

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(7) (2021) 1021-1024 DOI: 10.22060/mej.2020.18564.6848



Numerical analysis of the effect of baffle on heat transfer enhancement nanofluid flow over a backward facing step: A correlation for the average Nusselt number

H. Moayedi

Thermo-Fluids Department, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT: In this paper, the effect of baffle on the flow field and heat transfer enhancement of forced convection of Cu-water nanofluid flow in the laminar regime over a backward facing step is numerically investigated. Finite volume method is used to solve governing equations of flow and temperature. In this study, the influence of baffle geometrical parameters as height, width and number of baffles, as well as the Reynolds number and the volume fraction of nanoparticles on the flow filed and heat transfer are evaluated. Also, to evaluate the simultaneous of the heat transfer enhancement and pressure drop, the performance evaluation index is calculated. It is obvious that by increasing the Reynolds number and the performance evaluation index for the width of baffle 2 are higher than other cases about 7.6% and 15% respectively. The results show that using 2 baffles must be more beneficial than other number of baffles. Finally, a correlation for the average Nusselt number as a function of Reynolds number, volume fraction of nanoparticles, number of baffles, baffle height and baffle width is presented with an average error of 2.88%.

Review History:

Received: Jun. 10, 2020 Revised: Oct. 25, 2020 Accepted: Oct. 26, 2020 Available Online: Oct. 27, 2020

Keywords:

Numerical analysis Backward facing step Nanofluid Baffle Heat transfer

1. INTRODUCTION

The fluid flow separation phenomenon and its subsequent reattachment due to a sudden expansion occurs in many practical engineering applications in various fields. Armaly et al. [1] investigated the relationship between the reattachment length and the Reynolds number via experimental and numerical analysis of laminar, transitional, and turbulent airflow. They revealed that in the laminar regime, the recirculation length increases by increasing the Reynolds number. Moreover, Togun et al. [2] numerically studied the heat transfer of laminar and turbulent Cu/water nanofluid flow over a BFS. They showed that the heat transfer is augmented when the volume fraction and Reynolds number are increased. Furthermore, it was indicated that the pressure drop increases by increasing the Reynolds number and decreasing the nanofluid volume fraction. Nath and Krishnan [3] carried out a numerical simulation of the mixed convective heat and mass transfer of Cu-water nanofluid in a BFS. They demonstrated that the average Nusselt number and the reattachment length at the downstream of the step increase with increasing the nanoparticle volume fraction, whereas the average Sherwood number decreases. The goal of the current study is to examine the new advanced method on the heat transfer augmentation nanofluid flow over a BFS by utilizing baffles. In this regard, the case studies are conducted for a 2D BFS with varying substantial parameters; Reynolds number, number of baffles, arrangement of baffle, and volume fraction of the nanofluid.

*Corresponding author's email: hesam_moayedi@phd.guilan.ac.ir

2. GEOMETRY

Fig. 1 represents a schematic view of the computational domain used for the present study.

3. GOVERNING EQUATIONS

The governing equations of the nanofluid flow, thermal, and species fields including continuity, momentum energy equations are as follows:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \qquad 2)$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)$$
(3)

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{K_{nf}}{\left(\rho c_{P}\right)_{nf}} \left(\frac{\partial^{2} T}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} T}{\partial y^{2}}\right)$$
(4)

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 visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 1. Schematic view of the computational domain.



Fig. 2. Streamlines (*φ*=0.03, *Re*=100, *h_b*=*H*).

The thermo-physical properties of nanofluid are expressed as follows [4]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \tag{5}$$

$$\left(\rho c_{P}\right)_{nf} = \left(1 - \varphi\right) \left(\rho c_{P}\right)_{f} + \varphi \left(\rho c_{P}\right)_{p} \tag{6}$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{\left(1 - \varphi\right)^{2.5}} \tag{7}$$

$$K_{nf} = K_f \left[\frac{\left(K_p + 2K_f\right) - 2\varphi \left(K_f - K_p\right)}{\left(K_p + 2K_f\right) + \varphi \left(K_f - K_p\right)} \right]$$
(8)

4. RESULTS AND DISCUSSION

To express the effect of the width of baffle on the flow field and heat transfer enhancement, the streamlines for different width of baffle are shown in Figs. 2. It is clear that the presence of baffle causes considerable changes in the flow pattern. According to this Figure, it is found that the baffle remarkably influences the size and the position of the stream vortices through the backward-facing step.

Moreover, the Performance Evaluation Index (PEI) based on the width of baffle is shown in Fig. 3. It is clear that the PEI for the width of baffle 2 are higher than other cases.

To explain the influence of the number of baffles on the flow filed and heat transfer, the PEI for different number of baffles is depicted in Fig. 4. According to this Figure, it can be argued that by increasing the Reynolds number, the PEI is increased. Also, The results show that using 2 baffles must be more beneficial than other number of baffles.

To help engineering calculations, the correlation of the average Nusselt number as a function of Reynolds number, volume fraction of nanoparticles, number of baffles, baffle height and baffle width is developed as follows:

$$\frac{Nu_m}{Nu_{m0}} = 1.15 \operatorname{Re}^{0.2} \varphi^{0.02} N^{0.19} \left(\frac{h_b}{H}\right)^{0.93} \left(\frac{w_b}{H}\right)^{0.03}$$
(9)





Fig. 4. Performance evaluation index based on the number of baffle for varios the nanoparticles volume fraction $(h_b=H, w_b=H, \varphi=0.01)$.

Fig. 3. Performance evaluation index based on the width of baffle $(h_{\mu}=H, \varphi=0.02)$.



Fig. 5. The ratio of average Nusselt number from the correlation and numerical simulation of the present study within the tolerance range of 10%.

5. CONCLUSIONS

In this study, the forced convection of nanofluid flow in the presence of the baffle over a 2D backward-facing step in a hydraulically laminar regime was numerically investigated. The effects of effectiveness parameters as: Reynolds number, height and width of baffle, number of baffle, and volume fraction of the nanofluid were studied for evaluation the heat transfer enhancemet. The results indicated that the average Nusselt number and the Performance Evaluation Index for the width of baffle 2 are higher than other cases about 7.6% and 15% respectively. Finally, a correlation for the average Nusselt number is presented with an average error of 2.88%.

REFERENCES

- B.F. Armaly, F. Durst, J. Pereira, B. Schönung, Experimental and theoretical investigation of backwardfacing step flow, Journal of fluid Mechanics, 127 (1983) 473-496.
- [2] H. Togun, M.R. Safaei, R. Sadri, S.N. Kazi, A. Badarudin,

K. Hooman, E. Sadeghinezhad, Numerical simulation of laminar to turbulent nanofluid flow and heat transfer over a backward-facing step, Applied Mathematics and Computation, 239 (2014) 153-170.

[3] R. Nath, M. Krishnan, Numerical study of double diffusive mixed convection in a backward facing step

channel filled with Cu-water nanofluid, International Journal of Mechanical Sciences, 153 (2019) 48-63.

[4] E. Abu-Nada, Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step, International Journal of Heat and Fluid Flow, 29(1) (2008) 242-249.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Moayedi, Numerical analysis of the effect of baffle on heat transfer enhancement nanofluid flow over a backward facing step: A correlation for the average Nusselt number, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 1021-1024.



DOI: 10.22060/mej.2020.18564.6848

نشریه مهندسی مکانیک امیر کبیر



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۷، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۳۰۹ تا ۴۳۲۸ DOI: 10.22060/mej.2020.18564.6848

تحلیل عددی تأثیر وجود بافل بر افزایش انتقال حرارت جریان نانوسیال روی یک پله پسرو: رابطه برازش برای عدد ناسلت متوسط

حسام مويدى*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۱ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵ ارائه آنلاین:۱۳۹۹/۰۸/۰۶

> کلمات کلیدی: تحلیل عددی پله پسرو نانوسیال بافل انتقال حرارت

بافل در کانالهاست [۷-۴]. بوراح و همکاران [۴]، به بررسی تأثیر

هندسههای متفاوت بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت

درون یک کانال با پله پسرو به صورت عددی پرداختند. آنها نشان

دادند که استفاده از بافل مستطیلی در مقایسه با بافلهای بیضوی و

مثلثي موجب كاهش طول ناحيه اتصال مجدد جريان و افزايش انتقال

حرارت می شود. نتایج مطالعه آنها حاکی از آن است که در نزدیک بافل، عدد ناسلت به بیشینه مقدار خود می رسد. همچنین آنها

