Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(special issue 3) (2021) 457-460
DOI: 10.22060/mej.2020.16065.6276

Numerical simulation of nanofluid flow in an annulus with porous baffles based on combination of Darcy-Brinkman-Forchheimer model and two-phase mixture model

H. Namadchain, I. Zahmatkesh, S. M. Abolhasan Alavi*

Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

ABSTRACT: In this paper, forced convection heat transfer of a nanofluid in an annulus with porous baffles on the inner and outer walls is investigated numerically. The nanofluid is simulated based on the two-phase mixture model while the flow in the porous region is described by the Darcy-Brinkman-Forchheimer model. The fluid flow is considered laminar, steady, axisymmetric, and incompressible. The governing equations have been solved using the finite volume method. The effect of parameters such as the Darcy number, the height of the porous baffles, the thermal conductivity ratio, and the volume fraction, and the type of the nanoparticles on the flow field, heat transfer, and pressure drop have been investigated. The results show that the use of the porous baffles in the flow path leads to significant variations in the characteristics of the flow and heat transfer. Reducing the Darcy and Reynolds numbers leads to the formation of vortices behind the baffles that has a significant impact on the heat transfer. By decreasing the Darcy number, the heat transfer increases substantially. This also causes a severe pressure drop in the flow. Increasing the thermal conductivity ratio raises the local Nusslet number at the wall near the baffles, which is more remarkable in higher values of permeability. Increasing the height of the porous baffles reduces the thickness of the boundary layer and enhances heat transfer.

Review History:

Received: Apr. 14, 2019
Revised: Aug. 28, 2019
Accepted: Mar. 10, 2020
Available Online: Mar. 22, 2020

Keywords:

Heat Transfer
Nanofluid
Two-Phase Mixture Model
Porous Baffle
Darcy-Brinkman-Forchheimer Model

1- Introduction

Using nanofluid and porous media are two effective methods to enhance heat transfer in heat exchange systems. Nanofluid is a fluid containing solid nanoparticles with high thermal conductivity. The addition of these nanoparticles to a base fluid can cause significant variations in the thermophysical properties of the fluid. Porous media can also improve the heat transfer characteristics. When a fluid flows through porous media, the random motion of the fluid through the solid matrix increases the fluid mixing, which can enhance the heat transfer considerably.

In this study, the forced convection heat transfer of nanofluids in an annulus with staggered porous baffles is investigated numerically. For this purpose, the two-phase mixture model and the Darcy-Brinkman-Forchheimer model are employed simultaneously to simulate the nanofluid flow in the porous baffles. The implementation of these models in a configuration with porous baffles has been reported rarely in the literature. A numerical investigation of fluid flow and heat transfer in a channel with porous baffles was carried out by Davari and Maerefat [1] who studied the effects of geometric parameters of the baffles on the flow and heat transfer characteristics.

2- Problem Description

The schematic of the considered problem is shown in Fig. 1, which includes an annulus with a length of 28m, an internal radius of 0.4m, and an external radius of 1m, with four porous baffles on the walls. Geometric parameters of porous baffles are non-dimensionalized based on the hydraulic radius (R_H) of the annulus. The working fluid is Al_2O_3/water nanofluid and the porous matrix is made of aluminum foam with a porosity of 0.9, which is in local thermal equilibrium with the nanofluid. Moreover, a uniform velocity profile is specified at the inlet and the nanofluid enters the annulus at a constant temperature of 300 K. Besides, both walls are at a constant temperature of 400 K. It is assumed that the fluid flow is laminar, incompressible, and axisymmetric.

3- Governing Equations

Since our computational domain contains two regions including a clear domain and a porous domain, we need a set of equations for each region. The two-phase mixture model is used to describe the nanofluid behavior while the Darcy-Brinkman-Forchheimer model is added to it for the porous domain. The equations are solved using the finite volume method along with the SIMPLE algorithm. The continuity,

*Corresponding author's email: m-a-alavi@mshdiau.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 visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

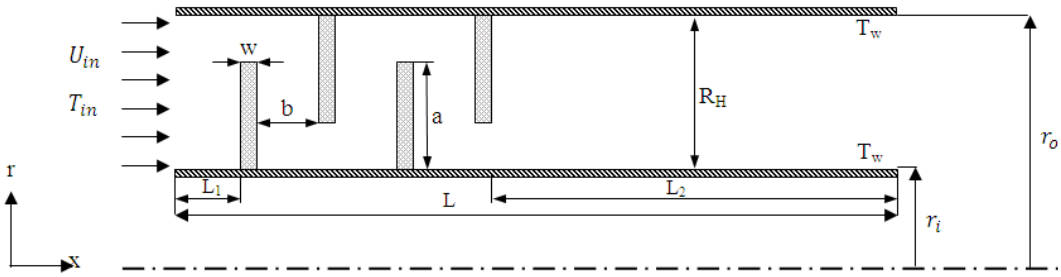


Fig. 1. Schematic of fluid flow in the channel having porous baffles

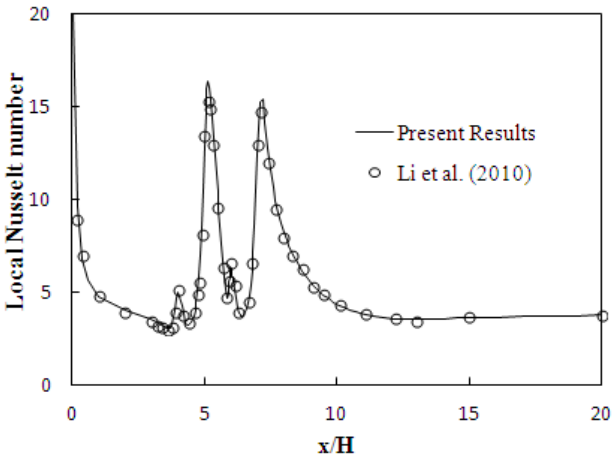


Fig. 2. The bracket must be closed at the end of "Comparison of the local Nusselt number obtained from the current research with the results of Li et al. [2]

momentum, energy, and the nanoparticles concentration equations for the clear domain are as follows [2]:

$$\vec{\nabla}.(\rho_m \vec{v}_m) = 0 \tag{1}$$

$$\vec{\nabla}.(\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = \vec{\nabla}.\left[\mu_m \left(\vec{\nabla}\vec{v}_m + \vec{\nabla}\vec{v}_m^T\right)\right] \tag{2}$$

$$\vec{\nabla}.\sum_{k=1}^{2}(\varphi_k \vec{v}_k \rho_k C_{pk} T) = \vec{\nabla}.(\lambda_{eff} \vec{\nabla} T) \tag{3}$$

$$\vec{\nabla}.(\varphi_{np} \rho_{np} \vec{v}_m) = -\vec{\nabla}.(\varphi_{np} \rho_{np} \vec{v}_{dr,np}) \tag{4}$$

For the porous domain, however, the momentum and energy equations take the following form:

$$\frac{\rho_m}{\varepsilon^2}\left[\vec{v}_m.\vec{\nabla}\vec{v}_m\right] = -\vec{\nabla}p + \frac{\mu_m}{\varepsilon}\nabla^2\vec{v}_m - \frac{\mu_m \vec{v}_m}{K} - \frac{\rho_m \varepsilon C_d}{\sqrt{K}}\vec{v}_m\left|\vec{v}_m\right| + \vec{\nabla}.\left(\sum_{k=1}^{2}\varphi_k \rho_k \vec{v}_{dr,k}\vec{v}_{dr,k}\right) \tag{5}$$

$$\vec{\nabla}.\sum_{k=1}^{2}(\varphi_k \vec{v}_k \rho_k C_{pk} T) = \vec{\nabla}.(\lambda_{eff} \vec{\nabla} T) \tag{6}$$

4- Results and Discussion

The present simulation is validated against the results of Li et al. [3]. For this purpose, a laminar water flow through a channel with staggered porous blocks at a Reynolds number of 100 is simulated and the results are compared with those of that work. The comparison is shown in Fig. 2, which indicates an excellent agreement.

To study the effect of the Darcy number on the heat transfer performance, the distributions of the local Nusselt number at both the inner and outer walls for different Darcy numbers are depicted in Fig. 3. It can be seen that the Darcy number affects the heat transfer rate considerably in such a way that decreasing the Darcy number enhances the heat transfer significantly. In the low values of the Darcy number, the permeability of porous baffles is not significant. As a result, the flow field is more distorted and the variations in the Nusselt number are sharper. In Da=10^{-6}, however, the peaks in the Nusselt number occur near the porous baffles, while its minimums appear in the space between the baffles. It is evident that in high values of the Darcy number, the variations in the Nusselt number are similar to that of an annulus without porous baffles due to the lower blockage effect. It is also obvious that heat transfer on the inner wall is higher than the outer wall, which goes back to due to the smaller radius and the higher velocity magnitudes.

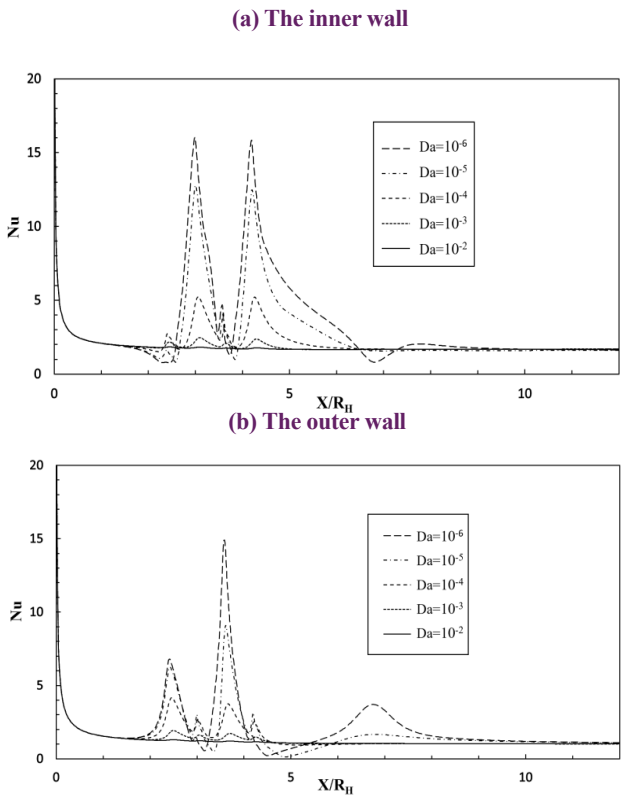


Fig. 3. The local Nusselt number for different Darcy numbers at (a) The inner wall (b) The outer wallFig. 3. The local Nusselt number for different Darcy numbers

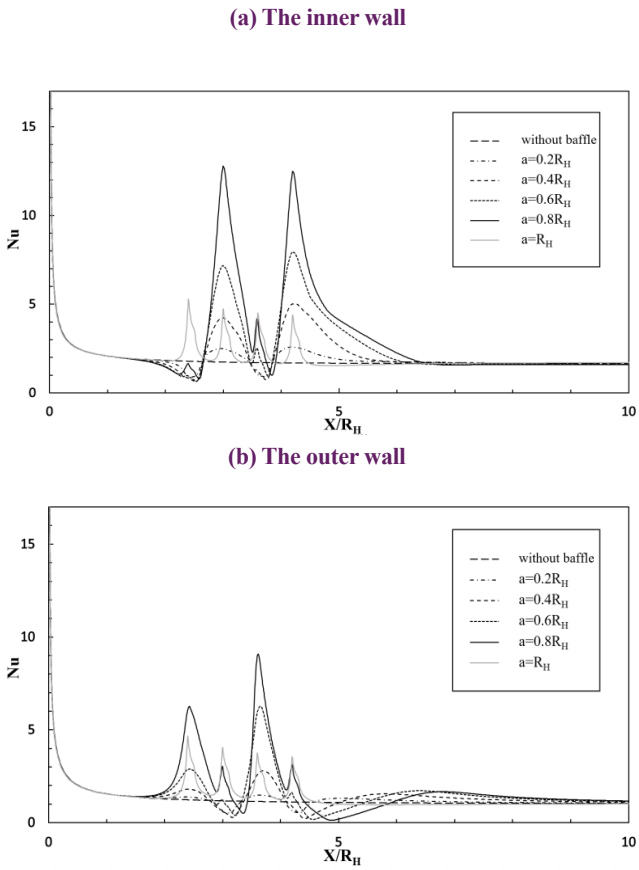


Fig. 4. The local Nusselt number for different baffle heights at (a) The inner wall (b) The outer wall

The effect of the height of the baffle on the variations of the local Nusselt number at both the inner and outer walls is shown in Fig. 4. Here, a rise in the height of the baffle leads to a velocity elevation. This decreases the boundary layer thickness and improves the heat transfer rate. However, this effect remains true until $a = 0.8R_H$. When the porous baffles occupy the whole radius, the clear gap disappears and the velocity acceleration due to the rise in the height of the baffle may not occur.

