

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(11) (2021) 791-794 DOI: 10.22060/mej.2019.16499.6407

Investigating the Orientation of the Heater and Cooler on the Performance of a Mini Natural Circulation Loop with Cu-Water Nanofluid

S. M. Seyyedi^{1*}, A. S. Dogonchi², M. Hashemi-Tilehnoee²

¹ Department of Mechanical Engineering, Aliabad Katoul Branch, Islamic Azad University, Aliabad Katoul, Iran ² Young Researchers and Elite Club, Aliabad Katoul Branch, Islamic Azad University, Aliabad Katoul, Iran

ABSTRACT: The main objective of this paper is to investigate the effects of the orientation of heater and cooler on the mass flow rate and temperature distribution in a natural circulation loop. The governing equations of the natural circulation loop - mass conservation, momentum, and energy- are written in the non-dimensional form. Cu-Water nanofluids considered as the working fluid and the effect of nanoparticles percentage on mass flow rate is investigated. Also, the effects of other parameters such as pipe diameter, height of the loop, loop inclination angle and the heater power on the mass flow rate of the loop and temperature distribution are investigated. The results show the mass flow rate increases 43% when the diameter of pipes increases 20% for all orientations of the heater and cooler. For heater power 50 W, the mass flow rate increases 12.8% almost, when the percentage of nanoparticles increases 2%. The mass flow rate increases 22.4% almost as the power heater increases from 20 W to 30 W (50 % increasing) for all orientations. For heater power 20 W and 2% nanoparticles, the temperature at the end of heater (hot leg) for horizontal heater and horizontal cooler and vertical heater and vertical cooler is 34 °C, and 97 °C, respectively.

Review History: Received: 2019/06/25

Revised: 2019/08/06 Accepted: 2019/09/22 Available Online: 2019/10/05

Keywords:

Mini natural circulation loop Mass flow rate Heater and cooler Nanofluid

1-Introduction

A simple rectangular Natural Circulation Loop (NCL) consists of a heater, a cooler, cold leg and a hot leg. The main aim of NCLs is heat transfer from a heat source to a heat sink without using a mechanical pump. NCL is used in various energy systems, such as solar heaters, nuclear reactors, geothermal power production, and engine and computer cooling. The capability of heat transfer depends on the mass flow rate in an NCL that the latter is a function of cooler and heater orientations. In a rectangular NCL, there are four orientations for the heater and cooler that are [1]: (1) Horizontal Heater and Horizontal Cooler (HHHC), (2) Horizontal Heater and Vertical Cooler (HHVC), (3) Vertical Heater and Horizontal Cooler (VHHC) and (4) Vertical Heater and Vertical Cooler (VHVC). Fig. 1 shows the schematic of four orientations. Vijayan et al. [2] obtained the steady state mass flow rate as a function of just one similarity group. In 2002, the effect of loop diameter on the stability of single phase natural circulation in rectangular loops was investigated by Vijayan [3]. An experimental investigation of single-phase natural circulation behavior in a rectangular loop with Al2O3 nanofluids was performed by Nayak et al [4]. In 2011, a generalized flow equation was proposed for cases where a single friction law is not applicable for the entire loop by Swapnalee and Vijayan [5]. The proposed equation is

tested with experimental data generated in a uniform diameter rectangular loop and is found to be in good agreement. In 2018, Seyyedi et al. [6] studied the behavior of a rectangular natural circulation loop at steady state. They considered HHHC orientation for loop and investigated the effects active parameters on the mass flow rate and temperature of fluid. In 2019, the behavior of a rectangular natural circulation loop was analyzed experimentally and numerically by Seyyedi et al. [7] and Hashemi-Tilehnoee et al. [8]. The type of their loop was HHHC and pure water was considered as working fluid. In the present work, a rectangular single-phase natural circulation mini-loop is considered and the effects of heater and cooler orientations are investigated on the steady state mass flow rate and the steady state fluid temperature. Cu-Water nanofluid is considered as the working fluid and the influences of active parameters such as heater power, diameter of tube, the height of loop, nanoparticle volume fraction and so on are investigated.

2- Governing Equations

The non-dimensional form of governing equations (momentum and energy) can be written as follows [7]:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{Gr_m}{Re_{ss}^3} \oint \theta dZ - \frac{pL_t \omega^{2-b}}{2DRe_{ss}^b}$$
(1)

*Corresponding author's email: s.masoud seyedi@aliabadiau.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visi https://mej.aut.ac.ir/article_3620.html.



Fig. 1. Schematic view of natural circulation loop with different orientation

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{L_t}{H} \omega \frac{\partial \theta}{\partial S} = \begin{cases} \frac{L_t}{L_h} \text{ for heater } (0 < S \le S_h) \\ 0 \quad \text{for pipes } (S_h < S \le S_{hl}) \text{ and } S_c < S \le S_t) \\ -St_m \theta \quad \text{for cooler } (S_{hl} < S \le S_c) \end{cases}$$
(2)

3- Results and Discussion

Fig. 2 presents the steady state mass flow rate versus the heater power for three values of volume fraction of nanoparticles for HHHC orientation. The figure shows that the mass flow rate increases as the nanoparticle volume fraction increases for each value of heater power. For example, the mass flow rate increases 12.8% when the nanoparticle volume fraction increases from 0 to 2% for heater power 50 W.



Fig. 2. Mass flow rate versus heater power for three different values of nanoparticle volume fractions

Fig. 3 demonstrates the steady state mass flow rate at three values of heater power for different orientations of heater and cooler. The figure shows that the mass flow rate for HHHC is more than other orientations and VHVC is less than other orientations for each heater power. Also, the mass flow rate ascends with increasing the heater power. For example, the

mass flow rate increases 22.4% as power heater increases from 20 W to 30 W for all orientations.



Fig. 3. Mass flow rate at different heater powers for all orientations

Fig. 4 shows the effects of loop diameter on the mass flow rate for all orientations. The figure shows that the mass flow rate increases 43.47%, 41.59%, 43.62% and 43.84% for HHHC, HHVC, VHHC, and VHVC, respectively when loop diameter increases from 5 mm to 6 mm.



Fig. 4. Mass flow rate at different diameters for all orientations

Fig. 5 illustrates the nanofluid temperature along the loop for all orientations. For a constant location of the loop, the nanofluid temperature for VHVC is more than other orientations and HHHC is less than other orientations. For example, the nanofluid temperature at the end of heater is 31°C and 97°C for HHHC and VHVC, respectively.

4- Conclusion

In the present work, the performance of a rectangular natural circulation mini loop was investigated. The working fluid was selected Cu-water and the effects of active parameters such as hater power, and loop diameter was studied on the mass flow rate and nanofluid temperature. The results show that for heater power 50W, the mass flow rate increases 12.8% almost when the percentage of nanoparticles increases 2%. Also the results show the mass flow rate increases 43% when the diameter of pipes increases 20% for all orientations of the heater and cooler.



Fig. 5. Temperature distribution at $\dot{Q}_h = 20 \text{ W}$ for different orientations

5- References

- Y. Zvirin, A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems, Nuclear Engineering and Design, 67(2) (1982) 203-225.
- [2] P. Vijayan, A. Nayak, D. Saha, M. Gartia, Effect of loop diameter on the steady state and stability behaviour of singlephase and two-phase natural circulation loops, Science and technology of nuclear installations, 2008 (2008).
- [3] P. Vijayan, Experimental observations on the general trends of

the steady state and stability behaviour of single-phase natural circulation loops, Nuclear Engineering and Design, 215(1-2) (2002) 139-152.

- [4] A. Nayak, M. Gartia, P. Vijayan, An experimental investigation of single-phase natural circulation behavior in a rectangular loop with Al2O3 nanofluids, Experimental thermal and fluid science, 33(1) (2008) 184-189.
- [5] B. Swapnalee, P. Vijayan, A generalized flow equation for single phase natural circulation loops obeying multiple friction laws, International Journal of Heat and Mass Transfer, 54(11-12) (2011) 2618-2629.
- [6] S.M. Seyyedi, M. Hashemi-Tilehnoee, Parametric study of a rectangular single phase natural circulation loop at steady state, Modares Mechanical Engineering, 18(2) (2018) 413-422.
- [7] S. Seyyedi, N. Sahebi, A. Dogonchi, M. Hashemi-Tilehnoee, Numerical and experimental analysis of a rectangular singlephase natural circulation loop with asymmetric heater position, International Journal of Heat and Mass Transfer, 130 (2019) 1343-1357.
- [8] M. Hashemi-Tilehnoee, N. Sahebi, A. Dogonchi, S.M. Seyyedi, S. Tashakor, Simulation of the dynamic behavior of a rectangular single-phase natural circulation vertical loop with asymmetric heater, International Journal of Heat and Mass Transfer, 139 (2019) 974-981.

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۱، سال ۱۳۹۹، صفحات ۳۲۲۳ تا ۳۲۲۴ DOI: 10.22060/mej.2019.16499.6407

بررسی اثر جهت قرار گیری هیتر و کولر بر عملکرد یک مدار جابهجایی طبیعی مینیاتوری با نانو سیال آب-مس

سید مسعود سیدی ** ، عبدالستار دوگونچی^۲، مهدی هاشمی تیله نوئی ^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران ۲ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران

تاریخچه داوری: دریافت: ۰۴–۰۴–۱۳۹۸ بازنگری: ۱۵–۵۵–۱۳۹۸ پذیرش: ۳۱–۰۶–۱۳۹۸ ارائه آنلاین: ۱۳–۰۷–۱۳۹۸

کلمات کلیدی: مدار جابهجایی مینیاتوری نرخ دبی جرمی هیتر و کولر نانو سیال

عنوان راه حلى مناسب در خنک کنندگي سلولهاي فتوولتائيک و

ریزپردازندهها به کار گرفته شوند. اختلاف دما بین منبع گرم (هیتر) و

منبع سرد (کولر) محرک اصلی برای چرخش سیال عامل در یک مدار

جابهجایی طبیعی میباشد، زیرا اختلاف دما باعث تغییر چگالی سیال

عامل و به وجود آمدن نیروی شناوری می گردد. در حالت پایا، نیروی

شناوری و نیروی اصطکاک در امتداد مدار با یکدیگر موازنه می شوند.