مشاهده كردند كه با افزایش موقعیت بافل نسبت به پله، مقدار عدد

ناسلت متوسط و افت فشار کاهش می یابد. نای و همکاران]۶[، تأثیر

مکان نصب بافل بر الگوی جریان سیال و افزایش انتقال حرارت درون

یک کانال با پله پسرو را به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج مطالعه

آنها حاکی از آن است که با نزدیکشدن موقعیت بافل به سمت

خلاصه: در مقاله حاضر، تأثیر حضور بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال مس با پایه آب در محدوده رژیم آرام روی یک پله پسرو به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفتهاست. برای حل معادلات جریان و دما از روش حجم محدود استفاده شدهاست. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای هندسی بافل از قبیل ارتفاع، عرض و تعداد آن، و همچنین عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات بر الگوی جریان و انتقال حرارت بررسی شدهاست. همچنین به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار، شاخص ارزیابی عملکرد تعریف شدهاست. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ارتفاع بافل، عدد رینولدز و کاهش کسر حجمی، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش مییابد. در تمامی شرایط، مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط و شاخص ارزیابی عملکرد، برای عرض بافل معادل ۲ برابر ارتفاع پله نسبت به سایر مقادیر عرض بافل، به ترتیب حدود ٪۷/۶ و ٪۱۵ میباشد. همچنین نتایج نشان میدهد که حضور ۲ بافل بهتر از تعداد دیگر بافلها است. به منظور جمعبندی، یک رابطه برازش برای نسبت عدد ناسلت متوسط همچون تابعی از عدد رینولدز، کسر حجمی نانو ذرات، تعداد بافل، ارتفاع بافل و عرض بافل با خطای متوسط شرچون تابعی از عدد رینولدز، کسر حجمی نانو ذرات، تعداد بافل، ارتفاع بافل و عرض بافل با خطای متوسط % ۲/۸۲ ارائه شدهاست.

۱– مقدمه

پدیده جدایش جریان سیال و اتصال مجدد^۱ آن به دلیل تغییرات ناگهانی هندسه کانال، در بسیاری از صنایع مختلف ازجمله تأسیسات تهویه مطبوع، حمل و نقل، هوافضا، انرژی هستهای، نیروگاهها، پتروشیمی و مواد غذایی رخ میدهد. یکی از معروفترین مدلها به منظور بررسی جریان و انتقال حرارت در مقاطع دارای انبساط ناگهانی، مدل پله پسرو^۲ است. به دلیل وجود جریان برگشتی و وجود ناحیهای در گوشه پله پسرو، که در آن کمینه نرخ انتقال حرارت رخ میدهد، این هندسه همواره مورد توجه محققین قرارگرفتهاست [۳–۱].

یکی از روشهای مؤثر برای افزایش انتقال حرارت، استفاده از

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: hesam_moayedi@phd.guilan.ac.ir

¹ Reattachment

Backward-Facing Step (BFS)

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

پایین دست جریان، ضریب انتقال حرارت افزایش مییابد. همچنین دریافتند که با تغییر مکان نصب بافل، مکان بیشینه عدد ناسلت و دما نیز تغییر می کند. کومار و ونگادسان [۷]، تأثیر نوسان بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت در رژیم جریان آرام روی یک پله پسرو را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از بافل نوسانی، در مقایسه با بافلهای ثابت، موجب ایجاد یک جریان پریودیک و همچنین بهبود انتقال حرارت می شود.

از سوی دیگر، یکی از روش های غیرفعال افزایش انتقال حرارت، افزودن نانو ذرات به سیال پایه و تشکیل نانوسیالات^۱ است. با توجه به هدایت حرارتی ضعیف ذاتی سیالات پایه متداول در انتقال حرارت (مانند آب، روغنها و اتیلن گلیکول)، با اضافه کردن نانو ذرات جامد و تأثیر بر روی خواص ترموفیزیکی سیال پایه مانند هدایت حرارتی، ویسکوزیته، چگالی و گرمای ویژه، انتقال حرارت بهبود مییابد [۱۱–۸].

بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات درون پله پسرو به طور گسترده مورد مطالعه قرارگرفتهاست که به عنوان نمونه می توان به مطالعات انجام شده توسط پور و نساب [۱۲]، چمخا و سلیمفندیگیل [۱۳]، سلیمفندیگیل و اوزتوپ [۱۴]، حسین و همکاران [۱۵]، توگان و همکاران [۱۶]، ناث و کریشنان [۱۷] و همچنین سلمان و همکاران [۱۸] اشاره کرد. پور و نساب [۱۲] تأثير انواع مختلف نانوسيالات بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت در محدوده رژیم جریان آرام در یک پله پسرو را به صورت عددی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که استفاده از نانوسیال در مقایسه با سیال پایه، سبب افزایش قابل توجه انتقال حرارت می شود. همچنین نتایج آن ها حاکی از آن است که استفاده از نانوذرات آلومینیوم (Ag) و مس (Cu) در مقایسه با ساير نانوذرات، موجب افزايش بيشتر انتقال حرارت مى گردد. چمخا و سلیمفندیگیل [۱۳]، افزایش انتقال حرارت جریان نانوسیال در یک کانال با پله پسرو با جریان ورودی نوسانی را به صورت عددی بررسی نمودند. آنها تأثیر دامنه نوسان و فرکانس جریان نوسانی و همچنین شکلهای متفاوت نانوذرات را مورد ارزیابی قراردادند. نتایج مطالعه آنها حاکی از آن است که استفاده از جریان ورودی نوسانی سبب افزایش چشمگیر انتقال حرارت می گردد. همچنین نشان دادند که با استفاده از نانوذرات با شکل کروی، ضریب افزایش عدد ناسلت متوسط حدود ٪۳۰ ۳۰ می گردد. محمد و همکاران [۱۵] تأثیر انواع

1 Nanofluids

موانع مختلف مثلثي، مستطیلي و دايروي بر الگوي جريان نانوسيال و افزایش انتقال حرارت ناشی از آن را در یک پله پسرو به صورت عددی بررسی نمودند. همچنین آنها با تعریف نسبت عدد ناسلت متوسط به افت فشار، که این نسبت را شاخص ارزیابی عملکرد نامیدند، افزایش انتقال حرارت و افت فشار را به صورت همزمان بررسی نمودند. آنها نشان دادند که شاخص ارزیابی عملکرد و عدد ناسلت متوسط برای مانع مثلثی نسبت به سایر موانع، افزایش بیشتری دارد. توگان و همکاران [18] به صورت عددی به بررسی جریان آرام و آشفته و انتقال حرارت نانوسیال روی یک پله پسرو پرداختند. در این تحقیق، از نانوسیال مس با پایه آب استفاده شدهبود. نتایج آنها حاکی از آن است که تأثیر استفاده از نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و عدد رینولدز بیشتر بوده و موجب بهبود انتقال حرارت می گردد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و عدد رینولدز، افت فشار نیز در مقایسه با سیال پایه افزایش می یابد. ناث و کریشنان [۱۷] نرخ انتقال جرم و انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال مس با پایه آب درون یک پله پسرو را به صورت عددی بررسی نمودند. آنها تأثیر نسبت نیروهای شناوری ناشی از انتقال جرم به انتقال حرارت، عدد پرانتل و کسر حجمی نانو ذرات را بررسی کردند. آنها نشان دادند که مقادیر متفاوت نسبت نیروهای شناوری منجر به شکل گیری الگوهای متفاوت در جریانهای چرخشی در نزدیکی پله پسرو می گردد. همچنین دریافتند که افزایش کسر حجمی نانو ذرات موجب افزایش عدد ناسلت و طول اتصال مجدد جریان می شود.

همچنین لازم به ذکر است که مطالعات محدودی در مورد استفاده همزمان از هر دو روش غیرفعال بافل و نانوسیال بر میدان جریان و افزایش انتقال حرارت درون یک پله پسرو انجام شدهاست [۲۲–۱۹]. محمد و همکاران [۲۰,۱۹]، تأثیر پیکربندی هندسی بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت جریان نانوسیال در یک پله پسرو و یک پله پیشرو را به صورت عددی بررسی نمودند. آنها ممچنین تأثیر عدد رینولدز، کسر حجمی نانو ذرات، موقعیت بافل نسبت به پله و همچنین ارتفاع و عرض بافل را نیز بررسی کردند. تأثیر قابل توجهی بر افزایش انتقال حرارت دارد. همچنین نتایج آنها نشان داد که تاثیر عرض بافل بر افزایش انتقال حرارت ناچیز میباشد.



