

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

حسین نم‌دچیان، ایمان زحمتکش، سیدمحمودابوالحسن علوی*

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

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

موانع متخلخل

مدل داریسی - برینکمن - فرچهیمر

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 داریسی - 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 داریسی، ارتفاع مانع متخلخل، نسبت هدایت حرارتی ناحیه متخلخل به سیال و کسر حجمی 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 داریسی و رینولدز منجر به ایجاد گردابه در پشت موانع می‌شود که این گردابه‌ها تأثیر بسزایی بر روی انتقال حرارت دارند. با کاهش عدد داریسی، انتقال حرارت به میزان قابل توجهی 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.

۱- مقدمه

هستند. هدایت حرارتی سیالات معمولی با اضافه کردن 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.

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

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



مغربی و همکاران [۱] به بررسی اثرات جریان نانوذرات بر روی انتقال حرارت در داخل یک کانال مستقیم پر شده از مواد متخلخل پرداختند. در این تحقیق انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، جریان کاملاً توسعه‌یافته فرض شده و معادله داریسی- برینکمن- فرچهیمر به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش عدد لوئیس، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش عدد اشمیت، گرادیان دمایی 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 داریسی- برینکمن- فرچهیمر به کار رفت و مدل‌های مختلف اتلاف لزج استفاده شد. شرایط مرزی برای ناحیه تماس سیال و ناحیه متخلخل، برای سرعت و دمایی سیال در نظر گرفته شد. آنها در مطالعه‌ای دیگر [۳]، جابه‌جایی ترکیبی جریان نانوسیال آب/ Al_2O_3 را در یک کانال عمودی مستطیلی پر شده 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 ترموفورسیس در معادلات حاکم در نظر گرفته شد و فرض تعادل دمایی موضعی به کار رفت.

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 داریسی، 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 داریسی 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 داریسی مختلف بررسی شد. آنها به این نتیجه رسیدند که ضریب انتقال حرارت محلی به گردابه‌های ایجاد شده 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 ایجاد شده، 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 داریسی- برینکمن توسط زحمتکش و ناقدی‌فر [۱۰] جهت مطالعه ظهور ناپایداری در انتقال حرارت جابه‌جایی توأم در مسأله برخورد جت نانوسیالات درون محیط متخلخل به کار رفت. مشخص شد که پایدار یا ناپایدار بودن جریان به اعداد رینولدز، گراشف و داریسی وابسته است اما به تخلخل محیط و کسر حجمی نانوذرات بستگی ندارد. آنها در ادامه، تحلیل خود را به جابه‌جایی اجباری ضربانی در آن مسأله توسعه دادند [۱۱].

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

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (123\phi_p^2 + 7.36\phi_p + 1) \quad (5)$$

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

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (6)$$

سرعت رانشی نانوذرات از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\vec{v}_{dr,np} = \vec{v}_{np,bf} - \sum_{k=1}^2 \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} \vec{v}_k \quad (7)$$

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:

$$\vec{v}_{np,bf} = \vec{v}_{np} - \vec{v}_{bf} \quad (8)$$

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

$$\vec{v}_{np,bf} = \frac{\rho_{np} d_{np}^2}{18\mu_{bf} f_{drag}} \frac{\rho_{np} - \rho_{bf}}{\rho_{np}} \vec{a} \quad (9)$$

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

$$\vec{a} = \vec{g} - \vec{v}_m \cdot \vec{\nabla} \vec{v}_m \quad (10)$$

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

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

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}_{np}^{0.687}, & \text{Re}_{np} \leq 1000 \\ 0.0183 \text{Re}_{np}, & \text{Re}_{np} > 1000 \end{cases} \quad (11)$$

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

$$\vec{\nabla} \cdot \sum_{k=1}^2 (\phi_k \vec{v}_k \rho_k C_{pk} T) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_m \vec{\nabla} T) \quad (12)$$

از نانوسیالات، امکان کنترل، توزیع غلظت و دما در میکروآکتور 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-فرچهمیر 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:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

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

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^2 \phi_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^2 \phi_k \rho_k \quad (3)$$

در اینجا، ϕ_k کسر جرمی فاز k می‌باشد.