5- Conclusions

Based on the presented study we reached the conclusion that the use of the porous baffles resulted in improvement of the heat transfer but it was accompanied by a rise in the pressure drop. It was found that the vortices generated by the porous baffles changed the fluid flow and heat transfer characteristics considerably. Moreover, it was observed that increasing the height of porous baffles up to $a = 0.8R_H$ elevates the heat transfer. A reduction in the Darcy number also contributed to the heat transfer elevation.

References

[1] A. Davari, M. Maerefat, Numerical analysis of fluid flow and heat transfer in entrance and fully developed regions of a channel with porous baffles, Journal of Heat Transfer, 138(6) (2016) 062601.

[2] M. Siavashi, H.R.T. Bahrami, H. Saffari, Numerical investigation of porous rib arrangement on heat transfer and entropy generation of nanofluid flow in an annulus using a two-phase mixture model, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 71(12) (2017) 1251-1273.

[3] H. Li, K. Leong, L. Jin, J. Chai, Analysis of fluid flow and heat transfer in a channel with staggered porous blocks, International Journal of Thermal Sciences, 49(6) (2010) 950-962.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Namadchain, I. Zahmatkesh, S. M. Abolhasan Alavi, Numerical simulation of nanofluid flow in an annulus with porous baffles based on combination of Darcy-Brinkman-Forchheimer model and two-phase mixture model. Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 3) (2021). 457-460

DOI: 10.22060/mej.2020.16065.6276

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ویژه ۳، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۸۹۷ تا ۱۹۱۴
DOI: 10.22060/mej.2020.16065.6276

شبیه‌سازی عددی جریان نانوسیال در یک کانال حلقوی با موانع متخلخل با استفاده از ترکیب مدل دارسی- برینکمن- فرچهیمر و مدل مخلوط دوفازی

حسین نمدچیان، ایمان زحمتکش، سیدمحمودابوالحسن علوی*

گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

خلاصه: در این مقاله، انتقال حرارت جریان جابه‌جایی اجباری نانوسیال در یک کانال حلقوی با موانع متخلخل بر روی دیواره‌های داخلی و خارجی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوسیال با استفاده از مدل مخلوط دوفازی و جریان در ناحیه متخلخل بوسیله مدل دارسی- برینکمن- فرچهیمر شبیه‌سازی شده است. جریان سیال به صورت آرام، پایا، متقارن محوری و تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود. همچنین، محیط متخلخل، یکنواخت و همگن بوده و خواص فیزیکی نانوسیال و محیط متخلخل ثابت فرض می‌شود. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل حل شده‌اند. اثر پارامترهایی نظیر عدد دارسی، ارتفاع مانع متخلخل، نسبت هدایت حرارتی ناحیه متخلخل به سیال و کسرحجمی نانوذرات و نوع آنها بر روی میدان جریان، انتقال حرارت و افت فشار بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از موانع متخلخل در مسیر جریان منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت می‌شود. کاهش اعداد دارسی و رینولدز منجر به ایجاد گردابه در پشت موانع می‌شود که این گردابه‌ها تأثیر بسزایی بر روی انتقال حرارت دارند. با کاهش عدد دارسی، انتقال حرارت به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. این امر همچنین افت فشار شدیدی را در جریان ایجاد خواهد کرد. افزایش نسبت هدایت حرارتی ماتریس جامد به سیال باعث افزایش عدد ناسلت محلی دیواره در اطراف موانع خواهد شد که این افزایش در نفوذپذیری‌های بالا، بیشتر است. با افزایش ارتفاع موانع متخلخل، ضخامت لایه مرزی کاهش پیدا می‌کند و انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۵
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۰۶
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۰۳

کلمات کلیدی:
انتقال حرارت
نانوسیال
مدل مخلوط دوفازی
مانع متخلخل
مدل دارسی- برینکمن- فرچهیمر

۱- مقدمه

در حال حاضر، خنک‌کاری یکی از مهم‌ترین نیازهای صنعت و تکنولوژی از جمله کامپیوترها، تجهیزات و قطعات الکترونیکی و سیستم‌های برق، موتور خودروها و رآکتورهای هسته‌ای می‌باشد. پیشرفت سریع صنایع مختلف مانند هوافضا، اتومبیل و الکترونیک با افزایش حرارت تولیدی در حجم‌های کوچکتر نسبت به گذشته همراه بوده است که حاکی از نیاز روزافزون به خنک‌کاری در حجم کمتر و به صورت بهینه می‌باشد.

نانوذرات، جامدهایی هستند که بر روی خواص ترموفیزیکی سیال پایه مانند هدایت حرارتی، لزجت، گرمای ویژه و چگالی تأثیرگذار هستند. هدایت حرارتی سیالات معمولی با اضافه‌کردن نانوذرات زیاد می‌شود و در نتیجه، انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش انتقال حرارت، استفاده از محیط متخلخل در مسیر جریان سیال می‌باشد. این روش، کاربردهای فراوانی در صنعت از جمله رآکتورهای شیمیایی، مبدل‌های حرارتی، سینک‌های گرمایی، خنک‌کاری رآکتورهای هسته‌ای و ذخیره انرژی دارد. استفاده از محیط متخلخل، به دلیل ایجاد حرکات نامنظم در سیال و در نتیجه، افزایش اختلاط سیال و همچنین هدایت حرارتی و تشعشع بالای شبکه متخلخل، انتقال حرارت جریان سیال را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. تحقیقات بسیاری بر روی استفاده از این دو روش به طور همزمان انجام شده است.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m-a-alavi@mshdiau.ac.ir

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

مغربی و همکاران [۱] به بررسی اثرات جریان نانوذرات بر روی انتقال حرارت در داخل یک کانال مستقیم پرشده از مواد متخلخل پرداختند. در این تحقیق انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، جریان کاملا توسعه‌یافته فرض شده و معادله دارسی- برینکمن- فرچهیمر به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش عدد لوئیس، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش عدد اشمیت، گرادیان دمای دیواره کم شده و در نتیجه، عدد ناسلت کاهش می‌یابد.

حاجی‌پور و دهکردی [۲] به مطالعه عددی انتقال حرارت ترکیبی جریان نانوسیال در یک کانال عمودی که بخشی از آن با محیطی با تخلخل بالا پر شده بود، پرداختند. در ناحیه متخلخل، معادله دارسی- برینکمن- فرچهیمر به‌کاررفت و مدل‌های مختلف اتلاف لزج استفاده شد. شرایط مرزی برای ناحیه تماس سیال و ناحیه متخلخل، برای سرعت و دمای سیال درنظر گرفته شد. آنها در مطالعه‌ای دیگر [۳]، جابه‌جایی ترکیبی جریان نانوسیال آب/Al_2O_3 را در یک کانال عمودی مستطیلی پرشده از مواد متخلخل فلزی که دیواره آن تحت شار حرارتی ثابت قرار داشت مورد مطالعه عددی و آزمایشگاهی قرار دادند. در این مطالعه، اثرات پخش براونی و ترموفرسیس در معادلات حاکم در نظر گرفته شد و فرض تعادل دمایی موضعی به‌کاررفت.

یانگ و هوانگ [۴] با بررسی عددی انتقال حرارت و میدان جریان سیال در یک کانال مستطیلی دارای موانع جامد و متخلخل نشان دادند که موانع متخلخل افت فشار بسیار کمتری را نسبت به موانع جامد ایجاد می‌کنند.

کو و آناند [۵] مطالعات آزمایشگاهی بر روی جریان در یک کانال دارای موانع متخلخل انجام دادند. موانع با آرایش زیگزاگی بر روی هر دو دیواره بالا و پایین قرار داشتند. نتایج نشان داد که استفاده از موانع متخلخل، انتقال حرارت را تا ۳۰۰ درصد نسبت به کانال بدون مانع متخلخل افزایش می‌دهد.

تارگوی و کاهالاراس [۶] مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت را در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای شامل موانع متخلخل با دو آرایش متفاوت مورد بررسی عددی قرار دادند. در آرایش اول، موانع بر روی دیواره داخلی قرار گرفته و در آرایش دوم، موانع بر روی هر دو دیواره داخلی و خارجی نصب شده بودند. تأثیر پارامترهایی نظیر عدد دارسی، ضخامت مانع متخلخل، فاصله بین موانع و نسبت هدایت حرارتی مطالعه شد. در نهایت مشاهده شد که با قرارگیری موانع بر روی هر دو دیواره، انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

لی و همکاران [۷] به مطالعه عددی جریان در داخل یک کانال با موانع متخلخل پرداختند و تأثیر پارامترهای هندسی و فیزیکی مختلف از جمله ضخامت و ارتفاع موانع، عدد رینولدز، عدد دارسی و نسبت هدایت حرارتی ماتریس متخلخل به سیال را بر روی انتقال حرارت و میدان جریان مطالعه کردند.

داوری و معرفت [۸] جریان آرام سیال و انتقال حرارت در ناحیه ورودی و همچنین ناحیه توسعه‌یافته تناوبی در یک کانال با موانع متخلخل را به صورت عددی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. فرض تعادل حرارتی محلی میان ماتریس متخلخل و سیال در نظر گرفته شد. پارامترهای مختلفی مانند عدد رینولدز، ارتفاع موانع و فاصله موانع در اعداد دارسی مختلف بررسی شد. آنها به این نتیجه رسیدند که ضریب انتقال حرارت محلی به گردابه‌های ایجادشده توسط موانع وابسته است و در مواردی که ناحیه گردابی ایجاد می‌شود، عدد ناسلت محلی در ناحیه ورودی، کمتر از ناحیه توسعه‌یافته تناوبی می‌باشد.

تأثیر تیغه‌های متخلخل بر روی انتقال حرارت و تولید آنتروپی جریان آرام نانوسیال در داخل یک کانال حلقوی توسط سیاوشی و همکاران [۹] مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، محیط متخلخل، نانوذرات و گردابه‌های ایجادشده، بر روی مشخصه‌های انتقال حرارت تأثیرگذار هستند. نتایج نشان داد که نفوذپذیری و ارتفاع تیغه‌های متخلخل، تأثیر بسزایی بر عملکرد حرارتی سیستم دارند. همچنین، نواحی گردابه‌ای بر روی نحوه تغییرات آنتروپی و انتقال حرارت تأثیرگذارند و نواحی بهینه‌ای بر اساس این دو پارامتر وجود دارند.

مدل دارسی- برینکمن توسط زحمتکش و ناقدی‌فر [۱۰] جهت مطالعه ظهور ناپایداری در انتقال حرارت جابه‌جایی توأم در مسأله برخورد جت نانوسیالات درون محیط متخلخل به‌کار رفت. مشخص شد که پایدار یا ناپایدار بودن جریان به اعداد رینولدز، گراشف و دارسی وابسته است اما به تخلخل محیط و کسرحجمی نانوذرات بستگی ندارد. آنها در ادامه، تحلیل خود را به جابه‌جایی اجباری ضربانی در آن مسأله توسعه دادند [۱۱].

گوتری و همکاران [۱۲] به تحلیل انتقال حرارت و جرم نانوسیالات در میکرورآکتوری که به‌طور جزئی با محیط متخلخل پر شده بود، پرداختند. آنها مشاهده کردند که قراردادن محیط متخلخل و استفاده

از نانوسیالات، امکان کنترل، توزیع غلظت و دما در میکروراآکتور را فراهم می‌آورد.