شکل ۱. نمایی شماتیک از دامنه محاسباتی

Fig. 1. Schematic view of the computational domain

را بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها حاکی از آن است که با نصب بافل بر روی دیواره بالا کانال، ضریب انتقال حرارت به بیشینه مقدار خود میرسد. همچنین دریافتند که عدد ناسلت و توزیع سرعت با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز افزایش می یابد. هشمتی و همکاران [۲۲]، تأثیر پیکربندی بافل شکافدار بر افزایش انتقال حرارت، افت فشار و الگوی جریان نانوسیال در یک کانال با پله یسرو در محدوده جریان آرام را به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج آنها حاکی از آن است که استفاده از نانوذرات SiO₂ در مقایسه با سایر نانوذرات (Al2O3، OuO و ZnO) موجب بهبود انتقال حرارت می شود. همچنین آن ها نشان دادند که استفاده از بافل های شکاف دار در مقایسه با بافلهای معمول، سبب کاهش افت فشار می گردد. نتایج آنها نشان داد که استفاده از بافل مایل در مقایسه با بافل عمودی سبب تغییرات قابل توجه در الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت می شود. همچنین آن ها نشان دادند که به ازای استفاده از بافل مایل و نانوسیال، افزایش عدد ناسلت برای اعداد رینولدز ۲۰۰ و ۴۰۰ به ترتيب ١٩١٪ و ٢٥۵٪ مي باشد.

با توجه به کاربردهای گسترده کانالهای بافلدار در تأسیسات حرارتی، الزاماً یک طرح خاص جوابگوی همه مسائل نخواهد بود، لذا لازم است برای هر مسئله به صورت مستقل تحلیل جریان و انتقال حرارت صورت گیرد. اکثر مطالعات گذشته، تأثیر پارامترهایی همچون عدد رینولدز، نوع نانوسیال، کسر حجمی نانوذرات و نصب بافل بر میدان جریان و انتقال حرارت در کانال با پله پسرو را بررسی کردهاند و توجهای به هندسه، چیدمان و مشخصات هندسی بافلها در افزایش انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال درون یک پله

پسرو نشدهاست. بر اساس مطالعه دیگر محققان و با توجه به عدم بررسی چیدمان و پارامترهای هندسی بافلها و همچنین عدم بررسی شاخص ارزیابی عملکرد جهت تحلیل الگوی جریان و انتقال حرارت در شرایط مختلف جریان، نوآوری مطالعه حاضر بررسی جابجایی اجباری نانوسیال درون یک پله پسرو و ارزیابی همزمان تأثیر پارامترهای مؤثر بر افزایش انتقال حرارت از قبیل عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات، پارامترهای هندسی بافل و همچنین بررسی آرایش بافلهای چندگانه در تغییر الگوی جریان و تأثیر آن بر افزایش نرخ انتقال حرارت میباشد. همچنین به منظور جمعبندی و سادهشدن استفاده از نتایچ این تحقیق، یک رابطه برازش برای عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات، تعداد، ارتفاع و عرض بافلها ارائه میگردد.

۲– هندسه مسئله

نمای شماتیکی از هندسه دوبعدی و دامنه محاسباتی مسئله مورد نظر، ابعاد به کاررفته و مکان نصب بافل در شکل ۱ نشان داده شده است. نسبت انبساط^۱، که نسبت سطح مقطع ورودی به سطح مقطع بعد از پله است، برابر ۲ و ارتفاع پله برابر H=1cm می باشد. به منظور ایجاد شرایط توسعه یافتگی جریان در ورودی و خروجی، طول ناحیه محاسباتی از ورودی کانال تا لبه پله و از لبه پله تا خروجی کانال به ترتیب H۰۲ و H۰۵ می باشد. همچنین بافل در فاصله H بعد از لبه پله بر روی دیواره بالا نصب شده است. دیواره پایین به طول از لبه پله بر موی دیواره بالا نصب شده است. دیواره بالا عایق در نظر

¹ Expansion ratio (ER)

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی

Table 1. Thermophysical properties.

مس	آب	پارامتر
۸۹۳۳	٩٩٧/١	چگالی (p) (kg/m³) چگالی
4	• /818	ضریب هدایت حرارتی (K) (W/m K)
۳۸۵	4179	(J/kg K) (c_p) فلرفیت گرمای ویژه (J/kg K) (
-	•,••)	ویسکوزیته دینامیکی (µ) (kg/ms)

جدول ۲. شرایط مرزی

Table 2. Boundary conditions.

جريان	دما	مرز
$u = u_0, v = \cdot$	<i>Т</i> ₀=۲٩٣ К	ورودى كانال
$\partial u/\partial x = \partial v/\partial x = 0$	$\partial (T - T_m) / \partial x = \cdot$	خروجي كانال
$u = \cdot, v = \cdot$	$q'' = \cdot$	بافل
$u = \cdot, v = \cdot$	$q'' = \Delta \cdots W/m^2$	ديواره شار ثابت
$u = \cdot, v = \cdot$	$q'' = \cdot$	دیوارههای آدیاباتیک

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$
 (۱)
مومنتم:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$
(7)

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{(7)}$$

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{K_{nf}}{\left(\rho c_{P}\right)_{nf}} \left(\frac{\partial^{2} T}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} T}{\partial y^{2}}\right)$$
(*)

همان گونه که از روابط (۱) تا (۴) مشخص است، به منظور حل معادلات حاکم، نیاز به تعیین خواص ترمودینامیکی نانوسیال میباشد.

۲-۳-روابط مربوط به خواص نانوسیال خواص ترمودینامیکی نانوسیال به کمک خواص سیال پایه (آب)

گرفته شده اند. مقادیر $h_b e_b W_i$ نیز به عنوان پارامترهایی جهت تعیین مشخصات هندسی بافل می باشند. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در این تحقیق محدوده عدد رینولدز براساس ارتفاع پله برابر با ۴۰۰ک Re می باشد، جریان دوبعدی در نظر گرفته شده و عمق کانال تأثیری در نتایج ندارد [۲٫۱]. همچنین فرض دوبعدی بودن رفتار جریان در محدود جریان آرام، یک فرض معمول در شبیه سازی جریان نانوسیال درون پله پسرو می باشد [۲۰–۱۲].

نانوسیال مس با پایه آب به عنوان سیال عامل با سرعت ورودی مشخص از سمت چپ وارد کانال می شود و از سمت دیگر کانال خارج می شود. خواص ترمودینامیکی آب و نانوذرات مس در جدول ۱ ارائه شدهاست.

۳- معادلات حاكم

۱-۳- معادلات میدان جریان

معادلات حاکم بر جریان نانوسیال با فرض یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و ذرات جامد، تراکمناپذیر، دوبعدی و آرام، شامل پیوستگی، مومنتم و بقای انرژی میباشند که به صورت زیر بیان میشوند [۲۰–۸]:

انرژى:



شکل ۲. نمایی از بخشی از شبکه محاسباتی

Fig. 2. The view of part of domain grid distribution



 $(\phi = \cdot, \cdot, \mathbf{N}, \mathbf{R} = \mathbf{V} \cdot \cdot, \mathbf{h}_b = H, w_b = H)$ شکل ۳. توزیع سرعت در $x = \cdot, \cdot, \mathbf{M}$ پس از پله و در امتداد ارتفاع کانال برای شبکههای مختلف ($x = \cdot, \cdot, \mathbf{M}$ m) m Fig. 3. Grid independence test for velocity profile at x=0.005 m right behind of step ($\mathbf{R} = 200, \phi = 0.02, \mathbf{h}_b = H, \mathbf{w}_b = H$)

$$K_{nf} = K_f \left[\frac{\left(K_p + 2K_f\right) - 2\varphi\left(K_f - K_p\right)}{\left(K_p + 2K_f\right) + \varphi\left(K_f - K_p\right)} \right] \tag{A}$$

در روابط بالا اندیسهای f،nf و P به ترتیب نشاندهنده نانوسیال، سیال پایه و نانوذرات میباشند. همچنین ϕ کسر حجمی نانوذرات میباشد.