هر چقدر دبی جرمی جریان بیشتر باشد، توانایی انتقال حرارت مدار

جابهجایی طبیعی افزایش مییابد. یکی از عوامل اثر گذار بر دبی

جرمی جریان، جهت قرار گیری هیتر و کولر در مدار جابهجایی طبیعی

میباشد. در یک مدار طبیعی مستطیل شکل، چهار حالت قرارگیری

هيتر و كولر عبارتند از: (الف) هيتر افقي - كولر افقي ، (ب) هيتر افقي-

کولر عمودی^۵، ج) هیتر عمودی- کولر افقی²و (د) هیتر عمودی - کولر

عمودی^۲. شکل ۱ شماتیک ساده مدار جابهجایی طبیعی را برای چهار

Horizontal Heater and Horizontal Cooler (HHHC)

Horizontal Heater and Vertical Cooler (HHVC)

Vertical Heater and Horizontal Cooler (VHHC)

Vertical Heater and Vertical Cooler (VHVC)

5

6

7

خلاصه: هدف اصلی این مقاله، بررسی اثرات جهت قرارگیری هیتر و کولر بر دبی جرمی مدار و توزیع دما در مدار جابهجایی طبیعی می باشد. برای رسیدن به این هدف، معادلات حاکم بر مدار جابهجایی طبیعی- بقاء جرم، مومنتم و انرژی- به صورت بدون بعد نوشته می شوند. نانو سیال آب – مس به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده و تأثیر درصد نانو ذرات بر دبی جرمی بررسی می گردد. همچنین، اثرات دیگر پارامترها مانند قطر لوله، ارتفاع مدار، زاویه شیب مدار نسبت به قائم، و توان هیتر بر روی نرخ دبی جرمی مدار و توزیع دما بررسی می گردند. نتایج نشان می دهد که افزایش ۲۰ درصدی قطر لولههای مدار برای تمام جهتهای قرارگیری هیتر و کولر، به طور متوسط باعث افزایش ۳۴ درصدی دبی جرمی مدار می گردد. در توان هیتر ۵۰۷ شنا می ده می گردند. نتایج نشان می دهد که افزایش ۲۰ تقریباً ۱۸/۸٪ افزایش می یابد. هنگامی که درصد نانو ذره از مقدار صفر به ۲٪ افزایش می ابد، دبی جرمی دبی جرمی حالت پایا تقریباً ۲۲/۶٪ افزایش می یابد. در توان هیتر ۵۰۷ و با ۲٪ نانو ذره، دما در انتهای هیتر برای حالت هیتر افقی حکولر افقی و برای حالت هیتر عمودی کولر عمودی به تریب ۲۰ ۳ و ۲۰ ۲٪ نانو ذره در انه ار انتهای هیتر برای حال

۱– مقدمه

در یک مدار جابهجایی طبیعی، حرارتی که در منبع حرارتی دما بالا (هیتر) تولید میشود توسط سیال عامل به سمت منبع حرارتی دما پائین (کولر) انتقال داده میشود. مدارهای جابهجایی طبیعی معمولاً در دو حالت ابعاد بزرگ و ابعاد کوچک (که در این جا به اختصار مینیاتوری نامیده میشوند) بررسی میگردند. یکی از کاربردهای اصلی مدار جابهجایی طبیعی در انواع راکتورهای شکافت هستهای است. انواع راکتورهای شکافت هستهای مانند راکتورهای آب سبک تحت فشار¹، راکتورهای آب جوشان^۲، خنک کننده مذاب^۳ از کاربردهای اصلی مدار جابهجایی طبیعی مینیاتوری به عنوان یک سیستم خنک کننده به جابهجایی طبیعی مینیاتوری به عنوان یک سیستم خنک کننده به

Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) که که دو ساید که درمی (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.

¹ Pressurized Water Reactor (PWR)

² Boiling Water Reactor (BWR)

³ Liquid Metal Reactor

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: s.masoud_seyedi@aliabadiau.ac.ir



شکل ۱: شماتیک مدار جابهجایی طبیعی مستطیل شکل برای جهتهای مختلف قرارگیری هیتر و کولر

Fig. 1. Schematic view of natural circulation loop with different orientation

حالت نشان میدهد.

در انواع راکتورهای هستهای، محل قرارگیری هیتر و کولر متفاوت است. به عنوان مثال، در راکتورهای آب سبک نوع اروپایی مدار از نوع هیتر عمودی - کولر عمودی و در نوع روسی - به مانند راكتور بوشهر - از نوع هيتر عمودي- كولر افقي است. البته تحقيق بر روی به کارگیری ماهیت چرخش طبیعی در مواقع عملکرد عادی و اضطراری در راکتورهای تولید انرژی همجوشی و خصوصاً پوششهای جانبی مولد تریتیوم در حال گسترش است. در فاصله بین سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ میلادی، پژوهشگرانی چون جاپیک[۲]، زویرین [۳]، جریف [۴] معادلات حاکم بر مدارهای جابهجایی طبیعی را به دست آوردند. ویجایان و همکاران [۵] دبی جرمی در حالت پایا را به عنوان تابعی از یک گروه بدون بعد به دست آوردند. ویجایان [۶] پایداری یک مدار جابهجایی طبیعی را به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داد. نایاک و همکاران [۷] رفتار یک مدار جابهجایی طبيعي مينياتوري حاوى نانو سيال اكسيد آلومينيوم را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۱۲، میساله و همکاران [۸] به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر نانوسیال اکسید

آلومینیوم در یک مدار جابجایی طبیعی پرداختند. در همان سال، یک رابطه کلی برای ضریب اصطکاک که در هر سه ناحیه آرام ، گذار و متلاطم برای مدارهای جابهجایی طبیعی تکفاز معتبر است، توسط سواپنالی و ویجایان [۹] ارائه گردید. در سال ۲۰۱۴، عملکرد حرارتی یک مدار جابهجایی طبیعی با نانوسیال اکسید آلومینیوم با چشمه و چاه حرارتی مینیاتوری توسط هو و همکاران [۱۰] به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آنها نتیجه گرفتند که استفاده از نانوسیال هر دو عدد ناسلت مربوط به سمت گرمایش و سرمایش مدار را افزایش مىدهد. البته استفاده از نانوسيال روى عدد ناسلت مربوط به سمت گرمایش بیشتر از عدد ناسلت مربوط به سمت سرمایش مدار اثر دارد. در سال ۲۰۱۵، دوگانای و همکاران [۱۱] به بررسی اثر نانو سیالات مختلف در افزایش راندمان انتقال حرارت در یک مدار جابهجایم، طبيعی مينياتوری پرداختند. ليما و همكاران [۱۲]، به تحليل پايدرای یک مدار جابهجایی طبیعی سیستم خنک کننده کمکی پرداختند. آنها نتيجه گرفتند که حجم آب استخر تنها پارامتر مؤثر بر پايداري مدار نیست. در سال ۲۰۱۶، رفتار یک مدار جابه جایی طبیعی تکفاز با سیال عامل نمک مذاب ٔ بطور تئوری و آزمایشگاهی توسط سریواستاوا و همکاران [۱۳] مطالعه گردید. در سال ۲۰۱۶، مرادزاده و همکاران [۱۴] به تحلیل جریان جابهجایی همزمان آزاد و اجباری نانوسیال در یک محفظه باز مستطیلی به روش عددی پرداختند. آنها معادلات بدون بعد حاکم برای جریان آرام دو بعدی در داخل محفظه را با فرض سیال نیوتنی غیر قابل تراکم و با استفاده از تقریب بوزینسک حل نمودند. در سال ۲۰۱۷، حسینی آباد شاپوری و همکاران [۱۵] به تحلیل جابهجایی آزاد نانوسیال آب و اکسید آلومینیم در یک محفظه مربعی با مرزهای نیم دایرهای در بالا و پایین محفظه پرداختند. آنها نتيجه گرفتند که با افزايش کسر حجمي نانوذرات عدد ناسلت متوسط جریان افزایش می یابد که بیان نمودند این موضوع ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی می باشد. چنگ و همکاران [۱۶ و ۱۷] شبیه سازی عددی و بررسی آزمایشگاهی را برای یک مدار جابهجایی طبيعي تكفاز ارائه كردند. آنها از دو مبدل حرارتي به جاي منبع گرم و سرد استفاده کردند، اما اثر نرخ دبی سیالات گرم و سرد را در بررسی آزمایشگاهی در نظر نگرفتند. در سال ۲۰۱۸، انتقال حرارت جابهجایی طبیعی نانوسیال آب اکسیدآلومینیوم با خواص متغیر در

¹ Molten salt

جریان آشفته درون یک محفظه مربعی با منابع حرارتی گرم و سرد برجسته روی دیوارههای عمودی آن به صورت عددی توسط شیخ زاده و همکاران [۱۸] بررسی شد. آنها لزجت سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی و لزجت نانوسیال را تابع دما و کسر حجمی نانو ذرات در نظر گرفتند. در سال ۲۰۱۸، سیدی و هاشمی [۱۹] به تحلیل رفتار یک مدار جابهجایی طبیعی در حالت پایا پرداختند. آنها هیتر وکولر را افقی در نظر گرفتند و اثر پارامترهای تأثیر گذار بر دبی جرمی و دمای سیال را بررسی کردند. در سال ۲۰۱۹، مشخصههای انتقال حرارت یک مدار جابهجایی مستطیل شکل مینیاتوری توسط چنگ و همکاران [۲۰] به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آنها آب مقطر را به عنوان سیال عامل در نظر گرفتند. آنها همچنین نتایج شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی مدار را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. آنها بیان داشتند که مدار میناتوری تقریباً همیشه میل به پایداری دارد. مدار مورد مطالعه آنها از نوع هیتر افقی و کولر افقی بود. در سال ۲۰۱۹، سیدی و همکاران [۲۱] به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی به تحلیل یک مدار جابهجایی طبیعی از نوع هیتر افقی و کولر افقی پرداختند. سیال عامل در پژوهش آنها آب خالص در نظر گرفته شد و اثر بسیاری از پارمترهای مؤثر بر رفتار مدار از جمله نامتقارن بودن مکان هیتر و کولر را بررسی کردند. در سال ۲۰۱۹، هاشمی تیله نویی و همکاران [۲۲] به مدلسازی یک مدار جابهجایی طبیعی با هیتر نامتقارن به کمک کدهای ریلپ و فلوینت پرداختند. در مراجع [۱۹-۲۲] مروری بر پژوهشهای گذشته به خوبی بیان شده است. بسیاری از محققین، تحقیقات خود را بر روی مدارهای جابهجایی طبیعی با ابعاد بزرگ معطوف کردهاند و از سیستمهای با ابعاد کوچک (مینیاتوری) غافل شدهاند. هنگامی که صحبت از مدار مینیاتوری می شود، ابعاد سیستم نسبت به مدار با ابعاد بزرگ، خیلی کوچکتر است. اولین مشخصه در یک مدار مینیاتوری کوچک بودن قطر لولههای مدار نسبت به سیستمهای با ابعاد بزرگ است. مطابق آنچه در مراجع مشاهده می شود (مخصوصاً پژوهش های آزمایشگاهی) معمولاً اگر قطر مدار کمتر از ۲ میلیمتر باشد، آن مدار، یک مدار مینیاتوری محسوب می شود. مشخصه مدارهای مینیاتوری از لحاظ پارامترهای عملکردی و مشخصههای جریان، آرام بودن جریان در تمام مدار است. از نظر معادلات حاکم و فرضیات، در ظاهر تفاوتی بین مدار با ابعاد بزرگ و مدار مینیاتوری وجود ندارد، اما هنگامی که

بحث تعیین ثابتهای ضریب اصطکاک پیش می آید، تعیین این ثوابت برای جریان آرام اهمیت می یابد. همچنین در بیشتر پژوهش ها جهت قرارگیری هیتر و کولر از نوع افقی بوده است و در مورد تأثیر جهت مدار مینیاتوری باشد و سیال عامل نیز نانو سیال انتخاب گردد. در پژوهش حاضر، با استفاده از معادلات بدون بعد حاکم بر مساله، اثرات قطر لوله های مدار، ارتفاع مدار، زاویه شیب مدار نسبت به قائم، درصد نانو ذره و توان هیتر بر روی نرخ دبی جرمی و توزیع دما در مدار برای شرایط حالت پایا در یک مدار جابه جایی طبیعی بررسی می گردند.