هدف از این تحقیق، بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری سیال با به‌کارگیری همزمان نانوذرات و محیط متخلخل می‌باشد. بدین منظور، برای محیط متخلخل از مدل پیشرفته و کامل دارسی-برینکمن- فرچهیمر استفاده می‌شود و نانوسیال نیز، با مدل مخلوط دوفازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. دقت این روش در مدلسازی جریان نانوسیالات در مطالعات گذشته به اثبات رسیده است [۱۴-۱۳]. استفاده همزمان از این دو مدل در هندسه‌ای با موانع متخلخل، موضوع جدیدی می‌باشد که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی بوده که به صورت زیر می‌باشند:

معادله پیوستگی برای مخلوط دوفازی در ناحیه سیال آزاد به شکل زیر است:

$$\vec{\nabla}.(\rho_m \vec{v}_m) = 0 \tag{۱}$$

در این معادله، $\vec{v}_m$ و ρ_m به ترتیب سرعت میانگین جرمی و چگالی مخلوط می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^{2} \varphi_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \tag{۲}$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^{2} \varphi_k \rho_k \tag{۳}$$

در اینجا، φ_k کسرحجمی فاز k می‌باشد.

معادله مومنتوم مخلوط دوفازی را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\vec{\nabla}.(\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla}.\left[\mu_m \begin{pmatrix} \vec{\nabla}\vec{v}_m \\ +\vec{\nabla}\vec{v}_m^T \end{pmatrix}\right] + \vec{\nabla}.\left(\sum_{k=1}^{2} \varphi_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k}\right) \tag{۴}$$

در اینجا، μ_m لزجت مؤثر مخلوط است که برای نانوسیال آب/Al_2O_3 از رابطه زیر تعیین می‌شود[۱۵]:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}\,(123\varphi_p^2 + 7.36\varphi_p + 1) \tag{۵}$$

همچنین، $\vec{v}_{dr,k}$ که سرعت رانشی فاز k می‌باشد، به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \tag{۶}$$

سرعت رانشی نانوذرات از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\vec{v}_{dr,np} = \vec{v}_{np,bf} - \sum_{k=1}^{2} \frac{\varphi_k \rho_k}{\rho_m} \vec{v}_k \tag{۷}$$

که در آن، سرعت نسبی، $\vec{v}_{np,bf}$، بیانگر سرعت فاز ثانویه، $\vec{v}_{np}$، نسبت به سرعت فاز اولیه (در اینجا، سیال پایه)، $\vec{v}_{bf}$، می‌باشد که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{v}_{np,bf} = \vec{v}_{np} - \vec{v}_{bf} \tag{۸}$$

در این پژوهش، سرعت نسبی از رابطه زیر که توسط مانین و همکاران [۱۶] پیشنهاد شده، به‌دست می‌آید:

$$\vec{v}_{np,bf} = \frac{\rho_{np} d_{np}^2}{18\mu_{bf} f_{drag}} \frac{\rho_{np} - \rho_{bf}}{\rho_{np}} \vec{a} \tag{۹}$$

در این معادله، $\vec{a}$ شتاب فاز ثانویه است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{a} = \vec{g} - \vec{v}_m.\vec{\nabla}\vec{v}_m \tag{۱۰}$$

که در آن، $\vec{g}$ بردار شتاب گرانش می‌باشد.

تابع پسا، f_{drag}، از رابطه شیلر و نومن [۱۷] به‌دست می‌آید:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15\,\mathrm{Re}_{np}^{0.687}, \mathrm{Re}_{np} \le 1000 \\ 0.0183\,\mathrm{Re}_{np}, \mathrm{Re}_{np} > 1000 \end{cases} \tag{۱۱}$$

با فرض برقراری تعادل حرارتی محلی، معادله انرژی مخلوط به شکل زیر است:

$$\vec{\nabla}.\sum_{k=1}^{2}\left(\varphi_k \vec{v}_k \rho_k C_{pk} T\right) = \vec{\nabla}.\left(\lambda_m \vec{\nabla} T\right) \tag{۱۲}$$

که در آن، λ_m هدایت حرارتی مؤثر مخلوط است:

$$\lambda_m = \sum_{k=1}^{2} \varphi_k \lambda_k \tag{۱۳}$$

معادله کسرحجمی فاز ثانویه در حالت پایا رابطه زیر است:

$$\vec{\nabla}.(\varphi_{np}\rho_{np}\vec{v}_m) = -\vec{\nabla}.(\varphi_{np}\rho_{np}\vec{v}_{dr,np}) \tag{۱۴}$$

برای جریان نانوسیال در محیط متخلخل، از ترکیب معادله دارسی- برینکمن- فرچهیمر و مدل مخلوط دوفازی می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned}&\frac{\rho_m}{\varepsilon^2}\left[\vec{v}_m.\vec{\nabla}\vec{v}_m\right] = -\vec{\nabla}p + \frac{\mu_m}{\varepsilon}\nabla^2\vec{v}_m \\ &-\frac{\mu_m\vec{v}_m}{K} - \frac{\rho_m\varepsilon C_d}{\sqrt{K}}\vec{v}_m\left|\vec{v}_m\right| + \\ &\vec{\nabla}.\left(\sum_{k=1}^{2}\varphi_k\rho_k\vec{v}_{dr,k}\vec{v}_{dr,k}\right)\end{aligned} \tag{۱۵}$$

در اینجا، K و C_d به ترتیب، نفوذپذیری و ضریب اینرسی محیط متخلخل می‌باشند که به شکل زیر به‌دست می‌آیند [۱۸]:

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2} \tag{۱۶}$$

$$C_d = \frac{1.75}{\sqrt{150}\varepsilon^{3/2}} \tag{۱۷}$$

که در آن، d_p قطر نانوذرات است.

معادله انرژی نانوسیال در محیط متخلخل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{\nabla}.\sum_{k=1}^{2}(\varphi_k\vec{v}_k\rho_k C_{pk}T) = \vec{\nabla}.(\lambda_{eff}\vec{\nabla}T) \tag{۱۸}$$

که λ_{eff} ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال در محیط متخلخل می‌باشد که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\lambda_{eff} = (1-\varepsilon)\lambda_p + \varepsilon\lambda_m \tag{۱۹}$$

اعداد بی‌بعد مورد بررسی شامل موارد زیر می‌باشند:

عدد رینولدز:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_m U_{in} D_h}{\mu_m} \tag{۲۰}$$

عدد دارسی:

$$Da = \frac{K}{D_h^2} \tag{۲۱}$$

اعداد ناسلت محلی و میانگین:

$$Nu_x = \frac{k_{eff}\,(\partial T/\partial r)\big|_{r=r_o} D_h}{k_f\,(T_w - T_m)} \tag{۲۲}$$

$$Nu_{ave} = \frac{1}{L}\int_0^L Nu_x\,dx \tag{۲۳}$$

که در آنها:

$$D_h = 2R_h = 2(r_o - r_i) \tag{۲۴}$$

دمای میانگین:

$$T_m = \frac{\int_{r_i}^{r_o} T\left|\vec{v}_m\right| r dr}{\int_{r_i}^{r_o}\left|\vec{v}_m\right| r dr} \tag{۲۵}$$

فشار بی‌بعد:

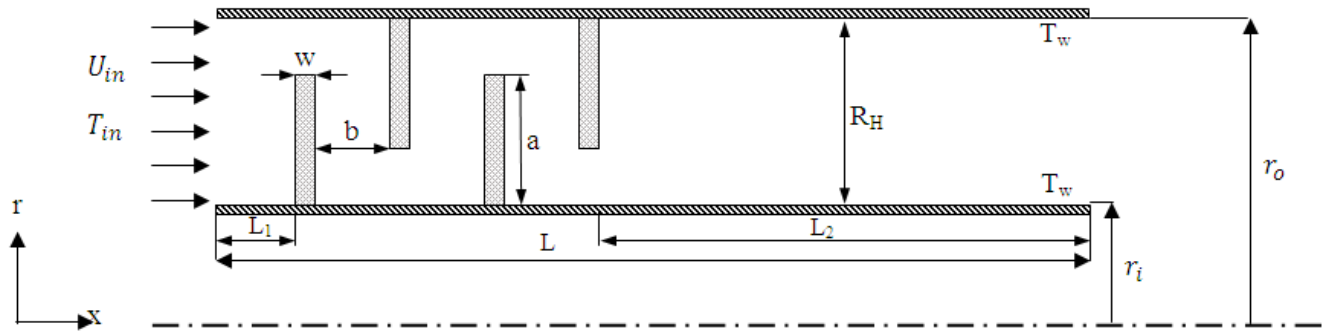
$$p^* = \frac{\Delta p}{\rho f u_{in}^2} \tag{۲۶}$$

فشار میانگین:

$$p = \frac{1}{r}\int_{r_i}^{r_o} p r dr \tag{۲۷}$$

۳- شرح مسأله، شکل هندسی و شرایط مرزی

در این هندسه، جریان آرام و پایا در داخل یک کانال دوبعدی متقارن محوری که در آن، موانع متخلخل در ابعاد و مکان‌های مختلف به صورت زیگزاگی در مسیر جریان قرار دارند، بررسی می‌شود. در این شرایط، علاوه بر افزایش انتقال حرارت ناشی از هدایت حرارتی بالای ماتریس متخلخل، به دلیل ایجاد گردابه در جریان، تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در مشخصه‌های جریان سیال و انتقال حرارت خواهیم داشت. هدف از این مسأله، بررسی تأثیر ابعاد و مکان موانع و همچنین مشخصه‌های تخلخل و بهبود انتقال حرارت می‌باشد. هندسه و ابعاد مسأله در شکل ۱ نشان داده شده است. ناحیه متخلخل با عدد دارسی 10^{-4} و تخلخل ۰/۷۵ با استفاده از مدل دارسی- برینکمن- فرچهیمر



شکل ۱: طرح شماتیک جریان سیال در کانال شامل موانع متخلخل

Fig. 1. Schematic of fluid flow in the channel having porous baffles

شبیه‌سازی می‌شود.در مقطع ورودی، جریان با دما و سرعت یکنواخت وارد می‌شود. دمای ورودی ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته می‌شود و سرعت ورودی بر طبق اعداد رینولدز متفاوت، محاسبه می‌شود. جریان در رینولدزهای ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ مورد بررسی قرار می‌گیرد. دیواره بالایی عایق در نظر گرفته می‌شود و برای شرط مرزی خروجی نیز، توسعه‌یافتگی کامل اعمال می‌شود. علاوه بر این شرایط، برای برقراری پیوستگی سرعت، فشار، تنش، شار حرارتی و دما، نیاز به اعمال شرایط مرزی در سطح تماس بین ناحیه سیال آزاد و ناحیه متخلخل می‌باشد:

$$\vec{v}\big|_c = \vec{v}\big|_p \tag{۲۸}$$

$$T\big|_c = T\big|_p \tag{۲۹}$$

$$\lambda_{nf}\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_c = \lambda_{eff}\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_p \tag{۳۰}$$

$$\left[\frac{\partial v_x}{\partial r}+\frac{\partial v_r}{\partial x}\right]_c = \frac{1}{\varepsilon}\left[\frac{\partial v_x}{\partial r}+\frac{\partial v_r}{\partial x}\right]_p \tag{۳۱}$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial r}\bigg|_c = \frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial v_r}{\partial r}\bigg|_p \tag{۳۲}$$

در این مسأله، نانوسیال آب/Al_2O_3 مورد استفاده قرار گرفته است. موانع متخلخل از جنس فوم آلومینیومی با تخلخل ۰/۹ می‌باشد. طول کانال ۲۸ متر و شعاع داخلی و خارجی به ترتیب ۰/۴ متر و ۱ متر می‌باشد. با استفاده از شعاع هیدرولیکی کانال، $R_H = ۰/۶\text{m}$ ، پارامترهای هندسی مسأله بی‌بعد می‌شوند. فاصله ورودی کانال تا اولین مانع $L_۱ = ۴R_H$ و فاصله آخرین مانع تا انتهای کانال $L_۲ = ۴۰R_H$ می‌باشد. ارتفاع، ضخامت و فاصله بین موانع به ترتیب، a، w و b در نظر گرفته شده است. نسبت هدایت حرارتی مؤثر به هدایت حرارتی نانوسیال به شکل $Kr = k_{eff}/k_{nf}$ تعریف می‌شود. دمای جریان ورودی ۳۰۰ کلوین و دمای دیواره‌های داخلی و خارجی ثابت و ۴۰۰ کلوین می‌باشد. سرعت ورودی یکنواخت است که در اعداد رینولدز مختلف محاسبه می‌شود. شرایط پایه موردنظر برای این مسأله $Re = ۱۰۰$، $a = ۰/۸R_H$، $w = ۰/۲R_H$، $b = ۰/۸R_H$ و $Kr = ۱$ می‌باشد.