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_p \tag{(a)}$$

$$\left(\rho c_{P}\right)_{nf} = \left(1 - \varphi\right) \left(\rho c_{P}\right)_{f} + \varphi \left(\rho c_{P}\right)_{p} \tag{8}$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{\left(1 - \varphi\right)^{2.5}} \tag{Y}$$

¹ Maxwell-Garnetts (MG)

* (%) درصد اختلاف	X _r /H	روش تحقيق	تحقيق
_	۴,٩٩	عددى	تحقيق حاضر
•,۴	۴٫۹۷	عددى	آچاریا و همکاران [۳]
• , Y	۴٫۹۸	عددى	کومار و ونگادسان [۷]
 , Υ-Υ,Δ 	۴,۹۸-۵,۱۲	عددى	سليمفنديگيل و اوزتوپ [۱۴]
۰ _/ ۵	$\Delta_{I} \cdot \Upsilon$	عددى	چودحاری و وولف [۲۵]
۴, <i>۶</i>	۴, ۷ ۷	عددى	الرفایی و همکاران [۲۶]
•	۴,٩٩	عددى	کومار و دهیمن [۲۷]
٩,٦	۴,۹۱	تجربى	لین و همکاران [۲۸]

جدول ۳. مقایسه طول اتصال مجدد (X٫) برای ER = ۲ و Re = ۱۰۰.

یکنواخت و دمای مشخص در ورودی در نظر گرفته شده است. همچنین شرط توسعه یافتگی در مرز خروجی در نظر گرفته شده است. بافل به دیواره بالا متصل شده است. دیواره های بالا و پایین به ترتیب به صورت آدیاباتیک و شار حرارتی ثابت و همه مرزهای جامد دارای شرط عدم لغزش می باشند. شرایط مرزی دما و سرعت، در جدول (۲) ارائه شده است.

۴– روند حل عددی

در این مطالعه، به منظور حل عددی معادلات حاکم، از کد متن باز اپن فوم ^{(۴} استفاده شده است. معادلات حاکم در اپن فوم بر اساس روش حجم محدود گسسته سازی شده است. معادلات جریان سیال در حالت پایا و توسط حل کننده بر پایه فشار به صورت ضمنی شبیه سازی شده اند. جهت گسسته سازی ترم فشار و سایر ترمهای معادلات به ترتیب، روش استاندارد و تقریب مرتبه دوم، ترمهای شامل گرادیان به روش گرادیان حداقل مربعات^۲ گسسته شده و همچنین برای حل همزمان میدان فشار و سرعت، از الگوریتم سیمپل^۳ استفاده شده است. به منظور تشخیص همگرایی، معیار کاهش باقیمانده های تراز شده ^{۸–۱}۰ می باشد. علاوه بر آن، کاهش خالص شار جرمی به میزان کمتر از ^{۲۸–۱}۰ شار کل و رصد کردن تغییرات کمیتهای مهم جریان در نواحی حساس به عنوان معیارهای همگرایی لحاظ شده اند.

بگونهای تنظیم شدهاند که همگرایی بهتری برای حل معادلات بدست آید. مقدار ضرایب زیرتخفیف برای معادلات فشار، مومنتم و انرژی به ترتیب برابر ۲٫۳، ۶٫۶ و ۶٫۶ انتخاب گردید. لازم بهذکر است که کلیه محاسبات با استفاده از پردازشگر هفت هستهای ۲ گیگاهرتز اینتل انجام شده و زمان محاسبات حدود ۲ الی ۴ ساعت میباشد.

۵- شبکه محاسباتی و استقلال حل عددی از شبکه

^{۲۴}٬۴۰ شبکهبندی ناحیه محاسباتی توسط نرم افزار تجاری گمبیت^۲٬۴۰ به صورت سازمانیافته، غیریکنواخت و مستطیلی ایجاد شدهاست. بهمنظور افزایش دقت محاسباتی در مکانهای نزدیک به دیوارهها، پله و بافل که گرادیانهای شدید وجود دارد، از شبکهبندی با تراکم بیشتری استفاده شدهاست. ضمناً ناحیه محاسباتی به نواحی مختلفی تقسیمبندی شدهاست تا کنترل بهتری بر روی شبکه تولیدی صورت گیرد. در شکل (۲) نمایی از شبکه محاسباتی در اطراف پله و نزدیک بافل نشان داده شدهاست. همچنین بهمنظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، توزیع سرعت در موقعیت طولی ز شبکه انتخاب شدهاست. همان گونه که در شکل ۳ مشاهده میشود، از شبکه انتخاب شدهاست. همان گونه که در شکل ۳ مشاهده میشود، از چهار شبکهبندی مختلف در عدد رینولدز ۲۰۰ و کسر حجمی ۲۰٫۰ برای هندسه با یک بافل استفاده شده است. با توجه به شکل ۳ واضح است که با تغییر تعداد شبکه از ۲۰۱۰۰ به ۲۵۴٬۰۰ تفاوت اندکی در

¹ OpenFoam4.0

² Least-squares gradient

³ SIMPLÉ (Semi-Implicit Method for Pressure-linked Equations)

⁴ Gambit2.4



منتقل ۱۰، مقایسة توریخ شرعت با تنایج تجربی (رهانی و فلمکاری ۱۱۰ به ارای ۲۰۰۰ - ۲۸ در مقاطع معنط ۲۰۰۰ (تحقیق کنونی ()، نتایج تجربی (●))

Fig. 4. Comparison of the velocity profiles with experimental results of Armaly et al [1] for Re=100 at different x/Hlocations (Present work (), Experimental (•))

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho_{nf} u_0 H}{\mu_{nf}} \tag{11}$$

در این رابطه u_0 سرعت جریان در ورودی و H ارتفاع پله میباشد. همچنین افت فشار از رابطه (۱۲) محاسبه میشود:

$$\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet} \tag{11}$$

در رابطه (۱۲)، P_{inlet} و P_{outlet} به ترتیب فشار متوسط در مقاطع ورودی و خروجی هستند. همچنین به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از حضور بافل، شاخص ارزیابی عملکرد مطابق رابطه (۱۳) محاسبه می شود [۲۴]:

$$\eta = \frac{\left(Nu_m/Nu_{m0}\right)}{\left(\Delta P/\Delta P_0\right)^{(1/3)}} \tag{17}$$

در این رابطه، Nu_m و ΔP به ترتیب عدد ناسلت متوسط و افت فشار جریان در کانال با پله پسرو در حضور بافل میباشد. همچنین، فشار جریان در کانال با پله ترتیب عدد ناسلت متوسط و افت فشار جریان در کانال با پله پسرو بدون بافل میباشد. داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، بهعنوان شبکه مناسب انتخاب میشود. لازم به ذکر است که استقلال حل عددی از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرارگرفتهاست.

۶- تحلیل دادهها

به منظور ارزیابی تأثیر نصب بافل و ابعاد آن بر جریان نانوسیال و انتقال حرارت، از عدد ناسلت محلی روی دیواره شار ثابت و عدد ناسلت متوسط به ترتیب مطابق روابط (۹) و (۱۰) بهره گرفته شده است [۶]:

$$Nu_{x} = \frac{h_{x}H}{K_{nf}} = \frac{H}{K_{nf}} \left(\frac{q''}{T_{wall,x} - T_{ave}}\right)$$
(9)

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (1 \cdot)$$

در رابطه (۹)، $q^{\prime\prime}$ شار حرارتی ثابت منتقل شده از سطح دیواره T_{ave} و $T_{wall,x}$ دمای موضعی دیواره پایین و T_{ave} دمای موضعی دیواره پایین و دمای م

همچنین عدد رینولدز بر اساس ارتفاع پله به صورت زیر تعریف می گردد [۲]: جدول ۴. مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره پایین (Nu_m) جدول ۲. مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره پایین (Table 4. Comparison of average Nusselt number on the bottom wall (Nu_m) for ER = 2 and Re = 200.

(0/)	Num		
(%) درصد احتلاف	ابو نادا [۲۳]	تحقيق حاضر	arphi
٠٫۴٧	۲,۱۱	۲,۱۰	•
۱,۰۸	۲٫۷۹	۲,۸۲	• / •)
۰,۲۷	٣,۶۴	۳٫۶۵	• / • T



Fig. 5. Comparison of the Nusselt number distribution for different Reynolds numbers

۷- بحث و بررسی نتایج

۱–۷– اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبار سنجی نتایج طول اتصال مجدد (X_r) حاصل تحلیل عددی حاضر با نتایج تجربی و عددی در جدول ۳ مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، نتایج تحلیل عددی تحقیق حاضر با داده های تجربی و عددی مقایسه شده و با بیشینه خطای حاضر با داده های تجربی و عددی مقایسه شده و با بیشینه خطای F درصد نسبت به نتایج محققین دیگر از تطابق مطلوبی بر خور دار است.

