



## Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Ferro-Nanofluid Containing Graphene in a Circular Tube under Magnetic Field

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Omiddezyani S.<sup>1</sup> MSc,  
Khazaei I.<sup>1</sup> PhD,  
Gharehkhani S.<sup>2</sup> PhD,  
Ashjaee M.<sup>\*3</sup> PhD,  
Shemirani F.<sup>4</sup> PhD,  
Zandian V.<sup>5</sup> MSc

#### How to cite this article

Omiddezyani S, Khazaei I, Gharehkhani S, Ashjaee M, Shemirani F, Zandian V. Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Ferro-Nanofluid Containing Graphene in a Circular Tube under Magnetic Field. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):1929-1941.

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical & Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Faculty of Chemical Engineering, Lakehead University, Ontario, Canada

<sup>3</sup>Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Chemistry Department, Science Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>5</sup>Rotary Machine Department, Mechanical Repair Unit, Parsian Gas Refinery Company, Lamerd, Iran

#### \*Correspondence

Address: Floor 8, NO. 2, Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, North Kargar Street, Tehran, Iran. Postal Code: 1439955961

Phone: +98 (21) 61119934

Fax: +98 (21) 66480290

ashjaee@ut.ac.ir

#### Article History

Received: November 14, 2018

Accepted: January 26, 2019

ePublished: August 12, 2019

### ABSTRACT

Today, nanofluid is attracting intense research due to its potential to augment the heat transfer rate and the cooling rate in many systems. On the other hand, new research progresses indicate that graphene nanofluids even in very low concentrations could provide higher convective heat transfer coefficient in comparison to the conventional nanofluids. For this reason, we used nanofluid containing the CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/GO nanoparticles as working fluid to perform experimental investigation of its effect on laminar forced convective heat transfer in the flow passing through a copper tube, which is under a uniform heat flux. It should be noted that utilizing magnetic field on nanoparticles is one of the active methods for improving the heat transfer rate. To achieve this objective, the effect of external magnetic field intensity and also the effect of applying different frequencies on the improvement of heat transfer in Reynolds number and different concentration is also investigated and the optimum frequency were obtained. The results showed that the heat transfer of the studied hybrid nanofluid has been improved in the presence of constant and alternating magnetic fields and the amount of heat transfer increment, due to an alternating magnetic field, is more significant compared with a constant magnetic field. The results also show that in the absence of magnetic field, using ferrofluid with concentration of  $\phi=0.6\%$ , improves the average enhancement in convective heat transfer up to 15.2% relative to the DI-water at Re=571, while this value is increased up to 19.7% and 31% by using constant and alternating magnetic field, respectively.

**Keywords** Forced Convective Heat Transfer; Ferrofluid; Magnetic Field; Graphene Oxide; Ferrite Cobalt

### CITATION LINKS

[1] Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube ... [2] Enhancement of thermal conductivity with CuO ... [3] Thermal conductance of nanofluids: Is the ... [4] Fabrication, characterization and measurement of thermal ... [5] Enhancement of thermal conductivity of ethylene ... [6] Review of nanofluids for heat transfer ... [7] Experimental investigations on transport properties ... [8] Enhancement of thermal conductivity in magnetite ... [9] Magnetic field enhanced thermal conductivity in heat ... [10] Magnetic field induced enhancement in thermal ... [11] The thermal conductivity of water base ... [12] Heat transfer characteristics in double tube helical heat ... [13] Numerical study of the ferrofluid flow and heat ... [14] Numerical investigation of heat transfer ... [15] Effects of nanoparticle migration and ... [16] MHD mixed convection in a vertical annulus ... [17] Investigation on convective heat transfer and ... [18] Experimental investigation into convective ... [19] Forced convective heat transfer of ... [20] Heat transfer enhancement and pressure drop ... [21] Experimental investigation for enhanced ferrofluid ... [22] Effect of magnetic field on heat transfer ... [23] Experimental investigation of forced convective heat ... [24] Experimental investigation of forced convection heat transfer ... [25] Experimental investigation on laminar forced ... [26] Experimental investigation into laminar forced ... [27] Effect of magnetic field on laminar convective heat ... [28] Convective heat transfer characteristics of ... [29] Experimental investigation on laminar forced ... [30] Experimental investigation on convective heat ... [31] Preparation of graphitic ... [32] Chemical methods for the production of ... [33] The viscosity of concentrated suspensions ... [34] Heat transfer ... [35] Experimental investigation on heat transfer ... [36] Describing the uncertainties in experimental ...

## بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال فریک گرافنی در یک لوله دایروی تحت میدان مغناطیسی

سهیل امیددزیانی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

ایمان خزایی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سمیرا قره‌خانی PhD

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه لیکهد، انتاریو، کانادا

مهدی اشجعی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

فرزانه شمیرانی PhD

گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

وحید زندیان MSc

گروه ماشین‌آلات دوار، واحد تعمیرات مکانیکی، شرکت پالایش گاز پارسین، لامرد، ایران

### چکیده

امروزه نانوسیالات با توجه به پتانسیل خود در افزایش نرخ انتقال حرارت و خنک‌کاری سیستم‌های مختلف، توجهات زیادی را در تحقیقات به خود جلب کرده‌اند. از طرف دیگر، تحقیقات جدید نشان می‌دهند که نانوسیالات گرافن‌دار، حتی در غلظت‌های پایین هم توانایی بیشتری در افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به نانوسیالات متداول دارند. با در نظر گرفتن این موضوع در مطالعه حاضر از نانوسیال حاوی نانوذرات فریت کبالت/گرافن به‌عنوان سیال عامل برای بررسی تجربی تاثیر آن بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری سیال عبوری از یک کانال دایروی از جنس مس که تحت شار حرارتی ثابت و در رژیم جریان آرام قرار دارد، استفاده شده است. گفتنی است اثر میدان مغناطیسی بر نانوذرات به‌عنوان یکی از روش‌های فعال در بهبود نرخ انتقال حرارت مطرح است. برای نیل به این هدف، تاثیر قدرت میدان مغناطیسی خارجی و همچنین تاثیر اعمال فرکانس‌های مختلف بر میزان بهبود انتقال حرارت در اعداد رینولدز و غلظت‌های مختلف بررسی و فرکانس بهینه به دست آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نرخ انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی مورد آزمایش در حضور میدان مغناطیسی ثابت و متناوب بهبود یافته، به طوری که این افزایش تحت میدان متناوب چشمگیرتر از میدان ثابت است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که در غیاب میدان مغناطیسی و عدد رینولدز ۵۷۱، میانگین افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی فروفلوید با غلظت ۰/۶ به ۱۵/۲٪ در مقایسه با آب خالص رسیده است، در حالی که این مقدار با اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متناوب به ترتیب به ۱۹/۷ و ۳۱٪ می‌رسد.

**کلیدواژه‌ها:** انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، فروفلوید، میدان مغناطیسی، گرافن اکساید، فریت کبالت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

\* نویسنده مسئول: ashjaee@ut.ac.ir

### ۱- مقدمه

فروفلویدها نوع خاصی از نانوسیالات هستند. آنها شامل یک مخلوط کلوئیدی پایدار متشکل از سیال حامل غیرمغناطیس (مانند آب یا روغن) و همچنین نانوذرات مغناطیسی با قطر ۵ تا ۱۵ نانومتر هستند که به‌طور همگن در سیال پایه حل شده‌اند. در چند دهه اخیر، انتقال حرارت رسانش و همرفتی نانوسیالات و به‌ویژه فروفلویدها، به‌شدت در کانون توجه محققان قرار گرفته است و مطالعات زیادی به بررسی ضریب هدایت حرارتی و تاثیر پارامترهای مختلف بر آن مانند ابعاد نانوذرات، غلظت و همچنین دمای نانوسیال پرداخته‌اند. در این بین، لیو و همکاران [1]، به بررسی ضریب هدایت حرارتی نانولوله‌های کربنی با سیالات پایه مختلف پرداختند. نتایج آنها حاکی از افزایش چشمگیر ضریب

هدایت حرارتی بود. آنها در پژوهش دیگری نشان دادند با اضافه‌شدن نانوذرات CuO به اتیلن‌گلیکول، ۲۲/۴٪ افزایش در رسانایی گرمایی مشاهده خواهد شد [2]. کلبینسکی و همکاران [3] نیز مکانیزم‌های افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را به حرکت براونی ذرات، لایه‌سازی مایع در سطح مشترک آن با فاز جامد، انتقال گرما توسط فوتون‌ها و تشکیل خوشه نسبت دادند. همچنین ابارشی و همکاران [4] تاثیر کسر حجمی و نیز دما را بر هدایت حرارتی فروفلوید Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> بررسی نمودند. آنها افزایش هدایت حرارتی با دما را مربوط به شدیدتر شدن حرکت براونی ذرات دانستند. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که با اضافه‌شدن نانوذرات به سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی سیال افزایش می‌یابد [5].

گفتنی است اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی، یکی از روش‌های فعال در افزایش نرخ انتقال حرارت محسوب می‌شود [6] و با توجه به اینکه نانوذرات مغناطیسی می‌توانند پاسخ مناسبی به نیروی ناشی از اعمال میدان مغناطیسی خارجی دهند، بعضی از مطالعات نیز روی اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی فروفلوید، تحت اثر میدان مغناطیسی متمرکز شدند. در این بین، لی و همکاران [7] به بررسی تجربی ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته فروفلوید تحت اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی و همچنین تاثیر عواملی مانند غلظت و روکشگر (سورفکتانت) بر این خواص پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که تا زمان رسیدن به حالت اشباع، میزان ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته با افزایش شدت میدان مغناطیسی، افزایش می‌یابد. آنها افزایش هدایت حرارتی را ناشی از تغییر ساختار میکروسکوپی (ساختار توده‌ای و زنجیروار) تحت میدان مغناطیسی موازی با گرادیان دما دانستند. همچنین فیلیپ و همکاران [8] افزایش چشمگیری در هدایت حرارتی نانوسیال با ذرات اکسید آهن که تحت میدان مغناطیسی بودند، مشاهده و بیشترین میزان افزایش هدایت حرارتی را به میزان ۳۰٪ در غلظت حجمی ۶/۳٪ گزارش کردند. بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت نانوسیال حاوی ذرات Ni که با نانولوله کربنی تزئین شده، در پژوهش رایت و همکاران [9] و همچنین فروفلوید حاوی Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> در پژوهش پارخ و لی [10] بررسی شده است. پارخ و لی به مطالعه حرارتی، به‌عنوان تابعی از میدان مغناطیسی عرضی و دما پرداخته و افزایش ۳۰ درصدی در ضریب هدایت حرارتی مشاهده کردند. گاولی و همکاران [11] نیز به مطالعه تجربی ضریب انتقال حرارت در یک فروفلوید تحت میدان مغناطیسی پرداختند. آنها در غلظت حجمی ۵٪، افزایش ۲۰۰ درصدی ضریب هدایت حرارتی را مشاهده کرده و به این نتیجه رسیدند که هرچه شدت میدان مغناطیسی بیشتر باشد، میزان ماکزیمم در افزایش ضریب هدایت حرارتی بیشتر و زمان رسیدن به حالت اشباع کمتر خواهد بود.

