ۲- خواص نانوسیال Fe_2O_3 / آب در درصدهای حجمی مختلف

ϕ (%)	ρ (kg/m ³)	$\mu \cdot 10^4$ (N.s/m ²)	K (W/mK)	Cp (J/kgK)	Pr
۰	۹۹۷/۱	۹/۰۹	۰/۶۱	۴۱۷۹	۶/۲۲
۱/۲۵	۱۰۷۶/۴۶	۹/۳۲	۰/۶۳	۴۱۴۱/۰۶	۶/۱۲
۲/۵	۱۱۵۵/۸۲	۹/۵۶	۰/۶۵	۴۱۰۳/۱۲	۶/۰۳
۵	۱۲۳۵/۱۸	۹/۸	۰/۶۷	۴۰۵۶/۱۸	۵/۹۴

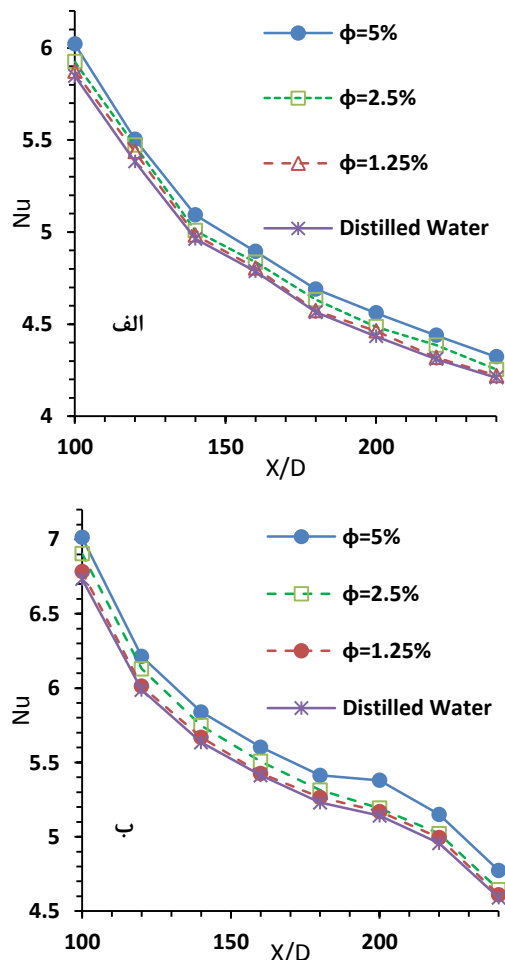
۲-۵- تهیه نانو سیال و اندازه‌گیری خواص آن

در این تحقیق، از روش دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال 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 نانو ذرات Fe_2O_3 با اندازه تقریبی ۲۸ نانومتر استفاده شده است. با توجه به اینکه در مطالعات گذشته [۲۴-۳۰] اسید اولیک برای پخش شدن یکنواخت نانو ذرات Fe_2O_3 و پایداری بیشتر آنها استفاده شده است، در این تحقیق نیز از اسید اولیک بعنوان سورفکتانت استفاده شد. بر این اساس جهت جلوگیری از کلوخه شدن و ته‌نشینی نیز، از ۵٪ حجمی اسید اولیک بعنوان سورفکتانت استفاده شده است؛ همچنین جهت یکنواخت شدن محلول نانوسیال، آن به مدت ۳ ساعت در حمام فراصوت (Vicenza S.P.A model, 4D, Euronda Co. Italia) با توان ۴۰۰ W و فرکانس ۲۴ kHz قرار داده شده است. تاثیر درصد حجمی نانوذرات در نانوسیال برای انتقال حرارت جابجایی اجباری و طبیعی متفاوت است. بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، درصد پایین نانو ذرات در انتقال حرارت جابجایی طبیعی، تاثیر بهتری دارند [۳۱-۳۴]. در صورتی که در مطالعات مربوط به انتقال حرارت جابجایی اجباری از درصدهای حجمی بالاتر استفاده شده است [۳۵-۳۹]. علت این موضوع را می‌توان جابجایی و اختلاط بیشتر نانوسیال در انتقال حرارت جابجایی اجباری دانست. بر این اساس در این تحقیق از نانوسیال با درصدهای حجمی ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ استفاده شده است. پس از آماده شدن نانوسیال، اندازه‌گیری خواص و انجام آزمایش‌ها با سرعت انجام شده است. در زمان انجام آزمایش‌ها هیچگونه ته‌نشینی نانوذرات مشاهده نشد که می‌تواند ناشی از سرعت انجام آزمایش، جابجایی اجباری و اختلاط نانوسیال در مسیر آزمایش باشد؛ ولی بعد از گذشت ده روز از انجام آزمایش‌ها، ته‌نشینی جزئی در نانوسیال مشاهده شد. در شکل ۳ تصویر نانوسیال تهیه شده با سه درصد حجمی مختلف نشان داده شده است.

خواص ترموفیزیکی نانوسیال Fe_2O_3 مانند چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته با استفاده از دستگاه‌های کالیبره شده و با دقت زیاد در دمای محیط آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است (جدول ۲). برای اندازه‌گیری خواص حرارتی از دستگاه KD2-Pro با دقت ۰/۵٪ و

شامل حالت های بدون میدان، میدان نقطه‌ای و گسترده و میدان با زوایای مختلف است. نتایج بدست آمده در این بخش ارائه و تحلیل شده است.

