

Convection Heat transfer Fe_3O_4 /Water in a Square microchannel Under Uniform Heat Flux and Magnetic Field

B. Nilforooshan Dardashti, M. M. Shahmardan*, M. Nazari

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ABSTRACT: This study aimed to investigate the heat transfer of water/ Fe_3O_4 nanofluid in a square cross-sectional channel with dimensions of $80 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ under the influence of a uniform heat flux perpendicular to the laminar flow of ferrofluid in the presence of a magnetic field. Firstly, the production of ferrofluid with concentrations of 0.5 vol.% and 1 vol.%, their quality, and the quality of the production method was investigated. The results of zeta potential and vibrating-sample magnetometer tests show the good quality and stability of the produced ferrofluid. The thermophysical properties of the made ferrofluid are compared and evaluated with existing experimental correlations. The heat transfer of the produced ferrofluids under the influence of heat fluxes of 134-546 Watts is investigated in the absence of an external magnetic field. Then, the effect of the external magnetic field on the heat transfer at 0.5 vol.%, under the influence of a total heat flux of 1258.2 Watts is investigated. The magnitude of increase of heat transfer coefficient compared to pure water, without external field, for ferrofluid with 1 vol.%, under total heat fluxes of 134, 545, and 321.3 Watts, are 30%, 48%, and 38% respectively. At a heat flux of 1258.2 Watts, the heat transfer coefficient in the presence of an external magnetic field increases by 3.16% at 0.5 vol.% compared to the absence of a magnetic field.

Review History:

Received: Aug. 07, 2020

Revised: Dec. 22, 2020

Accepted: Apr. 10, 2021

Available Online: May, 09, 2021

Keywords:

Magnetic field

Laminar flow

Heat transfer

Nusselt number

Ferrofluid

1- Introduction

A kind of nanofluids so-called ferrofluids exists that includes ferromagnetic nanoparticles in the base fluid. Ferrofluids have notable heat transfer applications because of their controllable thermo-magnetic heat transfer by an external magnetic field. Kikura et al. [1] and Sawada et al. [2] directed experimental research in a concentric horizontal cubic and annular chamber under the influence of a magnetic field. The permanent magnet was placed in different parts of the chamber, and the consequence of the magnetic gradient on the ferrofluid heat transfer was investigated. The heat transfer of combined natural and magnetic convection through a ferrofluid in a cubic chamber was numerically simulated by Snyder et al. [3], and the outcomes indicated good agreement with the experiment. Zablockis et al. [4] numerically studied the thermal-magnetic convection produced by a non-uniform constant magnetic field of a coil in a hot cylinder. Despite a noteworthy number of researches in this domain, researchers believe that a lack of broad investigations exists on square cross-sectional channels, and the accurate behavioral pattern of this type of fluid is not yet available.

In the present study as an innovation, the experimental investigation of convection coefficient and the Nu number of ferrofluid Fe_3O_4 /water under a constant heat flux was

done with/without applying an external magnetic field in a channel with a square cross-section in the laminar flow regime. The impact of various vol.% and the location of field application were other cases of study. It should be noted that the geometry of the present problem, which is one of the innovations of this research, is used in heat exchangers. The results showed an increment in heat transfer via employing a magnetic field. This approach may pave the way for the next generation of high-efficiency heat transfer engineering.

2- Methodology

2- 1- Apparatus and materials

Set-up includes ferrofluids, pump, a channel which has a square cross-section, flow meter, radiator, 6 temperature sensors, refractory mica sheets, magnets, 2 pressure sensors, autotransformer, and the tape heater which was wrapped around the channel. Adam cards were used to collect data, reservoir tank.

At a distance of 0.7 meters from the channel inlet, the fully-developed happens. Though, the distance of both origin of the heater and the location of the first thermal sensor ($x=0 \text{ cm}$) from the outset of the channel is 1 meter. Fig. 1 shows the set-up circuit and the distance between the sensors and their position relative to the channel.

*Corresponding author's email: mmmshahmardan@shahroodut.ac.ir



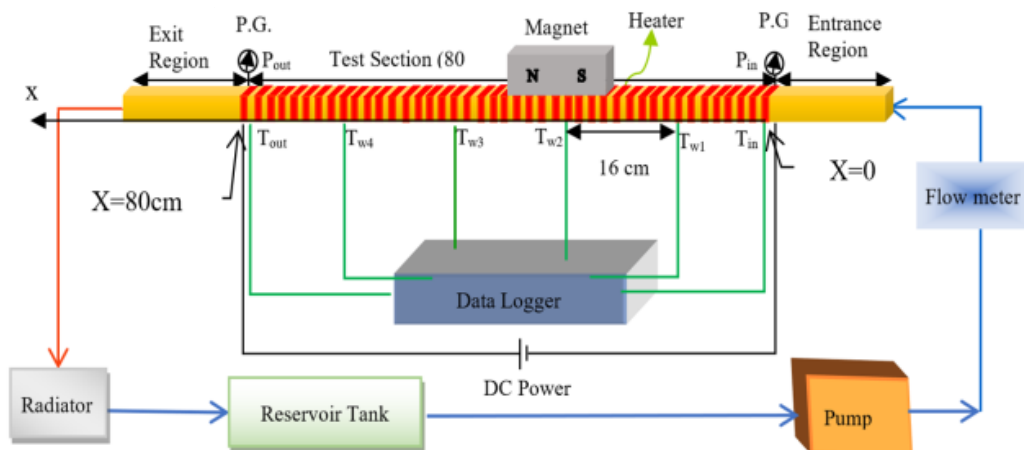


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

The result of the zeta potential test is 62.1 mV, which is much higher than 30 mV and, has good stability [5]. Thus, it is observed that the method proposed by Berger et al. [6] is a very suitable method for the production of water/Fe₃O₄ ferrofluid.

In the Vibrating-Sample Magnetometer (VSM) test, the amount of magnetic saturation of water/Fe₃O₄ with 1 vol.% was 2 emu/g and for ferrofluid with 0.5 vol.%, 0.6 emu/g was obtained. The hydrodynamic diameter of the Channel is 0.007. Despite the equality in volumetric flow rate and constant velocity of the working fluids, slight differences occur in Reynolds numbers due to differences in their density and viscosity. Therefore, instead of the Reynolds value, a volume flow is reported that is constant in all tests.

2- 2- Validation

In order to confirm the validity of the tests, water was used as a working fluid when the external field was zero. Bejan et al. [7] showed that according to these conditions the Nu number is 3.6 and it depends only on the geometry and dimensions of the channel. This value was found to be 3.56 for the first five points of the channel and 3.52 for the endpoint of the channel, which is very close to 3.6 (Fig. 3).

3- Results and Discussion

3- 1- Convection heat transfer coefficient

In the case of $B=0$ and according to $\frac{h}{k} = \frac{Nu}{D}$, when the values of hydrodynamic diameter and Nusselt number are constant the ratio of $\frac{h}{k}$ should be constant [7]. So, the h will increase as long as the k increases, $\frac{h}{k}$, (Fig. 2). Fig. 2 shows that the local convection coefficient for pure water and ferrofluid 0.5 vol.% are approximately constant versus its slight changes in ferrofluid of 1 vol.%. Under the heat flux of 1258.2 Watts and When the permanent magnet place at $x = 80, 32,$ and 0 cm, the convection coefficient of ferrofluid with 0.5 vol.% show in Table 1. In all cases, the magnet place in the developed area. Where the magnets place, the value of the convection coefficient has increased. When the magnet place at the beginning of the test section, it increases by +2.8%. At this heat flux, when the magnet place at the end of the test section, the convection coefficient increases

by 3.16%. When the magnet place at $x=32$ cm, the convection coefficient rises by 2.67%.

In the heat flux of 545 Watts, the maximum increase in convection coefficient relative to pure water is for the ferrofluid 1 vol.% is 48%. This value for ferrofluid of 0.5 vol.% in the flux of 134.4 Watts is 15.8%.

3- 2- Nu Number

As can be seen in Fig. 3, the test results show accepted the agreement with 3.6, [7] that indicates the good accuracy of the experiments performed .

4- Uncertainty

Without the presence of an external field, the maximum uncertainty of the convection coefficient related to both ferrofluids is 0.017, and for the Nusselt number is related to the ferrofluid with 0.5 vol% is 0.011. In the presence of an external magnetic field, the maximum convection uncertainty is 0.0032. These values indicate the high accuracy of the tests performed.

5- Conclusion

- In the absence of an external magnetic field, the use of 0.5 vol.% and 1 vol.% ferrofluid in comparison with water causes 15.8% and 30% growth in convection heat transfer respectively. For ferrofluid 1 vol.%, under the heat flux of 545 Watts, an increase of 48%, and under the heat flux of 321.3 Watts, 38% growth was observed.

Table 1. Ferrofluid local convection coefficient with 0.5 vol.% under the constant magnetic field and heat flux of 1258.2 Watts in channel different positions

Magnet positions (cm)	Local convection coefficient at magnet position (W/m ² k)	
	Without magnetic field	With magnetic field
0	358.4 ± 0.0032	368.74 ± 0.0032
32	358.42 ± 0.01737	368.00 ± 0.01737
80	358.4 ± 0.0032	369.76 ± 0.0032

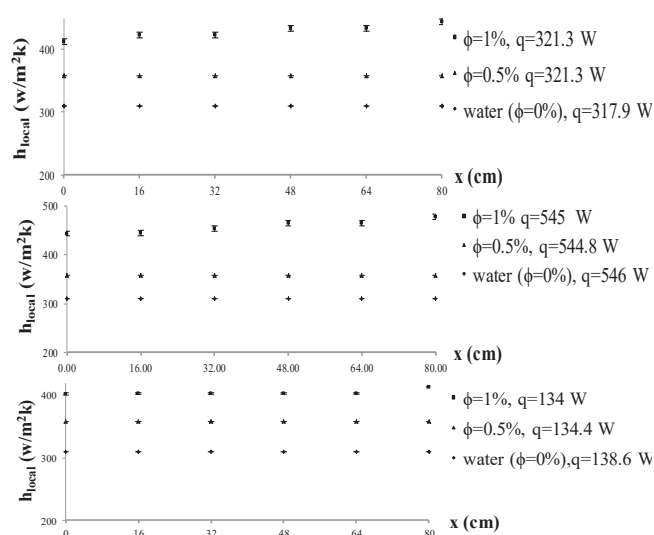


Fig. 2. Local convection coefficient in samples, 500 ml/min, without applying a magnetic field, at the thermal fully developed region at thermal fluxes: a) 317.9 and 321.3 Watts b) 545, 544.8 and 546 Watts c) 134, 134.4, and 138.6 Watts

Experiments performed.

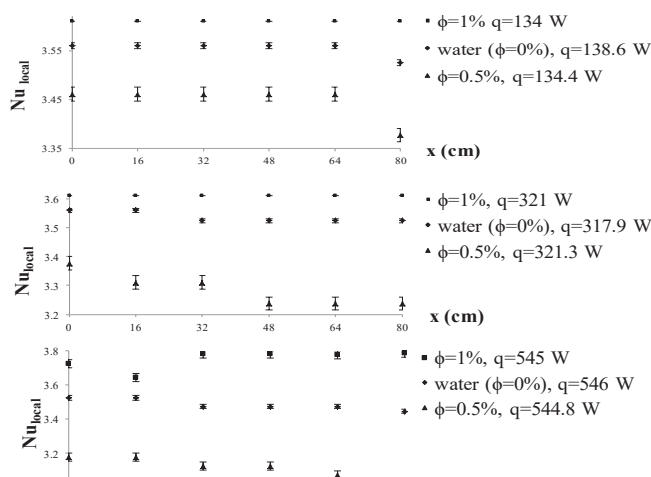


Fig. 3. Local Nusselt number in different fluids, flow rate 500 ml/min and heat fluxes a) 134, 134.4, and 138.6 Watts b) 317.9 and 321.3 Watts c) 544.8, 545 and 546 Watts, without External magnetic fieldM

- At a heat flux of 1258.2 Watts, when the magnet place at $x = 0$ cm, the convection coefficient increases by 2.8%. When the magnet place at $x = 80$ cm, the convection coefficient increases by 3.16%, and when the magnet place at $x = 32$ cm, the convection coefficient increases by 2.67%. When the fluid moves away from the location of the magnet along the channel, the convection coefficient decreases to 358.42 . These results confirm the positive effect of the magnetic field on local heat transfer within the test conditions.