باید اشاره کرد که مطالعات عددی مختلفی نیز به بررسی نظریه هیدرودینامیک مغناطیسی در انتقال حرارت رسانش نانوسیال‌ها و همچنین اثر مهاجرت نانوذرات پرداختند. هیومینیک و هیومینیک [12] به بررسی انتقال حرارت نانوسیال در مبدل حرارتی دولوله‌ای ماریچ در جریان آرام پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از نانوسیال‌هایی نظیر TiO<sub>2</sub> و CuO که در سیال پایه آب به‌صورت همگن پراکنده شده‌اند، بیشترین افزایش در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مشاهده خواهد شد. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت نانوذرات، انتقال حرارت نیز بهبود می‌یابد. امین‌فر و همکاران [13] در یک مطالعه عددی با استفاده از مدل دوفازی مخلوط و روش المان محدود، به

نمودند. نتایج آنها بیانگر افزایش انتقال حرارت و افت فشاری حدود ۳۱ و ۱۰٪ است.

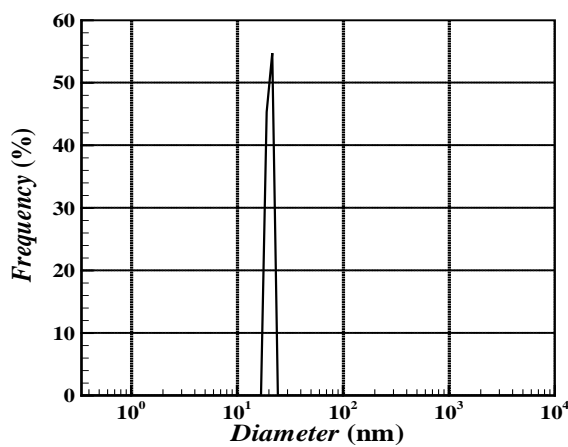
قفرانی و همکاران<sup>[25]</sup> اثر میدان مغناطیسی ثابت و متناوب را روی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فروفلوید بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که اثر میدان مغناطیسی در رینولدزهای پایین بیشتر مشهود بوده است. همچنین اعمال میدان مغناطیسی ثابت، اثری معکوس بر نرخ انتقال حرارت داشته یا به میزان ناچیزی موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود، در حالی که اعمال میدان مغناطیسی متناوب، باعث بهبود ضریب افزایش انتقال حرارت شده است. این نتایج در پژوهش مشابه دیگری که توسط یاراحمدی و همکاران<sup>[26]</sup> انجام گرفته است، نیز دیده می‌شود. در پژوهش دیگری که توسط عزیزیان و همکاران<sup>[27]</sup> انجام گرفته، تاثیر شدت و یکنواختی میدان مغناطیسی روی انتقال حرارت و افت فشار فروفلوید  $Fe_3O_4$  به کمک شبیه‌سازی توزیع میدان و نیروی مغناطیسی بررسی شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد با افزایش شدت و گرادیان میدان مغناطیسی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که این افزایش در اعداد رینولدز بالاتر بیشتر است. از سوی دیگر، نتایج آنها بیانگر تاثیر میدان مغناطیسی بر افت فشار قابل توجه نیست و کمتر از ۱۰٪ باعث افزایش افت فشار می‌شود. آنها این میزان افزایش انتقال حرارت را به تجمع ذرات در نزدیکی مغناطیس‌ها، افزایش ضریب هدایت حرارتی موضعی و همچنین ایجاد توده‌های ذرات نسبت دادند که باعث افزایش انتقال مومنوم و انرژی می‌شود. گوهرخواه و همکاران<sup>[28]</sup> نیز به بررسی عددی و تجربی انتقال حرارت نانوسیال حاوی  $Fe_3O_4$  پرداخته‌اند که در یک لوله تحت شار حرارتی ثابت و اعمال میدان مغناطیسی قرار دارد. آنها به منظور رسیدن به بالاترین انتقال حرارت، اقدام به شبیه‌سازی توزیع نیروی میدان مغناطیسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که در غیاب میدان، استفاده از فروفلوید با غلظت حجمی ۲٪، نرخ متوسط انتقال حرارت جابه‌جایی را در عدد رینولدز ۱۲۰۰ به میزان ۱۳/۵٪ نسبت به آب خالص بهبود می‌دهد. این مقدار برای حالت میدان ثابت و متغیر با شدت ۵۰۰ گاوس به ترتیب به ۱۸/۹ و ۳۱/۴٪ می‌رسد. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش عدد رینولدز، غلظت فروفلوید و شدت میدان مغناطیسی، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، آنها نتیجه گرفتند که افزایش موضعی ضریب هدایت حرارتی در اثر جذب نانوذرات به سطح، اغتشاش در لایه مرزی حرارتی و افزایش اختلاط جریان در این نواحی از محتمل‌ترین دلایل برای افزایش انتقال حرارت در این نواحی است. شهبسوار و همکاران<sup>[29]</sup> به بررسی اثر میدان‌های مغناطیسی مختلف بر انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال هیبریدی شامل تترامتیل‌آمونیم‌هیدروکسید پرداختند که با ذرات  $Fe_3O_4$  و همچنین صمغ عربی که با نانولوله‌های کربنی پوشانده شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از میدان مغناطیسی خارجی سبب تجمع ذرات در راستای میدان شده و این امر منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی موضعی و ضریب انتقال حرارت محلی خواهد شد. در پژوهش مشابه دیگری که توسط گوهرخواه و همکاران<sup>[30]</sup> در یک کانال مستطیلی انجام گرفت، افزایش ۱۶/۴ درصدی ضریب انتقال حرارت در غیاب میدان مغناطیسی مشاهده شد که این میزان در حضور میدان مغناطیسی ثابت و متناوب به ترتیب به ۲۴/۹ و ۳۷/۳٪ رسید.

با ظهور ماده‌ای شگفت‌انگیز به نام گرافن که ضریب هدایت حرارتی فوق‌العاده‌ای دارد، ورود این ماده پراهمیت به چالش انتقال حرارت ضروری به نظر می‌آید. گفتنی است اگرچه نانوذرات گرافنی ماده‌ای

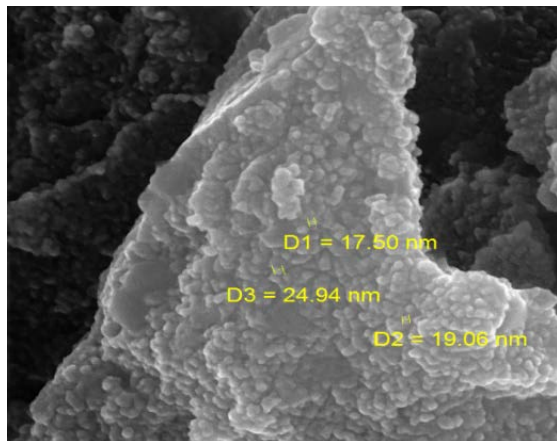
بررسی رفتار هیدرودینامیک و حرارتی فروفلوید در یک لوله افقی و خمیده و تحت میدان مغناطیسی خطی با شدت‌های مختلف پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در حضور میدان مغناطیسی خارجی، ضریب انتقال حرارت در لوله خمیده، افزایش بیشتری نسبت به لوله مستقیم خواهد داشت و این افزایش ناشی از نیروی کلوی و نیروی گریز از مرکز است. از دیگر پژوهش‌های عددی می‌توان به مطالعه یارمند و همکاران<sup>[14]</sup> اشاره کرد. آنها به مطالعه عددی نانوسیال‌های مختلف در جریان آشفته پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز و غلظت حجمی نانوذرات، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. آنها گزارش کرده‌اند که نانوسیال حاوی  $SiO_2$  با وجود کمترین ضریب هدایت حرارتی، بیشترین عدد ناسلت را خواهد داشت. ملوندی و دومیری‌گنجی<sup>[15]</sup> نیز به بررسی عددی اثر میدان مغناطیسی بر مهاجرت نانوذرات در انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آلومینا/آب در میکروکانال‌هایی با گرمای نامتقارن پرداختند. آنها نشان دادند نانوذرات خود را از دیواره‌های گرم شده جدا کرده و احتمالاً در نزدیکی دیوار با شار حرارتی پایین‌تر تجمع می‌کنند. علاوه بر این، توزیع غیریکنواخت نانوذرات باعث افزایش سرعت حرکت به طرف دیوار با شار حرارتی بالاتر و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. ملوندی و همکاران<sup>[16]</sup> همچنین به بررسی رفتار هیدرودینامیک مغناطیسی همان نانوسیال در یک حلقه عمودی پرداختند. آنها نشان دادند نرخ انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال به‌طور قابل توجهی وابسته به شرایط مرزی اعمال شده است.

همچنین برخی از مطالعات تجربی به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فروفلوید در حضور و غیاب میدان مغناطیسی پرداختند. ژوان و لی<sup>[17]</sup> افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال را در رژیم جریان آشفته ملاحظه کردند. ون و دینگ<sup>[18]</sup> در یک مطالعه تجربی، انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال حاوی  $Al_2O_3$  - ۷ را در جریان آرام بررسی کرده و افزایش قابل توجهی به دست آوردند. آنها نشان دادند که این بهبود، با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوسیال افزایش می‌یابد. یونگ و همکاران<sup>[19]</sup> به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آلومینا در یک میکروکانال مستطیلی و تحت جریان آرام پرداختند. آنها ۳۲٪ افزایش برای ضریب انتقال حرارت گزارش کرده‌اند. دو/تونگسوک و وانگ/بزیس<sup>[20]</sup> نیز به بررسی افزایش انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال حاوی  $TiO_2$  در یک مبدل حرارتی پرداختند. لاجوردی و همکاران<sup>[21]</sup> انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری داخل لوله‌ای با شار حرارتی ثابت و تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت در رژیم جریان آرام را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که افزودن نانوذرات اکسید آهن به سیال پایه، به‌تنهایی باعث افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود و اعمال میدان مغناطیسی، این افزایش را بیشتر می‌کند. از دیگر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به کارهای تجربی موتوزاوا و همکاران<sup>[22]</sup> در بررسی انتقال حرارت سیال مغناطیسی پایه آبی در داخل یک کانال مستطیلی شار ثابت تحت میدان مغناطیسی ثابت با شدت ۵۰۰ mT و زمزمیان و همکاران<sup>[23]</sup> در بررسی ضریب انتقال حرارت نانوسیال پایه اتیلن‌گلیکول اکسید آلومینیوم و اکسید مس در دو مبدل حرارتی اشاره کرد. نتایج زمزمیان و همکاران حاکی از برتری اکسید مس در افزایش ضریب انتقال حرارت داشته است. همچنین سوندر و همکاران<sup>[24]</sup> جابه‌جایی اجباری فروفلوید مگنتیت داخل لوله در جریان مغشوش و بدون میدان مغناطیسی را مورد بررسی قرار داده و روابطی تجربی برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه

از گرافن اکساید سنتز شده در مرحله قبل را در ۲۵۰ میلی لیتر آب دوبارتقطیر، حل و به مدت ۲ ساعت التراسونیک می کنیم. سپس ۱/۷۲ گرم از آهن کلرید ۹ آب و ۰/۶۲ گرم کبالت کلرید ۶ آب در ۲۵۰ میلی لیتر آب دوبارتقطیر حل شد و به صورت قطره قطره به محلول گرافن اکساید که روی هیتر استیبر در حال هم زدن است، اضافه شد. سپس محلول سدیم هیدروکسید قطره قطره به محلول اضافه شد تا PH محلول بزرگتر از ۱۲ شود. دمای واکنش به ۸۰°C رسانده و به مدت ۵ ساعت هم زده شد. سپس به مدت ۶ ساعت در آن خلأ با دمای ۱۱۰°C قرار گرفت و خشک شد. نمودار ۱ و شکل ۱ بیانگر مورفولوژی، اندازه و نحوه توزیع نانوذرات هستند و نشان می دهند قطر نانوذرات کمتر از ۲۵ نانومتر است. لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از چسبندگی و انباشته شدن نانوذرات در سیال حامل، از گالیک اسید به عنوان روکشگر برای پایداراری فروفلوید استفاده شده است.