همچنین جهت بررسی صحت نتایج عددی جریان سیال، توزیع سرعت به ازای عدد رینولدز ۱۰۰، در مقاطع مختلف پس از پله، با نتایج تجربی آرمالی و همکاران [۱] برای جریان سیال آب درون پله پسرو در شکل ۴ مقایسه شدهاست. لازم به ذکر است که طول

ناحیه محاسباتی این هندسه از ورودی کانال تا لبه پله و از لبه پله تا خروجی کانال به ترتیب ۲۰ و ۵۰ سانتیمتر، ارتفاع کانال ۱٬۰۱ سانتیمتر و همچنین نسبت انبساط ER=1/94 میباشد. همان گونه که مشاهده میشود نتایج عددی مطالعه حاضر و نتایج تجربی آنها با دقت قابل قبولی مطابقت دارند.

همچنین به منظور صحتسنجی نتایج اسکالر، توزیع عدد ناسلت روی دیواره پایین (دیواره شار ثابت) برای جریان روی پله پسرو با نتایج عددی سالدانا و همکاران [۲] به ازای اعداد رینولدز ۲۰۰ و ۴۰۰ در شکل ۵ مقایسه شدهاست. همچنین طول ناحیه محاسباتی برای این هندسه از ورودی کانال تا لبه پله و از لبه پله تا خروجی کانال به ترتیب برابر ۲ و ۵۰ سانتیمتر، ارتفاع پله ۱ سانتیمتر و همچنین نسبت انبساط ER=2 میباشد. همانگونه که مشاهده میشود نتایج



 $(\phi = \cdot, \cdot, \mathbf{R} = \mathbf{V} \cdot \cdot, w_b = H)$ شکل ۶. خطوط جریان

Fig. 6. Streamlines (φ=0.02, Re=200, w_b=H)



 $^{(\}phi=\cdot,\cdot,\mathbf{R},\mathbf{R}=\cdot,w_{b}=H)$ شکل ۷. توزیع عدد ناسلت روی دیواره شار ثابت ($\phi=\cdot,\cdot,\mathbf{R}_{b}=\cdot,\cdots,w_{b}=H$

Fig. 7. Longitudinal evolution of the Nusselt number on the heated wall (ϕ =0.02, Re=200, w_b=H)

و به ازای کسر حجمی ۰٬۰۲ برای ارتفاع مختلف بافل در شکل ۶ نشان داده شدهاست. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش ارتفاع بافل، تأثیر حضور بافل بر الگوی جریان سیال و انحراف آن بیشتر است. همچنین نتایج حاکی از آن است که طول اتصال مجدد پس از پله پسرو نیز با افزایش ارتفاع بافل، کاهش مییابد. همچنین، به منظور ارزیابی ارتفاع بافل بر افزایش انتقال حرارت، توزیع طولی عدد ناسلت بر روی دیواره شار ثابت در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، عدد ناسلت در نواحی دارای گردابه بعد از پله، بیشینه است و با نزدیک شدن به خروجی کانال، که تأثیر گردابهها کاهش یافته است، مقدار آن کاهش یافته و به توسعه یافتگی می رسد. مشخص است که با تغییر اندازه بافل، توزیع عدد ناسلت و بویژه مقدار

از تطابق مطلوبی برخوردار میباشند.

همچنین جهت حصول اطمینان از صحت نتایج برای نانوسیال، نتایج حاصل از تحلیل عددی عدد ناسلت متوسط برای جریان نانوسیال مس با پایه آب روی یک پله پسرو با نتایج عددی ابو نادا [77] به ازای عدد رینولدز ۲۰۰ در جدول ۴ مقایسه شدهاست. طول دامنه مطالعاتی آنها برابر با 30H و نسبت انبساط آن برابر با ER=2 میباشد. براساس جدول ۴، نتایج تحلیل عددی تحقیق حاضر، با بیشینه خطای ٪۱/۰۸، تطابق مطلوبی با نتایج ابو نادا [77] دارد.

۲–۷– تأثير ارتفاع بافل

خطوط جریان نانوسیال در اطراف پله و بافل در عدد رینولدز ۲۰۰



Fig. 8. Performance Evaluation Index based on the height of baffle (w_h=H)



(φ=·,·^{*}, Re=¹···, h_b=H) شکل ۹. خطوط جریان Fig. 9. Streamlines (φ=0.03, Re=100, h_b=H)

بیشینه آن به طور قابل ملاحظهای تغییر می کند. نتایج حاکی از آن است که عدد ناسلت از ابتدا تا نقطه انتهایی طول اتصال مجدد در حال افزایش است، زیرا در این ناحیه لایه مرزی توسط تداخل گردابه تشکیل شده در این ناحیه حذف شدهاست. همچنین، مقدار بیشینه عدد ناسلت نیز در طول اتصال مجدد (ناحیهای که لایه مرزی در حال تشکیل دوباره است) قرار دارد. همانگونه که مشخص است عدد ناسلت با افزایش ارتفاع بافل، به میزان قابل ملاحظهای افزایش می یابد، به طوری که مقدار بیشینه عدد ناسلت در حالت بدون بافل و با وجود بافل با ارتفاع لامه اله $h_b=0$

۲۱٫۱۷ میباشد. از طرف دیگر مکان مقدار بیشینه عدد ناسلت با تغییر ارتفاع بافل، به دلیل وجود ناحیه گردابی طول اتصال مجدد، کمی متفاوت میباشد. به عبارت دیگر، با افزایش ارتفاع بافل، اندازه طول اتصال مجدد کاهش یافته و مقدار بیشینه عدد ناسلت نیز به ابتدای دیواره شار ثابت نزدیکتر میشود.

از سوی دیگر، حضور بافل به عنوان مانعی در مقابل جریان نانوسیال، همواره باعث افزایش افت فشار می گردد. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از حضور بافل، شاخص ارزیابی عملکرد برای اعداد رینولدز و مقادیر مختلف کسر



Fig. 10. Longitudinal evolution of the Nusselt number on the heated wall (q=0.03, Re=100, h_=H)



 $\phi= \cdot, \cdot$ (ج $\phi= \cdot, \cdot$ (ج $\phi= \cdot, \cdot$) (نسبت عدد ناسلت متوسط بر حسب عرض بافل در کسر حجمی مختلف ($h_b=H$) الف) ($h_b=H$) الف) ($h_b=H$), (a) $\phi=0.01$, (b) $\phi=0.02$, (c) $\phi=0.03$

دیگر، انحراف سیال به دلیل وجود بافل در رینولدزهای بالاتر، باعث تولید گردابههای قویتر و حجیمتر در مجاورت بافل و دیواره شار ثابت میشود. بهطور واضح مشخص است که حضور بافل همچون مانعی در مقابل جریان در شرایطی که مومنتم جریان ورودی بیشتر باشد، مؤثرتر واقع میشود و در مقادیر بالاتر مومنتم، دارای قدرت و حجم گردابه تولیدشده بیشتری است.

۳-۷- تأثیر عرض بافل
در این بخش، تأثیر عرض بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال

حجمی نانوذرات، برای دو بافل با ارتفاع $h_b^{=}0/^{2}H$ و $h_b^{=}0/^{2}H$ در شکل ۸ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشخص است، در حضور بافل، نسبت نرخ افزایش انتقال حرارت به افزایش افت فشار در تمامی حالات بیشتر بوده و شاخص ارزیابی عملکرد همواره بزرگتر از ۱ است. از طرف دیگر، همان گونه که از این شکل مشاهده می شود در یک عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات ثابت، با افزایش یافته ارتفاع بافل، شاخص ارزیابی عملکرد به طور چشمگیری افزایش یافته و حدود n/2 این شکل ۸ یم و حدود و کسر حجمی نانوذرات ثابت، با افزایش یافته می شود در یک عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات ثابت، با افزایش یافته رادفاع بافل، شاخص ارزیابی عملکرد به طور چشمگیری افزایش یافته و حدود n/2 الی ۲ برابر می شود. با توجه به شکل ۸، با افزایش عدد رینولدز نیز شاخص ارزیابی عملکرد همواره افزایش می یابد. به عبارت

حرارت مورد بررسی قرار میگیرد. خطوط جریان حاصل از تغییر عرض بافل در عدد رینولدز ۱۰۰ و کسر حجمی نانوذرات ۰٫۳۳ در شکل ۹ نشان دادهشدهاست. همان گونه که در این شکل مشخص است، با تغییر اندازه عرض بافل، اندازه گردابههای ناشی از حضور بافل نیز تغییر میکند. لازم به ذکر است که با تغییر عرض بافل، مکان و اندازه گردابه پس از پله (قبل از بافل) تقریباً یکسان میماند اما گردابه ثانویه (پس از بافل) کاملاً متغیر است. به منظور ارزیابی افزایش انتقال حرارت به ازای مقادیر مختلف عرض بافل، توزیع طولی عدد ناسلت روی دیواره شار ثابت در عدد رینولدز ۱۰۰ و کسر حجمی نانوذرات ۰۲٬۰۳ در شکل ۱۰ نشان دادهشدهاست. همان گونه که مشاهده میشود، مقدار بیشینه عدد ناسلت و مقدار توسعهیافتگی به ازای تمامی مقادیر عرض بافل تقریباً یکسان می باشد. دلیل این