معادله مومنتوم مخلوط دوفازی را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \left[\mu_m \left(\begin{matrix} \vec{\nabla} \vec{v}_m \\ + \vec{\nabla} \vec{v}_m^T \end{matrix} \right) \right] + \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\sum_{k=1}^2 \phi_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right)$$

در اینجا، μ_m لزجت مؤثر مخلوط است که برای نانوسیال آب/

Al_2O_3 از رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۵]:

که در آن، λ_m هدایت حرارتی مؤثر مخلوط است:

$$Re = \frac{\rho_m U_{in} D_h}{\mu_m} \quad (20)$$

عدد دارسی:

$$Da = \frac{K}{D_h^2} \quad (21)$$

اعداد ناسلت محلی و میانگین:

$$Nu_x = \frac{k_{eff} (\partial T / \partial r)|_{r=r_o} D_h}{k_f (T_w - T_m)} \quad (22)$$

$$Nu_{ave} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (23)$$

که در آنها:

$$D_h = 2R_h = 2(r_o - r_i) \quad (24)$$

دمای میانگین:

$$T_m = \frac{\int_{r_i}^{r_o} T |\vec{v}_m| r dr}{\int_{r_i}^{r_o} |\vec{v}_m| r dr} \quad (25)$$

فشار بی‌بعد:

$$p^* = \frac{\Delta p}{\rho f u_{in}^2} \quad (26)$$

فشار میانگین:

$$p = \frac{1}{r} \int_{r_i}^{r_o} p r dr \quad (27)$$

$$\lambda_m = \sum_{k=1}^2 \phi_k \lambda_k \quad (13)$$

معادله کسر حجمی فاز ثانویه در حالت پایا رابطه زیر است:

$$\vec{\nabla} \cdot (\phi_{np} \rho_{np} \vec{v}_m) = -\vec{\nabla} \cdot (\phi_{np} \rho_{np} \vec{v}_{dr,np}) \quad (14)$$

برای جریان نانوسیال در محیط متخلخل، از ترکیب معادله

دارسی - برینکمن - فرچهیمر و مدل مخلوط دوفازی می‌توان نوشت:

$$\frac{\rho_m}{\varepsilon^2} [\vec{v}_m \cdot \vec{\nabla} \vec{v}_m] = -\vec{\nabla} p + \frac{\mu_m}{\varepsilon} \nabla^2 \vec{v}_m \quad (15)$$

$$- \frac{\mu_m \vec{v}_m}{K} - \frac{\rho_m \varepsilon C_d}{\sqrt{K}} \vec{v}_m |\vec{v}_m| +$$

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\sum_{k=1}^2 \phi_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right)$$

در اینجا، K و C_d به ترتیب، نفوذپذیری و ضریب اینرسی

محیط متخلخل می‌باشند که به شکل زیر به دست می‌آیند [۱۸]:

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (16)$$

$$C_d = \frac{1.75}{\sqrt{150} \varepsilon^{3/2}} \quad (17)$$

که در آن، d_p قطر نانوذرات است.

معادله انرژی نانوسیال در محیط متخلخل به صورت زیر نوشته

می‌شود:

$$\vec{\nabla} \cdot \sum_{k=1}^2 (\phi_k \vec{v}_k \rho_k C_{pk} T) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_{eff} \vec{\nabla} T) \quad (18)$$

که λ_{eff} ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال در محیط متخلخل

می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

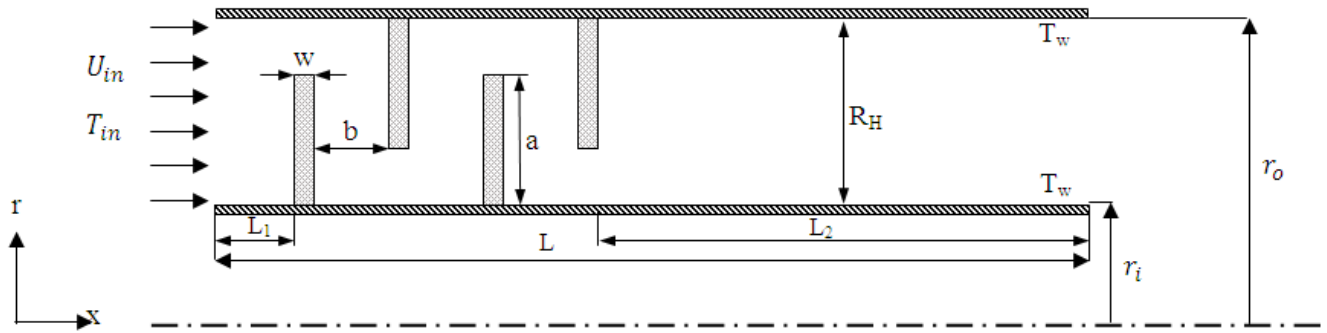
$$\lambda_{eff} = (1-\varepsilon)\lambda_p + \varepsilon\lambda_m \quad (19)$$

اعداد بی‌بعد مورد بررسی شامل موارد زیر می‌باشند:

عدد رینولدز:

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 قابل ملاحظه‌ای 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