نمودار ۱) توزیع سایز نانوذرات مغناطیسی با استفاده از پراکندگی نور دینامیکی



شکل ۱) تصویر فریت کبالت- گرافن اکساید به وسیله میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی

## ۲-۲- دستگاه آزمایش

به منظور بررسی تجربی اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابه جایی اجباری فروفلوید در رژیم جریان آرام که در یک لوله مسی جریان داشته و تحت شار حرارتی ثابت قرار دارد، دستگاه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده که شماتیک آن در شکل ۲ آمده است. اجزای اصلی این دستگاه شامل حمام دما ثابت در یک سیکل بسته برای رساندن دمای سیال به دمای مخزن، لوله ای از جنس مس که مجرای عبور سیال است، منبع تغذیه جریان مستقیم، چهار

عالی برای نانوسیالات هستند، اما سنتز گرافن در مقیاس بزرگ، دشوار و گران قیمت است و با توجه به این واقعیت، کاربرد اکسید گرافن به صورت هیبرید می تواند موثرتر باشد. در واقع هدف ما در این مطالعه، ساخت نانوسیال هیبریدی با خواص ترموفیزیک بهبود یافته از یک طرف و بهره گیری از ویژگی منحصر به فرد آن در پاسخ و واکنش به میدان مغناطیسی از طرف دیگر است تا به سمت بهبود انتقال حرارت گام برداشته شود.

## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی

### ۲-۱- مراحل سنتز فروفلوید

در این پژوهش از نانوکامپوزیتی به نام فریت کبالت/گرافن اکساید استفاده شده است. اغلب تحقیقاتی که پیشتر در مقدمه اشاره شدند، روی سه سیال پایه آب مقطر، اتیلن گلیکول و روغن موتور هستند. در این مطالعه نیز از آب به عنوان سیال پایه استفاده شده است. برای ساخت نانوکامپوزیت مورد نظر به مواد اولیه ای نیاز بوده که در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱) مواد اولیه مورد نیاز برای سنتز نانوکامپوزیت

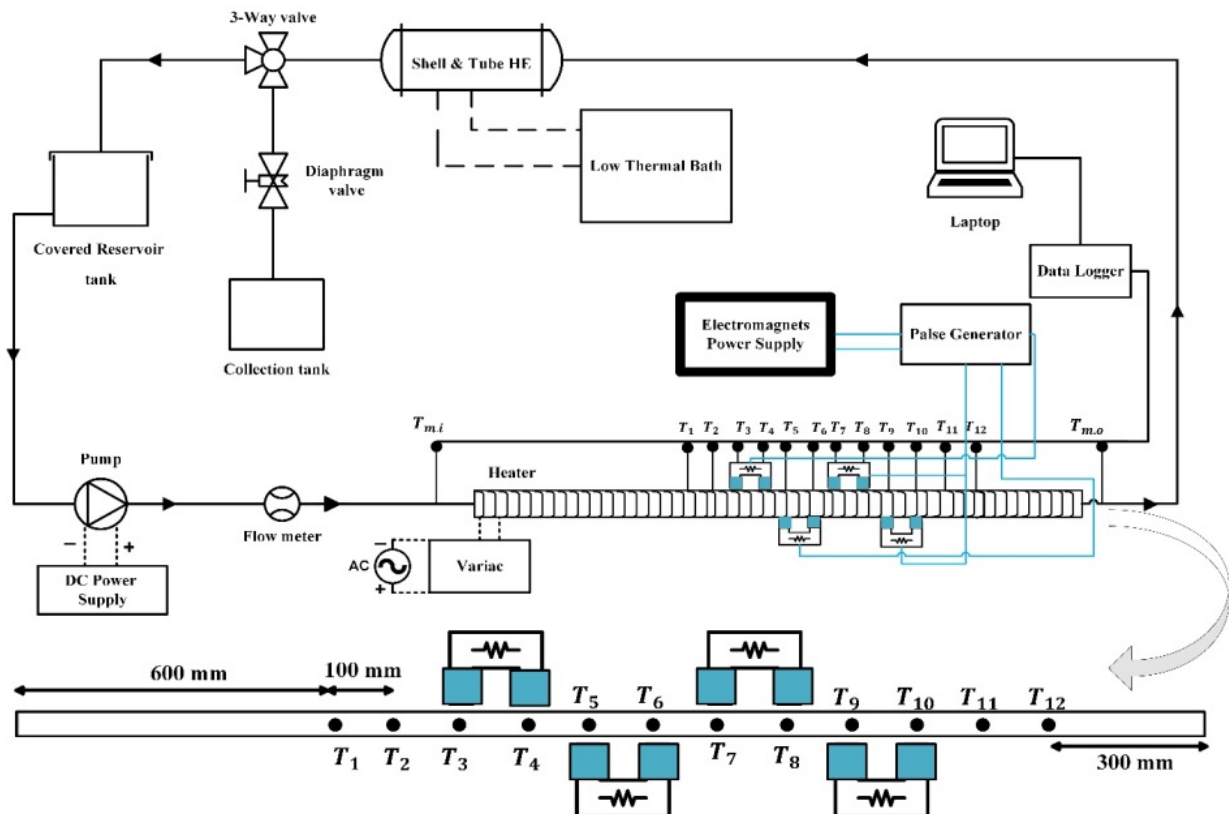
| مواد اولیه                    | نام یا فرمول شیمیایی                 | درصد خلوص |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| ورقه های طبیعی گرافیت (۵۰۰مش) | C                                    | ۹۹%       |
| پتاسیم پرمنگنات               | KMnO <sub>4</sub>                    | AR        |
| سولفوریک اسید                 | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>       | AR        |
| سدیم نترات                    | NaNO <sub>3</sub>                    | AR        |
| هیدروژن پراکسید               | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>        | Aq.       |
| سدیم هیدروکسید                | NaOH                                 | %۵۰       |
| فریک هگزاکلرید                | FeCl <sub>3</sub> .9H <sub>2</sub> O | %۹۸       |
| کبالت هگزاکلرید               | CoCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O | %۹۸       |
| هیدروژن کلرید                 | HCl                                  | %۵        |
| گالیک اسید                    | Gallic acid                          | -         |

به منظور سنتز گرافن اکساید، از روش اصلاح شده هامرز و آفرمن [31] و همان طور که در پژوهش دیگری [32] بیان شده، استفاده شده است. در این روش، پودر گرافیت به عنوان ماده اولیه تولید گرافن اکساید مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا یک گرم گرافیت و ۲۳ میلی لیتر اسید سولفوریک غلیظ در یک بشر ۲۵۰ میلی لیتری ریخته و به مدت نیم ساعت هم زده شدند. سپس ۰/۵ گرم نترات سدیم به آن اضافه شد و پس از ۳۰ دقیقه هم زدن در حمام آب- یخ، دمای آن به صفر درجه سانتی گراد کاهش یافت. پس از آن ۳ گرم پرمنگنات پتاسیم به تدریج و طی مدت ۳۰ دقیقه به آن اضافه شد. بعد از افزودن کامل پرمنگنات پتاسیم و هم زدن، مخلوط در دمای زیر ۲۰°C نگه داشته شد. سپس ۱۴۶ میلی لیتر آب دوبارتقطیر به ظرف واکنش افزوده شده و محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد. واکنش با اضافه کردن ۱۰ میلی لیتر آب اکسیژنه ۳۰٪، متوقف شد. برای تولید گرافن اکساید تک لایه، سوسپانسیون حاصل در فرکانس ۳۵ کیلوهرتز و به مدت ۳۰ دقیقه التراسونیک شد. گرافن اکساید تولید شده با محلول هیدروژن کلرید در آب، سه تا چهار مرتبه مورد شست و شو قرار گرفت و با کمک قیف بوخنر صاف شد. در مرحله بعد، سوسپانسیون حاصل سه تا چهار مرتبه با آب مقطر دوبارتقطیر شست و شو داده شد. لازم به ذکر است سوسپانسیون به دست آمده پس از هر بار شست و شو، با روش فیلتراسیون صاف شد. در نهایت ماده جامد مشکی رنگ حاصل و در آن خلأ با دمای ۵۰°C قرار گرفته و خشک شد.

در ادامه برای سنتز نانوکامپوزیت فریت کبالت/گرافن اکساید ۰/۹ گرم

سیکل، قسمت اصلی تست سیستم برای بررسی رفتار انتقال حرارت جابه‌جایی فرولوید تحت شار حرارتی ثابت قرار گرفته است. فرولوید از یک لوله دایروی و صاف از جنس مس به طول ۲ متر و قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۶/۵ و ۱۰/۵ میلی‌متر عبور می‌کند. مکانیزم ایجاد شار حرارتی یکنواخت توسط المنت حرارتی نگیر از جنس نیکل کروم و با مقطع تخت، منبع تغذیه جریان مستقیم و عایق حرارتی فراهم می‌شود. همچنین المنت حرارتی درون پوششی به نام وارنیش قرار گرفته و برای جلوگیری از ایجاد هر گونه میدان مغناطیسی توسط جریان گذرنده از المنت، به صورت رفت و برگشت به دور لوله مسی پیچانده می‌شود تا میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط المنت رفت با میدان مغناطیسی المنت برگشت خنثی شود.

الکترومغناطیس برای تولید میدان مغناطیسی، پالس ژنراتور برای متناوب نمودن جریان میدان مغناطیسی و سیستم اندازه‌گیری شامل ترموکوپل، دیتالاگر دوازده کاناله و دبی سنچ هستند. حجم سیال کاری استفاده شده درون لوله و خط برگشت سیال به مخزن حدوداً ۷۰۰ میلی‌لیتر بوده، ولی به دلیل خنک‌کنندگی سیال و تنظیم دمای بالک ورودی، حجم مخزن ۱۵۰۰ میلی‌لیتر در نظر گرفته شده است. مراحل بدین صورت آغاز می‌شود که سیال از مخزن به سمت پمپ جریان مستقیم که ولتاژ آن به وسیله یک منبع تغذیه که به پمپ متصل شده و قابل تنظیم است، فرستاده شده تا در سیکل مورد نظر به گردش در آید. سپس با عبور از یک دبی‌سنج کالیبره شده وارد لوله می‌شود. پس از بخش پمپاژ سیال به درون



شکل ۲) شماتیک دستگاه آزمایش

مخزن باز شود. برای اندازه‌گیری و ثبت دمای لوله و بالک سیال از چهارده ترموکوپل نوع  $K$  استفاده شده که دو دما مربوط به دمای ورودی و خروجی بالک سیال و دوازده دمای دیگر مربوط به سطح لوله است. اولین ترموکوپل سطح در فاصله ۶۰۰ میلی‌متری از ورودی لوله قرار گرفته است تا اطمینان حاصل شود که همه اندازه‌گیری‌ها در ناحیه کاملاً توسعه‌یافته خواهد بود. همچنین فواصل ترموکوپل‌های سطح یکسان و برابر با ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (شکل ۲). گفتنی است به منظور اندازه‌گیری دقیق دمای سطح لوله، حفره‌هایی به عمق ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر روی آن ایجاد و نوک ترموکوپل‌ها درون آن قرار گرفته و به کمک لحیم نقره به لوله متصل شدند. برای ثبت دمای بالک سیال نیز نوک ترموکوپل، قبل و بعد از لوله مسی دقیقاً در مرکز شلنگ رابط وارد شده است. باید تاکید نمود که با توجه به قطر کم شلنگ که تحت شار حرارتی قرار ندارد، تغییرات دما در راستای شعاعی بسیار کم است، به طوری که این تغییرات از میزان دقت ثبت دما کمتر خواهد بود. برای تولید میدان