امر را می توان این گونه توجیه نمود که مقدار بیشینه عدد ناسلت کاملاً به گردابه پس از پله پسرو (طول اتصال مجدد) بستگی دارد که با ثابت است. همچنین، که با ثابت است. همچنین، با افزایش W_b ، توزیع عدد ناسلت از مقدار بیشینه با شیب کمتری به مقدار توسعهیافتگی، که تأثیر گردابههای ناشی از پله و بافل کاهش یافتهاست، رسیده و می توان نتیجه گیری نمود که با افزایش W_b ، توزیع عدد ناسلت از مقدار بیشینه با شیب کمتری به مقدار توسعه یافتگی که تأثیر گردابه ای ناشی از پله و بافل کاهش توزیع عدد ناسلت از مقدار بیشینه با شیب کمتری به مقدار توسعه یافتگی می از پله و می توان کاه م

با توجه به اینکه عرض بافل جز پارامترهای طراحی بافل و تأثیرگذار بر جریان و انتقال حرارت میباشد، لازم است تأثیر آن بر افزایش انتقال حرارت نیز بررسی گردد. به عنوان معیار مناسبی از افزایش انتقال حرارت، نسبت «عدد ناسلت متوسط با حضور بافل» به « عدد ناسلت متوسط بدون بافل» بر حسب عرض بافل برای اعداد



 $\phi=\cdot,\cdot$ (ج $\phi=\cdot,\cdot$ (ج $\phi=\cdot,\cdot$) (لف) الف) ($h_b=H$) شکل ۱۲. شاخص ارزیابی عملکرد بر حسب عرض بافل در کسر حجمی مختلف ($h_b=H$) الف)

Fig. 12. Performance Evaluation Index based on the width of baffle for varios the nanoparticles volume fraction (h_b =H), (a) ϕ =0.01, (b) ϕ =0.02, (c) ϕ =0.03



شکل ۱۳. نمایی شماتیک از دامنه محاسباتی برای تعداد بافل مختلف

Fig. 13. Schematic view of the computational domain for various numbers of baffles

رینولدز و کسر حجمی مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشخص است، در تمامی حالتها مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط برای عرض بافل $H^{T}=_{d}w$ نسبت به سایر مقادیر عرض بافل، دارای مقدار بیشینه می باشد. همچنین همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش عدد رینولدز در محدوده ۱۰۰ تا ۴۰۰، عدد ناسلت متوسط افزایش یافته است. همان گونه که قبلاً ذکر شد با افزایش کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه، هدایت حرارتی سیال افزایش می یابد. به این ترتیب مشاهده می شود، نسبت عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد، به طوری که مقدار بیشینه Nu_m/Nu_{m0} به ازای عدد رینولدز ۲۰۰ و $H^{-}_{-}w$ و در کسر حجمی $N_{-}v$ به ترتیب حدود ۵۰٫۳ و $N_{-}v$

از سوی دیگر، با توجه به تغییر در الگوی جریان و اندازه \mathcal{R} دابههای اطراف بافل با تغییر اندازه عرض بافل، افت فشار نیز دچار تغییر میشود. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از تغییر w_a ، شاخص ارزیابی عملکرد (η) برای مقادیر مختلف عرض بافل در شکل ۱۲ نشان دادهشدهاست. همان گونه که در این شکل مشخص است، مقادیر بیشینه شاخص ارزیابی عملکرد در $H^T = w_c t$ می دهد. همچنین براساس این شکل، شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشاندهنده مؤثربودن حضور بافل بر راندمان حرارتی می باشد. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش عدد رینولدز و کاهش کسر حجمی، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش یافتهاست. به عبارت دیگر، اگرچه با

افزایش کسر حجمی مقدار عدد ناسلت متوسط افزایش مییابد، اما افت فشار ناشی از اضافه شدن نانو ذرات نیز افزایش مییابد و در نهایت منجر به کاهش شاخص ارزیابی عملکرد می شود. بر اساس این شکل، مقدار بیشینه شاخص ارزیابی عملکرد به ازای عدد رینولدز ۴۰۰ و مقدار بیشینه شاخص ارزیابی عملکرد به ازای عدد رینولدز ۴۰۰ و $W_b^{=}TH$ در کسر حجمی ۱۰٬۰۰ ۲۰٬۰ و ۲۰٬۰ به ترتیب حدود ۱۰٬۳

۴-۷- تأثیر تعداد بافل

در این بخش، تأثیر تعداد بافل بر میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال و همچنین تأثیر آن بر شاخص ارزیابی عملکرد مورد بررسی قرار گرفتهشدهاست. نمای شماتیکی از هندسه دوبعدی و دامنه محاسباتی برای ارزیابی تعداد بافل در شکل ۱۳ نشان دادهشدهاست. لازم به ذکر است که فاصله بین بافلها مقدار ثابت *H* میباشد. خطوط جریان حاصل از افزایش تعداد بافل در عدد رینولدز ۳۰۰ و کسر حجمی نانوذرات ۲۰_۱۰ در شکل ۱۴ نشان دادهشدهاست. همان گونه که در این شکل مشخص است، با تغییر تعداد بافل، تعداد و اندازه گردابههای تشکیلشده در اطراف بافلها نیز تغییر میکند. لازم به ذکر است که با تغییر تعداد بافلها نیز تغییر میکند. لازم به بافل میماند اما اندازه گردابههای بعد از آخرین بافل کاملاً متغیر است. به منظور ارزیابی انتقال حرارت در آرایشهای مختلف تعداد بافل، توزیع طولی عدد ناسلت روی دیواره شار ثابت در شکل ۱۵ نشان دادهشدهاست. همان گونه که مشاهده میشود، با افزایش تعداد بافل رفتار عدد ناسلت تا نقطه بیشینه کاملاً ثابت است، اما پس از



(φ=•,• ۱, Re=٣••, h_b=H, w_b=H) شکل ۱۴. خطوط جریان (Fig. 14. Streamlines (φ=0.01, Re=300, h_b=H, w_b=H)



شکل ۱۵. توزیع عدد ناسلت روی دیواره شار ثابت (φ=۰٬۰۱, Re=۳۰۰, h_b=H, w_b=H) شکل

Fig. 15. Longitudinal evolution of the Nusselt number on the heated wall (ϕ =0.01, Re=300, h_=H, w_=H)



 $\phi= \cdot, \cdot$ " (ج $\phi= \cdot, \cdot$ " (ب $\phi= \cdot, \cdot$ " (الف) ($h_b=H, w_b=H$) شكل ۱۶. نسبت عدد ناسلت متوسط بر حسب تعداد بافل در كسر حجمى مختلف ($h_b=H, w_b=H$) (b) $\phi=0.01$, (c) $\phi=0.03$

که مشخص است عدد ناسلت توسعهیافتگی در تمامی حالات یکسان است.

همچنین در شکل ۱۶ نسبت «عدد ناسلت متوسط با حضور بافل» به « عدد ناسلت متوسط بدون بافل» بر حسب تعداد بافل برای اعداد رینولدز و کسر حجمی مختلف نشان دادهشدهاست. بر اساس این شکل مشخص است که در تمامی حالتها مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط برای ۲ بافل نسبت به سایر تعداد بافل، بیشتر است. همچنین آن، توزیع عدد ناسلت کاملاً وابسته به تعداد بافلها متغییر میباشد. دلیل این امر را میتوان این گونه توجیه نمود که با افزیش تعداد بافل، ناحیه گستردهتری از کانال پله پسرو، به ویژه در اطراف بافلها، دارای سطح مقطع کمتر و سرعت بیشتر بوده که موجب افزایش ترم انتقال حرارت جابجایی نسبت به ترم انتقال حرارت هدایتی میباشد و سبب افزایش عدد ناسلت می گردد. با دور شدن از این ناحیه و نزدیکشدن به خروجی، جریان نانوسیال به توسعه یافتگی میرسد و همان گونه



 $\phi=*_{j}*$ ($\phi=*_{j}*$ (ب $\phi=*_{j}*$ (الف) ($h_{b}=H, w_{b}=H$) شكل ۱۷. شاخص ارزيابی عملكرد بر حسب تعداد بافل در كسر حجمی مختلف ($h_{b}=H, w_{b}=H$) الف) ($h_{b}=H, w_{b}=H$) (a) $\phi=0.01$, (b) $\phi=0.02$, (c) $\phi=0.03$