- The zeta potential test result is 62.1 mV, which is much higher than 30 mV (the proper ferrofluid stability limit). For this reason, ferrofluid produced by the Berger method [6] possesses pretty good stability.

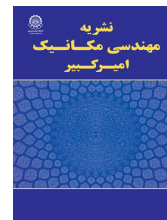
6- References

[1] H. Kikura, T. Sawada, T. Tanahashi, Natural convection of a magnetic fluid in a cubic enclosure, *Journal of Magnetism and Magnetic materials*, 122(1-3) (1993) 315-318.
 [2] T. Sawada, H. Kikura, A. Saito, T. Tanahashi, Natural convection of a magnetic fluid in concentric horizontal

annuli under nonuniform magnetic fields, *Experimental thermal and fluid science*, 7(3) (1993) 212-220.

[3] S.M. Snyder, T. Cader, B.A. Finlayson, Finite element model of magnetoconvection of a ferrofluid, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 262(2) (2003) 269-279.
 [4] D. Zablockis, V. Frishfelds, E. Blums, Numerical investigation of thermomagnetic convection in a heated cylinder under the magnetic field of a solenoid, *Journal of physics: condensed matter*, 20(20) (2008) 204134.
 [5] T. Lee, J.H. Lee, Y.H. Jeong, Flow boiling critical heat flux characteristics of magnetic nanofluid at atmospheric pressure and low mass flux conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56(1-2) (2013) 101-106.
 [6] P. Berger, N.B. Adelman, K.J. Beckman, D.J. Campbell, A.B. Ellis, G.C. Lisensky, Preparation and properties of an aqueous ferrofluid, *Journal of Chemical Education*, 76(7) (1999) 943.
 [7] A. Bejan, A.D. Kraus, *Heat transfer handbook*, John Wiley & Sons, 2003.

<p>HOW TO CITE THIS ARTICLE B. Nilforooshan Dardashti, M. M. Shahmardan, M. Nazari, <i>Convection Heat transfer Fe₃O₄ / Water in a Square microchannel Under Uniform Heat Flux and Magnetic Field, Amirkabir J. Mech Eng., 53(9) (2021) 1157-1160.</i> DOI:10.22060/mej.2021.18841.6901</p>	
---	---



انتقال حرارت جابجایی آب / Fe_3O_4 در یک ریزکانال مربعی تحت شار حرارتی و میدان مغناطیسی یکنواخت

بهنام نیلفروشان دردشتی، محمدمحسن شاهمردان*، محسن نظری

دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۰۲
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹

کلمات کلیدی:

میدان مغناطیسی
جریان آرام
انتقال حرارت
عدد ناسلت
فروسیال

خلاصه: در این مقاله به بررسی انتقال حرارت جابجایی نانو سیال آب / Fe_3O_4 در کانال با سطح مقطع مربعی با ابعاد $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ تحت تأثیر شار حرارتی یکنواخت در جریان آرام فروسیال در حضور میدان مغناطیسی پرداخته می‌شود. ابتدا به تولید فروسیال با درصد‌های حجمی ۵٪ و ۱٪، بررسی کیفیت فروسیال و روش تولیدی پرداخته می‌شود. نتایج آزمون‌های پتانسیل زتا و اشباع مغناطیسی فروسیال نشان از کیفیت و پایداری فروسیال تولیدی دارد. خواص ترمو فیزیکی فروسیال ساخته شده با روابط تجربی موجود مقایسه و ارزیابی می‌شوند. انتقال حرارت جابجایی فروسیال تولیدی تحت تأثیر شارهای حرارتی کل ۵۴۶-۱۳۴ وات، بدون حضور میدان مغناطیسی خارجی بررسی و سپس تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بر انتقال حرارت فروسیال با درصد حجمی ۵٪، تحت تأثیر شار حرارتی کل ۱۲۵۸/۲ وات مطالعه می‌شود. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به آب خالص، بدون وجود میدان خارجی، برای فروسیال با درصد حجمی ۱٪، تحت شار حرارتی کل ۱۳۴ وات، معادل ۳۰٪، تحت شار حرارتی کل ۵۴۵ وات، معادل ۴۸٪، تحت شار حرارتی کل ۳۲۱/۳ وات، معادل ۳۸٪ می‌باشند. در شار حرارتی ۱۲۵۸/۲ وات و برای فروسیال با غلظت ۵٪، ضریب انتقال حرارت جابجایی در حضور میدان مغناطیسی خارجی نسبت به حالت عدم وجود میدان ۳/۱۶٪ رشد دارد.

۱- مقدمه

با توزیع نانو ذرات در سیال پایه نانو سیال حاصل می‌شود که نسل جدیدی از سیالات با کارایی زیاد در کاربردهای صنعتی می‌باشند. به عبارت دیگر مفهوم نانو سیال، سوسپانسیون‌های حاوی ذرات نانو، مواد فلزی و غیر فلزی را شامل می‌شود. نانوسیالات از نظر ابعاد ذرات، جنس ذرات، شکل ذرات و سیال پایه متفاوت هستند. به لحاظ ابعاد ذرات مورد استفاده در نانو سیالات از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر است. جنس این ذرات از ذرات غیر فلزی، فلزی و یا اکسید فلزی مانند نقره^۲، مس^۳، اکسید مس^۴، اکسید آلومینیوم^۵ و... هستند. از مهمترین نانوسیالات بیولوژیکی موجود در طبیعت می‌توان از خون نام برد. در استفاده از سیالات مرسوم اشکالاتی نظیر سائیدگی^۶، انسداد لوله‌ها^۷، افزایش

افت فشار در مجرای سیال^۸ و رسوب یا ته نشینی ذرات^۹ وجود دارد همین امر سبب شد تا محققان به نانو سیالات روی آوردند. هدایت گرمایی بالا در نانو سیالات عموماً باعث زیاد بودن نرخ انتقال حرارت در آنها است. نانوسیالات با هدف افزایش هدایت گرمایی و بهبود عملکرد انتقال حرارت، بوسیله‌ی پخش و انتشار نانو ذرات در سیالات پایه ناقل گرما، ساخته می‌شوند. نانوسیالات در محیط‌ها و شرایط مختلف دارای پتانسیل‌های بسیار زیادی هستند که با توجه به رشد بسیار زیاد کاربرد آنها در صنایع میکروالکترونیک، روان کننده‌ها، سیستم‌های حرارتی، روغن موتورها و سایر فناوری‌ها، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در حقیقت، ارائه مقالات بسیار در طول دهه گذشته در مورد تهیه، توصیف [۴-۱] و خصوصیات حرارتی و فیزیکی [۸-۵] به تنهایی تأثیر عظیم نانوذرات را در تغییر فرایندهای مختلف مهندسی نشان می‌دهد. مواد مختلفی به عنوان گزینه‌های ممکن برای افزایش انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۹-۱۲].

برای بررسی انتقال حرارت در نانوسیال دو نگاه کلی وجود دارد. در

- 1-Suspension
- 2-Silve
- 3-Cu
- 4-CuO
- 5- Al₂O
- 6-Erosion
- 7-Fouling

8-Pressure drop of the flow channel

9- Sedimentation

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mmshahmardan@shahroodut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



دیدگاه اول نانوذرات و سیال پایه، به عنوان یک سیال همگن فرض شده و نانوذرات اجازه حرکت نسبت به سیال پایه را ندارند. در این نگاه، تأثیر تغییرات خواص ترموفیزیکی در اثر وجود نانوذرات بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شرایط معادلات حاکمه همان روابط حاکم بر سیال معمولی هستند.

در دومین حالت، به نانوسیال به صورت سیالی دوفازی (مایع و جامد) نگاه می‌شود در این صورت در اثر نیروهای وارده امکان لغزش نانوذرات نسبت به سیال پایه وجود دارد. از طرفی، افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت جابجایی در نانوسیال‌ها مشاهده می‌شود [۱۳]. کوزنتسوف^۱ و نیلد [۱۴] اثرات انتقال جرم بر مکانیزم‌های انتقال حرارت را مهم دانسته بر این اساس، انتقال حرارت نانوسیالات در لایه مرزی را بررسی نموده و نشان دادند که نانوذرات انرژی را در اثر مهاجرت خود در سیال منتقل می‌نمایند و این نوع انتقال انرژی را در لایه مرزی بسیار مؤثر گزارش کردند. پژوهش دیگری که توسط به‌سرشت و همکاران [۱۵] انجام شد، نشان داد که در مطالعه‌های پیشین در خصوص اثر مهاجرت نانوذرات، محدوده اعداد بی‌بعد به درستی انتخاب نشده است [۱۴ و ۱۶]. بدین ترتیب نشان دادند که با توجه به محدوده صحیح اعداد بی‌بعد، انتقال حرارت در اثر مهاجرت نانوذرات چندان پر اهمیت نیست. نقره‌آبادی و همکاران [۱۷] در پژوهشی دیگر نشان دادند که اگرچه مهاجرت نانوذرات تأثیر چندان بر انتقال حرارت ندارد ولی در عین حال لغزش نانوذرات در سیال پایه ایجاد ناهمگونی می‌کند. این ناهمگونی سبب ایجاد تغییر موضعی خواص نانوسیال شده و بدین ترتیب بر انتقال حرارت جابجایی در نانوسیالات تأثیر می‌گذارد. همانطور که ملاحظه می‌شود پژوهش‌های پیشین گاه‌ها تا نقض نتایج یکدیگر پیش می‌روند. از همین رو و برای درک عمیقتر انتقال حرارت در نانوسیالات نیاز به انجام آزمایش‌های بسیاری است.

حرکت براونی ذرات، لایه‌سازی مایع در سطح مشترک آن با فاز جامد، انتقال گرما توسط فونون‌ها و تشکیل خوشه از مواردیست که کیبلینسکی^۲ و همکاران [۱۸] اعتقاد دارند بر مکانیزم هدایت حرارتی مؤثر است. تشکیل خوشه به دلیل اجتماع ذرات منفرد می‌باشد. این موضوع را از چند زاویه می‌توان مورد بررسی قرار داد. بدین ترتیب که بر پایه یک سری از آزمایش‌ها، خوشه‌ها مسیری را با مقاومت حرارتی کمتر برای عبور گرما ایجاد می‌کنند. در حالی که تولید توده‌های بزرگ، همگنی سوسپانسیون را از بین برده و با ایجاد نواحی خالی از ذرات نانو در سیال