۳-۱- بررسی تأثیر نانوسیال Fe_2O_3 /آب نسبت به آب خالص روی عدد ناسلت موضعی بدون میدان مغناطیسی ابتدا، آزمایش با ۳ عدد رینولدز مختلف و ۳ غلظت حجمی مختلف بدون میدان مغناطیسی انجام شده است. اندازه گیری‌ها بعد از طول ورودی هیدرولیکی و در طول در حال توسعه حرارتی انجام شده است. شکل ۴ نمودار تغییرات عدد ناسلت موضعی را در برابر طول بی بعد (X/D) برای دو عدد رینولدز ۱۵۳۰ و ۲۱۰۰ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد



شکل ۴- تغییرات عدد ناسلت محلی با درصد حجمی ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ و عدد رینولدز الف) ۱۵۳۰ و ب) ۲۱۰۰

۲-۶- بررسی توسعه یافتگی هیدرولیکی و حرارتی جریان طراحی دستگاه آزمایش بر اساس روابط تئوری برای محاسبه طول در حال توسعه حرارتی انجام شده است. بر اساس رابطه موجود در مراجع [۴۰-۴۲]، محاسبه طول ورودی هیدرولیکی طبق رابطه ۱۳ است.

$$\left(\frac{X_{fd,h}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05 Re_D \quad (13)$$

براین اساس با توجه به قطر لوله که ۵ میلی‌متر است و عدد رینولدزهای ۶۶۵، ۱۵۳۰ و ۲۱۰۰، مقادیر طول ورودی هیدرولیکی به ترتیب برابر ۱۶/۶، ۳۸/۲ و ۵۲/۵ سانتی‌متر بدست می‌آیند. طول در حال توسعه حرارتی بر اساس رابطه ۱۴ [۴۳] محاسبه شده است.

$$\left(\frac{X_{fd,t}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05 Pr Re_D \quad (14)$$

با توجه به عدد پرانتل نانوسیال در درصدهای حجمی مختلف، مقدار طول مورد نیاز برای اینکه لایه مرزی حرارتی کاملاً توسعه یافته شود، مطابق با جدول ۳ است. اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی از فاصله ۵۰ cm از مقطع ورودی لوله شروع شده است و طول کل لوله نیز ۱۳۰ cm است؛ همچنان که از جدول ۳ مشخص است، بجز برای جریان با عدد رینولدز ۶۵۵ که در انتهای لوله، جریان به حالت کاملاً توسعه یافته حرارتی می‌رسد، در بقیه حالت‌ها جریان در حال توسعه حرارتی است.

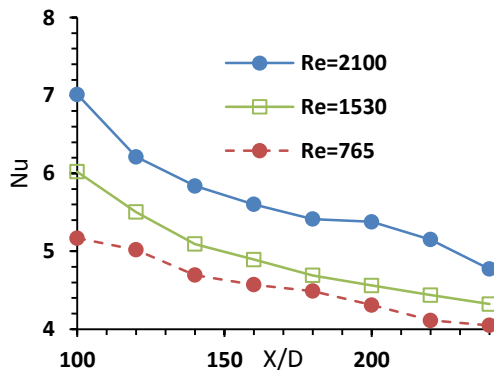
جدول ۳- طول توسعه حرارتی بر حسب درصد حجمی و عدد رینولدزهای مختلف

Re_D	$X_{fd,t}(cm)$			
	$\phi=0$	$\phi=1.25\%$	$\phi=2.5\%$	$\phi=5\%$
۶۶۵	۹۸/۷۵	۱۰۰/۲۵	۱۰۱/۷۴	۱۰۳/۴۰
۱۵۳۰	۲۲۷/۲۰	۲۳۰/۶۵	۲۳۴/۰۹	۲۳۷/۹۱
۲۱۰۰	۳۱۱/۸۵	۳۱۶/۵۷	۳۲۱/۳	۳۲۶/۵۵

۳- نتایج و بحث

بعد از ارزیابی سیستم آزمایش با آب مقطر، آزمایش‌های مختلف برای سه درصد حجمی مختلف نانوسیال (۱/۲۵، ۲/۵ و ۵)، سه عدد رینولدز مختلف (۶۶۵، ۱۵۳۰ و ۲۱۰۰) و تحت حالت‌های متفاوت از نظر میدان مغناطیسی انجام شد که

رینولدزهای متفاوت، از یک جفت آهنربای دائمی تخت استفاده شد. در شکل ۶ موقعیت جفت آهنرباهای دائمی در هر یک از حالت‌ها نشان داده شده است. بعد از دائمی شدن دما در نقاط مختلف، دماها اندازه گیری و ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شد. نتایج برای جریان نانوسیال ۱/۲۵٪ حجمی با عدد رینولدز ۷۶۵ در شکل ۷-الف و برای جریان نانوسیال ۲/۵٪ حجمی با عدد رینولدز ۱۵۳۰ در نقاط مختلف (Case 1-4) در شکل ۷-ب نشان داده شده است. بررسی شکل ۶ نشان می‌دهد، در Case 1 تاثیر میدان مغناطیسی از حالت‌های دیگر بیشتر است که همین موضوع



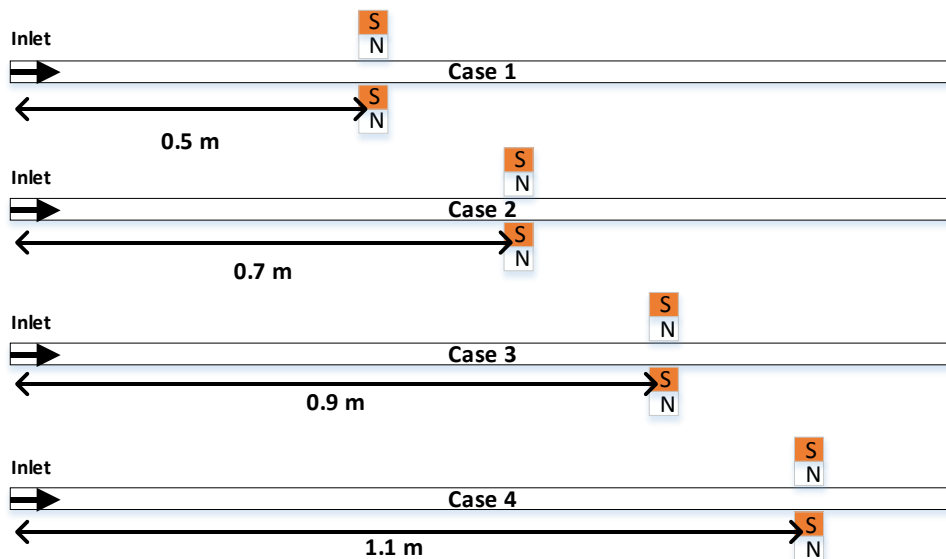
شکل ۵- تغییرات عدد ناسلت محلی با ۵٪ حجمی در عددهای رینولدز مختلف

که استفاده از نانوسیال Fe_2O_3 آب انتقال حرارت جابجایی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد که این افزایش برای درصدهای حجمی بالاتر بیشتر است. علت این افزایش انتقال حرارت، افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پایه بعلاوه افزودن نانوذرات و به دنبال آن مکانیزم‌هایی مانند انتقال ذره، تغییرات گذردهی حرارتی و حرکت براونی در نانوسیال‌ها هستند [۶، ۹، ۱۳، ۴۴]. قابل ذکر است، طبق رابطه تقریبی ضریب انتقال حرارت جابجایی ($h \cong \frac{k}{\delta}$) با افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال عامل، ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت افزایش خواهند یافت.