سپس هیتر به وسیله یک اتوترانسفورماتور متغیر (واریاک) به منبع تغذیه جریان متناوب متصل شد. به منظور انتقال شار حرارتی ثابت و یکنواخت به سمت نانوسیالی که در لوله مسی در جریان است و همچنین جلوگیری از اتلاف حرارتی ناخواسته که موجب ایجاد خطا در داده‌ها می‌شود، از عایق حرارتی استفاده شده است. بدین منظور، از یک لایه فوم الاستومری اسفنجی با ضخامت ۸ میلی‌متر که ضریب هدایت بسیار پایینی دارد، استفاده شده و همچنین یک لایه فویل آلومینیومی بسیار نازک به دور آن پیچیده شده است. گفتنی است برای کاهش حرارت در راستای محوری، دو بوش پلی‌اورتانی در ورودی و خروجی لوله جاگذاری شده‌اند تا با اتصال به شلنگ رابط، مانع از ذوب احتمالی توسط گرمای هیتر شود. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که برای دستیابی به حالت پایدار در سیستم و کاهش دمای سیال خروجی از لوله که تحت تاثیر شار حرارتی قرار گرفته است، سیال پس از خروج از لوله، وارد یک مبدل حرارتی و حمام دماثابت متصل به آن شود تا دمای خود را از دست دهد و به

محوری از ورودی لوله،  $q''$  شار حرارتی ثابت اعمال شده بر لوله،  $k$  ضریب هدایت حرارتی سیال،  $D_{in}$  قطر داخلی لوله و  $T_m$  دمای بالک فروقلید در ورودی و خروجی لوله است که می‌توان آن را به کمک موازنه انرژی، از رابطه ۳ به دست آورد.

$$T_m(x) = \frac{q}{L\dot{m}c_p}x + T_{m,i} \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $c_p$  گرمای ویژه سیال،  $\dot{m}$  نرخ دبی جرمی سیال،  $T_{m,i}$  دمای بالک سیال در ورودی و  $q$  میزان توان الکتریکی اعمال شده بر لوله است. همچنین شار حرارتی اعمالی بر سطح لوله از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$q'' = \frac{q}{A} = \frac{VI}{\pi D_{in}L} \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $V$  و  $I$  به ترتیب ولتاژ و جریان اعمال شده توسط منبع تغذیه و  $L$  طول لوله هستند. گفتنی است که شار حرارتی محاسبه شده از رابطه ۴ که تجربی بوده، با مقدار به دست آمده از موازنه انرژی در طول لوله که در رابطه ۵ آورده شده، متفاوت بوده که این تفاوت ناشی از افت حرارتی عایق در هر تست است. ماکزیمم اختلاف بین این دو مقدار ۳/۲٪ به دست آمده است.

$$q''_{theoretical} = \frac{q}{A} = \frac{D\rho c_p U(T_{m,o} - T_{m,i})}{4L} \quad (5)$$

در رابطه ۵،  $U$  سرعت سیال،  $T_{m,i}$  و  $T_{m,o}$  به ترتیب دمای بالک سیال در ورودی و خروجی لوله و  $\rho$  چگالی سیال است. گفتنی است با توجه به اینکه دمای سطح توسط دوازده ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط و همچنین درصد افزایش انتقال حرارت را می‌توان به کمک روابط ۶ و ۷ به دست آورد. مقایسه بین نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در حالت‌های مختلف و همچنین در حضور یا غیاب میدان مغناطیسی به کمک عدد بی‌بعد ناسلت انجام گرفته که معادله آن در رابطه ۸ آمده است.

$$h_{avg} = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{h_i}{12} \right) \quad (6)$$

$$\eta = \frac{h_2 - h_1}{h_2} \times 100 \quad (7)$$

$$Nu_{avg} = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{Nu_i}{12} \right) \quad (8)$$

که در آن  $Nu_i$  شماره ناسلت محلی است که ترموکوپل شماره  $i$ ام روی آن قرار دارد. همچنین عدد رینولدز و عدد پرانتل به ترتیب از روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شوند.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D\mu} \quad (9)$$

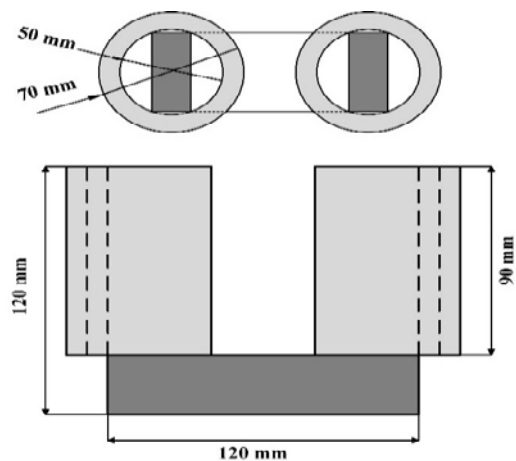
$$Pr = \frac{C_p\mu}{k} \quad (10)$$

فرکانس جریان متناوب نیز از رابطه ۱۱ به دست می‌آید.

$$f = \frac{1}{\tau} \quad (11)$$

زمان قطع و وصل جریان مساوی است و دوره تناوب تابع موج

مغناطیسی، سیستمی متشکل از چهار الکترومغناطیس غیردایم، دو منبع تغذیه جریان مستقیم و پالس ژنراتور به منظور اعمال تابع مستطیلی برای قطع و وصل جریان استفاده شده است. هر الکترومغناطیس از یک هسته U شکل و دو سیم پیچ مسی تشکیل شده که ابعاد آن در شکل ۳ آورده شده است. هسته‌ها از جنس پودر آهن عایق الکتریکی و آلیاژهای آهنی با هیستریزس پایین و چگالی شار اشباع بالا که برای ایجاد میدان مغناطیسی متناوب مناسب است، ساخته شده‌اند. در هر سیم پیچ ۳۰۰۰ دور سیم مسی با قطر ۰/۵ میلی‌متری به دو بازوی هسته U شکل پیچیده شده است، به طوری که مقاومت الکتریکی آن ۱۳۵ اهم باشد. از دو منبع تغذیه جریان مستقیم با محدوده ولتاژ ۰-۳۰ ولت به صورتی استفاده شده است که هر جفت الکترومغناطیس به یکی از آنها متصل شده و مدار آنها به طور موازی بسته شود تا ولتاژ هر یک از الکترومغناطیس‌ها ۶۰ ولت باشد. این دستگاه، جریان مستقیم خروجی از منبع تغذیه را به پالس‌های مستطیلی، تبدیل و سیم پیچ‌ها را تغذیه می‌کند. با کمک میکروکنترلر، مدار دیجیتال این دستگاه، توانایی آن را دارد تا فرکانس پالس‌ها و اختلاف فاز آنها نسبت به یکدیگر را تنظیم کند. ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی در جریان ورودی ۱/۷ آمپر در حدود ۸۰۰ گاوس است. گفتنی است شدت میدان مغناطیسی با استفاده از یک تسلا متر (HT201) با دقت اندازه‌گیری شد. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که همه اندازه‌گیری‌ها از قبیل سرعت، دما و شار حرارتی، در شرایطی که انتقال حرارت در سیستم به حالت پایدار رسیده باشد، انجام گرفته است.



شکل ۳ ابعاد الکترومغناطیس‌ها

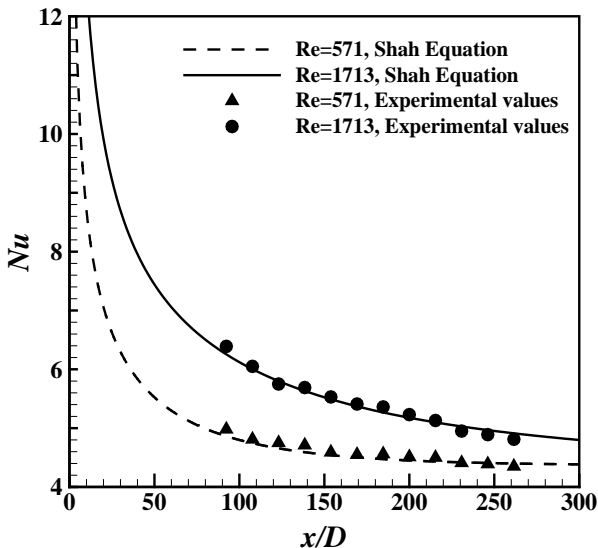
### ۳- معادلات حاکم و پردازش داده‌ها

به منظور بررسی افزایش انتقال حرارت، باید ضریب انتقال حرارت محلی ( $h$ ) محاسبه شود که به کمک رابطه ۱ و با استفاده از داده‌های تجربی به دست آمده از دستگاه آزمایش، محاسبه خواهد شد. همچنین این ضریب را می‌توان برحسب عدد ناسلت نیز بیان کرد که به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$h(x) = \frac{q''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad (1)$$

$$Nu(x) = \frac{h(x)D_{in}}{k} \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲،  $T_s$  دمای سطح لوله است که با استفاده از ۱۲ ترموکوپل که داخل گوشته لوله قرار دارد، به دست می‌آید،  $x$  فاصله



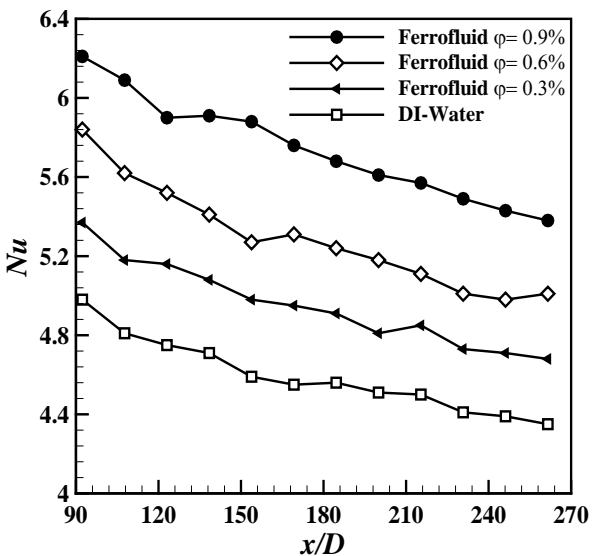
نمودار ۲) مقادیر اندازه گیری شده عدد ناسلت برای آب در مقایسه با معادله شاه

#### ۴- نتایج و بحث

پس از صحت گذاری از دستگاه آزمایش به وسیله آب خالص، نوبت به انجام آزمایش هایی به منظور بررسی انتقال حرارت فروفلوئید تحت شرایط مختلف می رسد. تحلیل نتایج به دست آمده در این بخش آورده شده است.