پایه، سبب افزایش مقاومت و کاهش انتقال حرارت می‌شوند [۱۹]. در این میان دسته‌ای از این نوع سیالات که از سوسپانسیون نانوذرات فرومغناطیس در سیال پایه تشکیل شده وجود دارند که فروسیال^۳ یا سیال مغناطیسی^۴ نامیده می‌شوند. به دلیل خواص ذاتی آنها، از جمله خاصیت بالا بودن ماندگاری مغناطیسی، تأثیرپذیری از میدان مغناطیسی و هدایت حرارتی بالاتر نسبت به دیگر مواد، مورد توجه ویژه محققین هستند. ذرات به کار رفته در این نوع از سیالات به طور معمول دارای قطر ۱۰ نانومتر هستند که برای حفظ حالت تعلیق پایدار با لایه‌های سورفاکتانت پوشش داده می‌شوند. با این حال، برخی از ذرات ممکن است به دلیل نیروهای واندروالس و فعل و انفعالات دو قطبی، با یکدیگر تجمع شوند. در غیاب یک منبع مغناطیسی اعمالی خارجی، ذرات به صورت تصادفی جهت یابی می‌شوند و سیال فاقد مغناطیدگی خالص است. با این حال، برای شدت میدان مغناطیسی معمولی، دو قطبی‌ها با یک میدان مغناطیسی خارجی مرتب می‌شوند [۲۰]. فروسیالات از پتانسیل قابل توجهی برای کاربردهای انتقال گرما برخوردار هستند زیرا انتقال حرارت ترمو-مغناطیسی آن‌ها را می‌توان با تغییر در خصوصیات فروسیال، توزیع و شدت میدان مغناطیسی و همچنین توزیع دما کنترل کرد. برخی تحقیقات نظری و تجربی در مورد انتقال حرارت فروسیال در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت و غیر یکنواخت وجود دارد. کراکوف و نیکیفوروف [۲۱] تأثیر جهت گیری گرادیان دما و میدان مغناطیسی یکنواخت را بر روی همرفت طبیعی گرما مغناطیسی در یک حفره مربع مطالعه کردند. مطالعه تجربی همرفت طبیعی در یک محفظه مربعی انجام شده توسط یاماگوچی [۲۲ و ۲۳] و افزایش انتقال حرارت مشاهده شده با افزایش عدد مغناطیسی رایلی و شبیه سازی عددی انجام شده توسط گاولی و همکاران [۲۴] توافق خوبی نشان دادند. کیکورا و همکاران [۲۵] و سوادا و همکاران [۲۶] در محفظه مکعبی و حلقوی افقی متحد‌المرکز تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی متغیر، تحقیقاتی تجربی انجام دادند. آهنربای دائمی در قسمتهای مختلف محفظه قرار داده شده و تأثیر گرادیان مغناطیسی بر انتقال حرارت فروسیال مورد بررسی قرار گرفت. انتقال حرارت همرفت طبیعی و مغناطیسی ترکیبی از طریق یک فروسیال در محفظه مکعب توسط سیندر و همکاران [۲۷] به صورت عددی شبیه سازی و نتایج توافق خوبی با آزمایش نشان داد. زابلوکیس و همکاران [۲۸] همرفت حرارتی-مغناطیسی تولید شده توسط یک میدان مغناطیسی ثابت غیر یکنواخت یک سیم پیچ در یک استوانه گرم را بشکل عددی مورد بررسی قرار دادند

3 Ferrofluid
4 Magnetic fluid

1-Kuznetsov
2-Kebblinski

انتهای بخش تحت آزمون، اتوترانس تکفاز^۵ با مشخصات: ولتاژ ورودی ۲۲۰ و خروجی ۳۲۰-۰ ولت، جریان متناوب قابل تنظیم تا حد ۱ ولت، تک فاز و حداکثر جریان خروجی ۲۰ آمپر می‌باشد. از دستگاه‌های دیگر مورد استفاده در این آزمون‌ها می‌توان به دوربین ترمووژن محصول کمپانی نک آویو^۶ ژاپن جهت ترموگرافی با دکتور دارای رزولوشن استاندارد ۳۲۰×۲۴۰ پیکسل و دارای قدرت تفکیک (حساسیت حرارتی) ۰/۰۳ درجه سانتی‌گراد، آمپر متر چنگکی^۷ ۳۲۸۰-۱۰ ساخت کمپانی هیوکی^۸، دستگاه تراسونیک هموژنایزر^۹ محصول شرکت کیوسونیکا^{۱۰} با توان مصرفی ۷۰۰ وات و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و ۱۰ عدد آهنربای نئودیمیم^{۱۱} با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ میلی‌متر و با میدان مغناطیسی تولیدی ۲۹۲۸G نام برد. برای جمع آوری داده‌ها از کارت‌های آدام^{۱۲} و برای تولید شار حرارتی یکنواخت از هیتری نواری شکل ۱ الف. که با فواصل کم به دور کانال پیچیده شده استفاده شد. به این ترتیب هر ۴ وجه کانال تحت شاری یکنواخت و عمود بر جهت جریان سیال (شکل ۲ د) قرار گرفت. طول هیتر نواری پیچیده شده بدور کانال، ۴ متر بود. در پیچیدن این نوار بدور کانال چندین موضوع حائز اهمیت بود؛ اول آنکه جهت جلوگیری از اتصال کوتاه نوار هیتر می‌بایست از عایقی الکتریکی که مقاومت حرارتی کمی داشته باشد استفاده گردد. از همین رو از کاغذ ورق‌های میکا نسوز از مسکویت^{۱۳} جهت ایجاد عایقی الکتریکی استفاده گردید. اتصال سنسور به کانال در میان هیتر پیچیده شده مسئله دوم در استفاده از این نوع هیتر بود. جهت ایجاد فضای اتصال سنسور به کانال در فواصل ۱۶ سانتی متری (فاصله سنسورها)، در گام هیتر به یکباره تغییر داده شد (شکل ۱).

برای حفظ یکنواختی شار حرارتی، فضای در نظر گرفته شده جهت اتصال سنسور مابین گام‌های هیتر بسیار کم اختیار شد. با توجه به این فضای کوچک، نحوه اتصال سنسورها به کانال سه چالش را به وجود می‌آورد:

الف) محکم کردن سنسورها در محل خود تا احیاناً در هنگام پیچیدن عایق به دور کانال جابجا نشده به هیتر متصل نگردند و بدین ترتیب جریان الکتریکی را از خود عبور نداده و نیز دمای هیتر را مستقیماً دریافت نکنند.

ب) اتصال مستقیم و بی واسطه سنسور به جداره کانال تا دمای کانال

از طرف دیگر تعدادی از محققین پژوهش‌های خود را بر مسیرهای با سطح مقطع غیرمربعی متمرکز کرده‌اند [۲۹-۳۴] با این حال علیرغم کارهایی که تاکنون انجام شده هنوز کار چندانی در کانالهای با سطح مقطع مربعی صورت نگرفته و الگوی رفتاری دقیقی از این نوع سیال در دست نیست.

هدف رسیدن به افزایش انتقال حرارت فروسیال در حضور میدان مغناطیسی و با استفاده از آن و تبدیل توان بالقوه آن به بالفعل در بسیاری از مسائل مهندسی که با تولید، انتقال و یا دفع حرارت همراه است می‌باشد. برای نیل به این هدف و به منظور ایجاد شناخت مناسب از رفتار این نوع از سیال، پژوهش حاضر در چند محور انجام پذیرفته است؛ در مرحله اول روابط تجربی زیادی که در خصوص ویژگی‌های فیزیکی این نوع از سیالات در پژوهش‌های پیشین مطرح گردیده و گاهاً با نتایج آزمایش‌های تجربی سیال کاملاً منطبق نیستند بررسی و نزدیکترین روابط تجربی با نتایج آزمونهای ویسکوزیته، ضریب گرمایی ویژه و چگالی برای فروسیال آب / Fe_3O_4 مشخص شدند. در قدم بعدی تحقیق، به عنوان یک نوآوری، بررسی تجربی عدد ناسلت و ضریب جابجایی فروسیال تحت شار حرارتی ثابت اعمالی به تمام وجوه کانال، با و یا بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی در یک کانال با مقطع مربعی شکل در جریان آرام انجام شد (در این مقاله تنها به شار حرارتی کل اعمالی اشاره شده است). از دیگر موارد بررسی شده تأثیر درصد‌های حجمی متفاوت و محل اعمال میدان می‌باشد. لازم به ذکر است هندسه مسئله‌ی حاضر که از نوآوریهای این پژوهش می‌باشد در مبدل‌های حرارتی کاربرد دارد.

نتایج نشان می‌دهد که انتقال گرما با استفاده از میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. این روش ممکن است مسیری را برای نسل بعد مهندسی انتقال حرارت با راندمان بالا باز کند.

۲- فعالیت تجربی

۲-۱- شرح دستگاه

سامانه آزمایشگاهی شامل منبع فروسیال، پمپ لانگر دارای فلومتر از نوع پمپ دنده‌ای^۱، کانال تحت آزمون^۲ با سطح مقطع مربعی با ابعاد $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 80\text{ cm}$ جداره ۳ میلی‌متر، رادیاتور با سرعت فن ۲۰۰۰-۸۰۰ دور بر دقیقه^۳، ۶ سنسور دما^۴، ورق‌های میکای نسوز، ۲ سنسور فشار مدل ویکا با محدوده جریان ۴-۰ میلی آمپر و محدوده فشار ۱۰-۰ بار در ابتدا و

مدل 1-WT3000-1FA

2- Test section

3-Revolutions Per Minute, RPM

4-pt100

5- TDGC2-5Kva

6- R300SR-HD, NEC-AVIO

7- Clamp meter

8-HIOKI

9-Ultrasonic Homogenizer, Q700 model

10-QSONICA700

11-NEE-oh-DIM-ee-am, NdFeB

12-ADAM6015 ,ADAM 4015, ADAM4018

13-Muscovite



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) موقعیت کلی سنسورهای دما روی کانال، فواصل سنسورها، نحوه پیچیدن هیتر و استفاده از کاغذ نسوز جهت عدم اتصال هیتر حامل جریان الکتریکی با کانال ب) شمایی از سامانه آزمایشگاهی عایق بندی شده

Fig. 1. a) Position of temperature sensors on the duct, distance between sensors, how to wrap the heater, and use of refractory paper to not connect the heater carrying electricity with the duct b) Scheme of set up

و و نیز شکل ۳ دیده می شود آهنرباها روی کانال قرار گرفته و قطبین آنها در امتداد کانال می باشد.

۲-۲- روش تهیه فروسیالات

۲-۲-۱- سنتز فروذرات^۱

برای تولید فروذرات از روش هم رسوبی^۲ که توسط برگر^۳ و همکاران [۳۵] مطرح گردید استفاده شد. برای این کار ۵/۴۱ گرم هگزا هیدرات کلراید آهن^۴ (کلراید آهن (III) (آبه) و ۱/۹۹ گرم تتراهیدرات کلراید آهن^۵ (کلراید آهن (II) (آبه) به ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه و به طور یکسان و یکنواخت هم زده شد. سپس به منظور گرم کردن، محلول در حمام اولتراسونیک که دمای آن قابل کنترل است، قرار گرفت. هنگامی که درجه حرارت به ۵۰ درجه سانتی گراد افزایش یافت، ۱۰ میلی لیتر آمونیاک غلیظ^۶ به مخلوط واکنش اضافه شد. واکنش شیمیایی آن به شرح زیر است:

1-Ferroparticle

2-Coprecipitation

3-Berger

4-Iron Chloride Hexahydrate III, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

5- Iron chloride tetrahydrates, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

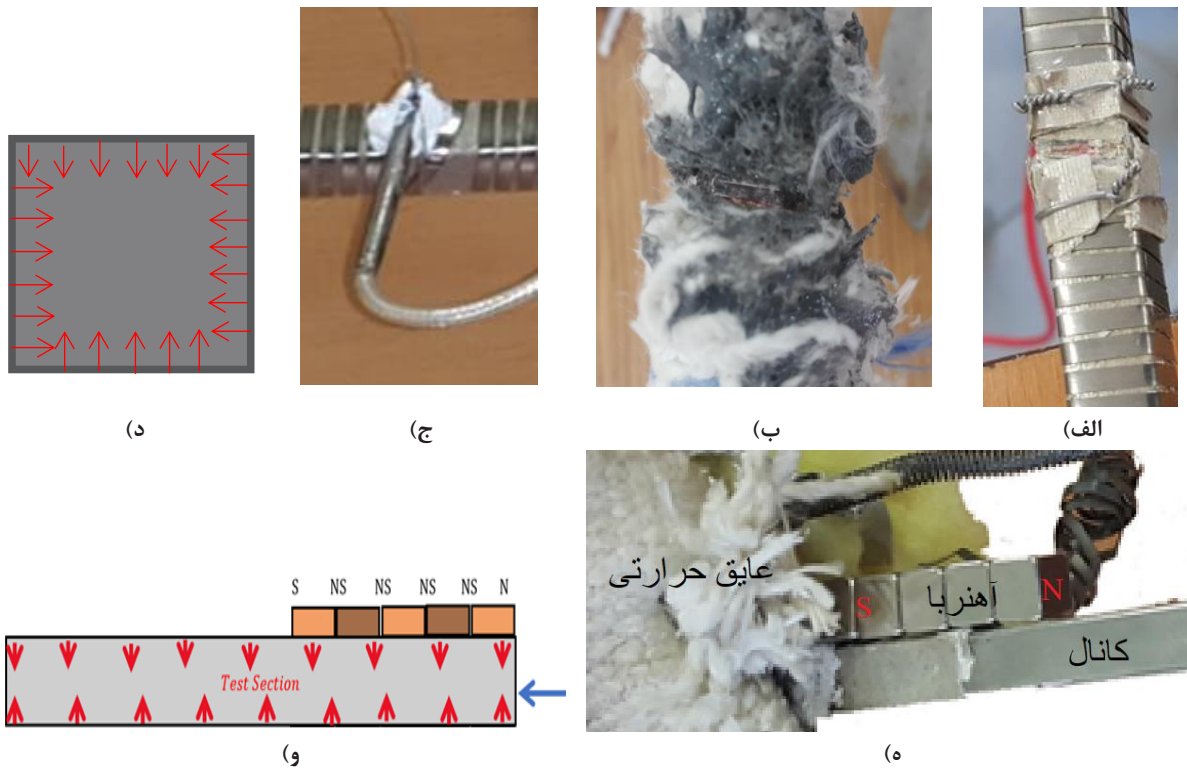
6- $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

بطور مستقیم اندازه گرفته شود.