افزایش دبی نانوسیال که با افزایش عدد رینولدز جریان همراه است، بعلاوه افزایش حرکت توده سیال، باعث افزایش انتقال حرارت جابجایی و بالطبع عدد ناسلت موضعی می‌شود. این افزایش از نظر تئوری نیز بدیهی است و طبق روابط موجود در مراجع [۴۰، ۴۲] با توان ۱/۲ عدد رینولدز متناسب است. این موضوع نیز در شکل ۵ برای نانوسیال ۵٪ نشان داده شده است.

۳-۲- بررسی تاثیر موقعیت میدان مغناطیسی نقطه‌ای بر عدد ناسلت موضعی

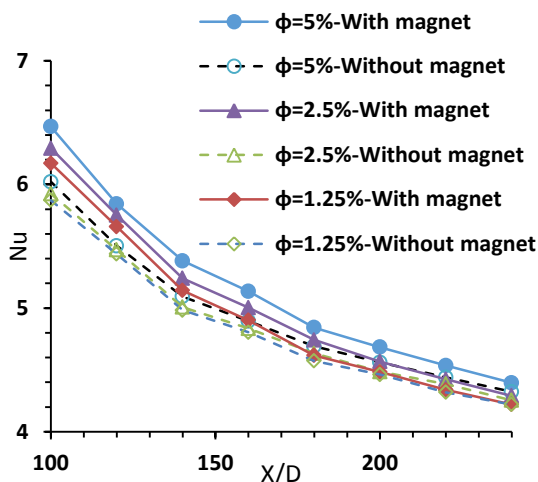
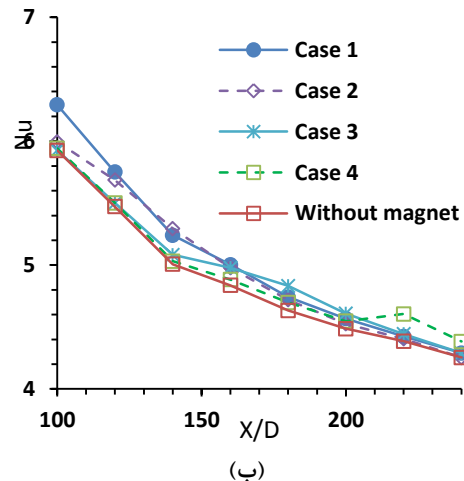
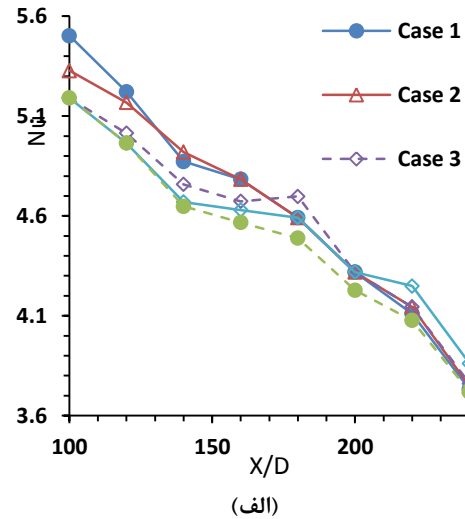
برای بررسی تاثیر میدان مغناطیسی نقطه‌ای بر ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال Fe_2O_3 آب با درصدهای حجمی و



شکل ۶- چیدمان‌های مختلف یک جفت آهنربای دائمی جهت بررسی تاثیر موقعیت میدان مغناطیسی نقطه‌ای

از آنجایی که در Case 1 آهن ربا به مقطع ورودی نزدیکتر است (دارای فاصله ۵۰ cm از مقطع ورودی لوله)، طبق رابطه مربوط به ضخامت لایه مرزی حرارتی برای سیال دارای عدد پرانتل بزرگتر از یک ($\delta_T \cong \frac{x}{Re^{1/2} Pr^{1/3}}$)، در این حالت لایه مرزی کمترین ضخامت را نسبت به موقعیت‌های دیگر آهن ربا در حالت‌های دیگر دارد؛ بنابراین میدان مغناطیسی اعمال شده باعث تاخیر در تشکیل ناحیه کاملاً توسعه یافته می‌شود و باعث می‌شود با ادامه داشتن رژیم لایه مرزی ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش یابد. در حالت‌های دیگر توانایی میدان مغناطیسی اعمال شده برای کاهش ضخامت لایه مرزی و به دنبال آن افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی، کمتر از Case 1 بوده، ولی با ایجاد نیروهای داخلی به سمت دیواره‌ها نظم جریان بهم ریخته و افزایش کمتری در این نقاط در ضریب انتقال حرارت جابجایی اتفاق می‌افتد. با بررسی Case 1-4 برای جریان با رینولدزهای مختلف مشخص می‌شود، تأثیر میدان مغناطیسی در یک نقطه در اعداد رینولدز کمتر، بیشتر است. در واقع در اعداد رینولدز کوچکتر توانایی نیروهای حجمی کلین در ایجاد تغییر در رژیم جریان نسبت به نیروهای اینرسی افزایش می‌یابد. در شکل ۸ نیز برای موقعیت قرار گیری آهن‌ربا در حالت Case 1 تأثیر افزایش درصد حجمی نانوسیال در عدد رینولدز ۱۵۳۰ نشان داده شده است. مقایسه درصدهای حجمی مختلف نشان می‌دهد که در یک عدد

برای رینولدزهای دیگر و درصدهای حجمی دیگر نیز صحت دارد. با توجه به تأثیر میدان مغناطیسی بر جریان دارای خاصیت مغناطیسی و ایجاد نیروهای حجمی کلین، باعث تغییر در شکل لایه مرزی شده و ضخامت آن را کاهش می‌دهد. کاهش ضخامت لایه مرزی ناشی از جذب سیال مغناطیسی به طرف دیواره بعثت نیروی حجمی بوجود آمده بوسیله میدان مغناطیسی آهن‌ربا است. طبق رابطه تقریبی ضریب انتقال حرارت جابجایی ($h \cong \frac{k}{\delta}$) با کاهش ضخامت لایه مرزی (δ)، ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت افزایش خواهند یافت.