تا اولین مانع $L_1 = 4R_H$ و فاصله آخرین مانع تا انتهای کانال $L_2 = 4R_H$ 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 $b = 0.18R_H$ ، $w = 0.2R_H$ ، $a = 0.18R_H$ ، $Re = 100$ و $Kr = 1$ 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 به دست می‌آید. در این پژوهش، گسسته‌سازی با استفاده از روش حجم محدود 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 به دست آوردن سرعت بر اساس میدان فشار حدس زده شده، حل می‌شود و سپس مقادیر سرعت به دست آمده، در معادله تصحیح فشار به کار می‌روند تا به کمک حل این معادله،

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، توسعه یافتگی 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:

$$\vec{v}|_c = \vec{v}|_p \quad (28)$$

$$T|_c = T|_p \quad (29)$$

$$\lambda_{nf} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_c = \lambda_{eff} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_p \quad (30)$$

$$\left[\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right]_c = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right]_p \quad (31)$$

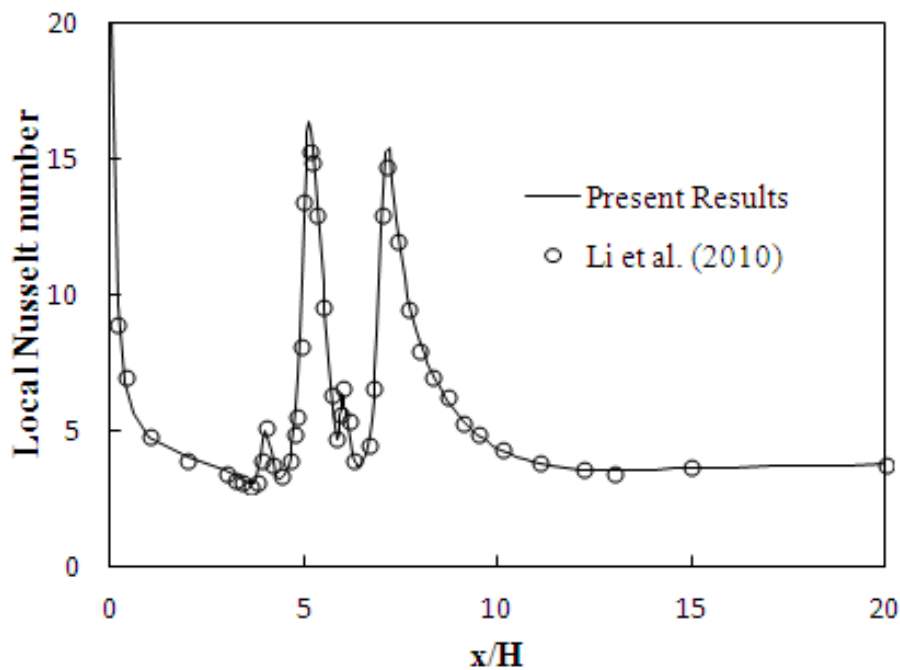
$$\frac{\partial v_r}{\partial r} \Big|_c = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial v_r}{\partial r} \Big|_p \quad (32)$$

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، $R_H = 0.6m$ ، پارامترهای هندسی مسأله بی‌بعد می‌شوند. فاصله ورودی کانال

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

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



شکل ۲: مقایسه عدد ناسلت محلی به دست آمده 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 Li et al. [19]

مشخص در راستاهای x و y استفاده می‌شود. در نزدیکی دیواره‌ها، شبکه‌ای ریزتر به خدمت 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

میدان‌های سرعت و فشار تصحیح شوند. با استفاده از مقادیر سرعت تصحیح‌شده، معادله انرژی و کسر حجمی (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

متخلخل به سیال، کسر حجمی نانوذرات و نوع نانوذرات بر انتقال حرارت در کانال حلقوی متخلخل نشان داده شده در شکل ۱ می باشد.

محاسباتی با ابعاد 700×40 مطلوب می باشد.