ج) انتخاب مناسب جنس اتصالات سنسور به کانال تا دمای زیاد هیتر را بتواند تحمل کند.

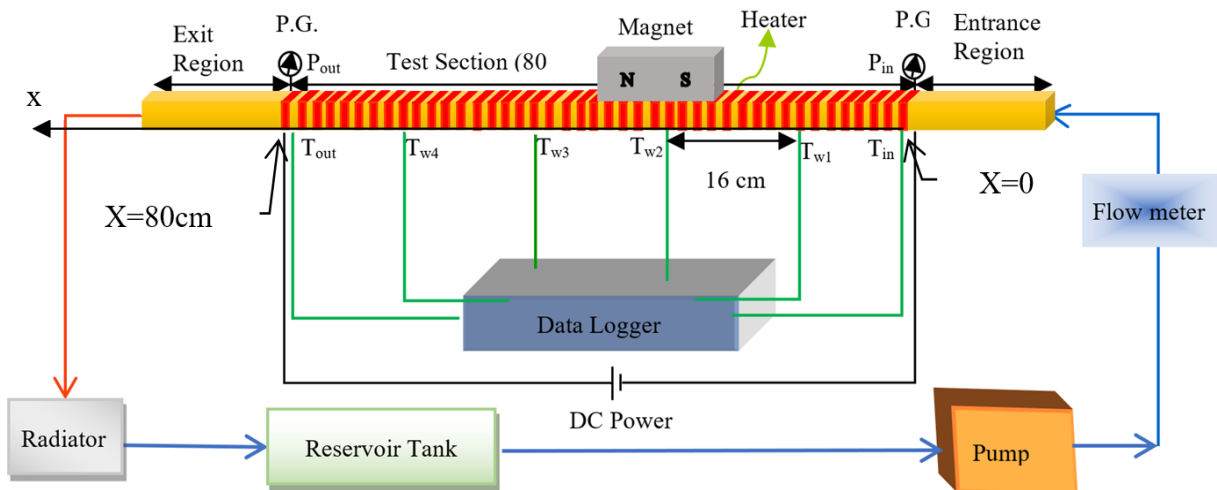
برای حل این مشکل در ابتدا شکافی در محل های مورد نظر که گام هیتر تغییر می کرد به اندازه قطر سنسور به وجود آمد. در اطراف این شکاف بر روی هیتر کاغذ نسوز پیچیده شد تا از برخورد اتفاقی این سنسور با هیتر جلوگیری کند. برای محکم تر کردن این عایق بندی الکتریکی و حرارتی (بین سنسور و هیتر) و نیز جلوگیری از حرکت کردن سنسور بر روی کاغذ از نخ نسوز و چسب حرارتی استفاده شد و بر روی آن (تا خشک شدن چسب) با استفاده از سیم آرماتور سنسور به کانال محکم شد (شکل ۲).

جریان پس از ورود به کانال و طی مسافت ۷۰ سانتی متر به حالت توسعه یافته می رسد. برای اطمینان از توسعه یافتگی جریان، بررسی ها و اندازه گیری ها در فاصله ۱ متری از ورودی کانال انجام گردید (فاصله شروع هیتر از ابتدای کانال و محل قرار گیری اولین سنسور حرارتی، $X=0$ cm). شکل ۳ مدار سامانه آزمایشگاهی و ب تصویریری از سامانه آزمایشگاهی را در محل آزمایشگاه نمایش می دهند. در شکل بطور واضح دیده می شود که فاصله سنسورهای دما از یکدیگر ۱۶ سانتی متر، سنسور اول در $X=0$ cm و سنسور آخر در $X=80$ cm قرار دارند. همانطور که در شکل های ۲ و ۲



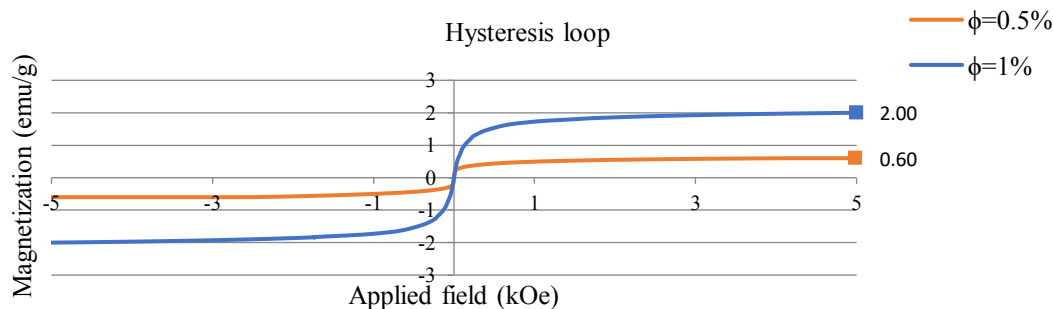
شکل ۲. الف) و ب) ایزوله کردن سنسور به جهت عدم برخورد مستقیم با هیتر توسط کاغذ نسوز و نخ نسوز ج) اتصال سنسور Pt 100 به بخش تحت آزمون د) سطح مقطع بخش تحت آزمون، جهت شار حرارتی یکنواخت اعمالی به سیال توسط هیتر پیچیده شده بدور کانال ه) نحوه قرارگیری آهنرباها بر روی کانال و شماتیک قرارگیری آهنرباها بر روی کانال

Fig. 2. . a) and b) Insulate the sensor to prevent direct contact with the heater by refractory paper and refractory yarn c) Connect the pt 100 sensors to the test section d) The cross section of the test section, and uniform heat flux direction applied to the fluid by heater wrapped around the channel e) How to place magnets on the channel and f) Schematic of placing magnets on the channel



شکل ۳. طرحواره دستگاه آزمایش

Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup

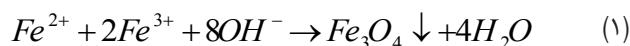


شکل ۴. نمودار مغناطیس سنج فروسیال ۰/۵٪ و ۱٪

Fig. 4. Ferrofluid magnetometer diagram 0.5 vol.% and 1 vol.%

می‌توان برای کنترل کیفیت فروسیال تولید شده از آن‌ها بهره جست. از همین روی از آزمایشگاه‌های استاندارد و مرجع پژوهشگاه‌هایی مانند پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشگاه صنعت نفت و بنیاد علوم کاربردی رازی استفاده شد. در آزمون مغناطیس سنج مقدار اشباع مغناطیسی فروسیال آب/ Fe_3O_4 با تراکم حجمی ۱٪، عدد 2 emu/g و برای فروسیال با تراکم ۰/۵٪، 0.6 emu/g به دست آمد (شکل ۴).

همانطور که می‌دانیم یکی از فاکتورهای مهم در پایداری فروسیال پتانسیل زتا است. در صورتیکه مقدار این آزمون بیشتر از 30 mV باشد فروسیال پایدار، کمتر از 20 mV پایداری محدود و در صورت کمتر از 10 mV در فروسیال تجمع و کلوخگی رخ می‌دهد [۳۶]. نتایج آزمون پتانسیل زتا که در شکل ۵ آورده شده است مقدار آن را $62/1 \text{ mV}$ نشان می‌دهد که حاکی از پایداری مناسب فروسیال تولیدی دارد. تصاویر این فروسیال در گذر زمان در ادامه آمده است (شکل ۶ و شکل ۷). در شکل‌های ۶ الف و ۷ الف فروسیال‌های نیم و یک درصد پس از گذشت ۵ روز از تاریخ تولید نشان داده شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود کوچکترین ته‌نشینی از فروذرات در ظروف دیده نمی‌شود. در شکل‌های ۶ ب و ۷ ب فروسیالات پس از گذشت ۷ ماه از تاریخ تولید به تصویر کشیده شده‌اند. در این شکل‌ها مقداری ته‌نشینی قابل ملاحظه است. این مقدار از ته‌نشینی با توجه به زمان زیاد گذشته از تاریخ تولید منطقی به نظر می‌رسد. در نهایت در شکل‌های ۶ ج و ۷ ج این دو فروسیال پس از ۲۱۵ روز از تاریخ تولید و نیز پس از ۵ روز از اولتراسونی مجدد نمایش داده شده‌اند. در این دو تصویر نیز کوچکترین ته‌نشینی ملاحظه نمی‌شود. این مطلب حاکی از پایداری بسیار مناسب فروسیال تولیدی دارد. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که روش مطرح شده توسط برگر و



سوسپانسیون حاصل با همزن برقی هم‌زده و در حمام اولتراسونیک با دمای 50°C درجه سانتیگراد به مدت 30 دقیقه هم‌زده شد. سپس برای چند دقیقه، تا زمانی که نانوذرات ته‌نشین شوند کنار گذاشته شد. این نانوذرات 4 مرتبه با الکل اتیلیک خالص شسته شدند. نتیجه نهایی این فرآیند فروذرات اکسید آهن III بودند.

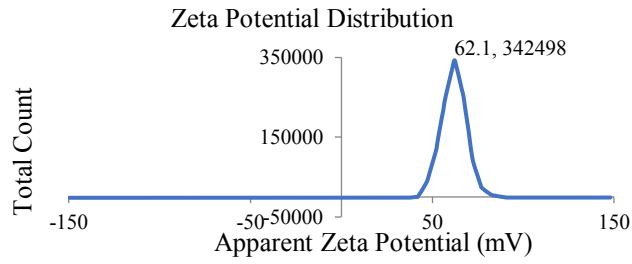
۲-۲-۲ آماده سازی فروسیالات

برای آماده سازی فروسیالات ۰/۵ و ۱ درصد حجمی مورد آزمایش پس از اضافه کردن مقادیر لازم از نانو پودر سنتز شده به میزان دو برابر وزن نانو پودر مورد استفاده و به منظور پایدار نمودن فروسیال، استیک اسید به محلول اضافه و پس از آن محلول به مدت 40 دقیقه در دمای 50°C درجه سانتیگراد داخل حمام اولتراسونیک با قدرت 28 کیلوهرتز قرار گرفت. بدینوسیله سوسپانسیون به حالت پایدار درآمد. این پایداری در شکل ۶ و شکل ۷ و نیز نتیجه آزمون پتانسیل زتا (شکل ۵) به وضوح قابل ملاحظه می‌باشد.