افزایش تعداد آن بر راندمان حرارتی میباشد. همان گونه که در این شکل مشخص است، به ازای ۲ بافل، شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی حالتها دارای مقدار بیشینه است. بر اساس این شکل، مقدار بیشینه شاخص ارزیابی عملکرد به ازای ۲ بافل و عدد رینولدز ۴۰۰ در کسر حجمی ۰۰۰۱ ۲۰۰۱ و ۰۰۳ به ترتیب حدود ۳٫۱۱، ۳٫۱۱ و ۳٬۰۹ می باشد. همان گونه که مشاهده می شود، در حالت ۴ بافل، اگرچه مقادیر شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط بزرگتر از ۲٫۳ است، اما نسبت به سایر حالتها تأثیر کمتری داشته و میتوان نتيجه گرفت که افزايش تعداد بافلها لزوماً موجب افزايش شاخص ارزیابی عملکرد و انتقال حرارت نمی شود. همچنین همان گونه که مشاهده می شود، استفاده از ۳ بافل نسبت به ۱ بافل نیز فقط در محدوده اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ مؤثر می باشد. همچنین می توان نتيجه گرفت که با افزايش تعداد بافل، افت فشار نيز افزايش مىيابد. از سوی دیگر، براساس شکلهای ۱۴ و ۱۶، استفاده از ۲ بافل نسبت به استفاده از ۳ و ۴ بافل موجب افزایش بیشتر عدد ناسلت می گردد. بنابراین، واضح است که برای تعداد بافل، یک مقدار بهینه وجود دارد که به ازای آن مقدار، تعامل بین ترم جابجایی جریان (به دلیل کاهش سطح مقطع) و ترم نفوذ جریان (به علت وجود جریان گردابی اطراف بافل)، موجب ایجاد حالت بهینه از نظر عدد ناسلت متوسط و شاخص ارزیابی عملکرد می گردد، که برای این هندسه با شرایط مشخص جریان، تعداد ۲ بافل نسبت به سایر تعداد بافلها راندمان حرارتی بالاتری دارد. علاوه بر این مشاهده می شود که با افزایش عدد رینولدز، همان گونه که مشاهده می شود، در حالت ۴ بافل، اگرچه انتقال حرارت نسبت به حالت بدون بافل افزایش می یابد، اما نسبت به حالت استفاده از ۱ بافل، نسبت عدد ناسلت کاهش چشمگیری یافته است. همچنین با افزایش تعداد بافل از ۱ بافل به ۳، عدد ناسلت متوسط در عدد رینولدز ۱۰۰ افزایش یافتهاست، اما در سایر اعداد رینولدز، عدد ناسلت نسبت به حالت ۱ بافل، مقدار کمتری دارد. علاوه بر این مشاهده می شود که با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط افزایش یافتهاست. همچنین براساس این شکل می توان نتیجه گرفت که استفاده از ۲ بافل نسبت به استفاده از ۳ و ۴ بافل موجب افزایش بیشتر عدد ناسلت می گردد. دلیل این امر را اینگونه می توان توجیه نمود که براساس شکل ۱۴، با افزایش تعداد بافل از ۱ به ۲ بافل، گردابه ای در فضای بین ۲ بافل ایجاد می گردد. براساس این شکل، واضح است که با افزایش بیشتر تعداد بافلها (برای ۳ و ۴ بافل)، جریان گردابی تقویت نمی گردد. بنابراین می توان انتظار داشت که با افزایش بیشتر تعداد بافلها، علی رغم کاهش سطح مقطع و افزایش ترم جابجایی جریان در ناحیه زیر بافلها، جریان گردابی موثر بر افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش نمی یابد.

به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از افزایش تعداد بافلها، نتایج حاصل از شاخص ارزیابی عملکرد برای مقادیر مختلف عرض بافل در شکل ۱۲ آمدهاست. براساس نتایج حاصل از این شکل، شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشاندهنده مؤثربودن حضور بافل و



شکل ۱۸. نسبت عدد ناسلت متوسط حاصل از رابطه برازش و شبیهسازی عددی تحقیق کنونی با محدوده انحراف ۱۰٪

Fig. 18. The ratio of average Nusselt number from the correlation and numerical simulation of the present study within the tolerance range of 10%

تعداد بافل: N=۱/۲

شاخص ارزيابي عملكرد افزايش يافتهاست. همچنين شاخص ارزيابي عملکرد، با افزایش کسر حجمی، به دلیل افزایش افت فشار ناشی از اضافهشدن نانو ذرات، كاهش مىيابد.

۵–۷– رابطه برازش برای عدد ناسلت

به منظور جمعبندی و کمک به محاسبات مهندسی، یک رابطه برازش برای نسبت «عدد ناسلت متوسط با حضور بافل» به «عدد ناسلت متوسط بدون بافل» همچون تابعی از عدد رینولدز، کسر حجمی نانو ذرات، تعداد بافل، ارتفاع بافل و عرض بافل برای انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در محدوده رژیم آرام روی یک پله یسرو در شرایط بهینه، از نظر چیدمان و هندسی بافل، مطابق رابطه (۱۴) محاسبه شدهاست:

$$\frac{Nu_m}{Nu_{m0}} = 1.15 \,\mathrm{Re}^{0.2} \,\varphi^{0.02} N^{0.19} \left(\frac{h_b}{H}\right)^{0.93} \left(\frac{w_b}{H}\right)^{0.03} \qquad ; \qquad \mathrm{R}^2 = 0.98 \quad (1\%)$$

محدوده پارامترهای بکاربردهشده در رابطه بالا به ترتیب زیر مىباشند:

$$h_b = \cdot \, \Delta H, H$$
 ارتفاع بافل: $h_b = \cdot \, \Delta H, H$
عرض بافل: $w_b = H, \, au H, \, au$
در شکل ۱۸ دقت رابطه برازش با نتایج حاصل از شبیهسازی
عددی تحقیق کنونی با محدوده انحراف ۱۰٪ نشان داده شدهاست.
لازم به ذکر است که برای محاسبه رابطه برازش از ۶۴ داده تحقیق
کنونی استفاده شدهاست. همچنین خطای متوسط بین نتایج حاصل
از رابطه برازش (۱۴) و نتایج حاصل از شبیهسازی عددی برابر ۲٫۸۸٪
می باشد. خطای متوسط مطابق رابطه (۱۵) محاسبه شدهاست.

L

۲

Average error =
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\left(\frac{Nu_m}{Nu_{m0}} \right)_{CFD} - \left(\frac{Nu_m}{Nu_{m0}} \right)_{Correlation}}{\left(\frac{Nu_m}{Nu_{m0}} \right)_{CFD}} \right|$$
(10)

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه، تأثیر حضور بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در محدوده رژیم آرام روی یک پله پسرو، به صورت عددی بررسی شدهاست. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بافل ازجمله ارتفاع، عرض و تعداد

آن است. همچنین تأثیر پارامترهایی همچون عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات نیز بررسی شدهاست. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از حضور بافل و افزایش کسر حجمى نانوذرات، شاخص ارزيابي عملكرد تعريف شدهاست. شاخص ارزیابی عملکرد در حضور بافل در تمامی شرایط مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشاندهنده مؤثربودن حضور بافل بر راندمان حرارتی میباشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش عدد رینولدز و كاهش كسر حجمي، شاخص ارزيابي عملكرد افزايش مي يابد. نتايج نشان می دهد که با افزایش ارتفاع بافل، عدد ناسلت محلی و متوسط و همچنین شاخص ارزیابی عملکرد افزایش چشمگیری می یابد، به طوری که مقدار بیشینه عدد ناسلت در حالت $h_{b}=0$ و $h_{b}=0$ به ترتيب حدود ٨٨٢ و ٢١.١٧ مي باشد. با توجه به نتايج به دست آمده با افزایش ارتفاع بافل، اندازه طول اتصال مجدد کاهش یافته و مقدار بیشینه عدد ناسلت نیز به ابتدای دیواره شار ثابت نزدیکتر می شود. همچنین نتایج نشان میدهد که در تمامی شرایط، مقدار افزایش عدد $w_{b} = TH$ ناسلت متوسط و شاخص ارزیابی عملکرد، برای عرض بافل نسبت به سایر مقادیر عرض بافل، دارای مقدار بیشینه می باشد. بهمنظور ارزیابی تأثیر تعداد بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت، آرایش های مختلفی از ۱ تا ۴ بافل در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که افزایش تعداد بافلها لزوماً موجب افزایش شاخص ارزیابی عملکرد و انتقال حرارت نمی شود، به نحوی که به ازای ۲ بافل، عدد ناسلت متوسط و شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط دارای مقدار بیشینه است. همچنین به منظور جمعبندی و کمک به محاسبات مهندسی، یک رابطه برازش برای نسبت "عدد ناسلت متوسط با حضور بافل" به "عدد ناسلت متوسط بدون بافل" همچون تابعی از عدد رینولدز، کسر حجمی نانو ذرات، تعداد بافل، ارتفاع بافل و عرض بافل با خطای متوسط ٪۲٫۸۸ ارائه شدهاست.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