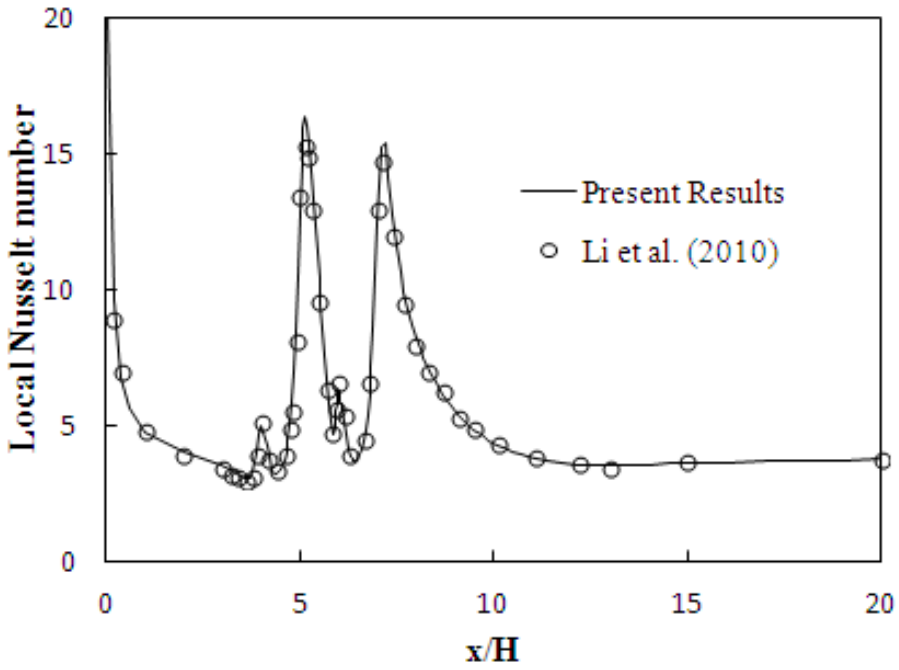
4- روش حل عددی

پس از معرفی معادلات حاکم بر مسأله، روش حل عددی در این بخش معرفی می‌شود. با گسسته‌سازی دامنه حل و تبدیل آن به المان‌های کوچکتر و اعمال شرایط مرزی، به مجموعه‌ای از معادلات خطی دست می‌یابیم. با حل این مجموعه معادلات، میدان‌های سرعت، فشار و دما به‌دست می‌آید. در این پژوهش، گسسته‌سازی با استفاده از روش حجم‌محدود انجام می‌شود. برای حل معادلات جبری از ماتریس TDMA استفاده می‌کنیم و برای برقراری ارتباط صحیح میان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده می‌شود. در این الگوریتم، ابتدا مقادیر اولیه برای میدان‌های سرعت و فشار حدس زده می‌شود. معادله مومنتوم برای به‌دست‌آوردن سرعت بر اساس میدان فشار حدس‌زده‌شده، حل می‌شود و سپس مقادیر سرعت به‌دست‌آمده، در معادله تصحیح فشار به‌کار می‌روند تا به کمک حل این معادله،

جدول ۱: مقادیر ضریب انتقال حرارت میانگین دیواره در تعداد نقاط شبکه مختلف

Table 1. The values of the average heat transfer coefficient at the wall for different grid points

ابعاد شبکه $x \times y$	ضریب انتقال حرارت میانگین دیواره $(W/m^2.K)$
۱۰۰ × ۱۰	۲۱۱۹/۳۷۶
۳۰۰ × ۲۰	۲۱۴۸/۴۴۱
۵۰۰ × ۳۰	۲۱۶۴/۱۶۲
۷۰۰ × ۴۰	۲۱۷۲/۴۵۶
۹۰۰ × ۵۰	۲۱۷۹/۲۹۴



شکل ۲: مقایسه عدد ناسلت محلی به‌دست‌آمده از پژوهش حال حاضر با نتایج لی و همکاران [۱۹]

Fig. 2. Comparison of the local Nusselt number obtained from the current research with the results of Liet al. [19]

میدان‌های سرعت و فشار تصحیح شوند. با استفاده از مقادیر سرعت تصحیح‌شده، معادله انرژی و کسرحجمی (در مدل مخلوط دوفازی) حل می‌شوند. این روند حل تا رسیدن به همگرایی لازم ادامه پیدا می‌کند.

۵- بررسی استقلال از شبکه

جهت بررسی استقلال از شبکه از یک شبکه منظم با تعداد نقاط مشخص در راستاهای x و y استفاده می‌شود. در نزدیکی دیواره‌ها، شبکه‌ای ریزتر به‌خدمت گرفته می‌شود. ضریب انتقال حرارت میانگین بر روی دیواره به عنوان شاخص انتخاب می‌شود. به منظور بررسی تأثیر اندازه شبکه بر روی حل عددی، شبکه‌هایی با اندازه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول ۱ مقادیر ضریب انتقال حرارت میانگین برای هر یک از این شبکه‌های محاسباتی نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر می‌توان به این نتیجه رسید که شبکه

محاسباتی با ابعاد ۴۰× ۷۰۰ مطلوب می‌باشد.

6- اعتبارسنجی شبیه‌سازی

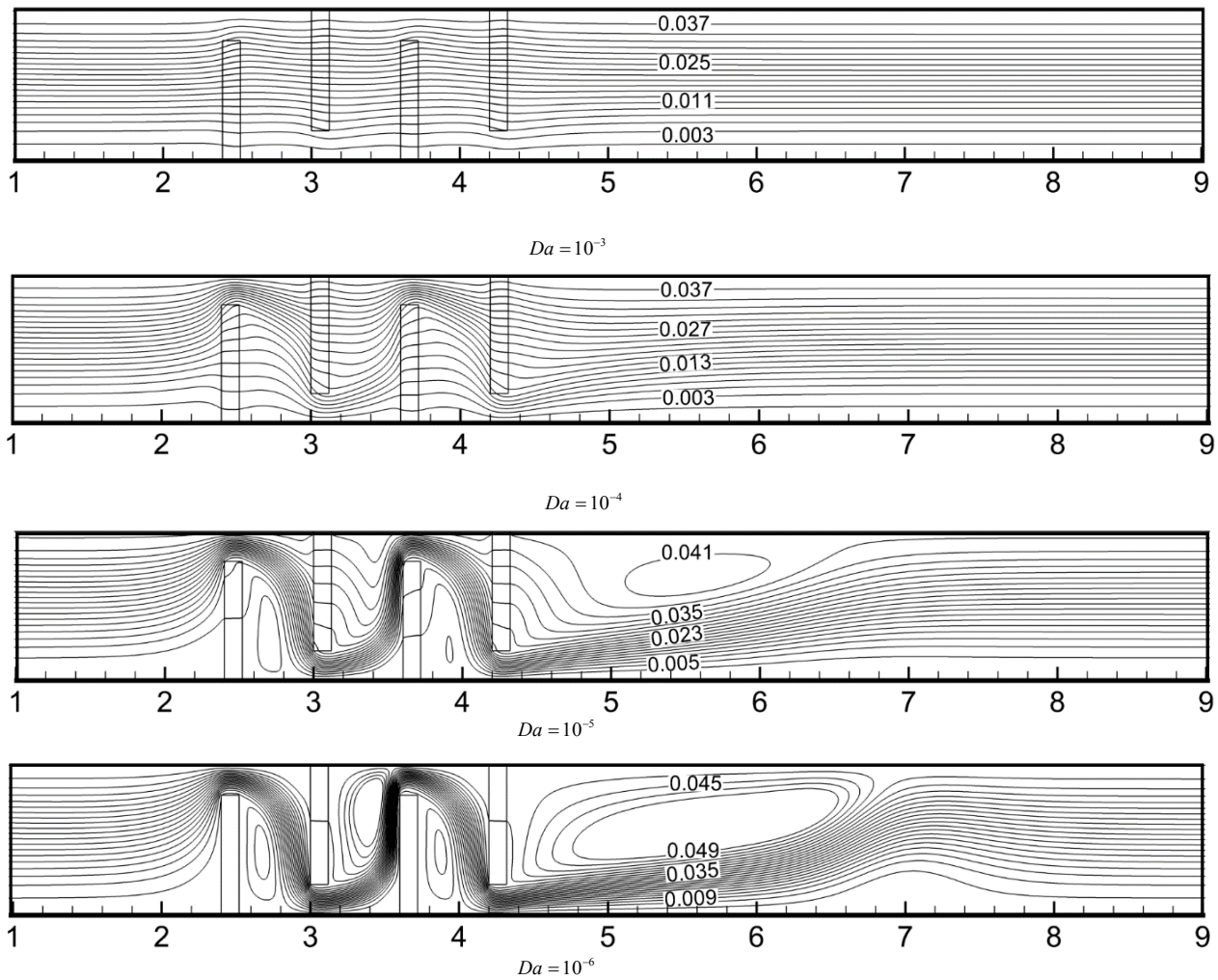
با مقایسه نتایج حل عددی در این مسأله با مطالعه عددی لی و همکاران [۱۹] می‌توان به صحت این شبیه‌سازی پی برد. طبق نمودار شکل ۲ با مقایسه مقادیر عدد ناسلت محلی بر روی دیواره در رینولدز ۱۰۰ می‌توان تایید کرد که نتایج همخوانی قابل‌قبولی دارند.

7- نتایج شبیه‌سازی

این بخش به ارائه نتایج شبیه‌سازی می‌پردازد. هدف، بررسی اثر عدد دارسی، ارتفاع مانع متخلخل، نسبت هدایت حرارتی ناحیه متخلخل به سیال، کسرحجمی نانوذرات و نوع نانوذرات بر انتقال حرارت در کانال حلقوی متخلخل نشان‌داده‌شده در شکل ۱ می‌باشد.