6- اعتبارسنجی شبیه سازی

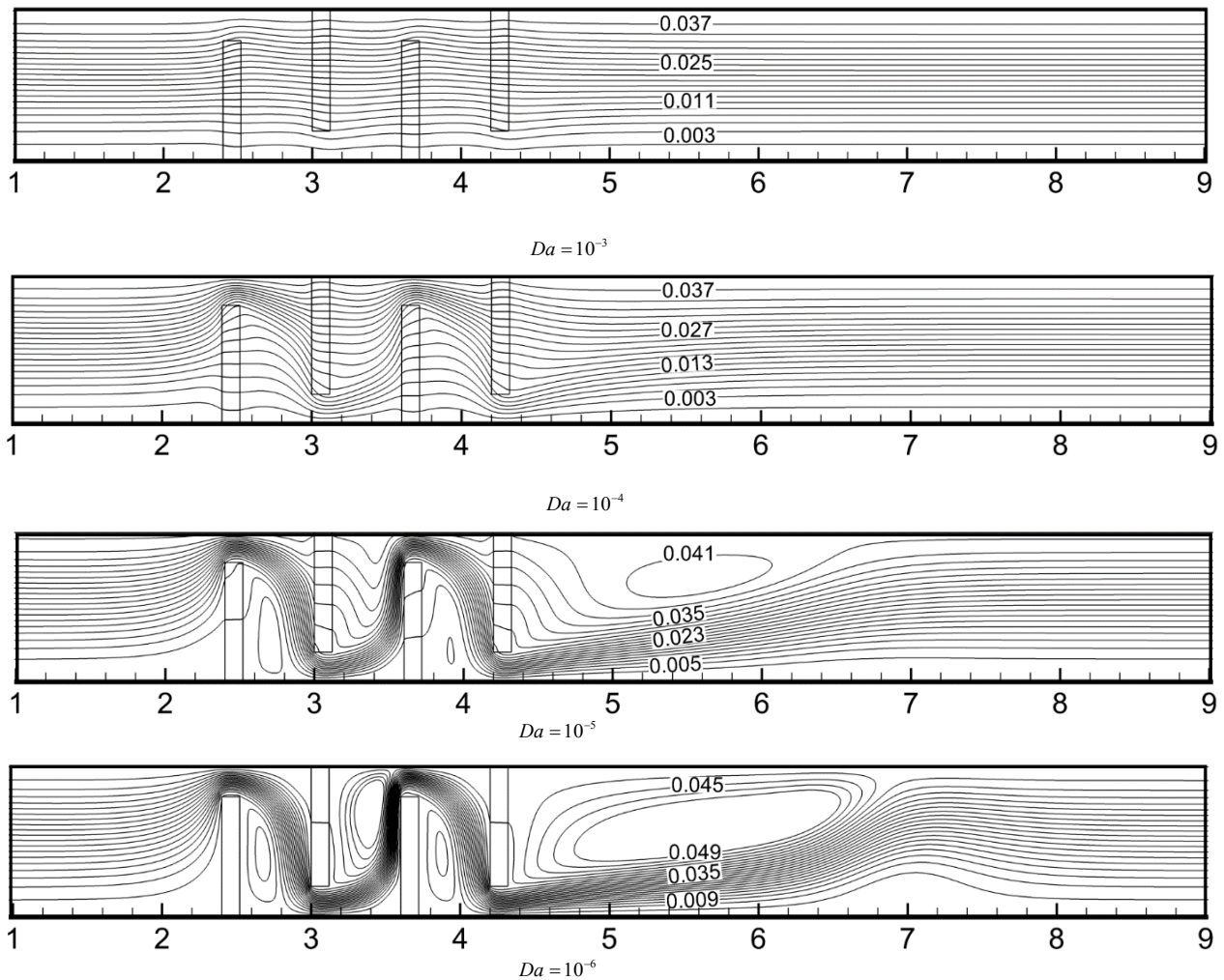
با مقایسه نتایج حل عددی در این مسأله با مطالعه عددی لی و همکاران [۱۹] می توان به صحت این شبیه سازی پی برد. طبق نمودار شکل ۲ با مقایسه مقادیر عدد ناسلت محلی بر روی دیواره در رینولدز ۱۰۰ می توان تایید کرد که نتایج همخوانی قابل قبولی دارند.

7- نتایج شبیه سازی

این بخش به ارائه نتایج شبیه سازی می پردازد. هدف، بررسی اثر عدد دارسی، ارتفاع مانع متخلخل، نسبت هدایت حرارتی ناحیه