نوآوریهای پژوهش حاضر نسبت به تحقیقات پیشین به صورت خلاصه عبارتند از:

الف- در پژوهشهای گذشته مرتبط با مدارهای مینیاتوری، معمولاً مشخصات هندسی مدار مورد مطالعه، ثابت در نظر گرفته شده است. در صورتی که در پژوهش حاضر، اثر تغییر مشخصات هندسی (مانند قطر و ارتفاع مدار) مورد بررسی قرار می گیرد.

ب – در پژوهش حاضر اثر جهت قرارگیری هیتر وکولر بر دبی جرمی و دمای سیال بررسی میگردد در حالی که در مراجع [۱۹ و ۲۱] هیتر وکولر افقی در نظر گرفته شدهاند.

ج- در پژوهش حاضر، سیال عامل نانو سیال مس- آب است و اثر درصد نانو سیال بر رفتار مدار بررسی می شود ولی در مراجع [۱۹ و ۲۱] سیال عامل آب بوده است. بنابراین، معادلات مربوط به محاسبه خواص نانو سیال اضافه می گردند.

د- در پژوهش حاضر اندازه ابعاد مدار کوچک است که در اصطلاح به آن مینی-لوپ (مدار مینیاتوری) گفته میشود، ولی در مراجع [۱۹ و ۲۱] اندازه ابعاد مدار بزرگ است.

۲- معادلات حاکم

معادلات بقاء جرم، مومنتم و انرژی برای یک مدار جابهجایی طبیعی تکفاز غیر قابل تراکم یک بعدی با در نظر گرفتن نانو سیال به عنوان سیال عامل به ترتیب در معادلات (۱) تا (۳) آمده است [۶ و ۱۹]:

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial s} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{L_t}{A}\frac{d\dot{m}}{dt} = g \oint \rho_{nf} dz - \frac{f \left(L_{eff}\right)_t \dot{m}^2}{2D \rho_0 A^2}$$
(Y)

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{L_t}{H} \omega \frac{\partial \theta}{\partial S} = \begin{cases} \frac{L_t}{L_h} \text{ for heater } (0 < S \le S_h) \\ 0 & \text{for pipes } (S_h < S \le S_{hl}) \text{ and } S_c < S \le S_t) \\ -St_m \theta & \text{for cooler } (S_{hl} < S \le S_c) \end{cases}$$
(**7**)

$$Re = \frac{\dot{m}D}{\mu_{nf}A}; Pr = \frac{\mu_{nf}C_{pnf}}{k_{nf}}; Nu = \frac{UL_t}{k_{nf}}; St = \frac{UA}{C_{pnf}\dot{m}};$$
$$St_m = \frac{4Nu}{Re_{ss}Pr}; Gr_m = \frac{g\beta_{nf}D^3\rho_0^2\dot{Q}_hH\cos\alpha}{A\mu_{nf}^3C_{pnf}}$$
(Y)

این نکته باید ذکر شود که در رابطه (۷) به جای شتاب جاذبه (۶) از عبارت ^{gcos ۵} استفاده گردیده تا امکان بررسی اثر زاویه شیب مدار فراهم گردد.

۳- محاسبه خواص نانو سیال خواص نانو سیال که در روابط (۲) تا (۷) ظاهر گردیدند، به کمک روابط زیر قابل محاسبه هستند.

چگالی نانو سیال توسط رابطه (۸)، محاسبه میشود:

$$\rho_{nf} = \rho_f \left(1 - \phi \right) + \rho_s \phi \tag{A}$$

که در رابطه بالا، ϕ درصد نانو ذره است و ρ_s . ρ_f به ترتیب چگالی آب و چگالی نانو ذره (در اینجا مس) میباشند. چسبندگی دینامیکی نانو سیال توسط مدل برینکمن [۲۳] و ضریب هدایت حرارتی آن، توسط مدل همیلتون وکراسر [۲۴] قابل محاسبه هستند که به ترتیب در رابطههای (۹) و (۱۰) نشان داده میشوند:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}}$$
(9)

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + (m-1)k_f - (m-1)\phi(k_f - k_s)}{k_s + (m-1)k_f + \phi(k_f - k_s)}$$
(1.)

در رابطه (۱۰)، پارامتر m نشان دهنده اثر شکل نانو ذره است.
ظرفیت گرمایی ویژه ، ضریب انبساط حجمی و ضریب پخش
گرمایی نانو سیال به ترتیب توسط روابط (۱۱) تا (۱۳) محاسبه
میگردند:

$$(\rho C_p)_{nf} = (\rho C_p)_f (1-\phi) + (\rho C_p)_s \phi$$
(۱۱)

$$\left(\rho\beta\right)_{nf} = \left(\rho\beta\right)_{f} \left(1 - \phi\right) + \left(\rho\beta\right)_{s} \phi \tag{17}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\dot{m}}{A \rho_0} \frac{\partial T}{\partial s} = \begin{cases} \frac{4q''}{D \rho_0 C_{pnf}} \text{ for heater } (0 < s \le s_h) \\ 0 \quad \text{for pipes } (s_h < s \le s_{hl} \text{ and } s_c < s \le L_t) \\ -\frac{4U}{D \rho_0 C_{pnf}} (T - T_s) \text{ for cooler } (s_{hl} < s \le s_c) \end{cases}$$
(7)

در رابطه (۲)، $(L_{eff})_t$ طول موثر کل مدار است که اتلافات محلی را به حساب می آورد. اگر از اتلافات محلی صرفنظر شود، طول مؤثر برابر با طول (محیط) مدار جابه جایی طبیعی است. برای استخراج معادلات و حل مسأله فرضیات و شرایط عبار تند از:

- در اعمال شرایط مرزی عدد استانتون اصلاح شده (شرط مرزی سمت کولر) و عدد گراشف اصلاح شده (شرط مرزی سمت هیتر) باید انتخاب شوند

- در معادله انرژی رابطه (۶) از اثر هدایت محوری و اتلافات ویسکوز صرفنظر شده است.

(قابل ذکر است در پژوهش حاضر، به دلیل مینیاتوری بودن مدار جریان آرام است بنابراین میتوان از اتلافات ویسکوز صرفنظر نمود. همچنین از هدایت محوری به دلیل پایین بودن عدد پکلت -حاصلضرب عدد رینولدز در عدد پرانتل- صرفنظر میشود).

معادلات مومنتم و انرژی با تعریف پارامترهای زیر بدون بعد میشوند.

$$\omega = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ss}}; \ \theta = \frac{T - T_s}{\left(\Delta T_h\right)_{ss}}; \tau = \frac{t}{t_r}; \ S = \frac{s}{H} \text{ and } \ Z = \frac{z}{H}$$
(*)

در رابطه (۴)، $m_{ss} = V \rho_0 / \dot{m}_{ss}$ میباشد. با استفاده از تقریب بوزینسک^۱ و پارامترهای بدون بعد ارائه شده در رابطه (۴)، شکل بدون بعد معادلات مومنتم و انرژی به صورت روابط (۵) و (۶) به دست میآیند:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{Gr_m}{Re_{ss}^3} \oint \theta dZ - \frac{pL_t \omega^{2-b}}{2DRe_{ss}^b}$$
(Δ)

¹ Boussinesq approximation

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{\left(\rho C_p\right)_{nf}} \tag{17}$$

۴- حل حالت پایا

با فرض جریان پایا، حل حالت پایا میتواند با برابر یک قرار دادن نرخ دبی جرمی بدون بعد و همچنین مساوی صفر قرار دادن تغییرات زمانی دبی جرمی بدون بعد و دمای بدون بعد در معادلات مومنتم و انرژی به دست آید:

$$\omega = 1, \, d\,\omega / d\,\tau = \partial\theta / \partial\tau = 0 \tag{14}$$

بنابراین با استفاده از معادله انرژی (معادله (۳)) عبارتهایی صریح برای توزیع دمای بدون بعد در هیتر و کولر به دست میآیند که به ترتیب در معادلات (۱۵) و (۱۶) نشان داده شدهاند:

$$\left[\theta_{h}\left(S\right)\right]_{ss} = \left(\theta_{cl}\right)_{ss} + \frac{H}{L_{h}}S \tag{10}$$

$$\left[\theta_{c}\left(S\right)\right]_{ss} = \left(\theta_{hl}\right)_{ss} \exp\left(St_{m}H\frac{S_{hl}-S}{L_{t}}\right)$$
(19)

در روابط (۱۵) و (۱۶)، $_{ss}(heta_{cl})$ و $_{ss}(heta_{bl})$ به ترتیب دمایهای بدون بعد بازوهای سمت سرد و گرم میباشند که به ترتیب از معادلات (۱۷) و (۱۸) به دست میآیند:

$$\left(\theta_{cl}\right)_{ss} = \left(e^{\frac{St_m L_c}{L_t}} - 1\right)^{-1} \tag{1Y}$$

$$\left(\theta_{hl}\right)_{ss} = \left(1 - e^{\frac{-St_m L_c}{L_l}}\right)^{-1} \tag{1A}$$

جالب است توجه شود در حل حالت پایا اختلاف دمای بدون بعد بازوهای سمت گرم و سرد مدار جابهجایی طبیعی مساوی یک است. یعنی با توجه به روابط (۱۷) و (۱۸) داریم:

$$\left(\theta_{hl}\right)_{ss} - \left(\theta_{cl}\right)_{ss} = 1 \tag{19}$$

حل حالت پایا برای معادله مومنتم (معادله (۵)) به صورت معادله (۲۰) بیان می شود:

$$Re_{ss} = \left(\frac{2}{p}Gr_m \frac{D}{L_t} I_{ss}\right)^{\frac{1}{3-b}}$$
(\(\cdots\))

$$I_{ss} = \oint \theta_{ss} dZ \tag{(1)}$$

جواب نهایی رابطه (۲۱) برای مدار جابهجایی طبیعی، بستگی به جهت قرارگیری هیتر و کولر دارد که میتوان نشان داد مقدار *ss* برای حالتهای مختلف از رابطههای (۲۲) تا (۲۵) به دست میآید [۲۵]:

$$I_{ss,HHHC} = 1 \tag{(YY)}$$

$$I_{ss,HHVC} = \frac{L_c}{H} \left[\frac{1}{1 - e^{\frac{-St_m L_c}{L_t}}} \right] + \frac{L_3}{H} - \frac{L_t}{St_m H}$$
(YY)

(ج) برای هیتر عمودی و کولر افقی داریم:
$$I_{ss,VHHC} = \frac{L_1 + 0.5L_h}{H}$$
 (۲۴)

$$I_{ss,VHVC} = \frac{L_c}{H} \left(e^{\frac{St_m L_c}{L_t}} - 1 \right)^{-1} + \frac{0.5L_h + L_1 - L_2 - L_t / St_m}{H}$$
(Ya)

بنابراین رابطه (۲۰) به صورت زیر بازنویسی می گردد:

$$Re_{ss} = \left(\frac{2Gr_m}{pN_G}I_{ss}\right)^{\frac{1}{3-b}} = C\left(\frac{Gr_m}{N_G}\right)^r$$
 (۲۶)
که در آن داریم [۶]:

$$N_G = \frac{L_t}{D}; C = \left(\frac{2}{p}I_{ss}\right)^r, r = \frac{1}{3-b}$$
(YY)

رابطه (۲۶) به رابطه ویجایان معروف است. مقادیر پارامترهای p و d در رابطه (۲۷) به نوع رژیم جریان (آرام، گذار و متلاطم) وابسته هستند که مطابق رابطه (۲۸) برای تعیین ضریب اصطکاک نیز استفاده می شوند [۶]:

$$f = \frac{p}{Re^b} = \frac{p\omega^{-b}}{Re^b_{ss}}$$
(YA)

اختلاف دمای دو سر هیتر با استفاده از رابطه بقاء انرژی در هیتر مطابق رابطه (۲۹) به دست میآید.