شکل ۸- تغییرات عدد ناسلت موضعی در عدد رینولدز ۱۵۳۰ و در چیدمان Case 1

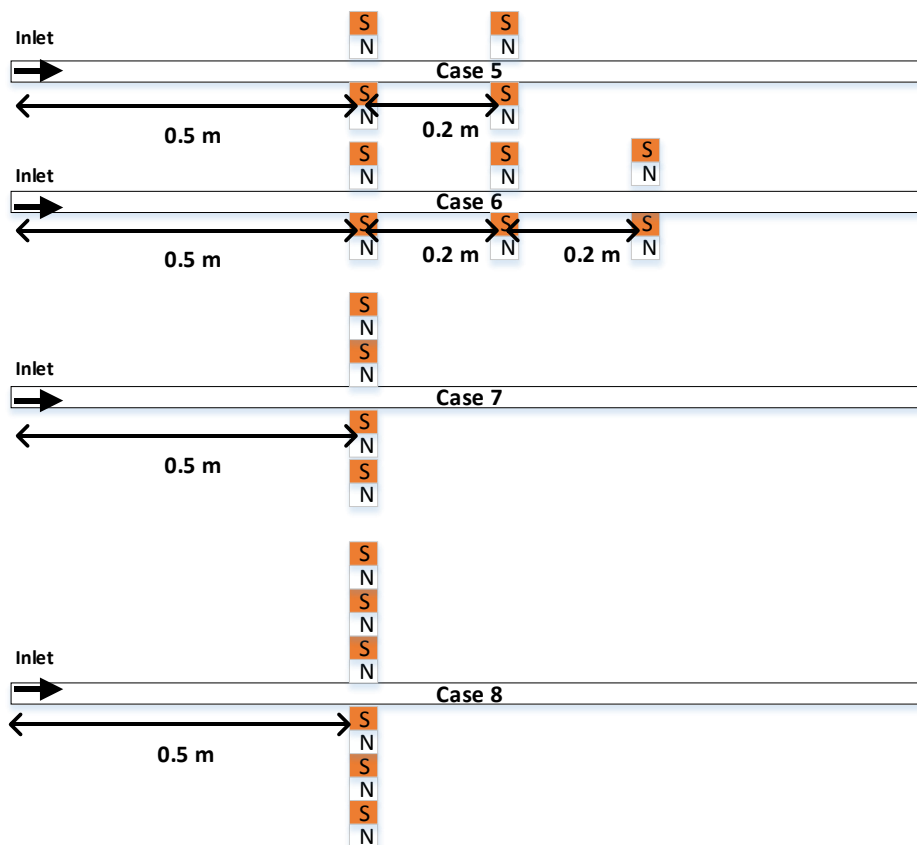
شکل ۷- تغییرات عدد ناسلت محلی در چیدمان‌های مختلف (Case 1-4): الف) ۱/۲۵٪ حجمی و عدد رینولدز ۷۶۵ و ب) ۲/۵٪ حجمی و عدد رینولدز ۱۵۳۰

جریان نانوسیال Fe_2O_3 / آب با ۲/۵٪ حجمی و رینولدز ۱۵۳۰ نشان داده شده است. بررسی افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در این دو حالت و نقاط مختلف نشان می‌دهد، علیرغم افزایش بسیار زیاد ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی در حالت میدان مغناطیسی نقطه‌ای نسبت به حالت متوسط در حالت میدان مغناطیسی پراکنده، ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌یابد. با کاهش نقاط اثرگذاری میدان مغناطیسی، نانوذرات از نظر مکانی و زمانی، کمتر تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند و تأثیر نیروهای حجمی مغناطیسی کمتر می‌شود که منجر به جذب نانوذرات و بدنبال آن کاهش ضخامت لایه مرزی می‌شوند؛ همچنین در حالت میدان مغناطیسی نقطه‌ای، جابجایی و اغتشاش در لایه مرزی کاهش می‌یابد.

رینولدز ثابت با افزایش درصد حجمی نانوذرات، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی در نقطه اعمال میدان مغناطیسی افزایش و همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط نیز افزایش می‌یابد. علت این افزایش ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و افزایش خاصیت مغناطیسی سیال عامل و بالطبع افزایش نیروهای حجمی و کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی است.

۳-۳- بررسی تاثیر تعداد میدان مغناطیسی نقطه‌ای در یک و چند موقعیت بر عدد ناسلت موضعی

تأثیر چیدمان‌های مختلف جفت آهنرباهای دائمی جهت بررسی تاثیر تعداد آنها در یک و چند موقعیت مطابق شکل ۹ بررسی شده است. در این حالت نیز بعد از یکنواخت شدن دما در قسمت‌های مختلف، ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده است که نتیجه آن در شکل ۱۰ و ۱۱ برای



شکل ۹- چیدمان‌های مختلف جفت آهنرباهای دائمی جهت بررسی تاثیر تعداد آنها در یک و چند موقعیت

می‌شود. نوسان مشاهده شده را می‌توان با افزایش درصد ذرات نانو در یک ناحیه و به تبع آن کاهش نانو ذرات در فاصله بین آهنرباها مطابقت داد. در حالت میدان مغناطیسی نقطه‌ای رشد توده‌ها و عبارتی تراکم نانوذرات متوقف و موجب کاهش جابجایی ذرات می‌شود. عوامل ذکر شده می‌توانند از دلایل اصلی کاهش انتقال حرارت جابجایی با میدان مغناطیسی نقطه‌ای باشند.