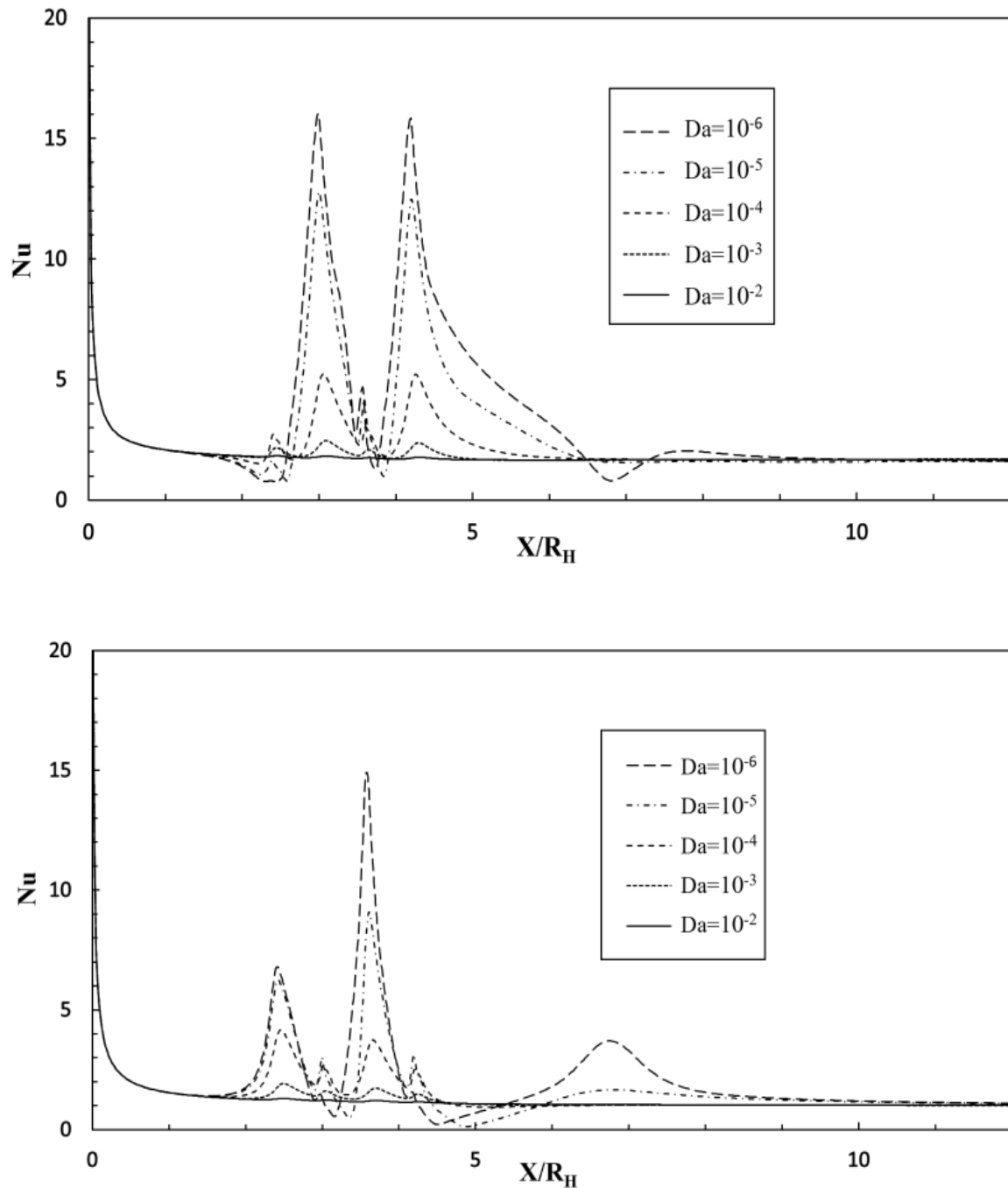
۱-7- تأثیر عدد دارسی

در این بخش، تأثیر عدد دارسی بر روی میدان جریان مورد بررسی قرار می گیرد. خطوط جریان در شکل ۳ در اعداد دارسی مختلف نشان داده شده است. در دارسی های پایین، میزان نفوذپذیری ناحیه متخلخل کاهش پیدا می کند و مانع متخلخل مقاومت بیشتری در مقابل جریان سیال از خود نشان می دهد. در نتیجه، ناحیه گردابی قوی تر و با ارتفاع بیشتری ایجاد می شود. با توجه به اینکه در دارسی های پایین، نفوذپذیری موانع کاهش می یابد، خطوط جریان در نزدیکی موانع