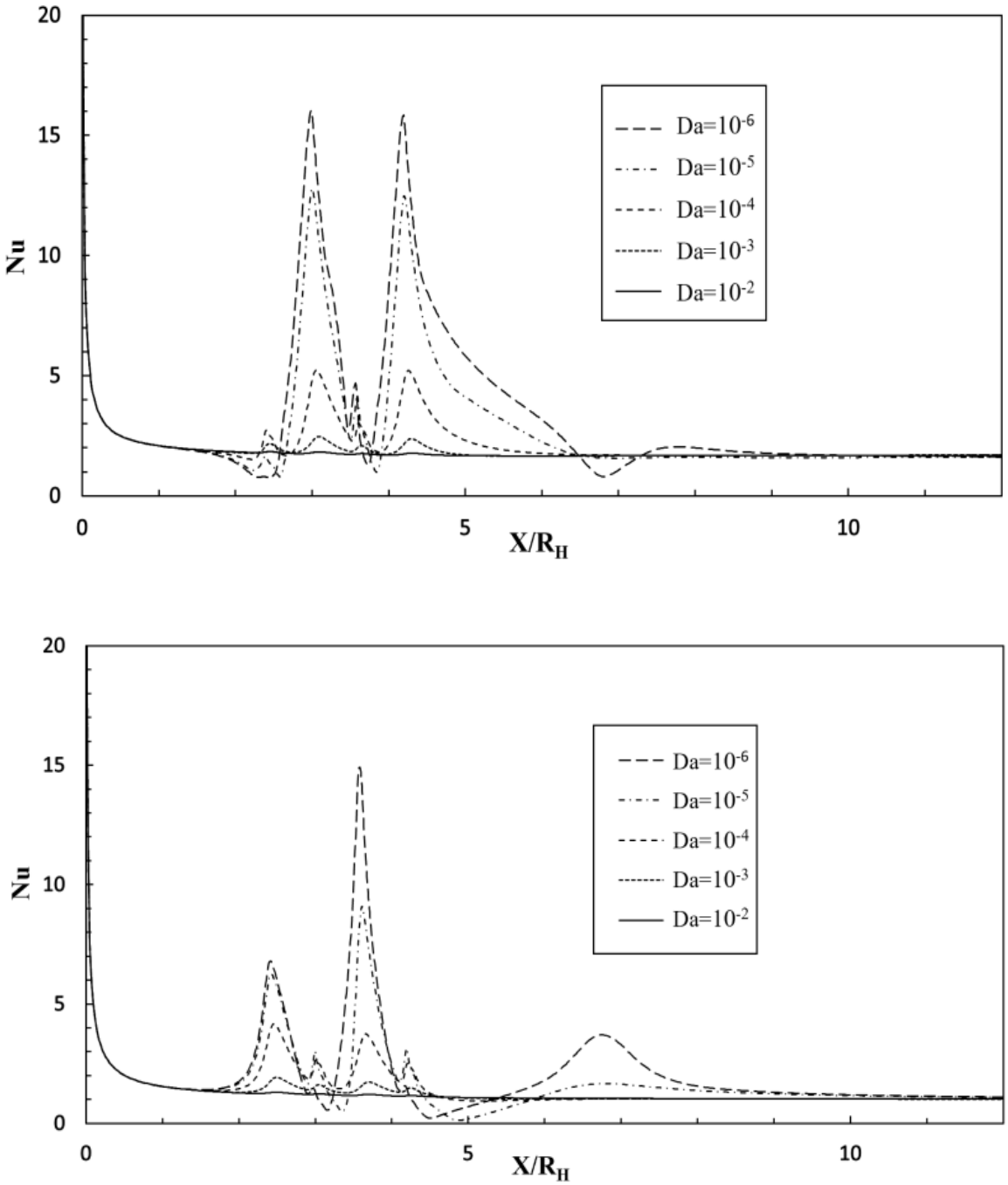
۱-۷- تأثیر عدد دارسی

در این بخش، تأثیر عدد دارسی بر روی میدان جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. خطوط جریان در شکل ۳ در اعداد دارسی مختلف نشان داده شده است. در دارسی‌های پایین، میزان نفوذپذیری ناحیه متخلخل کاهش پیدا می‌کند و مانع متخلخل مقاومت بیشتری در مقابل جریان سیال از خود نشان می‌دهد. در نتیجه، ناحیه گردابی قوی‌تر و با ارتفاع بیشتری ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه در دارسی‌های پایین، نفوذپذیری موانع کاهش می‌یابد، خطوط جریان در نزدیکی موانع



شکل ۳: توزیع خطوط جریان در اعداد دارسی متفاوت

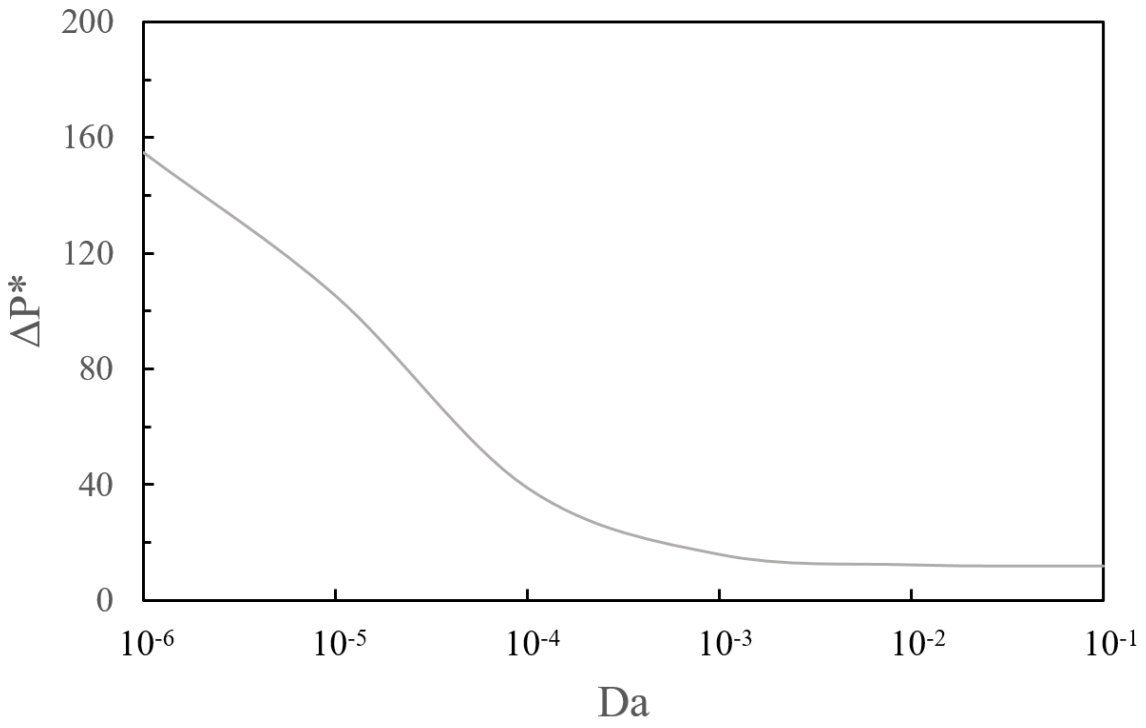
Fig. 3. Distribution of streamlines for different Darcy numbers



شکل ۴: عدد ناسلت محلی در (الف) دیواره داخلی و (ب) دیواره خارجی به ازای اعداد دارسی متفاوت

Fig. 4. The local Nusselt number at (a) the inner wall and (b) the outer wall for different Darcy numbers

فشرده‌تر می‌باشند. همچنین، نفوذپذیری کم موانع متخلخل مانع کشیده‌شدن ناحیه گردابی به سمت پایین‌دست جریان می‌شوند. در عدد دارسی $۱۰^{-۴}$، ناحیه گردابی تقریبا محو می‌شود. در دارسی‌های بالا، به دلیل نفوذپذیری بالای محیط متخلخل، جریان همانند جریان در کانال بدون مانع خواهد بود و موانع متخلخل تأثیر چندانی بر روی جریان نخواهند داشت. عکس این مطلب نیز در دارسی‌های پایین رخ



شکل ۵: افت فشار بی بعد در اعداد دارسی مختلف

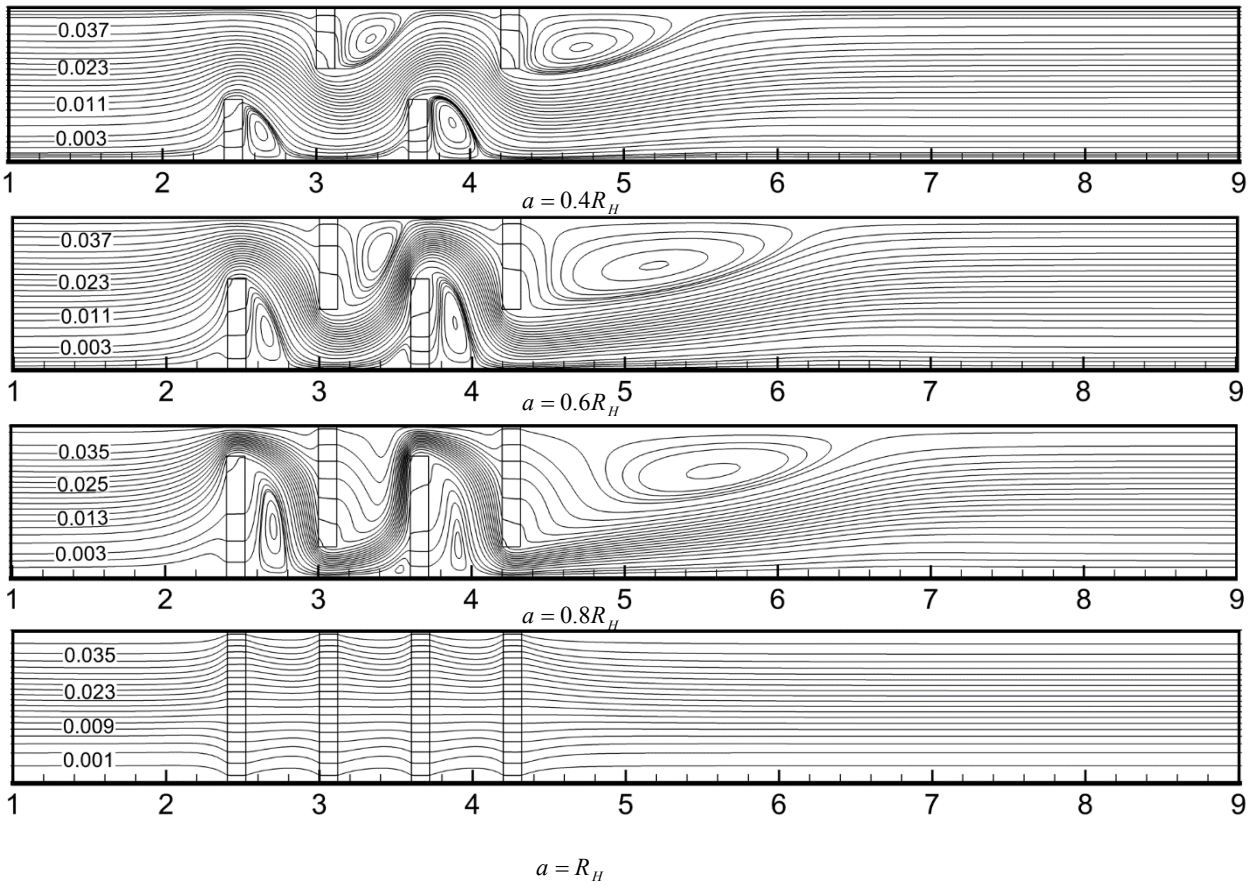
Fig. 5. The dimensionless pressure drop for different Darcy numbers

می‌دهد. در این حالت، به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین، محیط موانع متخلخل همانند موانع جامد نفوذناپذیر عمل می‌کنند.

در شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت محلی بر روی دیواره‌های داخلی و خارجی در اعداد دارسی مختلف نشان داده شده است. مشخص است که با تغییر عدد دارسی، عدد ناسلت دیواره به طور قابل‌ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. این تغییر ناشی از تأثیر موانع متخلخل بر روی میدان جریان می‌باشد که باعث دگرگونی در مشخصه‌های انتقال حرارت می‌شود. با مقایسه میدان جریان و نمودار عدد ناسلت محلی می‌توان دریافت که هرچه جریان به‌هم‌ریخته‌تر شود، تغییرات عدد ناسلت محلی نیز بیشتر می‌شود. در اعداد دارسی بالا، نمودار عدد ناسلت مشابه کانال بدون محیط متخلخل می‌باشد. کاهش عدد دارسی منجر به افزایش قابل‌ملاحظه انتقال حرارت می‌شود. در عدد دارسی $۱۰^{-۶}$ کمترین انتقال حرارت را در پشت موانع به دلیل تشکیل جریان برگشتی خواهیم داشت. بیشترین انتقال حرارت بر روی نواحی از دیواره که در بالای نوک موانع قرار گرفته‌اند، رخ می‌دهد. قرار گرفتن موانع متخلخل در مسیر جریان باعث می‌شود که جریان به سمت شکاف بین دیواره و مانع هدایت شود و در نتیجه، اختلاط جریان در این ناحیه افزایش یابد. افزایش سرعت و شدت جریان در این ناحیه، انتقال حرارت جابه‌جایی را به میزان قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد.