		زیکی آب و نانو ذره	خواص ترمو في	۲: ۱	جدول		
Fable	2.	Thermo-physical	properties	of	pure	water	and
		nano	particle				

آب خالص در فشار یک اتمسفر و دمای C° ۲۵	مس	خاصيت
٩٩٧/١	٨٩٣٣	ho (kg m ⁻³)
4184	377	$c_P \left(\mathrm{J \ kg^{-1} \ K^{-1}} \right)$
•/8180	4.1	$k \left(\text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1} \right)$
۰/۰۰۰۲۵	-	$oldsymbol{eta}\left(\mathbf{K}^{-1} ight)$
۶/٣	—	Pr
•/•••	_	μ (Pas)

جدول ۳: مقادیر ضریب شکل برای شکلهای مختلف نانو ذره Table 3: The values of nanoparticle shaping factor

ضریب شکل ذره ^۱ (<i>m</i>)	شکل ظاہری	نام
٣	0	کروی
۴/۸		استوانهای۳
۵/۷	\bigcirc	قرصى (پلاكتى) ^۴

¹ Particle shapes factor

² Spherical

³Cylinder

⁴ Platelet

جدول ۱ نشان داده شده است. برای بررسی اثر هر پارامتر، مقدار پارامتر مد نظر را تغییر میدهیم و سایر پارامترها را ثابت در نظر می گیریم. در همه بررسیهای مربوط به تغییر جهت هیتر و کولر، طول کل مدار ثابت در نظر گرفته شده است که در آخرین ردیف جدول ۱ آورده شده است. همچنین در جدول ۲ خواص ترموفیزیکی آب و نانو ذره مس داده شده است.

شکل نانو ذره و مقدار ضریب شکل مرتبط با آن (یعنی پارامتر m در رابطه (۱۰)) در جدول ۳، نشان داده شده است [۲۳].

جدول ۱: مشخصات هندسی مدار جابهجایی طبیعی Table 1. Geometrical specification of the NCL

مقدار پارامتر				نام پارامتر
НННС	HHVC	VHHC	VHVC	
۵	۵	۵	۵	D (mm)
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	W(mm)
۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	H(mm)
17.	17.	17.	17.	L_h (mm)
11.	11.	11.	11.	L_c (mm)
4.	۴.	۶۵	۶۵	L_l (mm)
۴۵	٧٠	۴۵	٧٠	$L_2 (\mathrm{mm})$
۴۵	٧٠	۴۵	٧٠	$L_3 (\mathrm{mm})$
۴.	۴.	۶۵	۶۵	$L_4 (\mathrm{mm})$
•	•	•	•	$\alpha(\circ)$
٩٠٠	٩٠٠	٩٠٠	٩٠٠	L_t (mm)

$$\left(\Delta T_h\right)_{ss} = \frac{\dot{Q}_h}{C_p \dot{m}_{ss}} \tag{(Y9)}$$

۵- بحث و بررسی نتایج

برای تحلیل مدار جابهجایی طبیعی و حل معادلات در حالت پایا، کد کامپیوتری در محیط برنامه نویسی متلب^۱ نوشته شده و اثر پارامترهای مختلف بررسی شده است. نخستین گام در تحلیل حالت پایای مدار، تعیین ضریب اصطکاک است. در مدارهای مینیاتوری، معمولاً جریان آرام است و بنابراین مقادیر پارمترهای *q و d* در رابطه (۲۸) به ترتیب برابر ۶۴ و ۱ میباشد. (مقادیر پارمترهای q و ط برای جریان گذار به ترتیب برابر ۱۲۰۶۳ و ۱۸۶/۰ و برای جریان مغشوش به ترتیب برابر ۱۳۱۶ و ۲۵/۰ میباشند.) برای جزئیات بیشتر مرجع [۱۹] را ببینید. بنابراین رابطه (۲۸) برای جریان آرام در حالت پایا به صورت زیر بازنویسی می گردد:

$$f = \frac{64}{Re_{ss}} \tag{(7.)}$$

همچنین ضریب انتقال حرارت کلی، با توجه به اختلاف دمای متوسط لگاریتمی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$U = \frac{\dot{Q}_h}{\pi D L_c \Delta T_m} \tag{(1)}$$

با توجه به شکل ۱ مقادیر اولیه هندسی مدارهای مورد بررسی در

1 MATLAB



شكل ٢: اعتبار سنجى پژوهش حاضر با)الف) مرجع [٧] براى تغييرات دبى جرمى حالت پايا و (ب) مرجع [٧] براى توزيع دماى سيال در طول مدار Fig. 2. Validation of present work with (a) Ref. [7] for variations of steady state mass flow rate (b) Ref. [19] for fluid temperature distribution along the loop



(ب)

(الف)



گرفته شد. توزیع دما در طول مدار، برای سه قطر مختلف به دست آمد که نتیجه در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است . برای سومین مقایسه، مشخصات هندسی مدار جابهجایی طبیعی که قبلاً توسط نویسندگان این مقاله ساخته شده و نتایج آن در مرجع [۲۱] آمده است به کد پژوهش حاضر وارد شد. سیال عامل مطابق با مرجع آب خالص در نظر گرفته شد. توزیع دما در طول مدار، برای سه توان مختلف هیتر به دست آمد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که نتیجه در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است. در مقایسه نتایج پژوهش مدار جابهجایی طبیعی مرجع [۷] با نانو سیال اکسید آلومینیوم به کد پژوهش حاضر وارد شد. نرخ دبی جرمی برای توانهای مختلف هیتر و در چهار مقدار مختلف درصد نانو ذره مقایسه شد. نتیجه در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است که توافق خوبی بین نتایج مرجع [۷] و پژوهش حاضر مشاهده می گردد. حداکثر خطا در این نمودار ۲ درصد می باشد. در دومین مقایسه، مشخصات هندسی مدار جابهجایی طبیعی مرجع [۱۹] که یک مدار اندازه بزرگ است به کد پژوهش حاضر وارد شد. سیال عامل مطابق با مرجع [۱۹] ، آب خالص در نظر



شکل ۴: (الف) نرخ دبی جرمی بر حسب توان هیتر در سه مقدار مختلف نانو ذره (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب $Gr_m \,/\,N_G$ در توانهای مختلف هیتر و درصدهای متفاوت نانو ذره

Fig. 4. (a) Mass flow rate versus heater power for three different values of nanoparticles volume fraction (b) Re_{ss} versus Gr_m / N_G at different values of heater powers and nanoparticle volume fractions

گام ۲: تعیین مشخصات هندسی مدار (جدول ۱)

گام ۳: تعیین متغیرهای مربوط به شرایط مرزی و عملکردی مدار مانند: قدرت هیتر (\dot{Q}_h) ، عدد استانتون اصلاح شده St_m ، زاویه شیب مدار (α) ، درصد نانو ذره (ϕ) و ...

گام ۴: محاسبه خواص نانو سیال با استفاده ازجداول ۲ و۳ و روابط (۸) تا (۱۳)

گام ۵: محاسبه عدد گراشف اصلاح شده $(Gr_m = \frac{g \beta_{nf} D^r \rho_{.}^{r} \dot{Q}_{h} H \cos \alpha}{A \mu_{nf}^{r} C_{pnf}})$

گام ۶: تعیین مقدار I_{ss} توسط یکی از روابط (۲۲) تا (۲۵) با توجه به گام ۱

گام ۷: محاسبه عدد رینولدز در حالت پایا با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷)

گام ۸: محاسبه ضریب اصطکاک توسط رابطه (۲۸) (در جریان آرام از رابطه (۳۰) استفاده میشود) گام ۹: محاسبه دبی جرمی حالت پایا ($\frac{Re_{ss}A \, \mu_{nf}}{D}$

گام ۱۰: تعیین اختلاف دمای دو سر هیتر در حالت پایا توسط رابطه (۲۹)

گام ۱۱: تعیین دمای بدون بعد بازوهای سرد و گرم به ترتیب از معادلات (۱۷) و (۱۸)

گام ۱۲: تعیین توزیع دمای بدون بعد در هیتر و کولر به ترتیب از معادلات (۱۵) و (۱۶)

گام ۱۳: محاسبه اختلاف دمای متوسط لگاریتمی در کولر (T_s) نابت باشد و (فرض میشود دمای سیال خنک کن در کولر (T_s) ثابت باشد و ΔT_r میشود دمای سیال خنک که در آن ΔT_r و $\Delta T_r - \Delta T_r$ به ترتیب اختلاف دما در طرف اول و دوم کولر میباشند)

گام ۱۴:محاسبه ضریب انتقال حرارت کلی با استفاده از رابطه (۳۱)

 $Nu = \frac{UL_t}{k_{nf}}$) گام 18: محاسبه عدد ناسلت ($Nu = \frac{UL_t}{k_{nf}}$) گام 19: محاسبه عدد استانتون اصلاح شده ($St_m = \frac{4Nu}{Re_{ss}Pr}$) (دقت شود محاسبه St_m در گام 18، جهت بررسی درستی محاسبات میباشد که باید با St_m در گام ۳ برابر باشد)

۳–۵– بررسی اثر درصد نانو ذره

در شکل ۴-الف اثر تغییر درصد نانو ذره بر روی دبی جرمی مدار جابهجایی در حالت هیتر افقی- کولر افقی در پنج مقدار متفاوت توان هیتر نشان داده شده است. همچنانکه شکل نشان میدهد در هر