شکل ۳: توزیع خطوط جریان در اعداد دارسی متفاوت

Fig. 3. Distribution of streamlines for different Darcy numbers

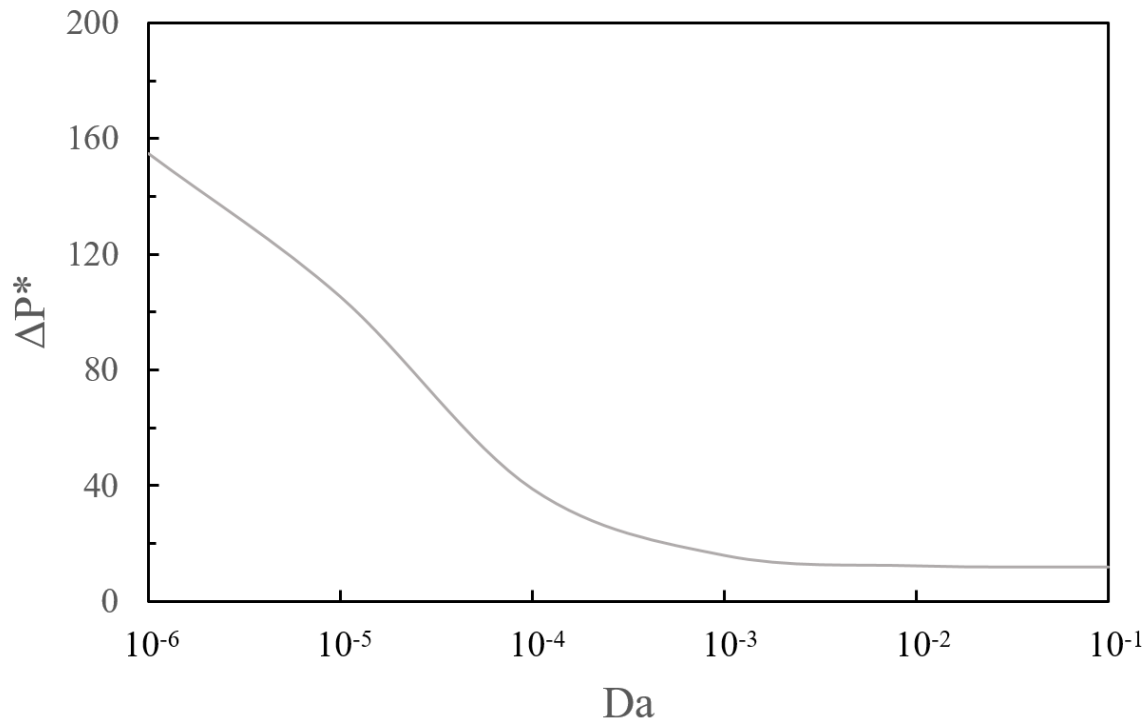


شکل ۴: عدد ناسلت محلی در (الف) دیواره داخلی و (ب) دیواره خارجی به ازای اعداد دارسی متفاوت

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

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

فشرده‌تر می‌باشند. همچنین، نفوذپذیری کم موانع متخلخل مانع کشیده شدن ناحیه گردابی به سمت پایین دست جریان می‌شوند. در عدد دارسی 10^{-4} ، ناحیه گردابی تقریباً محو می‌شود. در دارسی‌های



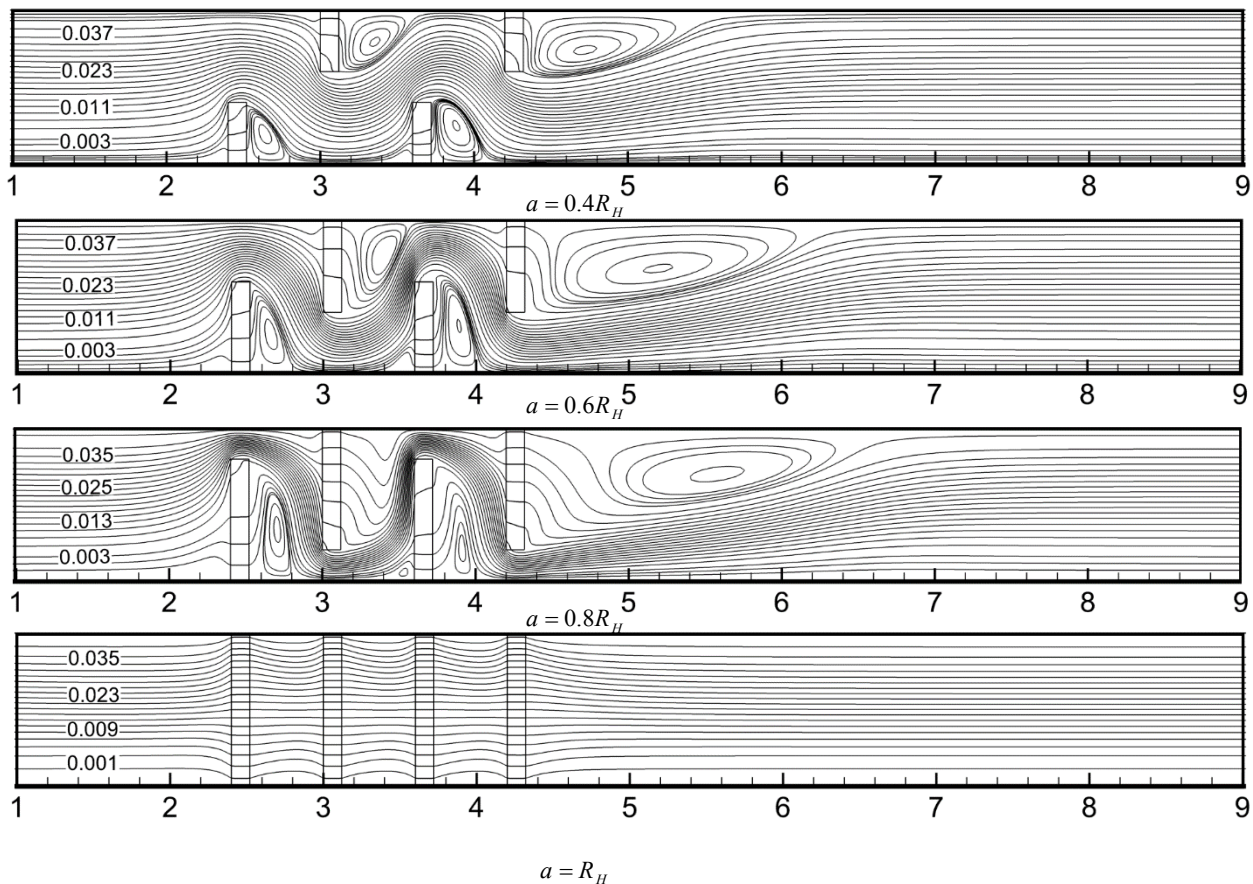
شکل ۵: افت فشار بی بعد در اعداد دارسی مختلف