#### ۴-۱- انتقال حرارت جابه جایی اجباری فروفلوئید در غیاب میدان مغناطیسی

ابتدا در غیاب میدان مغناطیسی، مجموعه آزمایش هایی برای آب خالص و همچنین فروفلوئید در سه غلظت وزنی مختلف (۰/۰۳/۰/۰۶/۰/۹) و در دو عدد رینولدز ۵۷۱ و ۱۷۱۳ انجام گرفت. تغییرات عدد ناسلت فروفلوئید در نمودارهای ۳ و ۴ نشان داده شده است که محور افقی، بیانگر فاصله بی بعد از ورودی لوله و نقاط مشخص شده روی خطوط بیانگر مکان ترموکوپل ها هستند. نتایج نشان می دهد استفاده از فروفلوئید، انتقال حرارت جابه جایی اجباری را به طور قابل توجهی بهبود می بخشد.



نمودار ۳) تغییرات عدد ناسلت برای فروفلوئید در غلظت های مختلف در عدد رینولدز ۵۷۱ در غیاب میدان مغناطیسی

مستطیلی برابر با مجموع زمان قطع و وصل تعریف می شود. همچنین غلظت وزنی، گرمای ویژه و چگالی فروفلوئید از روابط ۱۴-۱۲ به دست می آیند.

$$\text{Mass fraction}(\varphi) =$$

$$\frac{\text{Weight of solute}(gr)}{\text{Volume of solution}(ml)} \times 100 \quad (12)$$

$$C_{p,ff} = \frac{(1 - \varphi)\rho_w c_{p,w} + \varphi\rho_p c_{p,p}}{(1 - \varphi)\rho_w + \varphi\rho_p} \quad (13)$$

$$\rho_{ff} = (1 - \varphi)\rho_w + \varphi\rho_p \quad (14)$$

در روابط ۱۴-۱۲، چگالی آب، چگالی نانوذرات،  $c_{p,w}$  گرمای ویژه آب،  $c_{p,p}$  گرمای ویژه نانوذرات و چگالی فروفلوئید است. مطالعات تجربی حاکی از انطباق رابطه ۱۳ با نتایج و دقت قابل قبول آن برای محاسبه ظرفیت گرمایی نانوسیال داشته و نشان دهنده این است که ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال به ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی سیال پایه و نانوذرات و همچنین درصد حجمی نانوذرات مرتبط است. بنابراین در مقاله حاضر نیز از این رابطه استفاده شده است. همچنین برای به دست آوردن ویسکوزیته فروفلوئید می توان از معادله تجربی برینکمن استفاده کرد [33] که در رابطه ۱۵ آورده شده است.

$$\nu_{ff} = \frac{1}{(1 - \varphi)^{2.5}} \nu_w \frac{\rho_w}{\rho_{ff}} \quad (15)$$

در رابطه ۱۵،  $\nu_{ff}$  ویسکوزیته سینماتیک فروفلوئید و  $\nu_w$  ویسکوزیته سینماتیک آب در درجه حرارت متوسط بالک هستند. گفتنی است تغییرات ویسکوزیته فروفلوئید تحت میدان مغناطیسی و تخمین ویسکوزیته تحت میدان مغناطیسی متناوب عملاً امکان پذیر نبوده [7, 26] و علاوه بر این، تغییر هدایت حرارتی فروفلوئید در حضور یک میدان مغناطیسی و تعیین یک مقدار مشخص برای هدایت حرارتی تحت میدان مغناطیسی متناوب از اعتبار کمی برخوردار است [7, 11].

#### ۳-۱- صحت گذاری دستگاه آزمایش

قبل از بررسی انتقال حرارت نانوسیال، برای اطمینان از عملکرد صحیح دستگاه آزمایش و دقت کافی نتایج تجربی، عدد ناسلت برای آب خالص در دو عدد رینولدز ۵۷۱ و ۱۷۱۳ به صورت تجربی به دست آمده و نتایج با معادله شاه [34] برای جریان آرام و تحت شار حرارتی ثابت که در رابطه ۱۶ آمده، مقایسه شده است. همان طور که از نمودار ۲ مشاهده می شود، نتایج تجربی تطابق مطلوبی با مقادیر پیش بینی شده توسط معادله شاه در دو عدد رینولدز داشته و ماکزیمم خطا ۲/۱% به دست آمده است.

$$(16)$$

$$Nu_x = \begin{cases} 1.302x_*^{-\frac{1}{3}} - 1, & x_* \leq 0.00005 \\ 1.302x_*^{-\frac{1}{3}} - 0.5, & 0.00005 \leq x_* \leq 0.0015 \\ 4.36 + 8.68(10^3 x_*)^{-0.506} \exp(-41x_*), & x_* \geq 0.001 \end{cases}$$

در رابطه فوق،  $x_*$  به صورت رابطه ۱۷ تعریف می شود.

$$x_* = \frac{X/D}{RePr} \quad (17)$$

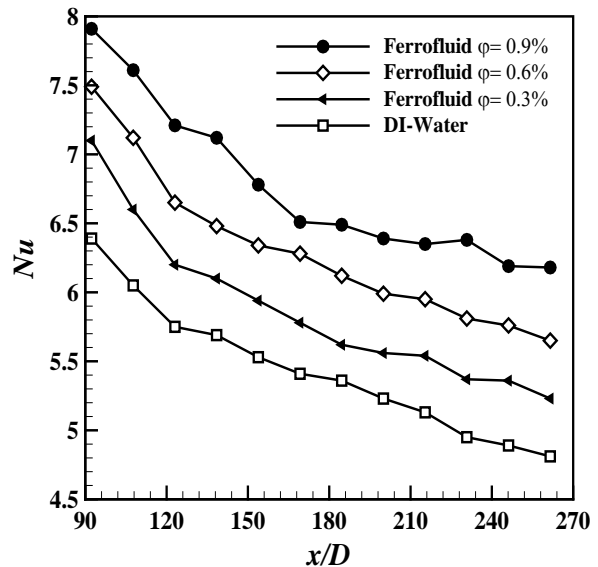
۲-۴- انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فروفلوئید در حضور میدان مغناطیسی

در این بخش به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی فروفلوئید تحت اعمال یک میدان مغناطیسی ثابت و متناوب می‌پردازیم. میدان مغناطیسی با حداکثر چگالی شار ۸۰۰ گاوس بر جریان فروفلوئید در اعداد رینولدز ۵۷۱، ۱۱۴۲ و ۱۷۱۳ و در غلظت‌های ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹٪ وزنی اعمال شده است. لازم به ذکر است که چیدمان الکترومغناطیس‌ها در طول لوله به‌گونه‌ای است که یک میدان مغناطیسی عمود بر جریان نانوسیال عبوری شکل می‌گیرد. همچنین برای بررسی اثر فرکانس میدان در حالتی که میدان متناوب به لوله اعمال می‌شود، سه دوره تناوب برابر با ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۰۵ ثانیه در نظر گرفته شده است که فرکانس آن به ترتیب ۵، ۱۰ و ۲۰ هرتز خواهد بود.

اثر میدان مغناطیسی ثابت و متناوب بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فروفلوئید مطابق با آرایش شکل ۳ مورد بررسی قرار گرفت. در این آرایش، چیدمان الکترومغناطیس‌ها به‌گونه‌ای است که اولین الکترومغناطیس در فاصله ۸۰۰ میلی‌متری از ورودی لوله و روی ترموکوپل‌های  $T_3$  و  $T_4$  و سه الکترومغناطیس دیگر در دو طرف لوله، با فواصل مساوی ۱۰۰ میلی‌متر و روی ترموکوپل‌های  $T_5$ ،  $T_6$ ،  $T_7$ ،  $T_8$ ،  $T_9$  و  $T_{10}$  قرار گرفتند. به‌منظور بررسی دقیق‌تر پارامترهایی مانند عدد رینولدز و غلظت فروفلوئید در حالتی که میدان مغناطیسی اعمال می‌شود، اثر اعمال میدان مغناطیسی ثابت و متناوب بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در دو حالت غلظت ثابت، رینولدز متغیر و برعکس انجام شده است. نمودارهای ۶-۸، تغییرات عدد ناسلت فروفلوئید را تحت میدان مغناطیسی ثابت و متناوب برای فروفلوئید با غلظت ۰/۶٪ وزنی و در رینولدزهای ۵۷۱، ۱۱۴۲ و ۱۷۱۳ نشان می‌دهند.

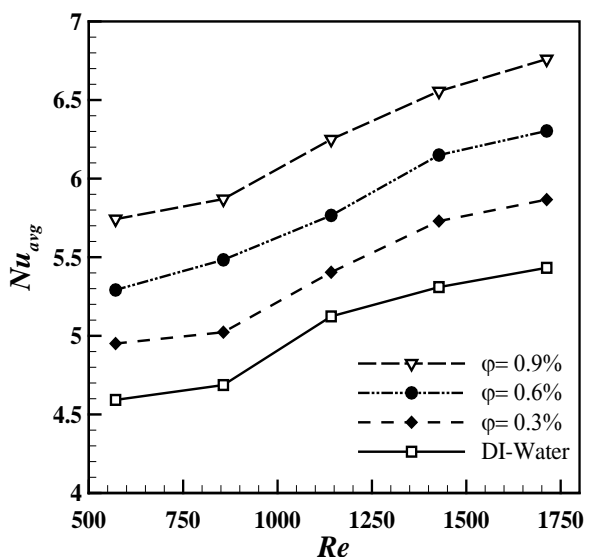
در نمودارهای ۶-۸، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فروفلوئید تحت اعمال میدان ثابت و متناوب، بررسی و با حالت غیاب میدان مغناطیسی ( $B=0$ ) و همچنین حالتی که آب خالص درون لوله جریان دارد، مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اعمال میدان مغناطیسی منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت شده است، به‌طوری که ضریب انتقال حرارت محلی در محل ترموکوپل  $T_{10}$  جایی که آخرین الکترومغناطیس قرار دارد ( $x/D = 230/18$ )، به ماکزیمم مقدار خودش می‌رسد. بعد از  $T_{10}$ ، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش پیدا می‌کند و به میزان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در حالت بدون میدان ( $B=0$ )، نزدیک می‌شود.