شکل ۵: (الف) نرخ دبی جرمی در توانها و قطرهای مختلف برای هیتر افقی – کولر افقی (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب $Gr_m \,/\,N_G$ در توانهای مختلف هیتر و قطرهای متفاوت

Fig. 5. (a) Mass flow rate in different heater powers and diameters for HHHC (b) Re_{ss} versus Gr_m / N_G at different values of heater powers and diameters

مقدار توان هیتر، با افزایش درصد نانو ذره، دبی جرمی مدار افزایش می ابد. به طور مثال، در توان هیتر ۵۰۵ هنگامی که درصد نانو ذره از مقدار صفر به ۲٪ درصد افزایش می ابد، دبی جرمی تقریباً ۱۲/۸ ٪ افزایش می ابد. دلیل افزایش دبی جرمی این است که با توجه با رابطه (۸) و (۱۱)، با افزایش درصد نانو ذره ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال کاهش می ابد و سپس با توجه به رابطه (۲۹) دبی جرمی حالت پایا افزایش می ابد (اختلاف دمای دو سر هیتر با تغییر درصد نانو ذره تغییر نمی کند و ثابت است). همچنین، در هر درصدی از نانو ذره، با افزایش توان هیتر دبی جرمی مدار افزایش می ابد که دلیل آن با توجه با رابطه (۲۹) واضح است. به طور مثال برای غلظت نانو ذره ۲٪، هنگامی که توان هیتر از ۲۰۲۷ به ۳۰۷ افزایش می ابد (۰۰۰٪ افزایش) ، مقدار دبی جرمی مدار از ۶۰۷ به ۲۰۰۷ به

شکل F-ب عدد رینولدز در حالت پایا را (Re_{ss}) بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در سه درصد نانو ذره متفاوت و سه توان مختلف هیتر نشان میدهد. در این شکل St_m برابر با ۱۰ در نظر گرفته شده است. شکل نشان میدهد که در یک توان ثابت هیتر، با افزایش درصد نانو ذره، عدد رینولدز افزایش مییابد (به طور مثال، علامتهای دایره، مربع و مثلث سبز رنگ را ببینید). همچنین، با افزایش توان هیتر در یک درصد نانو ذرهی ثابت، باز هم عدد رینولدز افزایش مییابد. به عنوان مثال، اگر توان هیتر از WT

افزایش یابد (۵۰٪ افزایش) برای درصد نانو ذره ۱٪ (علامت مربع سبز و قرمز رنگ را ببینید) عدد رینولدز از ۵۳/۶ به ۶۵/۶ افزایش مییابد (۲۲/۴ ٪ افزایش) که بیانگر افزایش آشفتگی جریان است.

۴–۵–بررسی اثر قطر مداربرای حالت هیتر افقی – کولر افقی

شکلهای ۵ و ۶ اثر تغییر قطر لولههای مدار را به ترتیب روی دبی جرمی حالت پایا، عدد رینولدز حالت پایا، اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب انتقال حرارت کلی برای سه مقدار متفاوت توان هیتر در مدار جابهجایی طبیعی حالت هیتر افقی- کولر افقی نشان میدهند. در این شکلها St_m

در شکل ۵-الف قطر مبنا ۵mm است و اثر افزایش (یا کاهش) ۲۰ درصدی قطر مدار بر روی دبی جرمی حالت پایا نشان داده شده است. به طور مثال شکل نشان میدهد برای توان هیتر ۲۰۷ در صورتی که قطر لولههای مدار ۲۰٪ افزایش یابد دبی جرمی حالت پایا کپا ۴/۲۹ مییابد. همچنین این شکل نشان میدهد که در یک قطر ثابت، اگر توان هیتر افزایش یابد، دبی جرمی حالت پایا نیز افزایش مییابد که دلیل آن در تفسیر شکل ۴-الف بیان شد. به طور مثال برای همه قطرها، هنگامی که توان هیتر از ۲۰۳ به ۲۰۳ افزایش یابد (٪۵۰ افزایش)، مقدار دبی جرمی مدار به طور متوسط ۲۲/۲ ٪



شکل ۶: اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب انتقال حرارت کلی در توانها و قطرهای مختلف برای هیتر افقی – کولر افقی

Fig. 6. Heater temperature difference, friction coefficient, logarithmic mean temperature difference and overall heat transfer coefficient at different powers and diameters for HHHC

از ۵mm به ۶mm افزایش یابد (۲۰٪ افزایش) اختلاف دمای دو سر هیتر در حالت پایا از C° ۲۹/۸۶ به C۰/۲۴ (۳۰/۲۴٪ کاهش) کاهش می ابد (ستون قرمز رنگ را ببینید). همچنین در هر قطر ثابت، با افزایش توان هیتر، اختلاف دمای دو سر هیتر در حالت پایا افزایش می یابد. در مورد ضریب اصطکاک می توان بیان داشت که با افزایش قطر یا افزایش توان هیتر، عدد رینولدز افرایش می یابد (شکل ۵-الف را ببینید) و با توجه به رابطه (۳۰) مقدار ضریب اصطکاک کاهش می یابد. به طور مثال برای توان ۲۰W، اگر قطر لولههای مدار از ۵mm به ۴mm یا ۶mm تغییر کند، مقدار ضریب اصطکاک به ترتیب از ۱/۱۵۵۵ به ۱/۴۴۰۰ یا ۰/۹۶۶۴ تغییر پیدا خواهد کرد (ستونهای سبز رنگ در شکل را ببینید). همچنانکه مشاهده می شود در هر توان هیتر، با افزایش قطر، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی کاهش می یابد. زیرا با افزایش قطر اختلاف دمای دو سر هیتر کاهش می یابد (شکل مربوط به اختلاف دمای دو سر هیتر را ببینید) و با توجه به روابط (۱۷) و (۱۸) اختلاف دمای متوسط لگاریتمی کاهش می یابد. همچنین در یک قطر ثابت، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی با افزایش توان هیتر، افزایش می یابد. چهارمین بخش شکل نشان می دهد در یک توان ثابت هیتر، با افزایش قطر لولههای مدار، ضریب

شکل ۵–ب، عدد رینولدز در حالت پایا را (Re_{ss}) بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در سه توان مختلف هیتر و سه قطر متفاوت نشان میدهد. شکل نشان میدهد که در یک توان ثابت هیتر، با افزایش قطر لولههای مدار ، Re_{ss} افزایش مییابد که نشان میدهد آشفتگی جریان افزایش یافته است (علامتهای دایره، مربع و مثلث سبز رنگ را در توان ۲۰۳ ببینید). ارتباط مستقیم بین قطر و Re_{ss} در رابطه (۷) نشان داده شده است. همچنین، با افزایش توان هیتر برای هر یک از قطرها، باز هم عدد رینولدز افزایش مییابد. به عنوان مثال، اگر توان هیتر از ۱۰۰۳ به ۳۰۳ افزایش مییابد (۲۰۰٪ افزایش) برای قطر مسته را در توان ۶۷/۳ به یا می میابد (۲۰۰٪ افزایش)

شکل ۶۰ اثر تغییر قطر لولههای مدار را بر روی اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب انتقال حرارت کلی برای توانهای مختلف هیتر نشان میدهد. تحلیل اولین شکل با کمک شکل ۵-الف انجام می شود. با افزایش قطر لولههای مدار، در یک توان ثابت هیتر، دبی جرمی حالت پایای مدار افزایش و اختلاف دمای دو سر هیتر کاهش می یابد (رابطه (۲۹) را بینید). به طور مثال در توان ۳۰۳ هنگامی که قطر لولههای مدار



شکل ۷: (الف) نرخ دبی جرمی در توانهای مختلف هیتر برای همهی جهتها (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب Gr_m/N_G در توانهای مختلف هیتر برای همهی جهتها

Fig. 7. (a) Mass flow rate at different heater powers for all orientations (b) Re_{ss} versus Gr_m / N_G at different heater powers for all orientations

یک است)، سیس برای حالت دوم و سوم این مقدار کاهش می یابد (ولی تقریباً با یکدیگر برابر است) و در حالت چهارم این مقدار از همه کمتر است (میتوانید همزمان شکل ۱۱ را ببینید که در ادامه توضيح داده خواهد شد). با توجه به رابطه (۲۶) کاهش مقدار I_{ss} باعث Re_{ss} مقدار Re_{ss} خواهد شد و با توجه به رابطه (۷)، کاهش Re_{ss} نیز منجر به کاهش مقدار دبی جرمی خواهد شد. از طرفی شکل نشان میدهد که در هر حالت با افزایش توان هیتر، دبی جرمی افزایش مي يابد. اين افزايش به اين دليل است كه با افزايش توان هيتر، مطابق رابطه (۷)، عدد گراشف اصلاح شده افزایش می یابد و با افزایش عدد گراشف اصلاح شده، مطابق رابطه ۲۶، عدد رینولدز افرایش می یابد که نهایتاً مطابق رابطه ۷، به افزایش دبی جرمی منجر خواهد شد. به طور مثال هنگامی که توان هیتر از ۲۰۷ به ۳۰۳ افزایش می یابد (۵۰٪ افزایش) در همه حالتها، دبی جرمی حالت پایا تقریباً ۲۲/۴٪ افزایش می یابد. شکل۷–ب، عدد رینولدز در حالت پایا را (*Re*ss) بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در سه توان مختلف هیتر برای تمامی جهتهای قرارگیری هیتر و کولر نشان میدهد. شکل نشان میدهد که در یک توان ثابت هیتر، Re_{ss} برای حالت هیتر افقی -کولر افقی بیشترین مقدار و برای حالت هیتر عمودی - کولر عمودی کمترین مقدار را داراست (مثلاً علامتهای مربع را در توان ۲۰W ببینید). همچنین، با افزایش توان هیتر برای هر یک از حالتها، باز هم

انتقال حرارت کلی افزایش مییابد. زیرا با افزایش قطر لولههای مدار، از یک طرف اختلاف دمای متوسط لگاریتمی، کاهش مییابد (شکل مربوط به اختلاف دمای متوسط لگاریتمی را ببینید) که این موجب افزایش ضریب انتقال حرارت کلی میشود (رابطه (۳۱) را ببینید). ولی از طرف دیگر، با افزایش قطر لولههای مدار، سطح جانبی کولر افزایش مییابد که باعث کاهش ضریب انتقال حرارت کلی می گردد (رابطه (۳۱) را ببینید) که نهایتاً ضریب انتقال حرارت کلی افزایش مییابد (یعنی مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت کلی افزایش مییابد (یعنی مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت کلی بر مقدار کاهش آن غلبه می کند).