۲-۲-۳ مشخصات فروسیالات

عموماً مشخصاتی نظیر هدایت الکتریکی، هدایت حرارتی، پتانسیل زتا، ویسکوزیته و آزمون مغناطیس سنجی^۲ از مهمترین آزمون‌هایی هستند که

7- Fe_3O_4
8-Vibrating Sample Manetometer, VSM



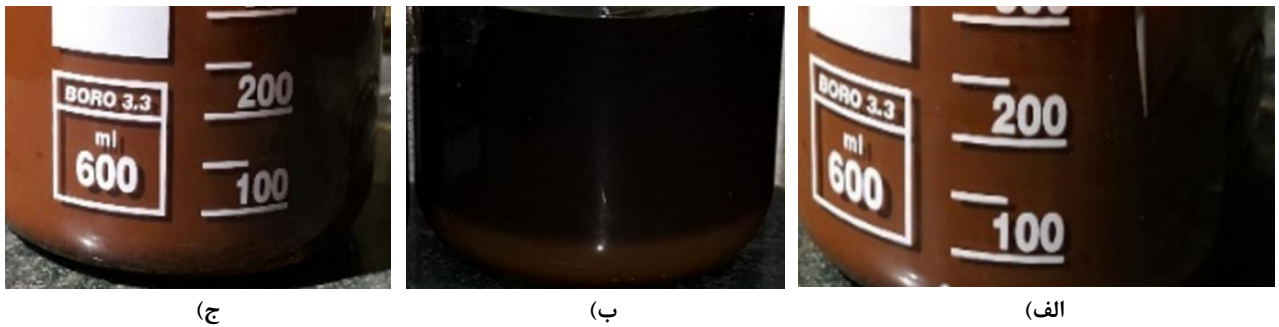
شکل ۵. نمودارهای آزمون پتانسیل زتا

Fig. 5. Zeta potential test diagram



شکل ۶. فروسیال $\phi = +0.5\%$ (الف) ۵ روز بعد از تولید (ب) ۷ ماه پس از تولید (ج) ۷ ماه پس از تولید و ۵ روز بعد از انجام اولتراسونیک

Fig. 6. Ferrofluid $\phi=0.5\%$ (a) 5 days after production (b) 7 months after production (c) 7 months after production and 5 days after ultrasonic



شکل ۷. فروسیال، $\phi = 1\%$ ، (الف) ۵ روز بعد از تولید (ب) ۷ ماه پس از تولید (ج) ۷ ماه پس از تولید و ۵ روز بعد از انجام اولتراسونیک

Fig. 7. Ferrofluid $\phi=1\%$ (a) 5 days after production (b) 7 months after production (c) 7 months after production and 5 days after ultrasonic

اعمالی به هیترا، m دبی جرمی جریان، T_{in} و T_{out} به ترتیب دماهای خروجی و ورودی کانال هستند. شار حرارتی اعمالی به بخش تحت آزمون نیز توسط معادله:

$$q'' = \frac{q}{A_{total}} = \frac{VI}{A_{total}} = h_{local} (T_{w_{local}} - T_{b_{local}}) \quad (7)$$

قابل بررسی است که در آن q'' شار حرارتی، m^2 $A_{total} = 4aL = 0.0224$ مساحت جانبی کانال، a عرض داخلی کانال، $L = 8.0$ cm طول آن، $T_{w_{local}}$ و $T_{b_{local}}$ به ترتیب دماهای دیواره و بالک محلی و h_{local} ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی می‌باشند. مقادیر ولتاژ، شدت جریان و شار حرارتی کل داده شده به سامانه آزمایشگاهی در جدول ۵ نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد که مقادیر ولتاژ اعمالی، به عنوان متغیر مستقل ثابت بوده و مقادیر شدت جریان اندازه گیری شده، به عنوان متغیر وابسته، تغییرات مختصری را نشان می‌دهد. به تبع این تغییرات، شار حرارتی کل اعمالی دقیقاً یکسانی بدست نمی‌آید (جدول ۵). برای کاهش این خطا هر آزمون ۳ مرتبه تکرار و مقادیر میانگین در این جدول ثبت شده است. با توجه به اینکه $T_{w_{local}}$ دمای داخلی دیواره کانال بوده و سنسورهای دما به قسمت خارجی کانال متصل شده‌اند از این رو برای بدست آوردن این دما از روی دمای سنسور، جداره استیل کانال را به عنوان مقاومت حرارتی در نظر گرفته و از رابطه $q'' = -k \frac{\Delta T}{\Delta x}$ (ضخامت جداره و برابر ۳ میلیمتر) دمای داخلی جداره بدست آمد. بدین ترتیب ضریب جابجایی محلی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$h_{local} = \frac{VI}{A_{total} (T_{w_{local}} - T_{b_{local}})} = \frac{q''}{(T_{w_{local}} - T_{b_{local}})} \quad (8)$$

با توجه به یکنواخت بودن شار حرارتی اعمالی در طول کانال تحت آزمون و در صورت صفر بودن میدان خارجی، در ناحیه توسعه یافته دماهای دیواره و بالک به شکل تابعی از مکان و بصورت خطی در می‌آیند [۳۸]:

$$T_b(x) = T_{b_{in}} + (T_{b_{out}} - T_{b_{in}}) \frac{x}{L} \quad (9)$$

همکاران [۳۵] روشی بسیار مناسب برای تولید فروسیال آب/ Fe_3O_4 می‌باشد.

مقادیر هدایت الکتریکی و هدایت حرارتی فروسیال‌های تولیدی در جدول ۱ و نتایج پایدار شده آزمون ویسکوزیته، پارامتر مهم دیگر فروسیال‌های تولیدی، در جدول ۲ آمده است. جدول ۳، C_w و $C_{Fe_3O_4}$ بترتیب ظرفیت گرمایی ویژه آب و اکسید آهن، ρ_w ، $\rho_{Fe_3O_4}$ و ρ_{nf} بترتیب چگالی اکسید آهن، آب و نانوسیال، ϕ درصدحجمی و μ_w ویسکوزیته دینامیکی آب می‌باشند. اینطور به نظر می‌رسد که روابط تجربی انتخاب شده در این جدول از میان چندین رابطه امتحان شده مطروحه، مرجع [۳۷]، بیشترین قرابت را با نتایج آزمون‌ها دارند. به وضوح دیده می‌شود که برای ظرفیت گرمایی فروسیال با غلظت ۵٪، معادله (۳) و برای فروسیال با غلظت ۱٪ معادله (۴) تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارند. این موضوع در مورد نتیجه رابطه تجربی و آزمون درباره ویسکوزیته نیز برقرار است که خود نشان از دقت آزمون‌ها و صحت روابط انتخابی در میان تعداد زیاد روابط امتحان شده می‌باشد.

$$(1 - \phi) \rho_w + \phi \rho_{Fe_3O_4} \quad (2)$$

$$(1 - \phi) C_w + \phi C_{Fe_3O_4} \quad (3)$$

$$\frac{(1 - \phi) \rho_w C_w + \phi (\rho C)_{Fe_3O_4}}{\rho_{nf}} \quad (4)$$

$$(1 + 2 / 5 \phi) \mu_w \quad (5)$$

۳- محاسبات

کل حرارت داده شده به بخش تحت آزمون از معادله:

$$q = VI = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (6)$$

بدست می‌آید که در آن V و I به ترتیب اختلاف پتانسیل و شدت جریان

جدول ۱. هدایت الکتریکی و حرارتی نمونه‌های تولیدی و آب خالص مورد استفاده در آزمون‌ها در دماهای مختلف

Table 1. Electrical and thermal conductivity of samples and pure water used in tests at different temperatures

هدایت حرارتی (W/m ² K)					هدایت الکتریکی	نمونه
۶۵ °C	۵۵ °C	۴۵ °C	۳۵ °C	۲۵ °C		
۰/۸۳۰	۰/۸۰۳	۰/۷۷۵	۰/۷۴۳	۰/۶۹۵	۳/۱۶ mS/cm	$\varphi=۰/۵\%$
۰/۹۲۲	۰/۸۸	۰/۸۴	۰/۸۰۱	۰/۷۶۱	۱۳۶ mS/cm	$\varphi=۱\%$

جدول ۲. نتایج پایدار شده آزمون ویسکوزیته دینامیکی فروسیاله‌های ۵/۰٪ و ۱٪ در نرخ برشی () ۱۰۰ در روز اول و دوم پس از تولید

Table 2. Stabilized results of dynamic viscosity test of 0.5 vol.% and 1 vol.% ferrofluids at shear rate of 100 (1/s) on the first and second day after production

Fe ₃ O ₄ /Water, $\varphi=۱\%$		Fe ₃ O ₄ /Water, $\varphi=۰/۵\%$		
روز دوم	روز اول	روز دوم	روز اول	ویسکوزیته [mPa·s]
۰/۹۱	۱/۰۱	۰/۹	۱	

جدول ۳. روابط تجربی [۳۷] و نتایج آزمون چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ویسکوزیته سیالات تحت آزمایش

Table 3. Experimental correlations [37] and test results of density, specific heat capacity and viscosity of ferrofluids

μ (mPas)	C_p (J/kgK)	ρ (kg / m ³)	کمیت
$(1 + \frac{2}{5}\varphi)\mu_w$ آزمون	$(1-\varphi)\rho_w C_w + \varphi(\rho C)_{Fe_3O_4}$ ρ_{nf}	$(1-\varphi)\rho_w$ آزمون $+ \varphi\rho_{Fe_3O_4}$	روش اندازه گیری
(۵)	(۴)	(۲)	ماده
۰/۹۰۱	۴۰۲۲/۳۸۶	۱۰۱۶/۹۲	Fe ₃ O ₄ /Water $\varphi = ۰/۵\%$
۰/۹۱۲	۳۹۳۸/۳	۱۰۳۷/۸۴	Fe ₃ O ₄ /Water $\varphi = ۱\%$
-	-	۵۱۸۰	پودر Fe ₃ O ₄ $\varphi = ۱۰۰\%$
-	-	۹۹۶	آب خالص $\varphi = ۰\%$

در شکل ۹ الف. ملاحظه می‌شود که مقدار عدد ناسلت محلی برای آب خالص برای پنج نقطه ابتدایی کانال عدد ۳/۵۶، برای نقطه انتهایی کانال ۳/۵۲، برای فروسیال ۱٪ در تمام نقاط کانال ۳/۶۱ و برای فروسیال ۰/۵٪ در پنج نقطه ابتدایی ۳/۴۶ و در آخرین نقطه کانال ۳/۳۷ بدست آمد که با مقدار فوق همخوانی مناسبی دارد (شکل ۹). با توجه به معلوم بودن بقیه پارامترهای معادله (۱۳)، قطر هیدرودینامیکی و ضریب هدایت حرارتی آب، مقدار ضریب جابجایی W/m^2K ۳۰۸/۵ به دست می‌آید که نزدیکی زیادی با نتایج حاصل از آزمون W/m^2K ۳۰۹/۴۲ دارد (شکل ۸).

۵- نتایج و بحث

۵-۱- ضریب انتقال حرارت جابجایی

در شرایطی که میدان خارجی صفر است و با توجه به معادله (۱۳) و ثابت بودن مقادیر قطر هیدرودینامیکی و عدد ناسلت، [۳۹] می‌بایست مقدار $\frac{h}{k}$ ثابت باشد. به عبارت دیگر در صورت افزایش ضریب هدایت، می‌باید ضریب جابجایی نیز رشد کند. بدین ترتیب با افزایش فروذرات آهن در سیال که باعث افزایش ضریب هدایت در سیال می‌گردد مقدار ضریب جابجایی نیز افزایش می‌یابد. این مطلب در نمودارهای الف، ب و ج شکل ۸ به صورت $h_{\varphi=1\%} > h_{\varphi=0.5\%} > h_{water}$ دیده می‌شود که در آن به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابجایی فروسیال با در صد حجمی ۱٪، ۰/۵٪ و آب خالص است.