از آنجایی که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با ضریب هدایت حرارتی، نسبت مستقیم و با ضخامت لایه مرزی حرارتی نسبت معکوس دارد، بنابراین انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری را به دو طریق می‌توان افزایش داد که نخست افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال و دیگری کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی است. بنابراین هنگامی که فروفلوئید از بخشی از لوله که تحت اثر میدان مغناطیسی قرار دارد عبور می‌کند، نانوذرات در اثر نیروی مغناطیسی کلویین به طرف سطح لوله جذب می‌شوند. انتقال ذرات به طرف دیواره و تجمع آنها در این ناحیه باعث افزایش غلظت فروفلوئید در این ناحیه، افزایش موضعی ضریب هدایت حرارتی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری می‌شود. همچنین این ذرات، زنجیره‌هایی در راستای میدان ایجاد می‌کنند که موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شوند. از طرف دیگر، تجمع نانوذرات در نزدیکی دیواره همانند مانعی در برابر جریان عمل می‌کند و موجب اغتشاش در لایه مرزی حرارتی به‌علت حرکت



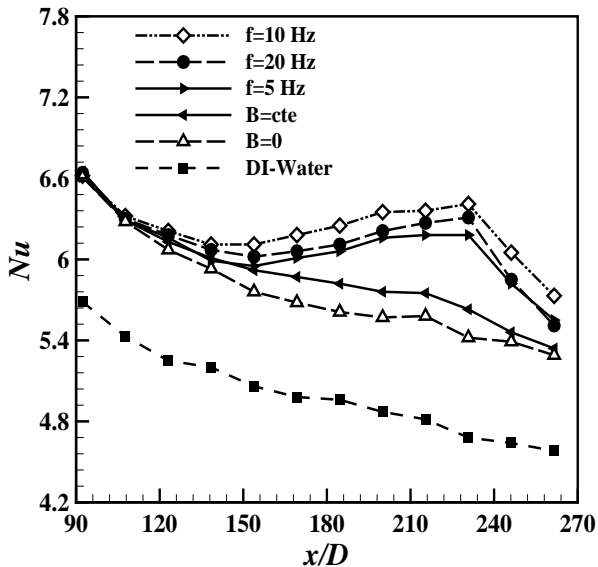
نمودار ۴) تغییرات عدد ناسلت برای فروفلوئید در غلظت‌های مختلف و در عدد رینولدز ۱۷۱۳ در غیاب میدان مغناطیسی

نمودارهای ۳ و ۴، نشان‌دهنده نقش نانوذرات مغناطیسی در افزایش نانوسیال، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هستند، به‌طوری که با افزایش غلظت انتقال حرارت جابه‌جایی بهبود پیدا می‌کند. لازم به ذکر است مقادیر عدد ناسلت در رینولدزهای بالاتر، بیشتر خواهد بود. از آنجایی که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با ضریب هدایت حرارتی سیال متناسب است، افزایش آن به‌وسیله نانوذرات، منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی خواهد شد. برای مثال در رینولدز ۱۷۱۳ با غلظت‌های ۰/۶ و ۰/۹٪، میانگین افزایش عدد ناسلت فروفلوئید نسبت به آب خالص، به ترتیب ۱۶ و ۲۴/۵٪ بوده است. همچنین از مقایسه دو نمودار واضح بوده که تغییرات عدد ناسلت در رینولدز بالاتر، بیشتر خواهد بود که نشان‌دهنده این نکته است که ناحیه انتقال حرارت در حال توسعه‌یافتگی حرارتی کامل است. همان‌طور که از نمودار ۵ نیز پیدا است، افزایش غلظت نانوسیال باعث بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود، به‌طوری که در عدد رینولدز ۱۷۱۳ و غلظت ۰/۳٪، متوسط افزایش انتقال حرارت نسبت به آب خالص برابر با ۷/۹٪ بوده که این مقدار در غلظت ۰/۹٪ به ۲۴/۵٪ رسیده است.

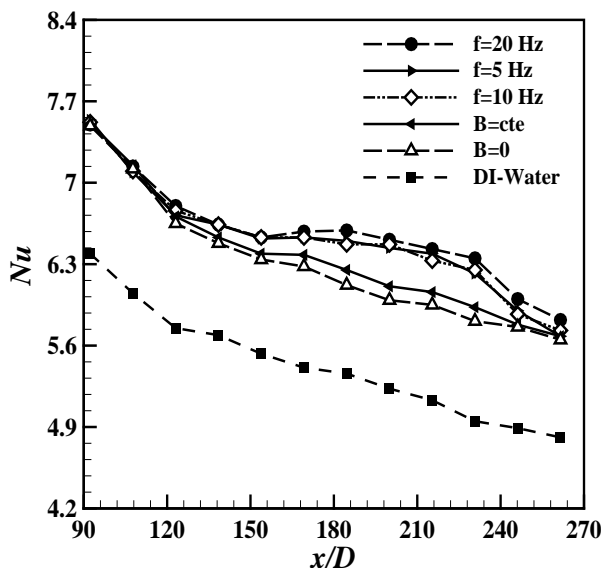


نمودار ۵) عدد ناسلت متوسط به‌صورت تابعی از عدد رینولدز و غلظت نانوذرات

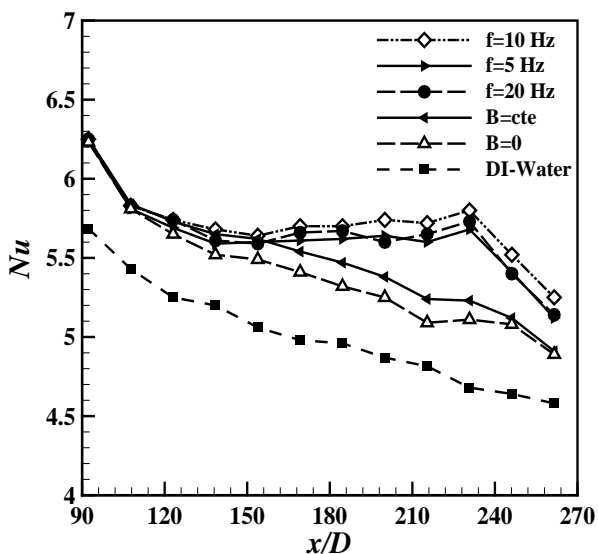




نمودار ۷) تغییرات عدد ناسلت تحت میدان در رینولدز ۱۱۴۲ و غلظت ۰/۶٪



نمودار ۸) تغییرات عدد ناسلت تحت میدان در رینولدز ۱۷۱۳ و غلظت ۰/۶٪

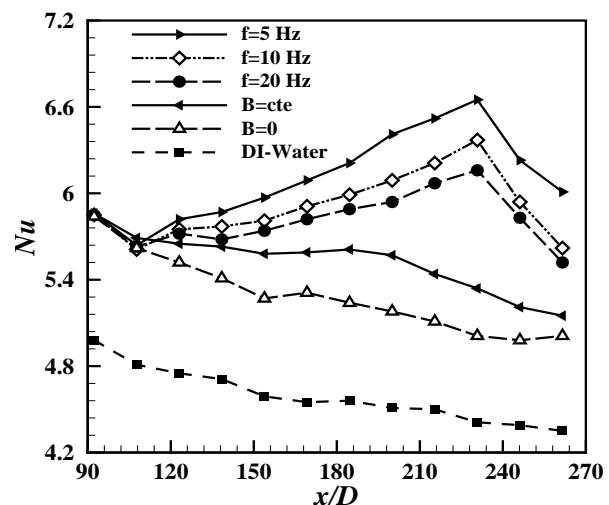


نمودار ۹) تغییرات عدد ناسلت تحت میدان در رینولدز ۱۱۴۲ و غلظت ۰/۳٪

عرضی نانوذرات مغناطیسی و همچنین کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی می‌شود که نهایتاً این عوامل منجر به افزایش انتقال حرارت خواهند شد. این استدلال این گونه تایید می‌شود که با عبور جریان فروفلوید در امتداد لوله که تحت میدان مغناطیسی دارد، کاهش بیشتری در ضخامت لایه مرزی حرارتی رخ می‌دهد و در نتیجه ضریب انتقال حرارت در محل قرارگیری آخرین الکترومغناطیس به ماکزیمم مقدار خودش می‌رسد و بعد از آن، روند افزایشی آن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، پس از قسمتی که میدان مغناطیسی اعمال می‌شود، نیروی ناشی از میدان بر نانوذرات قطع می‌شود و اثر میدان مغناطیسی بر ضخامت لایه مرزی حرارتی از بین می‌رود، در نتیجه ضخامت لایه مرزی حرارتی دوباره شروع به رشد کرده و این امر، دلیل کاهش در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بعد از قرارگیری آخرین الکترومغناطیس است.

از نمودارهای ۸-۶ می‌توان این نتیجه را نیز گرفت که با افزایش عدد رینولدز، تاثیر میدان مغناطیسی بر افزایش نرخ انتقال حرارت، کاهش پیدا می‌کند. برای مثال، بیشترین افزایش انتقال حرارت نسبت به فروفلوید که در حالت بدون میدان مغناطیسی قرار دارد، در عدد رینولدز ۵۷۱، ۱۵/۹٪ است، در حالی که این مقدار در عدد رینولدز ۱۷۱۳، به ۴/۵٪ خواهد رسید. دلیل این کاهش را بدین صورت می‌توان استنباط کرد که در رینولدزهای پایین، نانوذرات مغناطیسی با سرعت کمتری حرکت می‌کنند و در نتیجه، میدان مغناطیسی، زمان کافی برای اعمال نیروی مغناطیسی بر نانوذرات و جذب آنها به سمت دیواره را دارد، بنابراین اغتشاش لایه مرزی در رینولدزهای پایین بیشتر خواهد بود.

نمودارهای ۹-۱۱ بیانگر تغییرات عدد ناسلت فروفلوید تحت میدان مغناطیسی ثابت و متناوب برای فروفلوید با غلظت‌های ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹٪ و در عدد رینولدز ۱۱۴۲ هستند. با توجه به این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت با افزایش غلظت فروفلوید، تاثیر میدان مغناطیسی بر افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی بیشتر می‌شود. برای مثال، بیشترین افزایش انتقال حرارت نسبت به فروفلوید که در حالت بدون میدان مغناطیسی قرار دارد (B=0) در غلظت ۰/۳٪ برابر با ۵/۹٪ است، در حالی که این مقدار در غلظت ۰/۹٪ به ۱۳/۲٪ خواهد رسید. دلیل این افزایش را بدین صورت می‌توان استنباط کرد که در یک رینولدز ثابت، با افزایش تعداد نانوذرات مغناطیسی، برهم‌کنش بین آنها و لایه مرزی، بیشتر و موجب اغتشاش بیشتر در لایه مرزی خواهند شد.

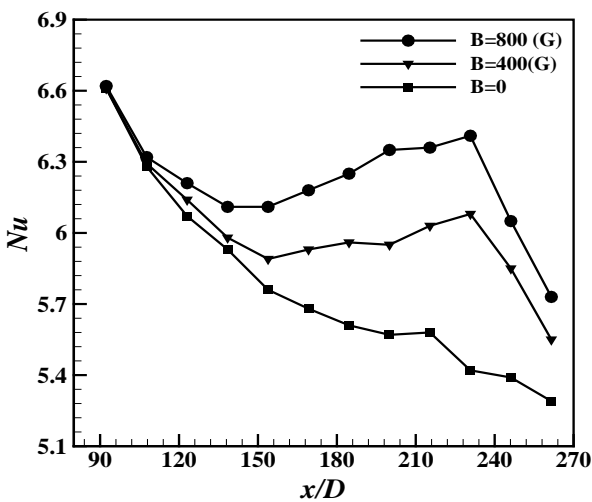


نمودار ۶) تغییرات عدد ناسلت تحت میدان در رینولدز ۵۷۱ و غلظت ۰/۶٪

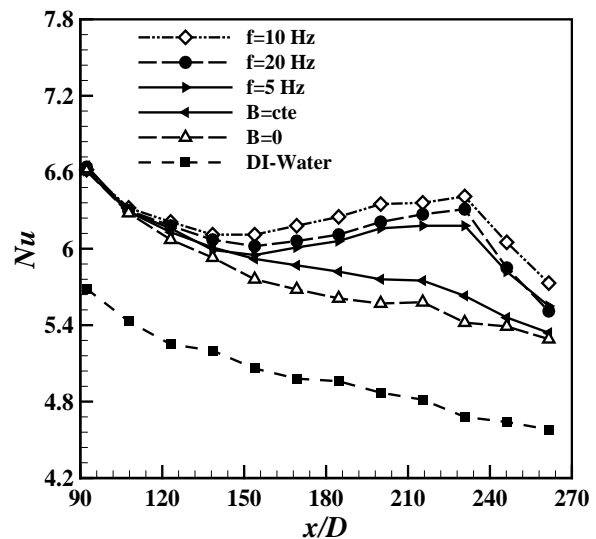
همچنین آنها افزایش نرخ انتقال حرارت تحت میدان متناوب را این گونه استدلال کردند که با قطع و وصل میدان مغناطیسی، نانوذرات عملاً نمی‌توانند در نزدیکی دیواره تجمع کنند و به همین دلیل، ویسکوزیته فروفلوید افزایش نیافته است یا افزایش ویسکوزیته قابل توجه نیست. از این رو، اثر منفی افزایش ویسکوزیته در مقایسه با اثر مثبت اغتشاش لایه مرزی مغلوب می‌شود. از طرف دیگر گوه‌رخواه و همکاران [28, 30] معتقدند تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت، انتقال نانوذرات به طرف دیواره و تجمع آنها در نزدیکی دیواره بر اثر نیروی مغناطیسی، باعث افزایش غلظت نانوسیال در این ناحیه، افزایش موضعی ضریب هدایت حرارتی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری می‌شود. از طرف دیگر، تجمع نانوذرات نزدیک دیواره همانند مانعی در برابر جریان فروفلوید عمل می‌کند و موجب اغتشاش در لایه مرزی حرارتی می‌شود که این عوامل منجر به افزایش انتقال حرارت تحت میدان مغناطیسی ثابت و همچنین موجب تغییر و اغتشاش در لایه مرزی حرارتی و شکل جریان و افزایش بیشتر انتقال حرارت خواهند شد. در حالی که در میدان‌های مغناطیسی با شدت بالاتر، افزایش ضریب هدایت حرارتی و کاهش ضخامت لایه مرزی، از دلایل اصلی برای افزایش نرخ انتقال حرارت هستند.