۳-۴- بررسی میزان افزایش عدد ناسلت در حالت‌های مختلف آزمایش

جهت مشخص شدن بهتر تاثیر پارامترهای مختلف مانند درصد حجمی نانوذرات، عدد رینولدز جریان، موقعیت یک جفت آهن‌ربا و قرارگیری تعداد آهن‌رباهای مختلف که در چیدمان‌های Case 1-8 در قسمت‌های قبل بررسی شده‌اند، ابتدا طبق رابطه ۱۵، عدد ناسلت متوسط برای هر حالت محاسبه شده است.

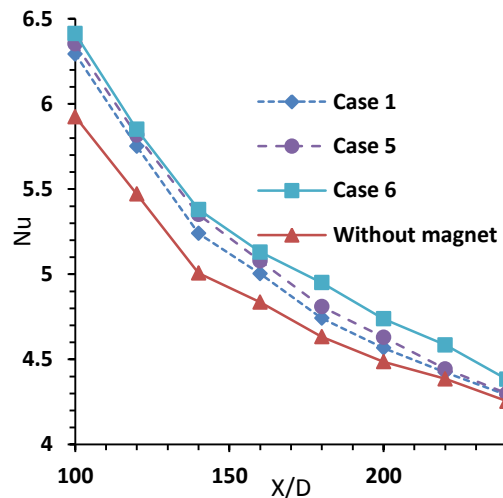
$$\overline{Nu} = \frac{\sum_{i=1}^n Nu_i}{n} \quad (15)$$

که i معرف X/D های مختلف است. جهت مقایسه حالت‌های مختلف از پارامتر بی بعد بازده انتقال حرارت به صورت زیر استفاده شده است:

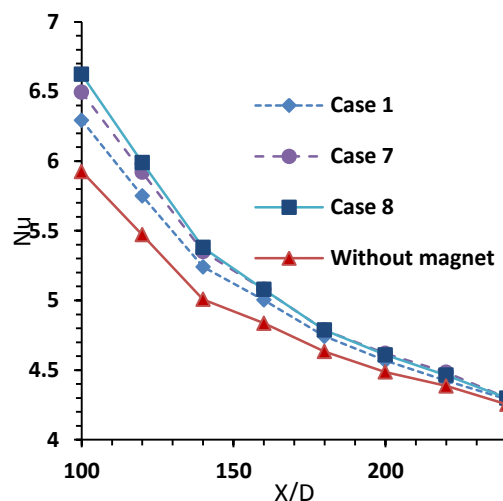
$$\eta(\%) = \frac{Nu_{new} - Nu_{base}}{Nu_{base}} * 100 \quad (16)$$

که Nu_{new} معرف عدد ناسلت جدید بعلا افزایش نانوذرات یا اعمال میدان مغناطیسی در هر عدد رینولدز است و Nu_{base} ، عدد ناسلت سیال پایه در همان عدد رینولدز است. براین اساس، نتایج حالت‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده اند.

همانطور که در شکل‌های ۴ تا ۱۱ تغییرات عدد ناسلت حاصل از اعمال شرایط جدید نشان داده شده است، طبق جدول ۴، در حالت بدون میدان مغناطیسی با افزایش درصد حجمی نانوذرات در هر عدد رینولدز تا ۵٪ حجمی، عدد ناسلت افزایش می‌یابد که این مقدار برای عددهای رینولدز ۷۶۵، ۱۵۳۰ و ۲۱۰۰ بترتیب برابر با ۲/۴۸٪، ۲/۶۶٪ و ۳/۸۸٪ است. از مقایسه این حالت‌ها همچنین مشخص است که در یک درصد حجمی مشخص با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد و در این تحقیق برای ۵٪ حجمی از ۴/۵۵ برای رینولدز ۷۶۵ به ۵/۶۷ در رینولدز ۲۱۰۰ رسیده است.



شکل ۱۰- تغییرات عدد ناسلت موضعی در چیدمان‌های مختلف (Case1,5,6): ۲/۵٪ حجمی و عدد رینولدز ۱۵۳۰



شکل ۱۱- تغییرات عدد ناسلت موضعی در چیدمان‌های مختلف (Case1,7,8): ۲/۵٪ حجمی و عدد رینولدز ۱۵۳۰

ضریب انتقال حرارت جابجایی رابطه‌ای مستقیم با اندازه نواحی توده‌ای شکل دارد که به علت تجمع نانوذرات مغناطیسی تشکیل می‌شوند. همچنین بعلا کاهش نقاط تاثیر میدان مغناطیسی بر نانوسیال، تراکم و ایجاد نواحی توده‌ای شکل در نانوسیال کمتر اتفاق افتاده و نواحی توده‌ای شکل نیز اندازه کمتری پیدا می‌کنند. به هنگام استفاده از آهنرباها در نقاط مختلف، بعلا افزایش اغتشاش در لایه مرزی حرارتی، نوسان در ضریب انتقال حرارت جابجایی مشاهده