تغییرات افت فشار بی‌بعد شده در اعداد دارسی متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است. با کاهش عدد دارسی، افت فشار به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. هرچه عدد دارسی کمتر باشد، میزان نفوذپذیری محیط متخلخل کاهش یافته و در نتیجه، مقاومت جریان افزایش می‌یابد. بنابراین، افت فشار بیشتری ایجاد می‌شود.

۲-۷- تأثیر ارتفاع مانع متخلخل

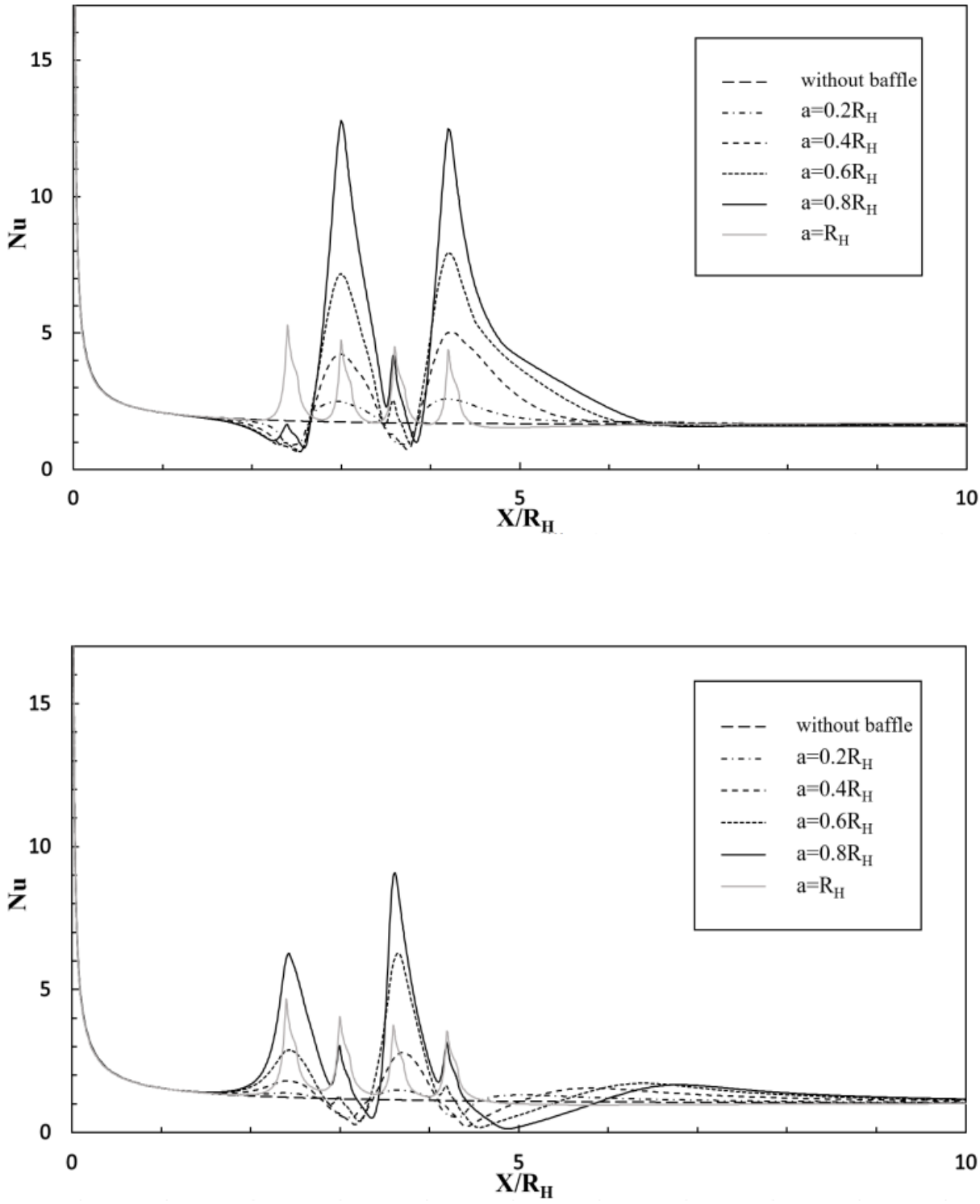


شکل ۶: توزیع خطوط جریان در ارتفاع‌های متفاوت برای موانع متخلخل

Fig. 6. Distribution of streamlines for different heights of the porous baffles

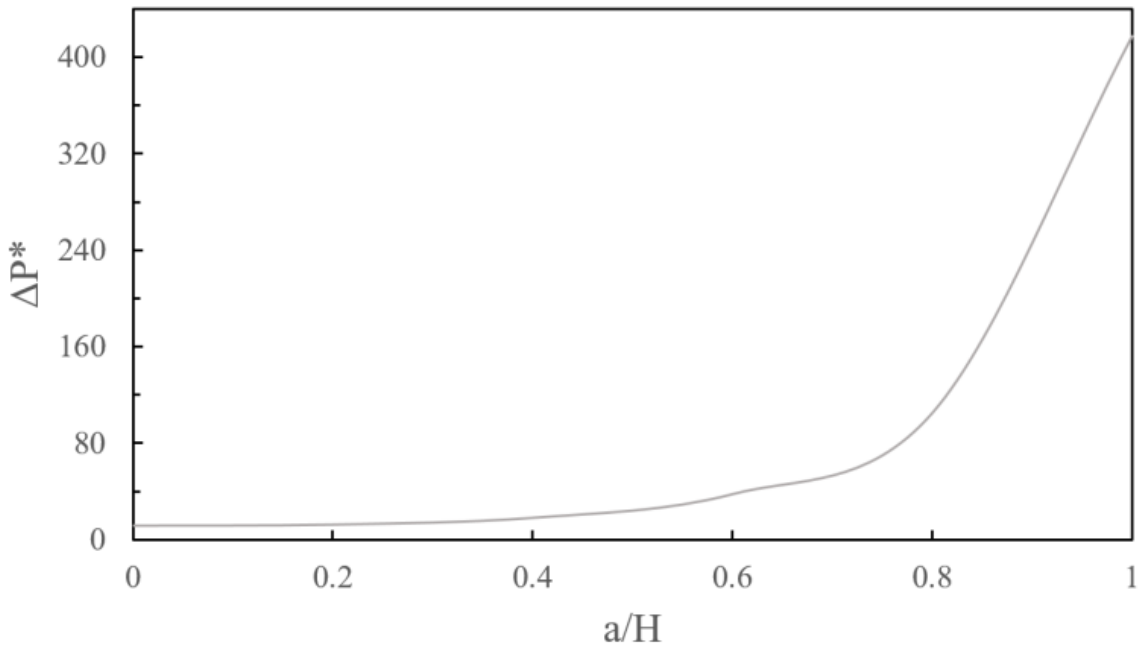
تأثیر ارتفاع موانع متخلخل بر روی میدان جریان در عدد دارسی 10^{-5} در شکل ۶ نشان داده شده است. در موانع متخلخل با ارتفاع کم، جریان برگشتی در پشت موانع ایجاد می‌شود. در این حالت، سرعت جریان عبوری از بالای موانع متخلخل افزایش می‌یابد و فشار افت پیدا می‌کند. پس از عبور جریان از مانع، انبساط ناگهانی جریان و گرادیان فشار منفی جریان منجر به تولید گردابه می‌شود. با افزایش ارتفاع موانع متخلخل تا $a = 0/8R_H$، به تدریج فاصله میان دیواره و مانع کاهش می‌یابد و در نتیجه، اینرسی جریان عبوری از این مقطع افزایش می‌یابد. مانع بعدی فضای کافی برای انبساط جریان و تعدیل فشار فراهم نمی‌کند. جریانی که از بالای مانع اول عبور می‌کند، به دلیل مقاومت ایجادشده ناشی از مانع دوم، به سمت پایین هدایت می‌شود. این جریان بر روی سیال گیرافتاده بین مانع و دیوار نیرو وارد کرده و آن را فشرده می‌کند. به همین دلیل، با افزایش ارتفاع موانع، جریان برگشتی ضعیف‌تر و محدودتر می‌شود. همچنین، افزایش ارتفاع مانع متخلخل در نفوذپذیری‌های بالا، باعث تقویت مومنتوم جریان عبوری از موانع متخلخل شده و انرژی جنبشی لایه مرزی پشت مانع متخلخل را افزایش می‌دهد که این امر، ایجاد جدایش در جریان را به تأخیر می‌اندازد. در واقع، این شرایط سبب تضعیف و یا ناپدیدشدن گردابه‌ها در موانع مرتفع‌تر می‌شود.

در شکل ۷ تأثیر ارتفاع موانع متخلخل بر روی عدد ناسلت محلی دیواره‌های داخلی و خارجی در عدد دارسی 10^{-5} نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع موانع متخلخل، به دلیل کاهش فاصله میان موانع و دیواره، جریان در تماس با دیواره سرعت بالاتری پیدا می‌کند. در نتیجه، ضخامت لایه مرزی بر روی دیواره کاهش یافته و انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش انتقال حرارت کلی می‌شود. این مسأله در حالت $a = R_H$ که در آن، ارتفاع



شکل ۷: عدد ناسلت محلی در (الف) دیواره داخلی و (ب) دیواره خارجی به ازای ارتفاع‌های متخلف موانع متخلخل

Fig. 7. The local Nusselt number at (a) the inner wall and (b) the outer wall for different heights of the porous baffles



شکل ۸: افت فشار بی‌بعد در ارتفاع‌های مختلف موانع متخلخل

Fig. 8. The dimensionless pressure drop for different heights of the porous baffles

موانع متخلخل برابر با ارتفاع کانال می‌باشد، متفاوت است؛ زیرا ناحیه باریک میان مانع متخلخل و دیواره که باعث شتاب‌گرفتن جریان و افزایش جریان جابه‌جایی می‌شد، از بین رفته و اختلاط جریان نیز کاهش یافته است. بیشترین انتقال حرارت در حالتی رخ می‌دهد که ارتفاع بی‌بعد مانع متخلخل $a = ۰/۸R_H$ است.

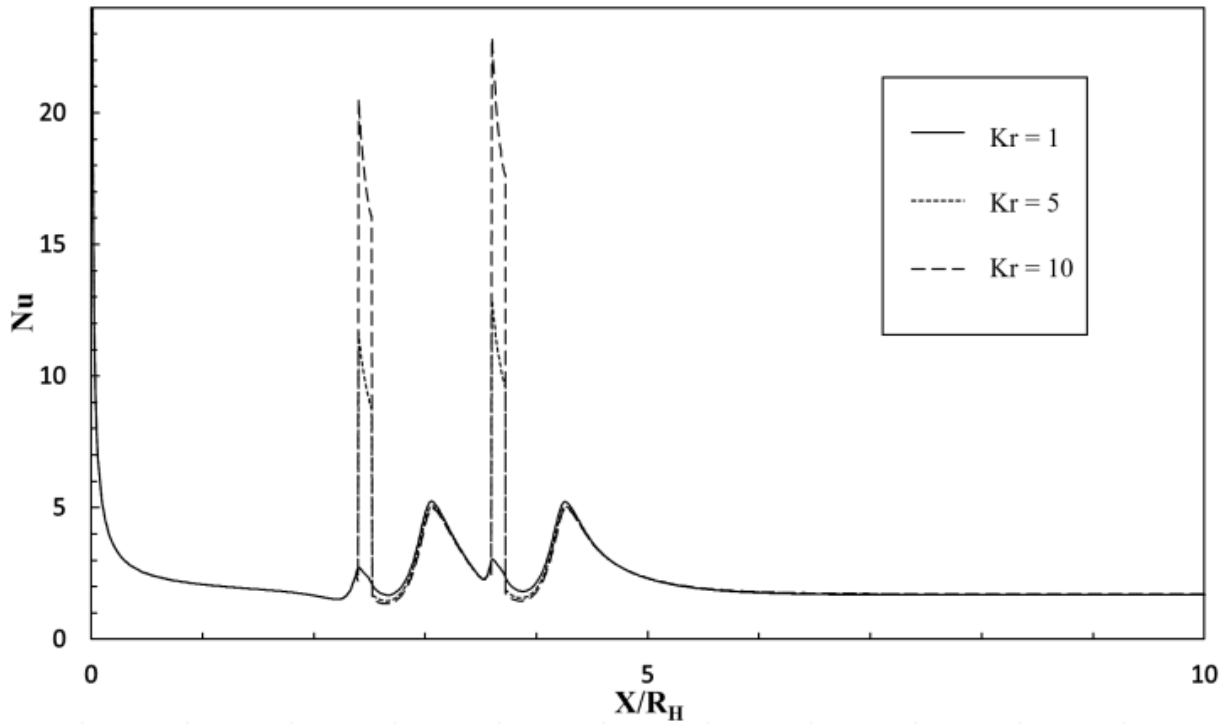
در شکل ۸ تأثیر ارتفاع موانع متخلخل بر روی افت فشار بی‌بعد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع موانع متخلخل، مقاومت جریان بیشتر شده و درنتیجه آن، افت فشار افزایش می‌یابد. افت فشار در ارتفاع‌های کم به‌تدریج افزایش می‌یابد. از ارتفاع $a = ۰/۶R_H$ افزایش افت فشار قابل‌ملاحظه است.