نکته قابل توجه دیگر در این نمودارها، شکل ۸ الف، ب و ج، ثابت بودن تقریبی ضریب جابجایی محلی برای آب خالص و فروسیال نیم درصد در مقابل تغییرات مختصر آن در فروسیال ۱٪ است. این مطلب می‌تواند از آنجا ناشی شود که علیرغم پایداری مناسب فروسیال‌های تولیدی که در بخش‌های قبلی بحث آن مطرح شد، فروسیال با غلظت ۱٪ بواسطه تراکم بیشتر ذرات از تجمع منطقه‌ای بیشتری نسبت به فروسیال با کسر حجمی ۰/۵٪ برخوردار بوده بنابراین پایداری کمتری نسبت به فروسیال با غلظت کمتر، علیرغم روش تولید، پراکنده‌سازی^۱ و پایداری سازی یکسان آنها دارد (شکل‌های ۶ و ۷).

در شار حرارتی اعمالی ثابت عمود بر جریان فروسیال، ۱۲۵۸/۲ وات، ضریب انتقال حرارت جابجایی فروسیال با کسر حجمی ۰/۵٪ و با وجود آهنربای دائمی به ترتیب در انتها ($X=80$ cm) و ابتدای بخش تحت آزمون ($X=0$ cm)، و نیز ۳۲ سانتی متری از ابتدای بخش تحت آزمون در جدول ۴ نمایش داده شده‌اند. در تمام حالات آهنربا در ناحیه توسعه یافته قرار

$$T_w(x) = T_{w_{in}} + (T_{w_{out}} - T_{w_{in}}) \frac{x}{L} \quad (10)$$

که در آن X فاصله سنسورها از ابتدای بخش تحت آزمون، T_{bin} ، T_{bout} ، T_{win} و T_{wout} به ترتیب دماهای بالک خروجی، ورودی، دماهای دیواره خروجی و ورودی می‌باشند. برای محاسبه رینولدز می‌دانیم:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (11)$$

که در آن V سرعت، $D_h = \frac{4A'}{P} = a = 0/007$ قطر هیدرودینامیکی، A' مساحت سطح مقطع کانال و P محیط سطح مقطع کانال می‌باشند [۳۹]. برای محاسبه سرعت سیال و عدد ناسلت روابط (۱۲) و (۱۳) مورد استفاده قرار گرفت. که در آنها Q و k به ترتیب دبی حجمی و ضریب هدایت حرارتی فروسیال می‌باشند (جدول ۱).

$$V = \frac{Q}{A'} \quad (12)$$

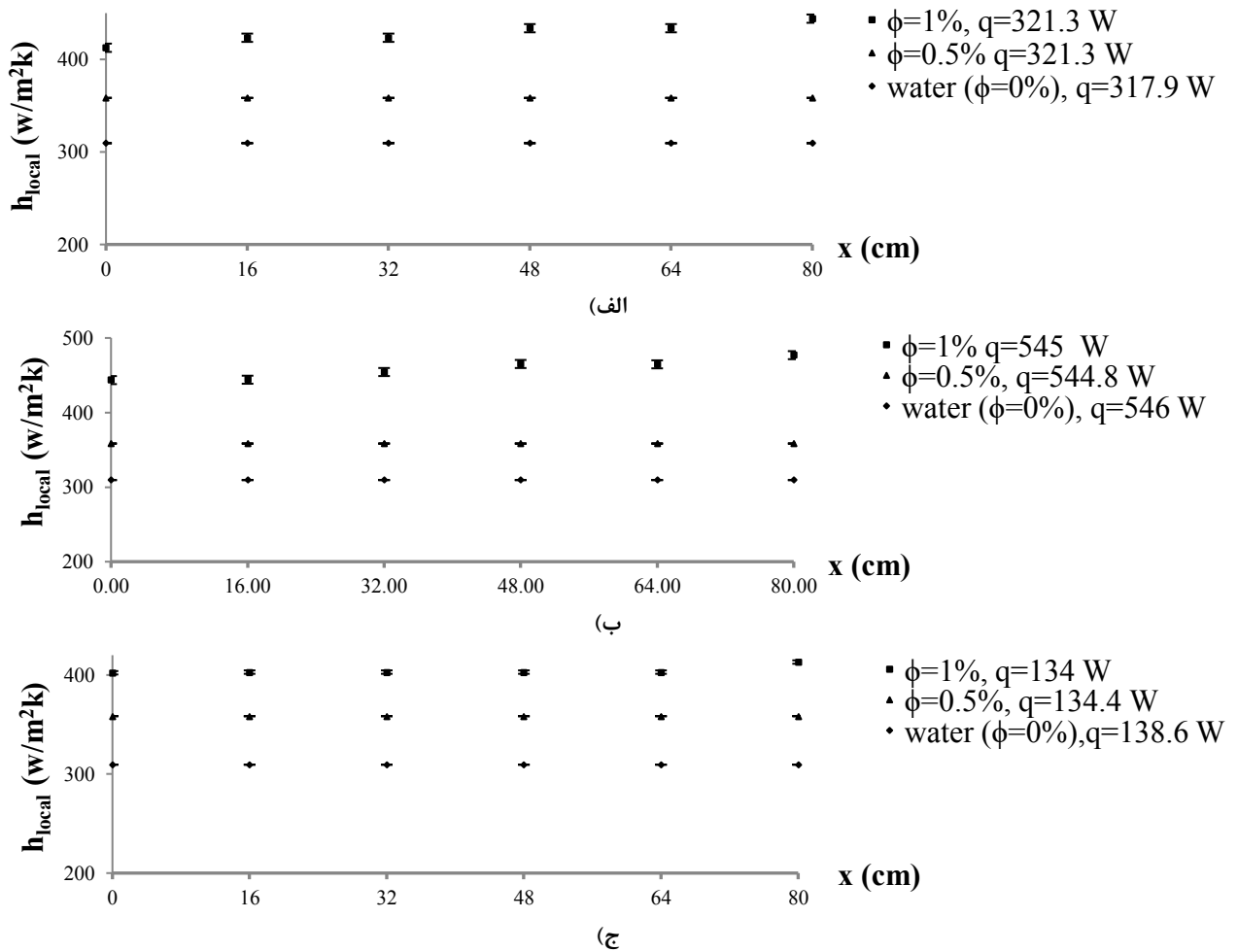
$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (13)$$

با وجود برابری در دبی حجمی و سرعت یکسان سیالات تحت آزمون، به دلیل اختلاف در چگالی و ویسکوزیته آنها، اختلافات جزئی در اعداد رینولدز، پدید می‌آید. به عنوان نمونه برای فروسیال ۰/۵٪ در دبی $\frac{m}{min}$ ۵۰۰ مقدار رینولدز ۱۳۴۲ و سرعت سیال $\frac{m}{s}$ ۰/۱۷ بدست می‌آید در حالی که برای فروسیال ۱٪ در همان دبی مقدار رینولدز ۱۳۵۳ بدست می‌آید. به همین خاطر بجای مقدار رینولدز، دبی حجمی که در تمام آزمون‌ها ثابت می‌باشند گزارش می‌شود.

۴- اعتبار سنجی

به منظور تأیید اعتبار آزمون‌ها و نتایج بدست آمده از سیال آب در شرایطی استفاده شد که میدان خارجی اعمالی صفر بود. با توجه به شرایط مسئله مقدار عدد ناسلت تنها به هندسه و ابعاد کانال وابسته و مقدار آن ۳/۶

می‌باشد [۳۹].



شکل ۸. ضریب جابجایی محلی در سیالات مختلف، دبی ۵۰۰ ml/min، بدون اعمال میدان مغناطیسی، در ناحیه کاملاً توسعه یافته حرارتی و در شارهای حرارتی الف) ۳۱۷/۹ و ۳۲۱/۳ وات ب) ۵۴۴/۸، ۵۴۵ و ۵۴۶ وات ج) ۱۳۴، ۱۳۴/۴ و ۱۳۸/۶ وات

Fig. 8. Local convection coefficient in samples, 500 ml/min, without applying a magnetic field, at thermal fully developed region at thermal fluxes: a) 317.9 and 321.3 Watts b) 545, 544.8 and 546 Watts c) 134, 134.4 and 138.6 Watts

جدول ۴: ضریب جابجایی محلی فروسیال با درصد حجمی ۰/۵٪ تحت میدان مغناطیسی ثابت در نقاط مختلف کانال تحت شار حرارتی ثابت ۱۲۵۸/۲ وات

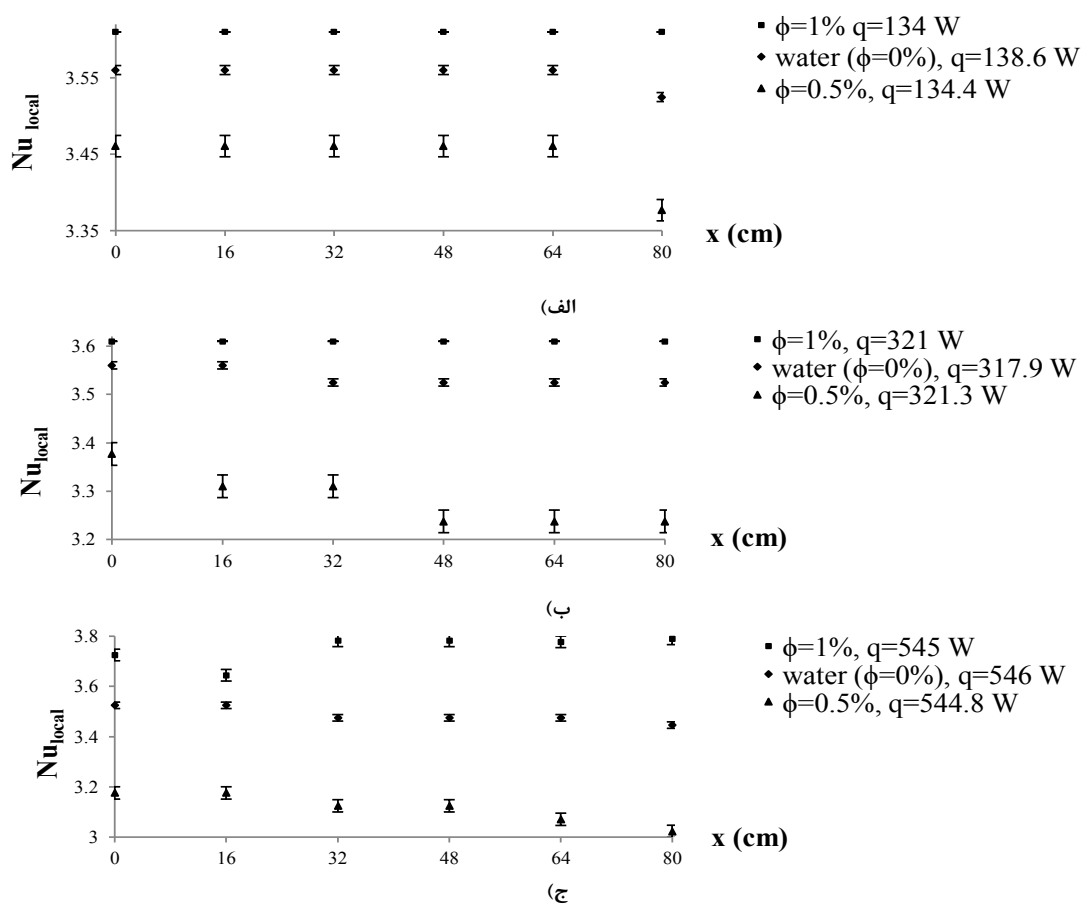
Table 4. Ferrofluid local convection coefficient with 0.5 vol.% under the constant magnetic field and heat flux of 1258.2 Watts in the different positions of channel 1

ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی در مکان آهنربا (W/m ² K)		مکان آهنربا (cm)
بدون وجود میدان مغناطیسی	با وجود میدان مغناطیسی	
۳۵۴/۰±۴/۰۰۳۲	۳۶۸/۰±۷۴/۰۰۳۲	۰
۳۵۸/۰±۴۲/۰۱۷۳۷	۳۶۸/۰±۰/۰۱۷۳۷	۳۲
۳۵۸/۰±۴/۰۰۳۲	۳۶۹/۰±۷۶/۰۰۳۲	۸۰