جدول ۴- مقادیر عدد ناسلت محلی و عدد ناسلت متوسط در حالت‌های مختلف آزمایش

حالت‌های مختلف آزمایش			X/D								\bar{Nu}	$\eta(\%)$
			۱۰۰	۱۲۰	۱۴۰	۱۶۰	۱۸۰	۲۰۰	۲۲۰	۲۴۰		
			Nu_1	Nu_2	Nu_3	Nu_4	Nu_5	Nu_6	Nu_7	Nu_8		
بدون میدان مغناطیسی	Re=765	$\phi=0$	۵/۱۳	۴/۸۸	۴/۶۳	۴/۵۲	۴/۴۱	۴/۲۱	۴/۰۲	۳/۷۴	۴/۴۴	-/۰۰
		$\phi=1.25\%$	۵/۱۰	۴/۸۹	۴/۵۹	۴/۵۱	۴/۴۴	۴/۱۹	۴/۰۳	۳/۷۷	۴/۴۵	-/۲۵
		$\phi=2.5\%$	۵/۱۹	۴/۹۶	۴/۶۵	۴/۵۷	۴/۴۹	۴/۲۳	۴/۰۸	۳/۷۲	۴/۴۹	-/۹۸
		$\phi=5\%$	۵/۱۷	۵/۰۲	۴/۶۹	۴/۵۷	۴/۴۹	۴/۳۱	۴/۱۱	۴/۰۵	۴/۵۵	۲/۴۸
	Re=1530	$\phi=0$	۵/۸۵	۵/۳۸	۴/۹۶	۴/۷۹	۴/۵۶	۴/۴۳	۴/۳۱	۴/۲۱	۴/۸۱	-/۰۰
		$\phi=1.25\%$	۵/۸۷	۵/۴۴	۴/۹۸	۴/۸۰	۴/۵۷	۴/۴۶	۴/۳۲	۴/۲۲	۴/۸۳	-/۴۵
		$\phi=2.5\%$	۵/۹۲	۵/۴۷	۵/۰۱	۴/۸۴	۴/۶۳	۴/۴۹	۴/۳۹	۴/۲۵	۴/۸۷	۱/۳۰
		$\phi=5\%$	۶/۰۲	۵/۵۰	۵/۰۹	۴/۸۹	۴/۶۹	۴/۵۶	۴/۴۴	۳/۳۲	۴/۹۴	۲/۶۶
	Re=2100	$\phi=0$	۶/۷۳	۵/۹۹	۵/۶۳	۵/۴۱	۵/۲۳	۵/۱۴	۴/۹۶	۴/۵۹	۵/۴۶	-/۰۰
		$\phi=1.25\%$	۶/۷۸	۶/۰۱	۵/۶۷	۵/۴۳	۵/۲۶	۵/۱۷	۴/۹۹	۴/۶۱	۵/۴۹	-/۵۵
		$\phi=2.5\%$	۶/۹۰	۶/۱۳	۵/۷۵	۵/۵۱	۵/۳۱	۵/۱۹	۵/۰۲	۴/۶۴	۵/۵۶	۱/۷۷
		$\phi=5\%$	۷/۰۱	۶/۲۱	۵/۸۴	۵/۶۰	۴/۴۱	۵/۳۸	۵/۱۵	۴/۷۷	۵/۶۷	۳/۸۸
با میدان مغناطیسی	Re=765, $\phi=1.25\%$	Case ۱	۵/۵۰	۵/۲۲	۴/۸۷	۴/۷۸	۴/۵۹	۴/۳۲	۴/۱۱	۳/۷۳	۴/۶۴	۴/۵۰
		Case ۲	۵/۳۳	۵/۱۷	۴/۹۲	۴/۷۸	۴/۵۹	۴/۳۲	۴/۱۴	۳/۷۵	۴/۶۲	۴/۱۲
		Case ۳	۵/۱۹	۵/۰۱	۴/۷۶	۴/۶۷	۴/۷۰	۴/۳۲	۴/۱۴	۳/۷۶	۴/۵۷	۲/۸۸
		Case ۴	۵/۱۹	۴/۹۶	۴/۶۷	۴/۶۳	۴/۵۹	۴/۳۲	۴/۲۵	۳/۸۶	۴/۵۶	۲/۶۵
	Re=1530, $\phi=1.25\%$	Case ۱	۶/۱۷	۵/۶۶	۵/۱۴	۴/۹۰	۴/۶۲	۴/۴۸	۴/۳۴	۴/۲۲	۴/۹۴	۲/۶۹
	Re=1530, $\phi=2.5\%$	Case ۱	۶/۲۹	۵/۷۵	۵/۲۴	۵/۰۰	۴/۷۴	۴/۵۷	۴/۴۲	۴/۲۹	۵/۰۴	۴/۷۱
		Case ۲	۶/۰۰	۵/۶۹	۵/۳۰	۴/۹۸	۴/۷۲	۴/۵۳	۴/۴۰	۴/۲۵	۴/۹۸	۳/۵۴
		Case ۳	۵/۹۲	۵/۵۰	۵/۰۸	۴/۹۸	۴/۸۳	۴/۶۱	۴/۴۴	۴/۲۹	۴/۹۶	۳/۰۲
		Case ۴	۵/۹۴	۵/۵۰	۵/۰۳	۴/۸۸	۴/۷۰	۴/۵۵	۴/۶۱	۴/۳۸	۴/۹۵	۲/۸۴
		Case ۵	۶/۳۵	۵/۸۲	۵/۳۵	۵/۰۸	۴/۸۱	۴/۶۳	۴/۴۴	۴/۳۰	۵/۱۰	۵/۹۳
		Case ۶	۶/۴۱	۵/۸۵	۵/۳۸	۵/۱۳	۴/۹۵	۴/۷۴	۴/۵۸	۴/۳۸	۵/۱۸	۷/۶۱
		Case ۷	۶/۵۰	۵/۹۲	۵/۳۵	۵/۰۸	۴/۷۹	۴/۶۲	۴/۴۸	۴/۳۰	۵/۱۳	۶/۵۹
		Case ۸	۶/۶۲	۵/۹۹	۵/۳۸	۵/۰۸	۴/۷۹	۴/۶۱	۴/۴۶	۴/۳۰	۵/۱۵	۷/۰۹
Re=1530, $\phi=5\%$	Case ۱	۶/۴۷	۵/۸۴	۵/۳۸	۵/۱۴	۴/۸۴	۴/۶۸	۴/۵۴	۴/۴۰	۵/۱۶	۷/۲۳	