ظرفیت گرمایی ویژه (/J kg K)	C_p
نسبت انبساط	ER
ارتفاع بافل (m)	h_{b}
ضريب انتقال حرارت (W/m² K)	h_{x}

H	ارتفاع پله (m)
K	ضریب هدایت حرارتی (W/m K)
L	طول دیواره شار ثابت (m)
N	(۱۱۱) تعداد بافل
Nu	عدد ناسلت
P	فشار (N/m ²)
$q^{"}$	شار حرارتی (W/m ²)
Ře	عدد رينولدز
Т	دما (K)
	مولفة افقي سرعت
и	(m/s)
U	س عت متوسط (m/s)
0	مولفه عمودی ساعت
ν	(m/s)
w	عيض رافل (m)
X^{b}	$dd = \dot{a} (m)$
21 _r	طوق چرخش (۱۱۱)
علائم يونانى	
η	شاخص ارزيابي عملكرد
μ	لزجت دینامیکی (kg/m s)
ρ	حگالہ (kg/m ³)
φ	کسہ حجمہ نانوز ات
زيرنويس	
ave	میانگین ورودی و
C	خروجى
Ĵ	سيال پايه
m	متوسط
nf	نانوسيال
p	نانوذرات
wall	سطح ديواره
0	ىدەن يافل
	0.0).

مراجع

- B.F. Armaly, F. Durst, J. Pereira, B. Schönung, Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, Journal of fluid Mechanics, 127 (1983) 496-473.
- [2] J.B. Saldana, N. Anand, V. Sarin, Forced convection over a three-dimensional horizontal backward facing step, International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 4)6) (2005) 234-225.
- [3] S. Acharya, G. Dixit, Q. Hou, Laminar mixed convection in a vertical channel with a backstep: a benchmark study, ASME-PUBLICATIONS-HTD, 258 (1993) 11-11.
- [4] M.P. Boruah, P.R. Randive, S. Pati, Hydrothermal performance and entropy generation analysis for mixed

- [13] A.J. Chamkha, F. Selimefendigil, Forced convection of pulsating nanofluid flow over a backward facing step with various particle shapes, Energies, 11)11) (2018) 3068.
- [14] F. Selimefendigil, H.F. Öztop, Numerical analysis of laminar pulsating flow at a backward facing step with an upper wall mounted adiabatic thin fin, Computers & Fluids, 88 (2013) 107-93.
- [15] H.A. Mohammed, F. Fathinia, H.B. Vuthaluru, S. Liu, CFD based investigations on the effects of blockage shapes on transient mixed convective nanofluid flow over a backward facing step, Powder technology, 346 (2019) 451-441.
- [16] H. Togun, M.R. Safaei, R. Sadri, S.N. Kazi, A. Badarudin, K. Hooman, E. Sadeghinezhad, Numerical simulation of laminar to turbulent nanofluid flow and heat transfer over a backward-facing step, Applied Mathematics and Computation, 239 (2014) 170-153.
- [17] R. Nath, M. Krishnan, Numerical study of double diffusive mixed convection in a backward facing step channel filled with Cu-water nanofluid, International Journal of Mechanical Sciences, 153 (2019) 63-48.
- [18] S. Salman, A.A. Talib, S. Saadon, M.H. Sultan, Hybrid nanofluid flow and heat transfer over backward and forward steps: A review, Powder Technology, 363 (2020) 472-448.
- [19] H. Mohammed, O.A. Alawi, M. Wahid, Mixed convective nanofluid flow in a channel having backward-facing step with a baffle, Powder Technology, 275 (2015) 343-329.
- [20] H. Mohammed, O. Alawi, N.C. Sidik, Mixed convective nanofluids flow in a channel having forward-facing step with baffle, J. Adv. Res. Appl. Mech, 24 (2016) 21-1.
- [21] Y. Ma, R. Mohebbi, M.M. Rashidi, Z. Yang, Y. Fang, Baffle and geometry effects on nanofluid forced convection over forward-and backward-facing steps channel by means of lattice Boltzmann method, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, (2020) 124696.
- [22] A. Heshmati, H. Mohammed, A. Darus, Mixed convection heat transfer of nanofluids over backward facing step having a slotted baffle, Applied Mathematics and Computation, 240 (2014) 386-368.

convective flows over a backward facing step channel with baffle, International Journal of Heat and Mass Transfer, 125 (2018) 542-525.

- [5] M. Moradzadeh, B. Ghasemi, A. Raisi, Nanofluid mixedconvection heat transfer in a ventilated cavity with a baffle, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 3)48) (2016) 266-257. (in Persian).
- [6] J. Nie, Y. Chen, R.F. Boehm, H.-T. Hsieh, Parametric Study of Turbulent Separated Convection Flow Over a Backward-Facing Step in a Duct, in: ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2007, pp. 1004-997.
- [7] S. Kumar, S. Vengadesan, The effect of fin oscillation in heat transfer enhancement in separated flow over a backward facing step, International Journal of Heat and Mass Transfer, 128 (2019) 963-954.
- [8] X. Shi, P. Jaryani, A. Amiri, A. Rahimi, E.H. Malekshah, Heat transfer and nanofluid flow of free convection in a quarter cylinder channel considering nanoparticle shape effect, Powder Technology, 346 (2019) 170-160.
- [9] H. Namadchian, I. Zahmatkesh, S. Alavi, Numerical simulation of nanofluid flow in a annular porous channel with using the Darcy-Brinkman-Forcheimer model and two-phase mixed model, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2020). (in Persian).
- [10] M. Nazari, S. Maleki-Delarestaghi, A. Shakeri, Experimental Investigation of the Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in Curved Tubes, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 2)50) (2018) 358-347. (in Persian).
- [11] A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, G.A. Sheikhzadeh, A numerical study of the effect of the magnetic field on turbulent fluid flow, heat transfer and entropy generation of hybrid nanofluid in a trapezoidal enclosure, The European Physical Journal Plus, 6)134) (2019) 310.
- [12] M.S. Pour, S.G. Nassab, Numerical investigation of forced laminar convection flow of nanofluids over a backward facing step under bleeding condition, Journal of Mechanics, 2)28) (2012) N7-N12.

ASME, NEW YORK, NY,(USA), 1993, 258 (1993) 36-29.

- [26] M. El-Refaee, M. Elsayed, N. Al-Najem, I. Megahid, Steady-state solutions of buoyancy-assisted internal flows using a fast false implicit transient scheme (FITS), International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 6)6) (1996) 23-3.
- [27] A. Kumar, A.K. Dhiman, Effect of a circular cylinder on separated forced convection at a backward-facing step, International journal of thermal sciences, 52 (2012) 185-176.
- [28] J.-T. Lin, B.F. Armaly, T. Chen, Mixed convection in buoyancy-assisting, vertical backward-facing step flows, International Journal of Heat and Mass Transfer, 10)33) (1990) 2132-2121.

- [23] E. Abu-Nada, Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step, International Journal of Heat and Fluid Flow, 1)29) (2008) 249-242.
- [24] Y. Malmir-Chegini, N. Amanifard, Heat transfer enhancement inside semi-insulated horizontal pipe by controlling the secondary flow of oil-based ferro-fluid in the presence of non-uniform magnetic field: A general correlation for the Nusselt number, Applied Thermal Engineering, 159 (2019) 113839.
- [25] D. Choudhury, A.E. Woolfe, Computation of laminar forced and mixed convection in a heated vertical duct with a step, ASME HEAT TRANSFER DIV PUBL HTD,

چگونه به اين مقاله ارجاع دهيم H. Moayedi, Numerical analysis of the effect of baffle on heat transfer enhancement nanofluid flow over a backward facing step: A correlation for the average Nusselt number, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 4309-4328. DOI: 10.22060/mej.2020.18564.6848



بی موجعه محمد ا