جدول ۵. مقادیر ولتاژ، شدت جریان و حرارت کل داده شده به کانال و درصد تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی فروسیال نسبت به آب خالص بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی

Table 5. Values of voltage, electric current and total energy given to the channel and percentage of changes in convection heat transfer coefficient of ferrofluid to pure water without applying external magnetic field

ولتاژ داده شده به هیتر V_{avg} (V)	میانگین شدت جریان اندازه گیری شده I_{avg} (A)	حرارت داده شده کل $q_{avg}=IV$ (W)	ϕ (%)	متوسط درصد افزایش ضریب جابجایی نسبت به آب خالص
۶۰	۲/۲۳۳	۱۳۴	۱	٪۳۰
۶۰	۲/۲۴	۱۳۴/۴	۰/۵	۱۵/۸٪
۶۰	۲/۳۱	۱۳۸/۶	۰	٪۰
۹۰	۳/۵۳	۳۱۷/۹	۰	٪۰
۹۰	۳/۵۷	۳۲۱/۳	۰/۵	٪۱۵
۹۰	۳/۵۷	۳۲۱/۳	۱	٪۳۸
۱۲۰	۴/۵۵	۵۴۶	۰	٪۰
۱۲۰	۴/۵۴	۵۴۴/۸	۰/۵	٪۱۵
۱۲۰	۴/۵۴۱۶	۵۴۵	۱	٪۴۸



شکل ۹. عدد ناسلت محلی در سیالات مختلف، دبی ۵۰۰ ml/min و شار حرارتی‌های الف) ۱۳۴، ۱۳۴/۴ و ۱۳۸/۶ وات ب) ۳۱۷/۹ و ۳۲۱/۳ وات ج) ۵۴۴/۸، ۵۴۵ و ۵۴۶ وات، بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی

Fig. 9. Local Nusselt number in different fluids, flow rate 500 ml/min and heat fluxes a) 134, 134.4 and 138.6 watts b) 317.9 and 321.3 watts c) 544.8, 545 and 546 watts, without external magnetic field

منطقی بنظر می‌رسد. به همین دلایل، در بیشتر موارد ضریب انتقال حرارت جابجایی ارائه می‌شود و عدد ناسلت معمولاً گزارش نشده است [۴۱ و ۴۲]. به همین جهت در این مقاله مقادیر عدد ناسلت حاصل از آزمون در شرایطی گزارش می‌شود که میدان خارجی صفر باشد.

همانطور که گفته شد مقدار عدد ناسلت در شرایطی که میدان مغناطیسی اعمال نمی‌گردد تنها به هندسه کانال وابسته است و با توجه به آنکه در این مسئله نسبت ابعاد (a/b) یک است، عدد ناسلت ۳/۶ بدست می‌آید [۳۹]. این مقدار در کل طول بخش تحت آزمون ثابت بوده و در صورت عدم اعمال میدان خارجی به پارامتر دیگری وابسته نیست. همانطور که در نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود نتایج آزمایش دقت خوبی را در نزدیکی به این عدد (۳/۶) نشان می‌دهد. این قرابت نتایج، خود دلیلی بر دقت و صحت آزمون انجام شده است.

۶- محاسبه عدم قطعیت

می‌دانیم تأثیر عدم قطعیت همه متغیرهای مستقل در تابع $R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۴۳]:

$$\delta R = \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (14)$$

که در آن $X_i = X_i(\text{measured}) \pm \delta X_i$ ، متغیرهای مستقل، $\pm \delta X_i$ عدم قطعیت آنها و $\delta R_{X_i} = \frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i$ ، اثر عدم قطعیت یکی از متغیرهای مستقل روی نتیجه می‌باشد. بنابراین عدم قطعیت پارامترهای ضریب انتقال حرارت جابجایی، $\frac{\Delta h}{h}$ و عدد ناسلت، $\frac{\Delta Nu}{Nu}$ ، به وسیله معادلات (۸) و (۱۳) و (۱۴) بدست می‌آید [۳۱]:

$$\frac{\Delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_w}{T_w - T_b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_b}{T_w - T_b}\right)^2} \quad (15)$$

$$\frac{\Delta Nu}{Nu} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D_h}{D_h}\right)^2} \quad (16)$$

در جدول ۶ کمیت‌های مورد اندازه‌گیری در این آزمایش و نیز دقت آنها

گرفت. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار ضریب جابجایی در نقاطی که آهنربا قرار داده شده، افزایش یافته است. در شار حرارتی $1258/2 \text{ W}$ هنگامی که از آهنربا در ابتدای قسمت آزمون استفاده می‌شود مقدار ضریب جابجایی را از $358/43 \text{ W/m}^2\text{K}$ به مقدار $368/74 \text{ W/m}^2\text{K}$ افزایش می‌دهد، یعنی رشدی معادل $2/8\%$. در همین شار حرارتی هنگامی که آهنربا در انتهای قسمت تحت آزمون قرار می‌گیرد ضریب جابجایی از $358/40 \text{ W/m}^2\text{K}$ به $369/76 \text{ W/m}^2\text{K}$ افزایش می‌یابد ($+3/16\%$) و زمانی که آهنربا در 32 سانتی متری ابتدای کانال قرار می‌گیرد ضریب جابجایی از $358/42 \text{ W/m}^2\text{K}$ به $368/00 \text{ W/m}^2\text{K}$ معادل $2/67\%$ رشد دارد. این مقادیر رشد متفاوت، اگر چه در برخی موارد، متناسب با افزایش شار حرارتی بوده‌اند ولی وابستگی معنی داری با یکدیگر ندارند.

در جدول ۴ در صورت عدم وجود میدان مغناطیسی مقدار ضریب جابجایی $358/4 \text{ W/m}^2\text{K}$ بدست آمده است که با اعداد شکل ۸ الف، ب و ج برای سیال با غلظت $0/5\%$ ($358/42 \text{ W/m}^2\text{K}$) هم‌خوانی مناسبی داشته و نشان از دقت آزمایش دارد. در جدول زیر، در شرایط بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی، متوسط درصد افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی به واسطه افزایش درصد حجمی مشاهده می‌گردد. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به آب خالص مربوط به فروسیال 1% و در شار حرارتی 545 وات، 48% می‌باشد.

۵-۲- عدد ناسلت

آسفر^۱ و همکاران [۲۹] گزارش کردند که برای جریان فروسیال تحت میدان مغناطیسی، عدد ناسلت ممکن است افزایش یا کاهش یابد. این تغییرات بستگی به فاکتورهای زیادی از جمله نسبت نیروی مغناطیسی به نیروی اینرسی که بر روی سیال مغناطیسی عمل می‌کند، اثر متقابل بین جریان فروسیال و تجمع نانوذرات اکسید آهن در دیواره، افزایش هدایت حرارتی محلی در فروسیال و تشکیل زنجیره خوشه‌های نانوذرات اکسید آهن در فروسیال با میدان مغناطیسی دارد. از طرفی هدایت توسط پاستوریزا^۲ و همکاران [۴۰] در شرایطی که میدان خارجی صفر باشد به عنوان تابعی از کسر حجمی و دما اندازه‌گیری شد. آن‌ها همچنین دریافته‌اند که افزایش هدایت حرارتی با غلظت تقریباً بصورت خطی رشد می‌کند. علاوه بر این، هدایت حرارتی فروسیالات تحت میدان مغناطیسی متفاوت بوده و تعیین مقدار قطعی برای هدایت حرارتی فروسیالات تحت میدان مغناطیسی غیر

1-Asfer

2-Pastoriza

جدول ۶. کمیت‌های مورد اندازه‌گیری و دقت آنها

Table 6. Measured quantities and their accuracy

کمیت	ولتاژ	جریان	دما	طول	مساحت جانبی
دقت	۱ V	۰/۰۱ A	۰/۰۱ °C	۱ mm	۱ mm ^۲

جابجایی از $358/42 \text{ W/m}^2\text{K}$ به $368/00 \text{ W/m}^2\text{K}$ معادل $2/67\%$ رشد دارد. این در حالیست که در هر سه حالت با دور شدن از محل قرار گیری آهنربا در طول کانال، این مقادیر به مرور تا $358/42 \text{ W/m}^2\text{K}$ کاهش می‌یابند. این نتایج مؤید تأثیر مثبت میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت محلی در محدوده‌ی شرایط آزمون‌های انجام شده می‌باشد. به منظور توضیح این اتفاق می‌توان گفت، از آنجا که شدت میدان مغناطیسی با فاصله فرودزات از منبع میدان رابطه عکس دارد، با نزدیک شدن ذرات به محل قرار گیری آهنربا، فاصله ذرات از آهنربا به مرور کاهش و در نتیجه شدت میدان محلی

افزایش می‌یابد. این موضوع باعث تأثیر بیشتر میدان بر روی درصد حجمی محلی گردیده با جذب فرودزات فلزی به سمت آهنربا تعداد ذرات در واحد حجم در اطراف آهنربا افزایش یافته و به تبع آن انتقال حرارت محلی به مرور افزایش می‌یابد. این واقعه با دور شدن از محل آهنربا به شکل عکس به وقوع می‌پیوندد یعنی کاهش میدان به تبع آن کاهش ذرات در واحد حجم و در نتیجه کاهش انتقال حرارت را شاهد هستیم.

- فروسیال تولیدی به روش برگر و همکاران [۳۵] از پایداری بسیار مناسبی، با توجه به شکل ۵، برخوردار است. در این شکل که نتیجه آزمون پتانسیل زتا است مقدار $62/1 \text{ mV}$ دیده می‌شود که بسیار بیشتر از 30 mV (مرز پایداری مناسب فروسیال) می‌باشد. این پایداری در شکل‌های ۶ و ۷ نیز قابل رویت است.

- از میان روابط تجربی مطرحه در مقالات مختلف، نتایج حاصل از معادلات (۲) تا (۵) بیشترین نزدیکی را با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی، برای فروسیال آب/ Fe_3O_4 دارند. در خصوص ظرفیت گرمایی ویژه به نظر می‌رسد فروسیال با درصد حجمی $0/5\%$ معادله (۳) و فروسیال با درصد حجمی 1% معادله (۴) نتایج بهتری را در اختیار می‌گذارند.

که برای محاسبه عدم قطعیت آزمون‌ها مورد نیاز است آورده شده است. بدون حضور میدان خارجی، حداکثر عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت جابجایی مربوط به هر دو فروسیال در شار حرارتی $134/4$ وات، $0/17\%$ ، حداکثر عدم قطعیت عدد ناسلت مربوط به فروسیال $0/5\%$ با شار حرارتی $134/4$ وات، $0/11\%$ ، در حالتی که آهنربا در ابتدا و انتهای بخش تحت آزمون قرار گرفت حداکثر عدم قطعیت جابجایی $0/032\%$ ، و در حالتی که آهنربا در میانه بخش تحت آزمون قرار گرفت حداکثر عدم قطعیت جابجایی، $0/17\%$ ، بدست آمد. این مقادیر نشان از دقت بالای آزمون‌های انجام گرفته دارد.

۷- نتیجه‌گیری

تمامی این نتایج مربوط به نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده ما در محدوده جریان آرام، یک فاز و در ناحیه توسعه یافته در کانالی با مقطع مربعی که هر چهار دیواره آن تحت تأثیر شار حرارتی یکنواخت و عایق بندی شده می‌باشد. بدین ترتیب نتایج اصلی پژوهش حاضر به شرح ذیل می‌باشد:

- در نبود میدان مغناطیسی خارجی، در شار حرارتی 134 وات، بکارگیری فروسیال $0/5\%$ در قیاس با آب خالص باعث $15/8\%$ رشد و فروسیال 1% ، در مقایسه با آب خالص باعث 30% افزایش انتقال حرارت جابجایی می‌گردد تحت شار حرارتی کل 545 وات برای فروسیال 1% ، افزایش 48% و در شار $321/3$ وات برای فروسیال 1% ، 38% رشد مشاهده گردید که این موضوع به دلیل ثابت بودن عدد ناسلت و افزایش مقدار ضریب هدایت سیال است.