افزایش انتقال حرارت شدت می‌یابد. البته برای یک میدان مغناطیسی با شدت ثابت، موقعیت اعمال میدان مهم است و طبق Case 1-4، با افزایش فاصله از مقطع ورودی لوله، میزان افزایش عدد ناسلت کاهش می‌یابد و از $4/71\%$ به $2/48\%$ می‌رسد. علاوه بر این، افزایش در غلظت حجمی در حضور یک میدان مغناطیسی، سبب افزایش انتقال حرارت خواهد شد؛ زیرا مکانیزم جذب ذرات به سمت دیواره تشدید می‌شود. بعنوان مثال در Case 1 با افزایش درصد حجمی نانوذرات از $1/25$ به 5 ، میزان بهبود انتقال حرارت از $2/69\%$ به $7/23\%$ می‌رسد. استفاده از تعداد آهن رباهای مختلف در دو حالت نقطه‌ای و پراکنده نیز نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی پراکنده تأثیر بهتری در افزایش عدد ناسلت دارد و برای نمونه سه جفت آهن‌ربا که در Case 6 و Case 7 بصورت پراکنده و نقطه‌ای قرار دارند، بترتیب عدد ناسلت را $7/61\%$ و $7/09\%$ افزایش می‌دهند. علت بهبود انتقال حرارت تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار انتقال حرارت نانوسیال است. وقتی تمام این مکانیزم‌ها همزمان رخ می‌دهند، فرآیند انتقال حرارت پیچیده‌تر خواهد شد. این را باید در نظر گرفت که تنها با یک میدان مغناطیسی ضعیف و یک غلظت حجمی کم، افزایش انتقال حرارت را می‌توان بدست آورد. بدیهی است، افزایش قدرت میدان مغناطیسی و غلظت حجمی منجر به افزایش انتقال حرارت قابل توجهی می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Zhang ZM, Zhang ZM, Luby (2007) Nano/microscale heat transfer. McGraw-Hill, New York.
- [2] Das SK, Choi SU, Yu W, Pradeep T (2007) Nanofluids: science and technology. John Wiley & Sons.
- [3] Xuan Y, Li Q (2003) Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. J Heat Transf 125(1): 151-155.
- [4] Jung JY, Oh HS, Kwak HY (2009) Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. Int J Heat Mass Tran 52(1-2): 466-472.
- [5] Anoop K, Sundararajan T, Das SK (2009) Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. Int J Heat Mass Tran 52(9-10): 2189-2195.
- [6] Dibaei M, Kargarsharifabad H (2017) New achievements in Fe_3O_4 nanofluid fully developed

با اعمال یک میدان مغناطیسی ثابت در نقاط مختلف طبق Case 1-4، با افزایش فاصله از مقطع ورودی لوله، میزان افزایش عدد ناسلت کاهش می‌یابد و از $4/71\%$ به $2/48\%$ می‌رسد. استفاده از تعداد آهن رباهای مختلف در دو حالت نقطه‌ای و پراکنده نیز نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی پراکنده تأثیر بهتری در افزایش عدد ناسلت دارد. مقایسه Case 5 با Case 6 و Case 7 با Case 7 این موضوع را بخوبی نشان می‌دهد. سه جفت آهن‌ربا که در Case 6 و Case 7 بصورت پراکنده و نقطه‌ای قرار دارند، بترتیب عدد ناسلت را $7/09\%$ و $7/61\%$ افزایش می‌دهند.

۴- نتایج

بدون میدان مغناطیسی خارجی، انتقال حرارت جابجایی نانوسیال نسبت به انتقال حرارت جابجایی سیال پایه بهتر و بیشتر است که البته به دلیل تغییر در خواص سیال قابل انتظار بوده است. درصد حجمی نانوسیال نقش به‌سزایی 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. در این حالت برای 5% حجمی، این مقدار برای عددهای رینولدز 765 ، 1530 و 2100 بترتیب برابر با $2/48\%$ ، $2/66\%$ و $3/88\%$ است. همزمان با افزودن ذرات Fe_2O_3 به آب و تشکیل نانو سیال ضمن افزایش ضریب انتقال حرارت سیال، حرکات براونی و جابجایی‌های سیال ناشی از تأثیر میدان مغناطیسی باعث می‌شود، انتقال حرارت افزایش یابد. بعلاوه خاصیت مغناطیسی نانو سیال باعث می‌شود تا ذرات نانو به طرف جداره داخلی لوله حرکت کرده و ضمن کاهش ضخامت لایه مرزی ضریب انتقال حرارت جابجایی را افزایش دهند. دلیل احتمالی این افزایش در حضور یک میدان مغناطیسی، آشفته‌گی لایه مرزی حرارتی است. میدان مغناطیسی در اعداد رینولدز پایین، بسیار مؤثر است، زیرا ذرات نانو، شانس بیشتری برای انتقال و آشفته‌گی در لایه مرزی حرارتی، در سرعت‌های پایین دارند. هنگامی که سرعت جریان افزایش می‌یابد، روند جذب ذرات سخت‌تر خواهد شد، اما این ذرات شتاب بیشتری برای برهم زدن لایه مرزی حرارتی بدست می‌آورند. بدیهی است، حتی در اعداد رینولدز بالا، اگر قدرت میدان مغناطیسی را افزایش دهیم،