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

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

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 10^{-6} کمترین انتقال حرارت را در پشت موانع به دلیل تشکیل جریان



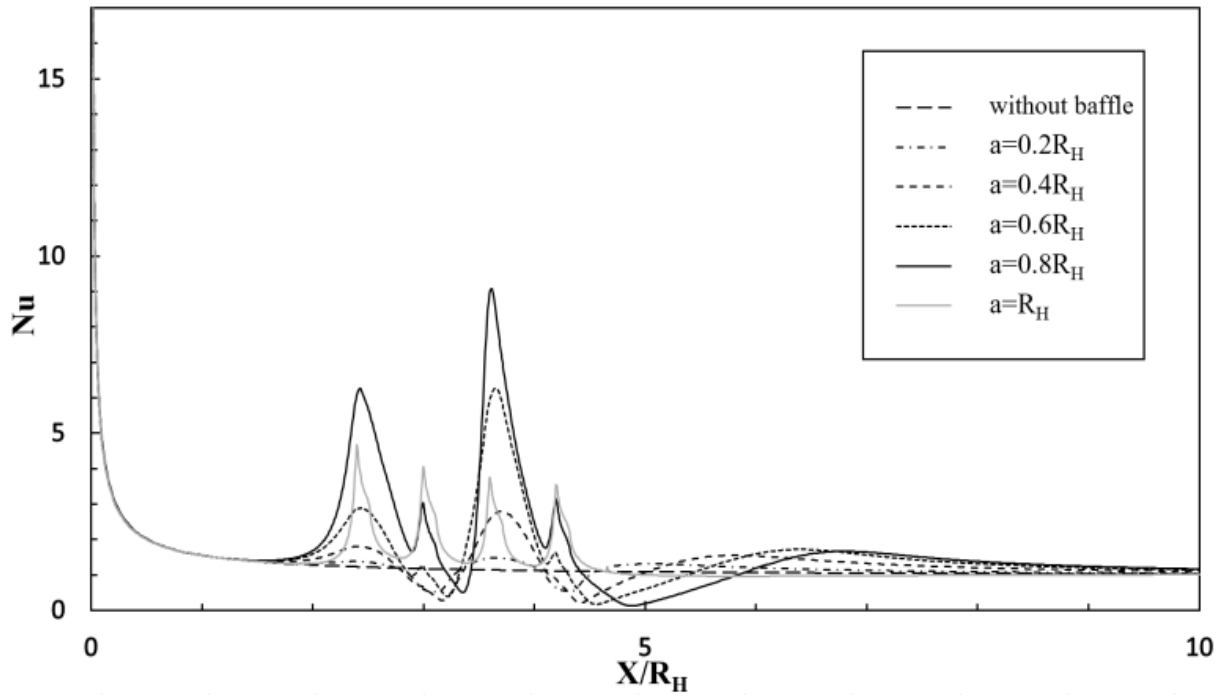
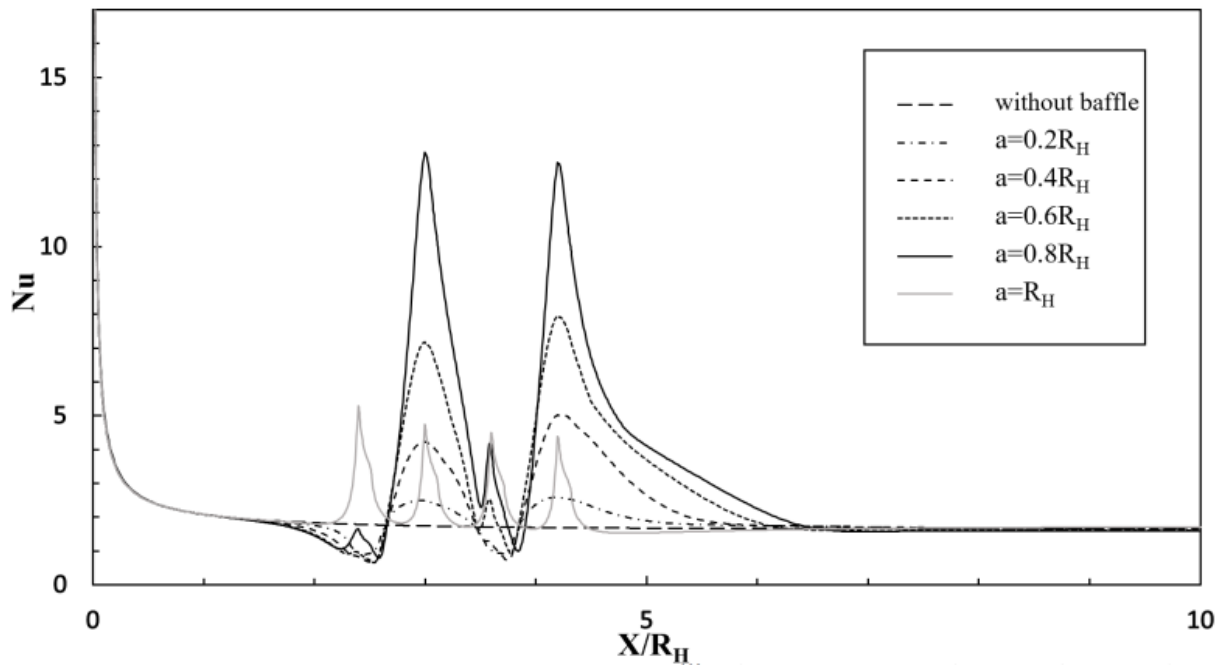
شکل ۶: توزیع خطوط جریان در ارتفاع‌های متفاوت برای موانع متخلخل