- ملاحظه می‌شود که در شار حرارتی $1258/2 \text{ W}$ هنگامی که از آهنربا در $x=0\text{cm}$ استفاده می‌شود مقدار ضریب جابجایی از $358/43 \text{ W/m}^2\text{K}$ به مقدار $368/74 \text{ W/m}^2\text{K}$ افزایش می‌یابد، یعنی رشدی معادل $2/8\%$. در همین شار حرارتی هنگامی که آهنربا در $x=80 \text{ cm}$ قرار می‌گیرد ضریب جابجایی از $358/40 \text{ W/m}^2\text{K}$ به $369/76 \text{ W/m}^2\text{K}$ افزایش می‌یابد ($3/16\%$) و زمانی که آهنربا در $x=32 \text{ cm}$ قرار می‌گیرد ضریب

۸- فهرست علائم

علائم یونانی			
ρ_{nf}	چگالی نانوسیال kg/m^3	A'	مساحت سطح مقطع m^2
$\rho_{Fe_3O_4}$	چگالی اکسید آهن kg/m^3	A	مساحت جانبی کانال m^2
ρ_w	چگالی آب خالص kg/m^3	a	عرض داخلی کانال m
ϕ	درصد حجمی	Δa	عدم قطعیت عرض داخلی کانال m
μ	ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال $mPa.s$	Cp	ظرفیت گرمایی ویژه J/kgK
μ_w	ویسکوزیته دینامیکی آب $mPa.s$	C_w	ظرفیت گرمایی ویژه آب J/kgK
زیر نویس		$C_{Fe_3O_4}$	ظرفیت گرمایی ویژه اکسید آهن J/kgK
nf	نانوسیال	D_h	قطر هیدرودینامیکی m
b	بالک	h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
w	دیواره	h_{local}	ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی
h	هیدرودینامیک	Δh	عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت جابجایی
$Local$	محلی	$h_{\phi=1\%}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی فروسیال با درصد حجمی ۱٪
		$h_{\phi=0/5\%}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی فروسیال با درصد حجمی ۰/۵٪
		h_{water}	ضریب انتقال حرارت جابجایی آب خالص
		I	شدت جریان الکتریکی A
		ΔI	عدم قطعیت شدت جریان الکتریکی A
		K	هدایت الکتریکی mS/cm
		k	هدایت حرارتی W/mK
		L	طول کانال m
		ΔL	عدم قطعیت طول m
		\dot{m}	دبی جرمی kg/s
		Nu	عدد ناسلت
		Nu_{local}	عدد ناسلت محلی
		ΔNu	عدم قطعیت ناسلت
		P	محیط سطح مقطع m
		Q	دبی حجمی ml/min
		q	انرژی حرارتی w
		q''	شار حرارتی بر واحد سطح W/m^2
		R	تابع
		δR_{xi}	عدم قطعیت تابع
		ΔT	عدم قطعیت دما $^{\circ}C$
		T_w	دمای داخلی دیواره $^{\circ}C$
		T_b	دمای بالک $^{\circ}C$
		v	سرعت سیال m/s
		V	ولتاژ الکتریکی V
		ΔV	عدم قطعیت ولتاژ الکتریکی V
		x	فاصله از ابتدای قسمت تحت آزمون
		X_i	متغیرهای مستقل
		$\pm \delta X_i$	عدم قطعیت متغیرهای مستقل

منابع

- [1] A. Ghadimi, R. Saidur, H. Metselaar, A review of nano-fluid stability properties and characterization in stationary conditions, International journal of heat and mass transfer, 54(17-18) (2011) 4051-4068.
- [2] Z. Haddad, C. Abid, H.F. Oztop, A. Mataoui, A review on how the researchers prepare their nanofluids, International Journal of Thermal Sciences, 76 (2014) 168-189.
- [3] Y. Li, S. Tung, E. Schneider, S. Xi, A review on development of nanofluid preparation and characterization, Powder technology, 196(2) (2009) 89-101.
- [4] W. Yu, H. Xie, A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications, Journal of nanomaterials, 2012 (2012).
- [5] S. Özerinç, S. Kakaç, A.G. Yazıcıoğlu, Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review, Microfluidics and Nanofluidics, 8(2) (2010) 145-170.
- [6] S. Murshed, K. Leong, C. Yang, Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids—a critical review, Applied Thermal Engineering, 28(17-18) (2008) 2109-2125.
- [7] M. Chandrasekar, S. Suresh, T. Senthilkumar, Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids—A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(6) (2012) 3917-3938.

- media, *Journal of Mechanics*, 30(3) (2014) 265-275.
- [18] P. Keblinski, S. Phillpot, S. Choi, J. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International journal of heat and mass transfer*, 45(4) (2002) 855-863.
- [19] M.M. Seyed Hossein Hosseini, Investigate the methods available for the stability of nanofluids and their effect on thermal conductivity, *Nanotechnology journal*, 4 (12) 28-32 in persian.
- [20] R. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics* Dover, New York, (1997).
- [21] M. Krakov, I. Nikiforov, To the influence of uniform magnetic field on thermomagnetic convection in square cavity, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 252 (2002) 209-211.
- [22] H. Yamaguchi, I. Kobori, Y. Uehata, Heat transfer in natural convection of magnetic fluids, *Journal of thermophysics and heat transfer*, 13(4) (1999) 501-507.
- [23] H. Yamaguchi, I. Kobori, Y. Uehata, K. Shimada, Natural convection of magnetic fluid in a rectangular box, *Journal of Magnetism and Magnetic materials*, 201(1-3) (1999) 264-267.
- [24] A. Gavili, M. Lajvardi, J. Sabbaghzadeh, The effect of magnetic field gradient on ferrofluids heat transfer in a two-dimensional enclosure, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 7(8) (2010) 1425-1435.
- [25] H. Kikura, T. Sawada, T. Tanahashi, Natural convection of a magnetic fluid in a cubic enclosure, *Journal of Magnetism and Magnetic materials*, 122(1-3) (1993) 315-318.
- [26] T. Sawada, H. Kikura, A. Saito, T. Tanahashi, Natural convection of a magnetic fluid in concentric horizontal annuli under nonuniform magnetic fields, *Experimental thermal and fluid science*, 7(3) (1993) 212-220.
- [27] S.M. Snyder, T. Cader, B.A. Finlayson, Finite element model of magnetoconvection of a ferrofluid, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 262(2) (2003) 269-279.
- [8] J. Philip, P.D. Shima, Thermal properties of nanofluids, *Advances in colloid and interface science*, 183 (2012) 30-45.
- [9] S. Suresh, K. Venkitaraj, P. Selvakumar, M. Chandrasekar, Effect of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 38 (2012) 54-60.
- [10] S. Halelfadl, T. Maré, P. Estellé, Efficiency of carbon nanotubes water based nanofluids as coolants, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53 (2014) 104-110.
- [11] M. Mehrali, E. Sadeghinezhad, S.T. Latibari, S.N. Kazi, M. Mehrali, M.N.B.M. Zubir, H.S.C. Metselaar, Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets, *Nanoscale research letters*, 9(1) (2014) 15.
- [12] D. Madhesh, R. Parameshwaran, S. Kalaiselvam, Experimental investigation on convective heat transfer and rheological characteristics of Cu-TiO₂ hybrid nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 52 (2014) 104-115.
- [13] Z. Haddad, H.F. Oztop, E. Abu-Nada, A. Mataoui, A review on natural convective heat transfer of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7) (2012) 5363-5378.
- [14] A. Kuznetsov, D. Nield, Natural convective boundary-layer flow of a nanofluid past a vertical plate, *International Journal of Thermal Sciences*, 49(2) (2010) 243-247.
- [15] A. Behseresht, A. Noghrehabadi, M. Ghalambaz, Natural-convection heat and mass transfer from a vertical cone in porous media filled with nanofluids using the practical ranges of nanofluids thermo-physical properties, *Chemical Engineering Research and Design*, 92(3) (2014) 447-452.
- [16] D. Nield, A. Kuznetsov, The Cheng-Minkowycz problem for natural convective boundary-layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(25) (2009) 5792-5795.
- [17] A. Noghrehabadi, M. Ghalambaz, A. Ghanbarzadeh, Effects of variable viscosity and thermal conductivity on natural-convection of nanofluids past a vertical plate in porous

- aqueous ferrofluid, *Journal of Chemical Education*, 76(7) (1999) 943.
- [36] T. Lee, J.H. Lee, Y.H. Jeong, Flow boiling critical heat flux characteristics of magnetic nanofluid at atmospheric pressure and low mass flux conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56(1-2) (2013) 101-106.
- [37] O. Mahian, A. Kianifar, C. Kleinstreuer, A.-N. Moh'd A, I. Pop, A.Z. Sahin, S. Wongwises, A review of entropy generation in nanofluid flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65 (2013) 514-532.
- [38] F.P. Incropera, A.S. Lavine, T.L. Bergman, D.P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, Wiley, 2007.
- [39] A. Bejan, A.D. Kraus, *Heat transfer handbook*, John Wiley & Sons, 2003.
- [40] M. Pastoriza-Gallego, L. Lugo, J. Legido, M. Piñeiro, Enhancement of thermal conductivity and volumetric behavior of Fe x O y nanofluids, *Journal of Applied Physics*, 110(1) (2011) 014309.
- [41] M. Lajvardi, J. Moghimi-Rad, I. Hadi, A. Gavili, T.D. Isfahani, F. Zabihi, J. Sabbaghzadeh, Experimental investigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic field effect, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(21) (2010) 3508-3513.
- [42] M. Yarahmadi, H. Moazami Goudarzi, M.B. Shafii, 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*, 68 (2015) 601-611.
- [43] K. Okada, H. Ozoe, Experimental heat transfer rates of natural convection of molten gallium suppressed under an external magnetic field in either the X, Y, or Z direction, (1992).
- [28] D. Zablockis, V. Frishfelds, E. Blums, Numerical investigation of thermomagnetic convection in a heated cylinder under the magnetic field of a solenoid, *Journal of physics: condensed matter*, 20(20) (2008) 204134.
- [29] M. Asfer, B. Mehta, A. Kumar, S. Khandekar, P.K. Panigrahi, Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer characteristics of ferrofluid flowing through a circular stainless steel tube, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 59 (2016) 74-86.
- [30] N. Hatami, A.K. Banari, A. Malekzadeh, A. Pouranfard, The effect of magnetic field on nanofluids heat transfer through a uniformly heated horizontal tube, *Physics Letters A*, 381(5) (2017) 510-515.
- [31] M. Yarahmadi, H.M. Goudarzi, M. Shafii, 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*, 68 (2015) 601-611.
- [32] L.S. Sundar, M. Naik, K. Sharma, M. Singh, T.C.S. Reddy, Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 37 (2012) 65-71.
- [33] Y.-C. Chiang, J.-J. Chieh, C.-C. Ho, The magnetic-nanofluid heat pipe with superior thermal properties through magnetic enhancement, *Nanoscale research letters*, 7(1) (2012) 322.
- [34] M. Goharkhah, M. Ashjaee, M. Shahabadi, 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*, 99 (2016) 113-124.
- [35] P. Berger, N.B. Adelman, K.J. Beckman, D.J. Campbell, A.B. Ellis, G.C. Lisensky, Preparation and properties of an

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Nilforooshan Dardashti, M. M. Shahmardan, M. Nazari, M. Nazari, Convection Heat transfer Fe_3O_4 /Water in a Square microchannel Under Uniform Heat Flux and Magnetic Field, Amirkabir J. Mech Eng., 53(9) (2021) 4925-4942.

DOI: 10.22060/mej.2021.18841.6901