۵–۵ – بررسی اثر قدرت هیتر روی عمکرد مدار برای حالتهای مختلف قرارگیری هیتر وکولر

شکل ۷-الف دبی جرمی حالت پایای مدار را برای حالتهای مختلف جهت قرار گیری هیتر و کولر در سه توان مختلف هیتر نشان میدهد. شکل نشان میدهد که در یک توان ثابت هیتر، دبی جرمی در حالت هیتر افقی – کولر افقی از بقیه حالتها بیشتر است، در حالتهای هیتر افقی – کولر عمودی و هیتر عمودی – کولر افقی تقریباً یکسان است و در مورد هیتر عمودی – کولر عمودی دبی جرمی کمترین مقدار را دارد. دلیل این امر آن است که با توجه به رابطههای (۲۲) تا (۲۵)، در حالت اول بیشترین مقدار _{ss} وجود دارد (که مساوی



شکل ۸: (الف) نرخ دبی جرمی در قطرهای مختلف برای تمام جهتها (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب Gr_m/N_G در قطرهای مختلف برای تمام جهتها (ب) in Fig. 8. (a) Mass flow rate at different diameters for all orientations (b) Re_{ss} versus Gr_m/N_G at different diameters for

all orientations



شكل ۹: اختلاف دماى دو سر هيتر، ضريب اصطكاك، اختلاف دماى متوسط لگاريتمى و ضريب انتقال حرارت كلى در دو قطر مختلف براى تمام جهتها Fig. 9. Heater temperature difference, friction coefficient, logarithmic mean temperature difference and overall heat transfer coefficient at two different values of diameters for all orientations

۶-۹-بررسی اثر قطر لولهها روی عمکرد مدار برای حالتهای مختلف قرارگیری هیتر و کولر

شکلهای ۸ و ۹، اثر افزایش قطر لولههای مدار را نشان میدهند. در این شکلها مقادیر توان هیتر، درصد نانو ذره و عدد استانتون ثابت در نظر گرفته شده است (St_m برابر با ۲۰، ϕ برابر با ۲٪ و توان هیتر برابر با ۲۰W است). در شکل ۸-الف، اثر افزایش قطر لولههای مدار بر روی دبی جرمی حالت پایا برای همه جهتهای قرار گیری هیتر و کولر عدد رینولدز افزایش مییابد، زیرا با افزایش توان هیتر، عدد گراشف افزایش اصلاح شده مییابد (رابطه (۷)) و افزایش عدد گراشف اصلاح شده، منجر به افزایش عدد رینولدز خواهد شد (رابطه (۲۰)). به عنوان مثال، اگر توان هیتر از ۲۰۳ به ۳۰۳ افزایش یابد (۵۰٪ افزایش)، برای حالت هیتر افقی – کولر افقی، (علامت مربع و مثلث آبی رنگ را ببینید) عدد رینولدز از ۵۵ به حدود ۶۸ افزایش مییابد (۲۳/۶٪ افزایش) که بیانگر افزایش آشفتگی جریان است.

نشان داده شده است. شکل نشان میدهد در صورتی که قطر لولههای مدار از ۵mm به ۶mm افزایش یابد (۲۰٪ افزایش) دبی جرمی حالت پایا برای حالتهای اول تا چهارم به ترتیب ۴۳/۴۷٪، ۴۱/۵۹٪، ۴۳/۶۲ و ۴۳/۸۴٪ افزایش مییابد. دلیل افزایش دبی جرمی حالت پایا، با توجه به تعریف عدد رینولدز و ارتباط مستقیم آن با قطر قابل تحلیل است (رابطه (۷) را ببینید).

شکل ۸–ب، عدد رینولدز در حالت پایا را (Re_{ss}) بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در دو قطر مختلف برای تمامی جهتهای قرارگیری هیتر و کولر نشان میدهد. شکل نشان میدهد که در یک قطر ثابت، Re_{ss} برای حالت هیتر افقی – کولر افقی بیشترین مقدار و برای حالت هیتر عمودی – کولر عمودی کمترین مقدار را داراست (مثلاً علامتهای مربع را در قطر Rm ببینید). نکته جالب توجه در این نمودار این است که با افزایش قطر، در تمامی حالتهای مدار، هر دو مقدار se_{ss} و N_{d} به طور مستقل از یکدیگر افزایش مییابند (به طور مثال علامت دایره و مربع آبی رنگ را ببینید). زیرا با افزایش قطر، با توجه به تعریف عدد رینولدز، مقدار را ببینید). زیرا با افزایش قطر، با توجه به تعریف عدد رینولدز، مقدار کاهش Re_{ss} و در نتیجه افزایش Gr_m / N_g میگردد.

شکل ۹، اثر قطر لولههای مدار را بر روی اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب انتقال حرارت کلی برای جهتهای مختلف قرارگیری هیتر و کولر نشان میدهد. با افزایش قطر، دبی جرمی حالت پایا برای هر کدام از حالتها، افزایش مییابد (شکل ۸-الف را ببینید) و مطابق رابطه (۲۹)، با افزایش دبی جرمی اختلاف دمای دو سر هیتر کاهش مییابد. در با افزایش دبی جرمی اختلاف دمای دو سر هیتر یک پارامتر مهم است تحلیل پایداری مدار، اختلاف دمای دو سر هیتر یک پارامتر مهم است که میتواند جهت چرخش سیال در مدار را نشان دهد. در صورتی که قطر لولههای مدار از Mm به Mm افزایش یابد (۲۰٪ افزایش) اختلاف دمای دو سر هیتر در حالت پایا برای حالتهای اول تا چهارم به ترتیب ۳۰/۳۰ ٪، ۳۰/۳۲ ٪، ۳۰/۳۲ ٪ و ۲۰/۴۸ ٪ کاهش مییابد.

شکل نشان میدهد که با افزایش قطر، برای هر کدام از حالتها، ضریب اصطکاک و اختلاف دمای متوسط لگاریتمی کاهش مییابند در حالی که ضریب انتقال حرارت کلی افزایش مییابد. مقدار ضریب اصطکاک در شکل ۹، از تقسیم عدد ۶۴، بر مقدار رینولدز در هر حالت به دست میآید (رابطه (۳۰) را ببینید). دلایل فیزیکی افزایش

یا کاهش هر پارامتر، مانند تفسیر فیزیکی بیان شده در شکلهای ۵ و ۶ است. هنگامی که قطر لولههای مدار از ۵mm به ۶mm افزایش یابد (۲۰٪ افزایش) ضریب اصطکاک و اختلاف دمای متوسط لگاریتمی برای همه حالتها به طور متوسط به ترتیب حدوداً ۱۶/۵ ٪ و ۳۰/۴ ٪کاهش مییابند، در حالی که ضریب انتقال حرارت کلی به طور متوسط حدوداً ۱۹/۷ ٪ افزایش مییابد.

در شکل ۱۰، اثر تغییر قطر لولههای مدار بر روی عدد ناسلت در سه مقدار مختلف توان هیتر برای حالت هیتر افقی-کولر افقی نشان داده شده است. در این حالت St_m برابر با ۱۰ و ϕ برابر با ۲٪ است. همچنانکه مشاهده می شود در هر توان هیتر، با افزایش قطر، عدد ناسلت افزایش می یابد زیرا با افزایش قطر ضریب انتقال حرارت کلی افزایش می یابد (شکل ۶ را ببینید) و با توجه به رابطه (۷) عدد ناسلت نیز افزایش می یابد. همچنین در یک قطر ثابت، عدد ناسلت با افزایش توان هیتر، افزایش می یابد، زیرا با افزایش توان هیتر، ضریب انتقال حرارت کلی افزایش می یابد (شکل ۶ را ببینید) و افزایش ضريب انتقال حرارت كلى با توجه به رابطه (٧)، به افزايش عدد ناسلت منجر می شود. همچنین این شکل اثر قطر لوله های مدار را بر روی عدد ناسلت برای جهتهای مختلف قرارگیری هیتر و کولر نشان میدهد. در این قسمت St_m برابر با ۲۰، ϕ برابر با ۲٪ و توان هیتر برابر با ۲۰W است. با افزایش قطر، برای هر کدام از حالتها، عدد ناسلت افزایش می یابد. هنگامی که قطر لولههای مدار از ۵mm به ۶mm افزایش یابد (۲۰٪ افزایش) عدد ناسلت به طور متوسط







Fig. 11. I_{ss} for different orientations of heater and cooler

۱۹/۶ ٪ افزایش می یابد.

در شکل ۱۱، مقدار I_{ss} (رابطه (۲۱)) برای تمام جهتهای قرارگیری هیتر و کولر در دو ارتفاع مختلف و دو عدد استانتون مختلف نشان داده شده است. مقدار I_{ss} ، برای حالت هیتر افقی - کولر افقی ، همیشه مساوی یک است (رابطه (۲۲)). شکل نشان میدهد که با افزایش ارتفاع از ۲۵۰mm به ۳۰۰mm (٪۲۰ افزایش)، مقدار ss برای حالتهای هیتر افقی- کولر عمودی و هیتر عمودی –



کولر عمودی به ترتیب تقریباً 3 و 77 کاهش می یابد در حالی که با افزایش عدد استانتون اصلاح شده از 14 به 14 (71/8 کر افزایش) مقدار $s_s I$ برای حالتهای هیتر افقی- کولر عمودی و هیتر عمودی -کولر عمودی به ترتیب تقریباً 1/7 کر و 71/8 کر افزایش می یابد. مقدار $s_s I$ ، برای حالت هیتر عمودی- کولر افقی، با توجه به رابطه (17) برابر با 1/6 است. دقت شود هر چند ظاهراً این رابطه نشان می دهد با افزایش ارتفاع، مقدار $s_s I$ باید کاهش یابد، ولی چون هنگام بررسی اثر ارتفاع، طول هیتر ثابت در نظر گرفته می شود، بنابراین مقدار $s_s I$ با تعییر ارتفاع تغییری نمی کند و ثابت می ماند به عبارتی دیگر با توجه به رابطه (17) مقدار $s_s I$ ، برای حالت هیتر عمودی- کولر افقی، در مورتی که هیتر در وسط قرار گیرد (یعنی مطابق شکل ۱ فاصله L_1 با J_s مساوی باشد)، همیشه برابر با 1/6 است.