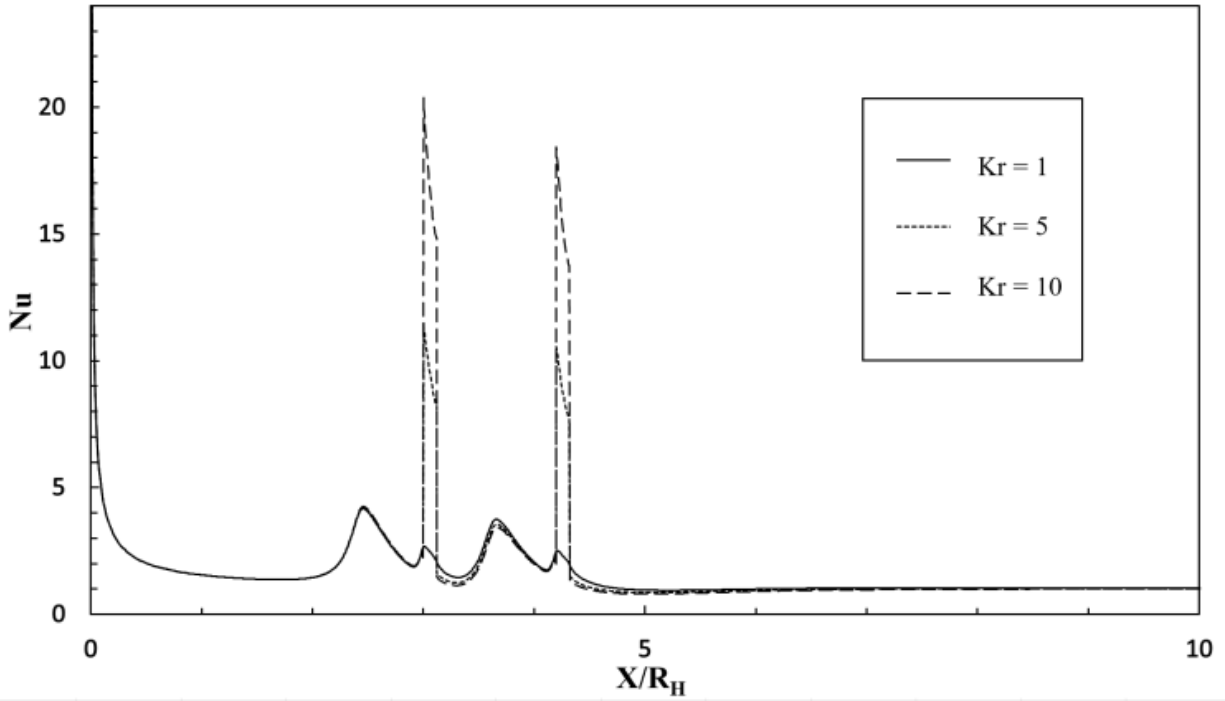
۳-۷- تأثیر نسبت هدایت حرارتی ناحیه متخلخل به سیال

نسبت هدایت حرارتی ناحیه متخلخل به سیال، در بخش‌های قبل برابر با واحد در نظر گرفته شده بود. در این بخش، تأثیر نسبت هدایت حرارتی را بر روی انتقال حرارت مورد مطالعه قرار می‌دهیم. نتایج این تحقیق برای عدد دارسی $۱۰^{-۴}$ در شکل ۹ آمده است. با افزایش هدایت حرارتی مانع متخلخل، قابلیت آن برای جذب حرارت از دیواره و انتقال آن به سیال افزایش می‌یابد. بنابراین، نقاط ماکزیمم انتقال حرارت بر روی نواحی که مانع متخلخل قرار دارد، منتقل می‌شود. در محیط‌های متخلخل با نفوذپذیری بالا، سیال، سرعت و مومنتوم بالاتری خواهد داشت که این افزایش سرعت منجر به افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی در نفوذپذیری‌های بالا خواهد شد. با کاهش نفوذپذیری موانع متخلخل، انتقال حرارت غالب از طریق هدایت حرارتی خواهد بود. این مسأله به خوبی در نمودار عدد ناسلت محلی بر روی دیواره مشخص است. در عدد دارسی $۱۰^{-۵}$، عدد ناسلت محلی در محل موانع متخلخل پایین‌تر از مقدار آن در عدد دارسی $۱۰^{-۴}$ می‌باشد.

۴-۷- تأثیر کسرحجمی نانوذرات

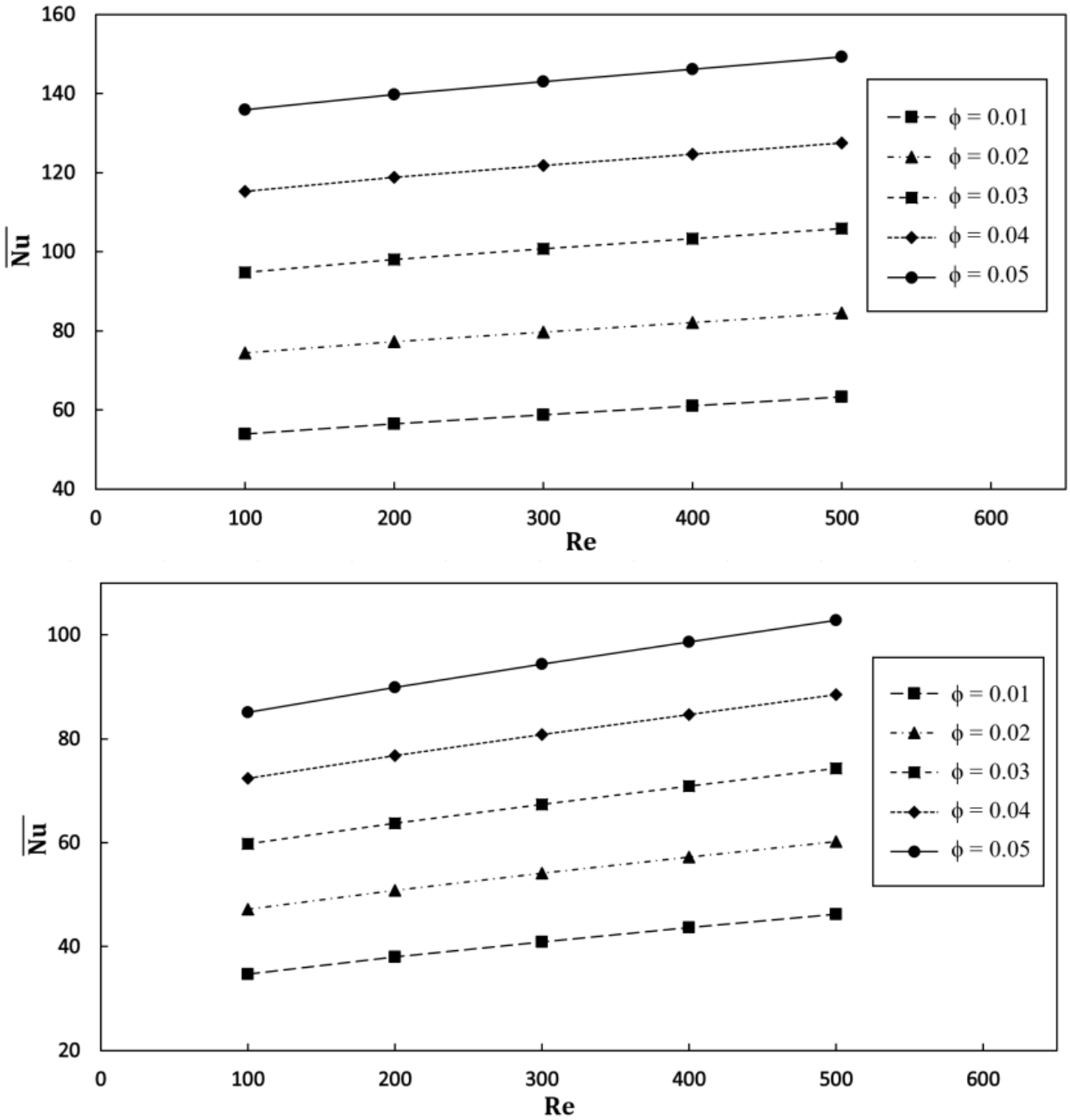
اثر کسرحجمی نانوذرات بر روی عدد ناسلت میانگین در بازه عدد رینولدز ۱۰۰ تا ۵۰۰ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نانوسیال آب/Al_2O_3 در کسرحجمی‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق انتظار، با افزایش عدد رینولدز و کسرحجمی نانوذرات، عدد ناسلت میانگین افزایش می‌یابد. همچنین، تمامی





شکل ۹: عدد ناسلت محلی در (الف) دیواره داخلی و (ب) دیواره خارجی به ازای نسبت‌های هدایت حرارتی مختلف

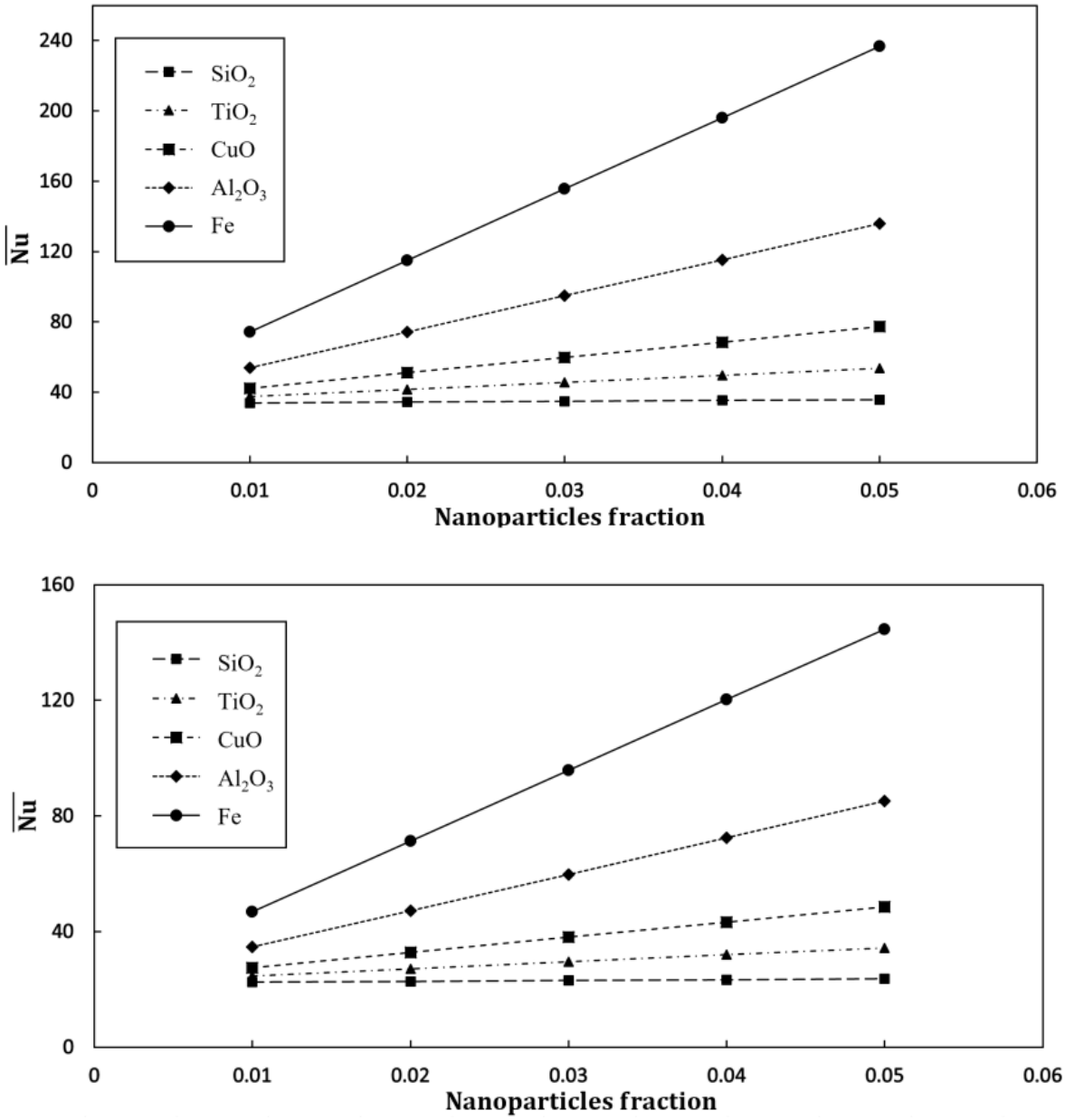
Fig. 9. The local Nusselt number at (a) the inner wall and (b) the outer wall for different thermal conductivity ratios