- sinusoidal channel. *Modares Mechanical Engineering* 13(14): 43-55. (In Persian)
- [19] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M (2014) Free convection of ferrofluid in a cavity heated from below in the presence of an external magnetic field. *Powder Technol* 256(0): 490-498.
- [20] Sundar LS, Naik M, Sharma K, Singh M, Reddy TCS (2012) Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe_3O_4 magnetic Nanofluid. *Exp Therm Fluid Sci* 37: 65-71.
- [21] Bejan A, Kraus AD (2003) *Heat transfer handbook*. John Wiley & Sons.
- [22] Kargarsharifabad H (2020) Experimental and numerical study of natural convection of Cu-water nanofluid in a cubic enclosure under constant and alternating magnetic fields. *Int Commun Heat Mass* 119: 104957.
- [23] Kline SJ, McClintock F (1953) Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mech Eng* 75(1): 3-8.
- [24] Ahniyaz A, Seisenbaeva GA, Haggström L, Kamali S, Kessler VG, Nordblad P, Johansson C, Bergström L (2008) Preparation of iron oxide nanocrystals by surfactant-free or oleic acid-assisted thermal decomposition of a Fe(III) alkoxide. *J Magn Mater* 320(6): 781-787.
- [25] Bazrafshan H, Alipour Tesieh Z, Dabirmia S, Shajareh Touba R, Manghabati H, Nasernejad B (2017) Synthesis of novel $\alpha-Fe_2O_3$ nanorods without surfactant and its electrochemical performance. *Powder Technol* 308: 266-272.
- [26] Gholoobi A, Abnous K, Ramezani M, Homaei Shandiz F, Darroudi M, Ghayour-Mobarhan M, Meshkat Z (2018) Synthesis of $\gamma-Fe_2O_3$ Nanoparticles Capped with Oleic Acid and their Magnetic Characterization. *Iran J Sci Technol A* 42(4): 1889-1893.
- [27] Hashemzadeh M, Nilchi A, Hassani AH (2019) Synthesis of novel surface-modified hematite nanoparticles for lead ions removal from aqueous solution. *Mater Chem Phys* 227: 279-290.
- [28] Hashemzadeh M, Nilchi A, Hassani AH, Saberi R (2019) Synthesis of Novel surface-modified hematite nanoparticles for lead ions removal from aqueous solution. *J Water Wastewater* 30(2): 48-63. (In Persian)
- [29] Herranz F, Morales MP, Roca AG, Vilar R, Ruiz-Cabello J (2008) A new method for the aqueous functionalization of superparamagnetic Fe_2O_3 nanoparticles. *Contrast Media Mol I* 3(6): 215-222.
- [30] Teng X, Yang H (2004) Effects of surfactants and synthetic conditions on the sizes and self-assembly of monodisperse iron oxide nanoparticles. *J Mater Chem* 14(4): 774-779.
- forced convection heat transfer under the effect of a magnetic field: An experimental study. *J Heat Mass Tran Res* 4(1): 1-11.
- [7] Heris SZ, Etemad SG, Esfahany MN (2006) Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *Int Commun Heat Mass* 33(4): 529-535.
- [8] Hwang KS, Jang SP, Choi SU (2009) Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al_2O_3 nanofluids in fully developed laminar flow regime. *Int J Heat Mass Tran* 52(1-2): 193-199.
- [9] Kim D, Kwon Y, Cho Y, Li C, Cheong S, Hwang Y, Lee J, Hong D, Moon S (2009) Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions. *Curr Appl Phys* 9(2): e119-e123.
- [10] Rea U, McKrell T, Hu LW, Buongiorno J (2009) Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina–water and zirconia–water nanofluids. *Int J Heat Mass Tran* 52(7-8): 2042-2048.
- [11] Shirejini SZ, Rashidi S, Esfahani J (2016) Recovery of drop in heat transfer rate for a rotating system by nanofluids. *J Mol Liq* 220: 961-969.
- [12] Tahir S, Mital M (2012) Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel. *Appl Therm Eng* 39: 8-14.
- [13] Falsafi M, Kargarsharifabad H (2015) Numerical study of ferrofluid forced convection heat transfer in tube with magnetic field. *J Comput Methods Eng* 34(1): 11-25.
- [14] Belyaev A, Smorodin B (2009) Convection of a ferrofluid in an alternating magnetic field. *J Appl Mech Tech Ph+* 50(4): 558-565.
- [15] Li Q, Xuan Y (2009) Experimental investigation on heat transfer characteristics of magnetic fluid flow around a fine wire under the influence of an external magnetic field. *Exp Therm Fluid Sci* 33(4): 591-596.
- [16] Shakiba A, Gorji M (2015) Numerical investigation of ferrofluid flow and heat transfer characteristics through a double pipe heat exchanger. *Modares Mechanical Engineering* 15(2): 41-52. (In Persian)
- [17] Mohammadpourfard M (2015) Numerical study of magnetic fields effects on the electrical conducting non-Newtonian ferrofluid flow through a vertical channel. *Modares Mechanical Engineering* 15(1) 379-389. (In Persian)
- [18] Nouri R, Gorji M, Domiri Ganji D (2014) Numerical investigation of magnetic field effect on forced convection heat transfer of nanofluid in a

- magnetic field. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 10(2): 219-236. (In persian)
- [37] Malahmadi J (2013) Forced convection heat transfer and hydrodynamic behavior of CuO/water nanofluid in rotational concentric annuli. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 3(3): 121-136. (In persian)
- [38] Hussein AM, Sharma KV, Bakar RA, Kadirgama K (2013) The effect of nanofluid volume concentration on heat transfer and friction factor inside a horizontal tube. *J Nanomater* 2013: 859563.
- [39] Sheikholeslami M, Rashidi MM, Ganji DD (2015) Effect of non-uniform magnetic field on forced convection heat transfer of Fe_3O_4 -water Nanofluid. *Comput Method Appl M* 294: 299-312.
- [40] Bejan A (2013) Convection heat transfer. John Wiley & sons.
- [41] Bergman TL, Incropera FP, Lavine AS, DeWitt DP (2011) Introduction to heat transfer. John Wiley & Sons.
- [42] Kakac S, Yener Y, Pramuanjaroenkij A (2013) Convective heat transfer, CRC press.
- [43] Bergman TL, Incropera FP, DeWitt DP, Lavine AS (2011) Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons.
- [44] Zeinali Heris S, Etemad SG, Nasr Esfahany M (2006) Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *Int Commun Heat Mass* 33(4): 529-535.
- [31] Ashjaee M, Goharkhah M, Khadem LA, Ahmadi R (2015) Effect of magnetic field on the forced convection heat transfer and pressure drop of a magnetic nanofluid in a miniature heat sink. *Heat Mass Transfer* 51(7): 953-964.
- [32] Goharkhah M, Ashjaee M, Jamali J (2015) Experimental investigation on heat transfer and hydrodynamic behavior of magnetite nanofluid flow in a channel with recognition of the best models for transport properties. *Exp Therm Fluid Sci* 68: 582-592.
- [33] Goharkhah M, Salarian A, Ashjaee M, Shahabadi M (2015) Convective heat transfer characteristics of magnetite nanofluid under the influence of constant and alternating magnetic field. *Powder Technol* 274: 258-267.
- [34] Shahsavar A, Saghafian M, Salimpour MR, Shafii MB (2016) Experimental investigation on laminar forced convective heat transfer of ferrofluid loaded with carbon nanotubes under constant and alternating magnetic fields. *Exp Therm Fluid Sci*, 76: 1-11.
- [35] Talebi M, Kalantar V, Nazari M, Kargarsharifabad H (2018) Experimental investigation of the forced convective heat transfer of hybrid Cu/Fe_3O_4 nanofluids. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 8(4): 229-238. (In persian)
- [36] Nemati M, Sefid M, Rahmati A (2020) The effect of changing the position of the hot wall and increasing the amplitude and number of oscillations of wavy wall on the flow and heat transfer of nanofluid inside the channel in the presence of