۷–۵-بررسی اثر ارتفاع مدار بر عمکرد مدار برای حالتهای مختلف قرارگیری هیتر و کولر

در شکل ۱۲–الف، اثر افزایش ارتفاع مدار بر روی دبی جرمی حالت پایا برای همه جهتهای قرارگیری هیتر و کولر نشان داده شده است. شکل نشان میدهد با افزایش ارتفاع مدار، در سه حالت اول دبی جرمی حالت پایا افزایش مییابد در صورتی که در حالت هیتر عمودی – کولر عمودی دبی جرمی حالت پایا با افزایش ارتفاع مدار، کاهش مییابد. به طور مثال اگر ارتفاع مدار از ۲۰۰mm به ۲۰۰m



شکل ۱۲: (الف) نرخ دبی جرمی در ارتفاعهای مختلف برای تمام جهتها (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب Gr_m / N_G در ارتفاعهای مختلف برای تمام جهتها Fig. 12. (a) Mass flow rate at different heights for all orientations (b) Re_{ss} versus Gr_m / N_G at different heights for all orientations



شکل ۱۳: (الف) نرخ دبی جرمی در زاویههای شیب مختلف برای تمام جهتها (ب) نمودار Re_{ss} بر حسب Re_{ss} بر حسب مع الفی در زاویههای شیب مختلف برای تمام جهتها (تف) نرخ دبی جرمی در زاویه ای شیب مختلف برای تمام جهتها (تف) نرخ دبی جرمی در زاویه ای شیب مختلف برای تمام جهتها (the second second

شکل ۱۲–ب، عدد رینولدز در حالت پایا (Re_{ss}) را بر حسب پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در سه ارتفاع مختلف برای تمامی جهتهای قرارگیری هیتر و کولر نشان میدهد. شکل نشان میدهد که در یک ارتفاع ثابت، Re_{ss} برای حالت هیتر افقی – کولر افقی بیشترین مقدار و برای حالت هیتر عمودی – کولر عمودی کمترین مقدار را داراست (مثلاً علامتهای مثلث آبی و زرد رنگ را ببینید). شکل نشان میدهد که در سه حالت اول، با افزایش ارتفاع عدد رینولدز افزایش مییابد و برای حالت چهارم یعنی هیتر عمودی – کولر عمودی، عدد رینولدز کاهش مییابد (علامتهای دایره، مربع و مثلث زرد رنگ را ببینید). استدلال در این مورد مانند توضیحات شکل ۲۱–الف میباشد. البته شکل نشان میدهد که مقدار پارامتر بدون بعد (Gr_m / N_G) در تمامی حالتها، با افزایش ارتفاع افزایش بدون بعد (میرامتر بدون بعد (Y)، مشخص است که رابطه مستقیمی

۸-۸- بررسی اثر زاویه شیب مدار بر عملکرد مدار برای حالتهای مختلف قرارگیری هیتر و کولر

در شکل ۱۳ الف، اثر افزایش زاویه شیب مدار بر روی دبی جرمی حالت پایا برای همه جهتهای قرارگیری هیتر و کولر نشان داده شده است. شکل نشان میدهد با افزایش زاویه شیب مدار، در همه حالتها، دبی جرمی حالت پایا کاهش مییابد. به طور مثال هنگامی

افزایش یابد (۵۰٪ افزایش)، دبی جرمی حالت پایا برای حالتهای اول تا سوم به ترتیب ۹/۷ ٪، ۳/۵ ٪ و ۹/۶ ٪ افزایش می یابد و برای حالت چهارم ۱۷/۸ ٪ کاهش می یابد. دلیل این امر آن است که در هر چهار حالت، با افزایش ارتفاع مدار عدد گراشف اصلاح شده افزایش می یابد (رابطه (۷)) که در نتیجه عدد رینولدز افزایش می یابد (رابطه (۲۶)) و در پی آن، دبی جرمی حالت پایای مدار افزایش می یابد (رابطه (۷)) . اما از طرفی، در حالتهای هیتر افقی- کولر عمودی و هیتر عمودی – کولر عمودی با افزایش ارتفاع مدار مقدار I_{ss} ، کاهش می یابد (تحلیل شکل ۱۱ را ببینید). با کاهش مقدار I_{ss} ، عدد رینولدز کاهش می یابد (رابطه (۲۶)) و در نتیجه مقدار دبی جرمی حالت پایای مدار کاهش می یابد (رابطه (۷)). در حالت هیتر افقی- کولر عمودی، افزایش دبی جرمی حاصل از افزایش عدد گراشف اصلاح شده بر کاهش دبی جرمی ناشی از کاهش مقدار I_{ss} غلبه می کند که نهایتا دبی جرمی حالت پایای مدار افزایش می یابد. اما در حالت هیتر عمودی - کولر عمودی، افزایش دبی جرمی حاصل از افزایش عدد گراشف اصلاح شده نمی تواند بر کاهش دبی جرمی ناشی از کاهش مقدار I_{ss} غلبه کند و بنابراین نهایتا، دبی جرمی حالت پایای مدار کاهش می یابد. در دو حالت دیگر، یعنی حالتهای هیتر افقی – کولر افقی و هیتر عمودی- کولر افقی، افزایش ارتفاع بر مقدار I_{ss} اثری ندارد (تحلیل شکل ۱۱ را ببینید)، و بنابراین افزایش ارتفاع باعث افزایش دبی جرمی حالت پایای مدار میشود.



شكل ۱۵: توزيع دما در توانهاى مختلف Fig. 15. Temperature distribution for different heater powers

$$W_{ss} = a_1 \phi + a_0$$
 (۳۲)
 $\dot{\phi}_{ss} = a_1 \phi + a_0$ فرایب .a و a_1 با استفاده از برازش منحنی در توان هیتر ۱۰W
به ترتیب برابر با ۲۰۰۰۱۴۳۹ و ۲/۰۰۰۹۰ میباشند و برای
توانهای دیگر به طور مشابه قابل محاسبه هستند. همچنین شکل
نشان میدهد که در یک درصد نانو ذرهی ثابت، دبی جرمی پایای مدار
با افزایش توان هیتر افزایش مییابد.

۱۰–۵- بررسی توزیع دما در مدار برای حالتهای مختلف قرارگیری هیتر و کولر

شکل ۱۵ توزیع دما را بر حسب طول مدار در سه توان مختلف هیتر نشان میدهد. این شکل برای حالت هیتر افقی – کولر افقی و $7:=\phi$ رسم شده است. در یک توان مشخص، با حرکت در طول مدار و از ابتدای هیتر (- S)، ابتدا دما در طول هیتر افزایش مییابد (خط با شیب مثبت)، سپس دما در بازوی گرم ثابت میماند (اولین خط افقی). آنگاه دمای نانو سیال با ورود به قسمت کولر کاهش مییابد(خط با شیب منفی) و نهایتاً دما در بازوی سرد ثابت میماند (دومین خط افقی) و انتهای بازوی سرد بر ابتدای هیتر منطبق است (مقدار دما یکسان است). همانطور که مشاهده میگردد با افزایش میابد. به عنوان هیتر در هر مکان از مدار، دمای نانو سیال افزایش مییابد. به (مقدار دما یکسان است). همانطور که مشاهده میگردد با افزایش (*۰۸ افزایش میابد. به ۲۰۰۳ به -2° ۴۷/۶ افزایش مییابد (-7؛ افزایش).



شکل ۱۴: نرخ دبی جرمی بر حسب درصد نانو ذره در توانهای مختلف Fig. 14. Mass flow rate versus nanoparticle concentration for different heater powers

۹-۵-استخراج رابطه ریاضی دبی جرمی حالت پایای مدار

شکل ۱۴ دبی جرمی پایای مدار را بر حسب درصد نانو ذره در سه توان مختلف هیتر نشان میدهد. در این شکل *St*_m برابر با ۱۰ فرض شده است. شکل نشان میدهد که با افزایش درصد نانو ذره در یک توان ثابت هیتر، دبی جرمی پایای مدار تقریباً به صورت خطی افزایش مییابد. به عنوان نمونه، دبی جرمی حالت پایای مدار را بر حسب درصد نانو ذره میتوان از رابطه خطی زیر محاسبه نمود:



شکل ۱۶: توزیع دمای بدون بعد در اعداد استانتون اصلاح شده مختلف برای همه جهتها Fig. 16. Dimensionless temperature distribution in different modified Stanton numbers for all orientations



Fig. 17. Nanofluid temperature distribution in different modified Stanton numbers for all orientations



شكل ۱۸: (الف) توزيع دما در توانها و اعداد استانتون اصلاح شده مختلف براى هيتر افقى – كولر افقى (ب) توزيع دما در $\dot{Q}_h = 20 \,\text{W}$ براى تمام جهتها Fig. 18. (a) Temperature distribution in different heater powers and modified Stanton numbers for HHHC (b) Temperature distribution at $\dot{Q}_h = 20 \,\text{W}$ for different orientations

شیب خطوط دما در هیتر و کولر در حالتهای مختلف قرارگیری هیتر و کولر با یکدیگر متفاوت است. به عبارتی دیگر میتوان بیان داشت که طول خطوط دما در بازوهای گرم و سرد برای حالتهای مختلف با یکدیگر متفاوت است (خطوط افقی در نمودارها را با یکدیگر مقایسه کنید).

در شکل ۱۸ – الف توزیع دمای نانوسیال در مدار برای حالت هیتر افقی – کولر افقی در دو مقدار مختلف عدد استانتون اصلاح شده و برای دو توان مختلف هیتر رسم شده است. شکل نشان می دهد که هر چقدر توان هیتر بیشتر و عدد استانتون اصلاح شده کمتر انتخاب شود دمای نانوسیال افزایش می یابد (خط قرمز رنگ را در نمودار مشاهده کنید). این شکل برای درصد نانو ذره ۲٪ رسم شده است. همانطور که از شکل دیده می شود برای mtildot times the methins and the methicکه از شکل دیده می شود برای <math>mtildot times the methic times the methicاز ۲۰۳۷ به ۲۰۳ افزایش پیدا می کند، اختلاف دمای دو سر هیتر ازوقرمز را ببینید). اما برای <math>mtildot times the methic times the methic $از <math>T^{*}$ به ۲۰ ۲ (۲۶/۱ ٪ افزایش) افزایش می یابد (خطوط آبی وقرمز را ببینید). اما برای mtildot times the methic times the methic times the termو صورتی را ببینید).

در شکل ۱۸–ب توزیع دمای نانوسیال در مدار برای همه حالتهای قرارگیری هیتر و کولر با یکدیگر مقایسه شده است. در این شکل توان هیتر ۲۰W، درصد نانو ذره ۲٪، و عدد استانتون اصلاح

در شکلهای ۱۶ و ۱۷ به ترتیب، توزیع دمای بدون بعد و دمای نانو سیال در مدار برای حالتهای مختلف قرار گیری هیتر و کولر در سه مقدار مختلف عدد استانتون اصلاح شده (St_m) رسم شده است. در همه این شکلها، توان هیتر ۱۰W و مقدار نانو ذره ۲ درصد در نظر گرفته شده است. با دقت در همه شکلها مشخص می گردد که در یک عدد استانتون اصلاح شده ثابت، اختلاف دمای بدون بعد در بازوهای سرد و گرم مساوی یک است و این مهم تائید رابطه (۱۹) مىباشد. شكلها نشان مىدهد كه با افزايش عدد استانتون اصلاح شده، دمای بدون بعد و دمای نانوسیال در مدار کاهش می یابد و این به دلیل افزایش قدرت خنککاری کولر است. زیرا با توجه به (St_m) رابطههای (۱۷) و (۱۸) با افزایش عدد استانتون اصلاح شده (، دمای بدون بعد در بازوهای سرد و گرم کاهش می ابد و بنابراین با جایگذاری این مقادیر در رابطههای (۱۵) و (۱۶) دمای بدون بعد در هیتر و کولر نیز کاهش می یابد. البته به لحاظ فیزیکی هنگامی که دمای سیال خنککن Ts در کولر کاهش می یابد، قدرت خنککاری كولر افزايش مىيابد و به عبارتى عدد استانتون افزايش مىيابد و سبب کاهش دمای کل مدار می گردد [۶]. در همه این شکلها به جهت این که مقایسه صحیح باشد، طول هیتر، طول کولر و طول کل مدار به ترتیب برابر با ۹۰۰mm ، ۱۱۰mm ،۱۲۰mm و ثابت در نظر گرفته شدهاند. بنابراین همانطور که در شکلها مشاهده می شود،

شده برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده است. شکل نشان میدهد که در هر مکان از مدار، دمای نانوسیال برای حالت هیتر افقی – کولر افقی کمترین مقدار و برای حالت هیتر عمودی – کولر عمودی بیشترین مقدار را داراست (باید توجه شود که دمای حداکثر باید زیر C° ۲۰ باقی بماند تا فرض تکفاز بودن سیال معتبر باشد). به طور مثال، دما در انتهای هیتر برای حالت اول و چهارم به ترتیب C° ۳۴ و C° ۷ است (خطوط آبی و صورتی را ببینید). علت این که خط افقی اول مربوط به حالت هیتر عمودی – کولر عمودی در این نمودار (یعنی دمای خروجی از هیتر یا به عبارتی دمای بازوی گرم) نسبت به دیگر حالتها بالاتر قرار می گیرد این است که دبی جرمی حالت پایا در این حالت نسبت به دیگر حالتها کمتر است (شکل ۱۶ را ببینید) و با توجه به رابطه (۲۹) اختلاف دمای دو سر هیتر از بقیه حالتها بیشتر است که نهایتاً به بالاتر بودن دمای بازوی گرم منجر می گردد.