شکل ۱۰: عدد ناسلت میانگین در (الف) دیواره داخلی و (ب) دیواره خارجی

Fig. 10. The average Nusselt number at (a) the inner wall and (b) the outer wall

نانوسیالات، عدد ناسلت بیشتری نسبت به آب خالص دارند. افزایش انتقال حرارت به دو دلیل رخ می‌دهد. افزودن نانوذرات با هدایت حرارتی بالا باعث افزایش هدایت حرارتی سیال شده و همچنین، حرکات نامنظم نانوذرات در سیال، انتقال انرژی را افزایش می‌دهد. با مقایسه اعداد ناسلت میانگین بر روی دیواره خارجی و داخلی مشاهده می‌شود که اعداد ناسلت دیواره خارجی مقادیر کمتری دارند. این



شکل ۱۱: عدد ناسلت میانگین در (الف) دیواره داخلی و (ب) دیواره خارجی

Fig. 11. The average Nusselt number at (a) the inner wall and (b) the outer wall

مسأله ناشی از وسیع‌تربودن ناحیه عبوری سیال در نزدیکی دیواره خارجی می‌باشد که باعث کاهش سرعت و در نتیجه، کاهش انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود.

۵-۷- تأثیر نوع نانوذرات

اثر جنس نانوذرات بر روی عدد ناسلت میانگین دیواره برای کسرحجمی‌های مختلف در شکل ۱۱ آمده است که در آن، از سیالات حاوی نانوذرات SiO_2، TiO_2، CuO ، Al_2O_3 و Feاستفاده شده است. مشخص است که عملکرد حرارتی نانوسیالات وابسته به نوع نانوسیال مورد استفاده می‌باشد. بیشترین عدد ناسلت مربوط به

نانوسیال آب/Fe است که ناشی از هدایت حرارتی بالای این نانوذرات می‌باشد. همچنین، کمترین عدد ناسلت در نانوسیال آب/SiO_2 مشاهده می‌شود. هرچه هدایت حرارتی نانوذرات افزایش می‌یابد، تأثیر افزایش کسرحجمی بر روی افزایش عدد ناسلت بیشتر می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری آرام نانوسیال در داخل یک کانال حلقوی با شعاع‌های داخلی و خارجی مشخص همراه با موانع متخلخل نصب‌شده بر روی دیواره‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، نانوسیال با استفاده از مدل مخلوط دوفازی شبیه‌سازی شد و از فوم آلومینیومی با تخلخل ۰/۹ به عنوان موانع متخلخل استفاده شد. اثر پارامترهای موانع متخلخل مانند ارتفاع موانع، عدد دارسی و نسبت هدایت حرارتی ماتریس متخلخل به نانوسیال مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، اثر کسرحجمی نانوذرات و جنس آنها در اعداد رینولدز متفاوت مطالعه شد. بر این اساس، نتایج زیر به‌دست آمد:

۱- در تمامی موارد، استفاده از موانع متخلخل باعث افزایش انتقال حرارت و زیادشدن افت فشار جریان می‌شود.

۲- موانع متخلخل باعث ایجاد گردابه در ناحیه موانع متخلخل می‌شود. این گردابه‌ها باعث تغییر شدید در مشخصه‌های میدان جریان و انتقال حرارت می‌شوند.

۳- با کاهش عدد دارسی، نواحی گردابه‌ای قوی‌تر و با ارتفاع بیشتری ایجاد شده و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

۴- ماکزیمم انتقال حرارت در نزدیکی موانع و گردابه‌های ایجادشده اتفاق می‌افتد.

۵- افزایش ارتفاع موانع متخلخل باعث تضعیف و از بین‌رفتن گردابه‌ها می‌شود. افزایش ارتفاع تا میزان $a = ۰/۸R_H$ منجر به افزایش انتقال حرارت جریان می‌شود.

۶- با افزایش نسبت هدایت حرارتی ماتریس متخلخل به سیال، انتقال حرارت در اطراف موانع به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

۷- با افزایش کسرحجمی نانوذرات، انتقال حرارت افزایش می‌یابد؛ البته افزودن نانوذرات تأثیر چندانی بر افت فشار ندارد. از میان نانوسیالات آب/Fe، آب/Al_2O_3، آب/CuO، آب/TiO_2، آب/SiO_2 ، نانوسیال آب/Fe بیشترین انتقال حرارت را ایجاد می‌کند.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

a	ارتفاع مانع متخلخل، m
$\vec{a}$	شتاب فاز ثانویه، m/s^2
b	فاصله بین موانع متخلخل، m
C_d	ضریب اینرسی محیط متخلخل
d_p	قطر نانوذرات، m
Da	عدد دارسی
D_H	قطر هیدرولیکی کانال حلقوی، m
f_{drag}	ضریب پسا
$\vec{g}$	بردار شتاب گرانش، m/s^2
k	ضریب هدایت حرارتی، W/m.K
K	نفوذپذیری محیط متخلخل، m^2
Kr	نسبت هدایت حرارتی مؤثر به هدایت حرارتی نانوسیال
L	طول کانال، m
p	فشار، Pa
R_H	شعاع هیدرولیکی کانال حلقوی، m
T	دما، K
$\vec{v}_{bf}$	سرعت فاز اولیه، m/s
$\vec{v}_m$	سرعت میانگین جرمی، m/s
$\vec{v}_{dr,k}$	سرعت رانشی فاز k، m/s
$\vec{v}_{np,bf}$	سرعت نسبی، m/s
$\vec{v}_{np}$	سرعت فاز ثانویه،m/s
W	ضخامت موانع متخاخل، m

علائم یونانی

ε	نسبت تخلخل
ρ_m	چگالی مخلوط، kg/m^3
φ_k	کسرحجمی فاز k
μ_m	لزجت مؤثر مخلوط، Pa.s
λ_m	هدایت حرارتی مؤثر مخلوط، kW/m.K

زیرنویس

c	محیط غیرمتخلخل
eff	خواص مؤثر نانوسیال در محیط متخلخل

f	سیال پایه
m	مخلوط
nf	نانوسیال
p	محیط متخلخل
w	دیواره

مراجع

[1]M.J. Maghrebi, M. Nazari, T. Armaghani, Forced convection heat transfer of nanofluids in a porous channel, Transport in Porous Media, 93(3) (2012) 401-413.

[2]M. Hajipour, A.M. Dehkordi, Analysis of nanofluid heat transfer in parallel-plate vertical channels partially filled with porous medium, International Journal of Thermal Sciences, 55 (2012) 103-113.

[3]M. Hajipour, A.M. Dehkordi, Mixed-convection flow of Al_2O_3–H_2O nanofluid in a channel partially filled with porous metal foam: Experimental and numerical study, Experimental Thermal and Fluid Science, 53 (2014) 49-56.

[4]Y.T. Yang, C.Z. Hwang, Calculation of turbulent flow and heat transfer in a porous-baffled channel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46(5) (2003) 771-780.

[5] K.H. Ko, N.K. Anand, Use of porous baffles to enhance heat transfer in a rectangular channel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46(22) (2003) 4191-4199.

[6]N. Targui, H. Kahalerras, Analysis of fluid flow and heat transfer in a double pipe heat exchanger with porous structures, Energy Conversion and Management, 49 (11) (2008) 3217-3229.

[7]H. Li, K. Leong, L. Jin, J. Chai, Analysis of fluid flow and heat transfer in a channel with staggered porous blocks, International Journal of Thermal Sciences, 49(6) (2010) 950-962.

[8]A. Davari, M. Maerefat, Numerical analysis of fluid flow and heat transfer in entrance and fully developed regions of a channel with porous baffles, Journal of Heat Transfer, 138(6) (2016) 062601.

[9]M. Siavashi, H.R.T. Bahrami, H. Saffari, Numerical investigation of porous rib arrangement on heat transfer and entropy generation of nanofluid flow in an annulus using a two-phase mixture model, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 71(12) (2017) 1251-1273.

[10]I. Zahmatkesh, S.A. Naghedifar, Oscillatory mixed convection in the jet impingement cooling of a horizontal surface immersed in a nanofluid-saturated porous medium, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 72 (5) (2017) 401-416.

[11] I. Zahmatkesh, S.A. Naghedifar, Pulsating nanofluid jet impingement onto a partially heated surface immersed in a porous layer, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 12(2) (2018) 99-107.

[12]D.G.P. Guthrie, M. Torabi, N. Karimi, Combined heat and mass transfer analyses in catalytic microreactors partially filled with porous material - The influences of nanofluid and different porous-fluid interface models, International Journal of Thermal Sciences, 140 (2019) 96-113.

[13]J. Alsarraf, A. Moradikazerouni, A. Shahsavar, M. Afrand, H. Salehipour, M.D. Tran, Hydrothermal analysis of turbulent boehmite alumina nanofluid flow with different nanoparticle shapes in a minichannel heat exchanger using two-phase mixture model, Physica A, 520 (2019) 275–288.

[14]E. Torshizi, I. Zahmatkesh, Comparison between single-phase, two-phase mixture and Eulerian-Eulerian models for the description of jet impingement of nanofluids, Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 27(2) (2016) 55-70. (in Persian)

[15]S.E. Maiga, C.T. Nguyen, N. Galanis, G. Roy, Heat transfer behaviors of nanofluids in a uniformly heated tube, Superlattices and Microstructures, 35(3-6) (2004) 543-557.

[16]M. Manninen, V. Taivassalo, S. Kallio, On the mixture model for multiphase flow, Technical Research Centre of Finland, Finland, 1996.

[17]L. Schiller, A. Naumann, A drag coefficient correlation, Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 38 (1935) 318–320.

[18]K. Vafai, Convective flow and heat transfer in variable-porosity media, Journal of Fluid Mechanics, 147 (1984) 233-259.

[19]H. Li, K. Leong, L. Jin, J. Chai, Analysis of fluid flow and heat transfer in a channel with staggered porous blocks, International Journal of Thermal Sciences, 49(6) (2010) 950-962.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Namadchain, I. Zahmatkesh, S. M. Abolhasan Alavi. Numerical simulation of nanofluid flow in an annulus with porous baffles based on combination of Darcy-Brinkman-Forchheimer model and two-phase mixture model. Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 3) (2021). 1897-1914.

DOI: 10.22060/mej.2020.16065.6276