**۴-۳- بررسی شدت میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری**

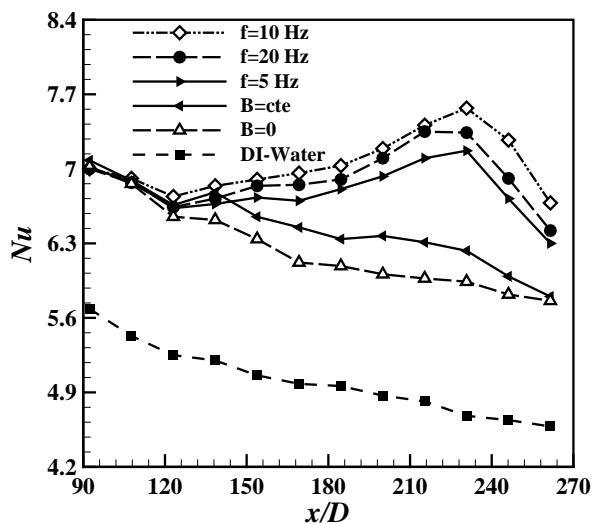
برای بررسی اثر شدت میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فروفلوید، میدان مغناطیسی متناوب با چگالی ۴۰۰ و ۸۰۰ گاوس در فرکانس ۱۰ هرتز به فروفلوید با غلظت ۰/۶٪ و عدد رینولدز ۱۱۴۲ اعمال شده است. نمودار ۱۲ نشان‌دهنده تغییرات عدد ناسلت برحسب پارامتر بی بعد ( $x/D$ ) برای فروفلوید در مقایسه با حالتی است که میدان مغناطیسی وجود ندارد ( $B=0$ ). همان‌طور که مشاهده می‌شود، با نصف شدن شدت میدان مغناطیسی، ماکزیمم افزایش عدد ناسلت از ۱۳/۸ به ۱۲/۱٪ کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار، کاهش نیروی مغناطیسی اعمال شده بر نانوذرات مغناطیسی و در نتیجه، تغییرات کمتر در ضخامت لایه مرزی حرارتی است. همان‌طور که از نمودار ۱۳ مشاهده می‌شود، استفاده از فروفلوید در مقایسه با آب باعث کاهش دمای سطح لوله می‌شود و همچنین با اعمال میدان مغناطیسی، دمای سطح در این ناحیه کاهش خواهد یافت، به طوری که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، کاهش دمای سطح نیز بیشتر شده است.



نمودار ۱۲) اثر شدت چگالی میدان مغناطیسی بر افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی در رینولدز ۱۱۴۲ و غلظت ۰/۶٪



نمودار ۱۰) تغییرات عدد ناسلت تحت میدان در رینولدز ۱۱۴۲ و غلظت ۰/۶٪



نمودار ۱۱) تغییرات عدد ناسلت تحت میدان در رینولدز ۱۱۴۲ و غلظت ۰/۹٪

گفتنی است در برخی از پژوهش‌ها اعمال میدان مغناطیسی ثابت، منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی شده یا دست کم تأثیر مثبتی نداشته است [25, 26, 35]. در حالی که در برخی دیگر از تحقیقات، اعمال این نوع میدان، منتج به افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی شده است [21, 27-30]. با بررسی این پژوهش‌ها به نظر می‌رسد سه عامل شامل ضریب هدایت حرارتی، ضخامت لایه مرزی و ویسکوزیته فروفلوید در افزایش یا کاهش نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی فروفلوید تحت میدان مغناطیسی ثابت موثرند. افزایش ضریب هدایت حرارتی ناشی از تجمع نانوذرات در نزدیکی دیواره و کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی، منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود، در حالی که افزایش ویسکوزیته فروفلوید بر اثر اعمال میدان ثابت و در نتیجه کاهش سرعت جریان سیال منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی خواهد شد. در این میان یاراحمدی و همکاران [26] معتقدند در مقادیری که شدت میدان مغناطیسی کم بوده، ویسکوزیته عامل غالب است و بنابراین انتقال حرارت تحت میدان مغناطیسی ثابت کاهش می‌یابد، در حالی که در میدان‌هایی با شدت بیشتر، ضریب هدایت حرارتی و ضخامت لایه مرزی، دو پارامتر برنده در افزایش نرخ انتقال حرارت محسوب می‌شوند.

**سهم نویسندگان:** سهیل امیددزیانی (نویسنده اول)، روش شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ ایمان خرابی (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۱۰٪)؛ سمیرا قره‌خانی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روش شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۱۰٪)؛ مهدی اشجعی (نویسنده چهارم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی (۱۰٪)؛ فرزانه شمیرانی (نویسنده پنجم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۱۰٪)؛ وحید زندیان (نویسنده ششم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۱۰٪).

**منابع مالی:** این پژوهش تحت حمایت شرکت ملی گاز ایران- شرکت پالایش گاز پارسیان انجام شده است.

**۶- پیوست: آنالیز عدم قطعیت**

عدم قطعیت داده‌های تجربی ممکن است بر اثر خطای اندازه‌گیری برخی پارامترها مانند شار حرارتی، ضریب هدایت حرارتی، دما و طول باشد. عدم اطمینان در مقادیر تجربی گزارش شده در پژوهش حاضر، به کمک روش *مفات* [36] تخمین زده شده‌اند. جدول‌های ۲ و ۳ بیانگر خطای پارامترهای مربوط به اندازه‌گیری عدد ناسلت و عدد رینولدز است و میزان تخمین عدم قطعیت برای آنها از روابط زیر به دست می‌آید:

$$Nu = \frac{VI}{\pi Lk(T_s - T_m)} = f(V, I, k, L, T_s, T_m)$$

$$u_{Nu} = f(u_V, u_I, u_k, u_L, u_{T_s}, u_{T_m})$$

$$u_{Nu} = \left[ \left( \frac{\partial Nu}{\partial V} u_V \right)^2 + \left( \frac{\partial Nu}{\partial I} u_I \right)^2 + \left( \frac{\partial Nu}{\partial k} u_k \right)^2 + \left( \frac{\partial Nu}{\partial L} u_L \right)^2 + \left( \frac{\partial Nu}{\partial T_s} u_{T_s} \right)^2 + \left( \frac{\partial Nu}{\partial T_m} u_{T_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{\partial Nu}{\partial V} = \frac{I}{\pi Lk(T_s - T_m)}; \frac{\partial Nu}{\partial I} = \frac{V}{\pi Lk(T_s - T_m)}$$

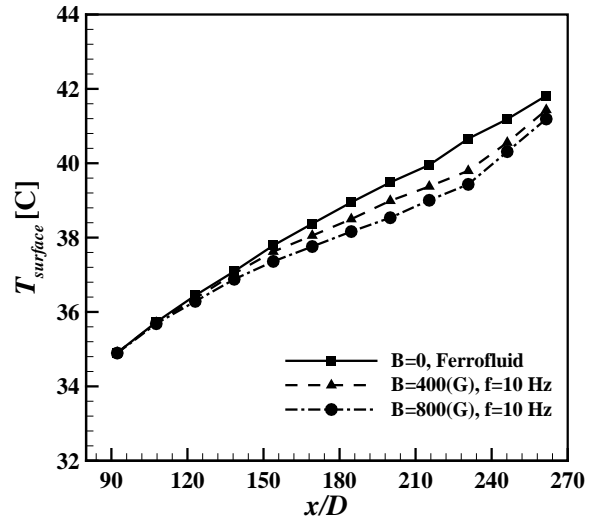
$$\frac{\partial Nu}{\partial k} = \frac{-VI}{\pi Lk^2(T_s - T_m)}; \frac{\partial Nu}{\partial L} = \frac{-VI}{\pi L^2k(T_s - T_m)}$$

$$\frac{\partial Nu}{\partial T_s} = \frac{-VI}{\pi Lk(T_s - T_m)^2}; \frac{\partial Nu}{\partial T_m} = \frac{VI}{\pi Lk(T_s - T_m)^2}$$

$$\frac{u_{Nu}}{Nu} = \left[ \left( \frac{u_V}{V} \right)^2 + \left( \frac{u_I}{I} \right)^2 + \left( \frac{u_k}{k} \right)^2 + \left( \frac{u_L}{L} \right)^2 + \left( \frac{u_{T_s}}{T_s - T_m} \right)^2 + \left( \frac{u_{T_m}}{T_s - T_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

جدول ۲) میزان خطای اندازه‌گیری پارامترها برای عدد ناسلت

| خطا   | واحد                             | پارامتر           |
|-------|----------------------------------|-------------------|
| ۰/۰۵  | Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> | ضریب هدایت حرارتی |
| ۰/۰۱  | آمپر                             | جریان             |
| ۰/۰۱  | ولت                              | ولتاژ             |
| ۰/۱   | °C                               | دما               |
| ۰/۰۰۱ | متر                              | طول               |



نمودار ۱۳) تاثیر شدت میدان مغناطیسی بر توزیع دمای سطح برای فروفلوئید با غلظت ۰/۱۶% و عدد رینولدز ۱۷۱۳

**۵- نتیجه‌گیری**

در غیاب میدان مغناطیسی، استفاد از نانوذرات مغناطیسی منجر به بهبود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی فروفلوئید می‌شود. همچنین تحت اعمال یک میدان مغناطیسی ثابت و متناوب، انتقال حرارت جابه‌جایی بهبود یافته به‌صورتی که این افزایش در حالتی که میدان از نوع نوسانی باشد، بیشتر است. گفتنی است این بهبود، در رینولدزهای پایین‌تر و غلظت‌های وزنی بالاتر بیشتر می‌شود. کاهش قدرت میدان مغناطیسی سبب کاهش تغییرات ضریب هدایت حرارتی و ضخامت لایه مرزی حرارتی می‌شود و در نتیجه، بهبود کمتری در انتقال حرارت را در پی دارد. انتقال حرارت تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد، ولی با میدان مغناطیسی متناوب، هم به عدد رینولدز و هم به فرکانس میدان وابسته است. در هر عدد رینولدز، مقدار بهینه‌ای برای فرکانس میدان وجود دارد که در آن، انتقال حرارت به بیشینه مقدار خود می‌رسد. فرکانس بهینه، وابسته به عدد رینولدز است و با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. همچنین فرکانس بهینه، مستقل از شدت میدان مغناطیسی است. انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت و متناوب، با افزایش غلظت نانوسیال و شدت میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان، مراتب سپاس و قدردانی خود را از شرکت ملی گاز ایران- شرکت پالایش گاز پارسیان بابت حمایت مالی از این پروژه اعلام می‌نمایند. همچنین نویسنده سوم لازم می‌داند کمال تشکر را از بنیاد ملی نخبگان به عمل آورد.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتوای علمی مقاله، حاصل فعالیت علمی نویسندگان و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