۶-نتیجه گیری

در این پژوهش، با کمک معادلات بدون بعد حاکم بر یک مدار جابهجایی طبیعی مینیاتوری، حل در حالت پایا به دست آمد و سپس اثرات قطر لولهها، ارتفاع مدار، زاویه شیب مدار نسبت به قائم، درصد نانو ذره مس و توان هیتر بر روی دبی جرمی مدار و توزیع دما در مدار بررسی گردید. نتایج این پژوهش را میتوان به صورت زیر خلاصه نمود:

دبی جرمی و عدد رینولدز پایای مدار با افزایش توان هیتر و درصد نانو ذره افزایش مییابند.

 دبی جرمی، ضریب انتقال حرارت کلی و عدد ناسلت با افزایش قطر لولههای مدار برای تمامی جهتهای قرارگیری هیتر و کولر افزایش مییابند در حالی که اختلاف دمای دو سر هیتر، ضریب اصطکاک و اختلاف دمای متوسط لگاریتمی کاهش مییابند.

برای یک توان ثابت هیتر، دبی جرمی و عدد رینولدز برای
 حالت هیتر افقی - کولر افقی بیشترین مقدار و برای حالت هیتر
 عمودی - کولر عمودی کمترین مقدار را داراست.

با افزایش ارتفاع، دبی جرمی و عدد رینولدز پایای مدار برای
 همه جهتهای قرارگیری هیتر و کولر به جز حالت هیتر عمودی کولر عمودی افزایش مییابند.

ک دبی جرمی و عدد رینولدز پایای مدار با افزایش زاویه شیب

مدار برای تمامی جهتهای قرارگیری هیتر و کولر کاهش مییابند.

اختلاف دمای بدون بعد بین بازوهای گرم و سرد برای
 تمامی جهتهای قرارگیری هیتر و کولر در حل حالت پایا همیشه
 برابر یک است.

برای تمامی جهتهای قرارگیری هیتر و کولر، دمای نانو
 سیال در هر مکان از مدار با افزایش توان هیتر افزایش مییابد در
 حالی که با افزایش عدد استانتون اصلاح شده کاهش مییابد.

 برای یک حالت هندسی مشخص و با پارامترهای عملکردی ثابت، مدار در حالت هیتر افقی - کولر افقی بیشترین دبی جرمی و در حالت هیتر عمودی - کولر عمودی کمترین دبی جرمی را داراست. مشخص گردید مقدار دبی جرمی در حالت هیتر افقی - کولر افقی تقریباً چهار برابر مقدار دبی جرمی در حالت هیتر عمودی - کولر عمودی است. همچنین، دمای بازوی گرم در حالت هیتر عمودی - کولر عمودی بیشترین مقدار و در حالت هیتر افقی - کولر افقی کمترین مقدار را داراست که این اختلاف با توجه به شکل ۱۸-ب، حدوداً °C ۳ است.

شرح	فهر ست
	علائم
سطح جریان (m ²)	A
ظرفیت گرمایی ویژه (^۱ -kJ kg))	C_p
قطر (m)	D
ضريب اصطكاك	f
$({ m m~s^{-2}})$ شتاب جاذبه (g
عدد گراشف	Gr
عدد گراشف اصلاح شده ¹	Gr_m
ارتفاع مدار (m)	H
انتگرال دمای پایای بدون بعد در کل مدار (رابطه (21))	Iss
(W m ⁻¹ K ⁻¹) ضریب هدایت حرارتی	k
طول (m)	L
نرخ دبی جرمی (kg s ⁻¹)	ṁ
عدد ناسلت ²	Nu

عدد پرانتل Pr

مراجع

۷

- [1] Q. Zhou, Y. Xia, G. Liu, X. Ouyang, A miniature integrated nuclear reactor design with gravity independent autonomous circulation, Nuclear Engineering and Design, 340 (2018) 9-16.
- [2] D. Japikse, Advances in thermosyphon technology, in: Advances in heat transfer, Elsevier, 1973, pp. 1-111.
- [3] Y. Zvirin, A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems, Nuclear Engineering and Design, 67(2) (1982) 203-225.
- [4] R. Greif, Natural circulation loops, Journal of Heat Transfer, 110(4b) (1988) 1243-1258.
- [5] P. Vijayan, A. Nayak, D. Saha, M. Gartia, Effect of loop diameter on the steady state and stability behaviour of single-phase and two-phase natural circulation loops, Science and technology of nuclear installations, 2008 (2008).
- [6] P. Vijayan, Experimental observations on the general trends of the steady state and stability behaviour of single-phase natural circulation loops, Nuclear Engineering and Design, 215(1-2) (2002) 139-152.
- [7] A. Nayak, M. Gartia, P. Vijayan, An experimental investigation of single-phase natural circulation behavior in a rectangular loop with Al2O3 nanofluids, Experimental thermal and fluid science, 33(1) (2008) 184-189.
- [8] M. Misale, F. Devia, P. Garibaldi, Experiments with Al2O3 nanofluid in a single-phase natural circulation mini-loop: Preliminary results, Applied Thermal Engineering, 40 (2012) 64-70.
- [9] B. Swapnalee, P. Vijayan, A generalized flow equation

(W m⁻²) شار حرارتی
$$q''$$

 (w) توان ھيتر $\dot{Q_h}$

Re عدد رينولدز

s مختصات در امتداد مدار (m)

- *S* فاصله بدون بعد در امتداد مدار
 - عدد استانتون St
- 3 عدد استانتون اصلاح شده St_m

(s) زمان (K) دما

(K) دمای منبع سرد $T_{\rm s}$

 $(W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1})$ فريب انتقال حرارت كلى (m^3) حجم V (m³) محرض مدار (m) عرض مدار W (m) ار تفاع z ا

علايم يوناني

زيرنويسها

1 Modified Grashof number

Nusselt number
 Modified Stanton nu

Modified Stanton number

- [18] G.A. Sheikhzadeh, M. Sepehrnia, M. Rezaie, M. Mollamahdi, Natural Convection of Turbulent Al2O3-Water Nanofluid with Variable Properties in a Cavity with a Heat Source and Heat Sink on Vertical Walls, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 50(6) (2019) 1237-1250.
- [19] S.M. Seyyedi, M. Hashemi-Tilehnoee, Parametric study of a rectangular single phase natural circulation loop at steady state, Modares Mechanical Engineering, 18(2) (2018) 413-422.
- [20] H. Cheng, H. Lei, L. Zeng, C. Dai, Experimental investigation of single-phase natural circulation in a mini-loop driven by heating and cooling fluids, Experimental Thermal and Fluid Science, 103 (2019) 182-190.
- [21] S. Seyyedi, N. Sahebi, A. Dogonchi, M. Hashemi-Tilehnoee, Numerical and experimental analysis of a rectangular single-phase natural circulation loop with asymmetric heater position, International Journal of Heat and Mass Transfer, 130 (2019) 1343-1357.
- [22] M. Hashemi-Tilehnoee, N. Sahebi, A. Dogonchi, S.M. Seyyedi, S. Tashakor, Simulation of the dynamic behavior of a rectangular single-phase natural circulation vertical loop with asymmetric heater, International Journal of Heat and Mass Transfer, 139 (2019) 974-981.
- [23] X.-Q. Wang, A.S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, International journal of thermal sciences, 46(1) (2007) 1-19.
- [24] A. Dogonchi, M.A. Ismael, A.J. Chamkha, D. Ganji, Numerical analysis of natural convection of Cu–water nanofluid filling triangular cavity with semicircular bottom wall, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 135(6) (2019) 3485-3497.
- [25] J. Reyes, Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments, Dr. Jose Reyes (US), 2005.

for single phase natural circulation loops obeying multiple friction laws, International Journal of Heat and Mass Transfer, 54(11-12) (2011) 2618-2629.

- [10] C.-J. Ho, Y. Chung, C.-M. Lai, Thermal performance of Al2O3/water nanofluid in a natural circulation loop with a mini-channel heat sink and heat source, Energy conversion and management, 87 (2014) 848-858.
- [11] S. Doganay, A. Turgut, Enhanced effectiveness of nanofluid based natural circulation mini loop, Applied Thermal Engineering, 75 (2015) 669-676.
- [12] L. Lima, N. Mangiavacchi, L. Ferrari, Stability analysis of passive cooling systems for nuclear spent fuel pool, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39(3) (2017) 1019-1031.
- [13] A. Srivastava, J.Y. Kudariyawar, A. Borgohain, S. Jana, N. Maheshwari, P. Vijayan, Experimental and theoretical studies on the natural circulation behavior of molten salt loop, Applied Thermal Engineering, 98 (2016) 513-521.
- [14] m. moradzadeh, b. ghasemi, A. Raisi, Nanofluid mixed-convection heat transfer in a ventilated cavity with a baffle, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 48(3) (2016) 257-266.
- [15] M. Hosseini Abadshapoori, M.H. Saidi, Al2O3-water Nanofluid in a Square Cavity with Curved Boundaries, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 49(3) (2017) 567-580.
- [16] H. Cheng, H. Lei, C. Dai, Thermo-hydraulic characteristics and second-law analysis of a singlephase natural circulation loop with end heat exchangers, International Journal of Thermal Sciences, 129 (2018) 375-384.
- [17] H. Cheng, H. Lei, L. Zeng, C. Dai, Theoretical and experimental studies of heat transfer characteristics of a single-phase natural circulation mini-loop with end heat exchangers, International Journal of Heat and Mass Transfer, 128 (2019) 208-216.

بی موجعه محمد ا