**تعارض منافع:** هیچ گونه تعارض منافی بین نویسندگان و حامی مالی (شرکت پالایش گاز پارسیان) وجود ندارد. لازم به ذکر است کلیه حقوق مادی و معنوی این مقاله (صرفاً محتوای مقاله و نه انتشار مقاله) برای دانشگاه شهیدبهشتی و نویسنده اول محفوظ است.

| پارامتر   | واحد              | خطا   |
|-----------|-------------------|-------|
| چگالی     | Kgm <sup>-3</sup> | ۰/۱   |
| سرعت      | ms <sup>-1</sup>  | ۰/۰۱  |
| قطر       | متر               | ۰/۰۱  |
| ویسکوزیته | Pa.s              | ۰/۰۰۱ |

|  |                |
|--|----------------|
| ویسکوزیته سینماتیک (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ) | θ              |
| چگالی (kgm <sup>-3</sup> )                           | ρ              |
| ضخامت لایه مرزی حرارتی (متر)                         | δ <sub>t</sub> |
| غلظت وزنی- حجمی (%)                                  | φ              |
| دوره تناوب میدان مغناطیسی متناوب (ثانیه)             | τ              |
| درصد افزایش نرخ انتقال حرارت (%)                     | η              |

زیرنویس‌ها

|                |     |
|----------------|-----|
| مقدار متوسط    | ave |
| فروفلوید       | ff  |
| شماره ترموکوپل | i   |
| بالک ورودی     | m.i |
| بالک خروجی     | m.o |
| ذره            | p   |
| سطح لوله       | s   |
| آب             | w   |

منابع

- 1- Liu MS, Lin MCC, Huang IT, Wang CC. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2005;32(9):1202-1210.
- 2- Liu MS, Lin MCC, Huang IT, Wang CC. Enhancement of thermal conductivity with CuO for nanofluids. Chemical Engineering Technology. 2006;29(1):72-77.
- 3- Koblinski P, Prasher R, Eapen J. Thermal conductance of nanofluids: Is the controversy over?. Journal of Nanoparticle Research. 2008;10(7):1089-1097.
- 4- Abareshi M, Goharshadi EK, Zebarjad SM, Khandan Fadafan H, Youssefi A. Fabrication, characterization and measurement of thermal conductivity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2010;322(24):3895-3901.
- 5- Sharma P, Baek IH, Cho T, Park S, Lee KB. Enhancement of thermal conductivity of ethylene glycol based silver nanofluids. Powder Technology. 2011;208(1):7-19.
- 6- Wen D, Lin G, Vafaei S, Zhang K. Review of nanofluids for heat transfer applications. Particuology. 2009;7(2):141-150.
- 7- Li Q, Xuan Y, Wang J. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. Experimental Thermal and Fluid Science. 2005;30(2):109-116.
- 8- Philip J, Shima PD, Raj B. Enhancement of thermal conductivity in magnetite based nanofluid due to chainlike structures. Applied Physics Letters. 2007;91(20):203108.
- 9- Wright B, Thomas D, Hong H, Groven L, Puszynski J, Duke E, et al. Magnetic field enhanced thermal conductivity in heat transfer nanofluids containing Ni coated single wall carbon nanotubes. Applied Physics Letters. 2007;91(17):173116.
- 10- Parekh K, Lee HS. Magnetic field induced enhancement in thermal conductivity of magnetite nanofluid. Journal of Applied Physics. 2010;107(9):09A310.
- 11- Gavili A, Zabihi F, Dallali Isfahani T, Sabbaghzadeh J. The thermal conductivity of water base ferrofluids under magnetic field. Experimental Thermal and Fluid Science. 2012;41:94-98.
- 12- Humnic G, Humnic A. Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011;54(19-20):4280-4287.
- 13- Aminfar H, Mohammadpourfard M, Ahangar Zonouzi S. Numerical study of the ferrofluid flow and heat

حال با توجه به رابطه ۹ برای عدد رینولدز، میزان تخمین عدم قطعیت از روابط زیر به دست می‌آید:

$$Re = \frac{4\rho Q}{\pi D \mu} = f(\rho, Q, D, \mu)$$

$$u_{Re} = f(u_{\rho}, u_Q, u_D, u_{\mu})$$

$$u_{Re} = \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial \rho} u_{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial Q} u_Q\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial D} u_D\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \mu} u_{\mu}\right)^2}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \rho} = \frac{4Q}{\pi D \mu}; \frac{\partial Re}{\partial Q} = \frac{4\rho}{\pi D \mu}; \frac{\partial Re}{\partial D} = \frac{-4\rho Q}{\pi D^2 \mu}; \frac{\partial Re}{\partial \mu} = \frac{-4\rho Q}{\pi D \mu^2}$$

$$\frac{u_{Re}}{Re} = \sqrt{\left(\frac{u_{\rho}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{u_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{u_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{u_{\mu}}{\mu}\right)^2}$$

از بین مقادیر به دست آمده برای عدد ناسلت و رینولدز در آزمایش‌های مختلف، بیشترین عدم قطعیت برای فروفلوید در غلظت ۰/۹٪، عدد رینولدز ۱۱۴۲ و تحت میدان متناوب در فرکانس ۱۰هرتز، برای عدد ناسلت و رینولدز به ترتیب ۳/۷ و ۴/۲ به دست آمده است.

۷- پی‌نوشت

علام

|                |   |
|----------------|---|
| A              | مساحت جانبی لوله (m <sup>2</sup> )                              |
| B              | چگالی شار مغناطیسی (G)  |
| C <sub>p</sub> | گرمای ویژه (Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )                 |
| D              | قطر لوله (میلی‌متر)   |
| f              | فرکانس میدان مغناطیسی متناوب (هرتز)                             |
| h              | ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ) |
| I              | شدت جریان (آمپر)  |
| k              | ضریب هدایت حرارتی (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )           |
| L              | طول لوله (متر)  |
| m              | دبی جرمی سیال (kgs <sup>-1</sup> )                              |
| Nu             | عدد ناسلت   |
| Pr             | عدد پرناتل  |
| Re             | عدد رینولدز   |
| q              | انتقال حرارت (وات)  |
| q''            | شار حرارتی (Wm <sup>-2</sup> )                                  |
| T              | دما (°C)  |
| u              | عدم قطعیت   |
| U              | سرعت سیال (ms <sup>-1</sup> )                                   |
| V              | ولتاژ جریان (ولت)   |
| x              | فاصله محوری از ورودی لوله (متر)                                 |

علام یونانی

|   |  |
|---|--|
| μ | ویسکوزیته دینامیک (kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ) |
|---|--|

- convection heat transfer and friction factor in a tube with  $Fe_3O_4$  magnetic nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012;37:65-71.
- 25- Ghofrani A, Dibaei MH, Hakim Sima A, Shafii MB. Experimental investigation on laminar forced convection heat transfer of ferrofluids under an alternating magnetic field. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013;49:193-200.
- 26- Yarahmadi M, Moazami Goudarzi H, Shafii MB. Experimental investigation into laminar forced convective heat transfer of ferrofluids under constant and oscillating magnetic field with different magnetic field arrangements and oscillation modes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015;68:601-611.
- 27- Azizian R, Doroodchi E, Mc Krell T, Buongiorno J, Hu LW, Moghtaderi B. Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer of magnetite nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;68:94-109.
- 28- Goharkhah M, Salarian A, Ashjaee M, Shahabadi M. Convective heat transfer characteristics of magnetite nanofluid under the influence of constant and alternating magnetic field. *Powder Technology*. 2015;274:258-267.
- 29- Shahsavari A, Saghafian M, Salimpour MR, Shafii MB. Experimental investigation on laminar forced convective heat transfer of ferrofluid loaded with carbon nanotubes under constant and alternating magnetic fields. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016;76:1-11.
- 30- Goharkhah M, Ashjaee M, Shahabadi M. Experimental investigation on convective heat transfer and hydrodynamic characteristics of magnetite nanofluid under the influence of an alternating magnetic field. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;99:113-124.
- 31- Hummers Jr WS, Offeman RE. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*. 1958;80(6):1339-1339.
- 32- Park S, Ruoff RS. Chemical methods for the production of graphenes. *Nature Nanotechnology*. 2009;4:217-224.
- 33- Brinkman HC. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*. 1952;20(4):571.
- 34- Bejan A, Kraus AD. *Heat transfer handbook*. Bejan A, Kraus AD, editors. Hoboken: John Wiley & Sons; 2003.
- 35- Li Q, Xuan Y. Experimental investigation on heat transfer characteristics of magnetic fluid flow around a fine wire under the influence of an external magnetic field. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2009;33(4):591-596.
- 36- Moffat RJ. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1988;1(1):3-17.
- transfer through a rectangular duct in the presence of a non-uniform transverse magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013;327:31-42.
- 14- Yarmand H, Gharehkhani S, Newaz Kazi S, Sadeghinezhad E, Safaei MR. Numerical investigation of heat transfer enhancement in a rectangular heated pipe for turbulent nanofluid. *The Scientific World Journal*. 2014;2014:369593.
- 15- Malvandi A, Domiri Ganji D. Effects of nanoparticle migration and asymmetric heating on magnetohydrodynamic forced convection of alumina/water nanofluid in microchannels. *European Journal of Mechanics B Fluids*. 2015;52:169-184.
- 16- Malvandi A, Safaei MR, Kaffash MH, Domiri Ganji D. MHD mixed convection in a vertical annulus filled with  $Al_2O_3$ -water nanofluid considering nanoparticle migration. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;382:296-306.
- 17- Xuan Y, Li Q. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. *Journal of Heat Transfer*. 2003;125(1):151-155.
- 18- Wen D, Ding Y. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004;47(24):5181-5188.
- 19- Jung JY, Oh HS, Kwak HY. Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 5-10, 2006, Chicago, Illinois, USA. New York: ASME; 2006.
- 20- Duangthongsuk W, Wongwises S. Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of  $TiO_2$ -water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52(7-8):2059-2067.
- 21- Lajvardi M, Moghimi Rad J, Hadi I, Gavili A, Dallali Isfahani T, Zabihi F, et al. Experimental investigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic field effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010;322(21):3508-3513.
- 22- Motozawa M, Chang J, Sawada T, Kawaguchi Y. Effect of magnetic field on heat transfer in rectangular duct flow of a magnetic fluid. *Physics Procedia*. 2010;9:190-193.
- 23- Zamzamin AH, Nasser Oskouie Sh, Doosthoseini A, Joneidi AA, Pazouki M. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of  $Al_2O_3/EG$  and  $CuO/EG$  in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011;35(3):495-502.
- 24- Syam Sundar L, Naik MT, Sharma KV, Singh MK, Reddy TCS. Experimental investigation of forced