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

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 ناپدید شدن گردابه‌ها در موانع مرتفع‌تر می‌شود.

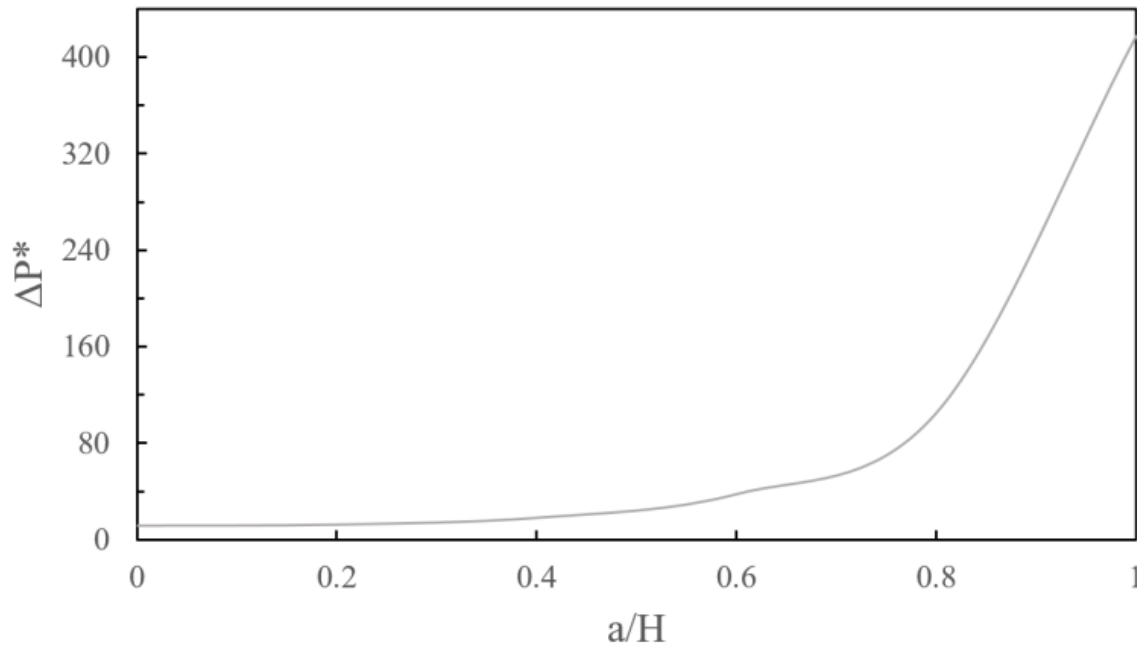
در شکل ۷ تأثیر ارتفاع موانع متخلخل بر روی عدد ناسلت محلی دیواره‌های داخلی و خارجی در عدد دارسی 10^{-5} نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع موانع متخلخل، به دلیل کاهش فاصله میان موانع و دیواره، جریان در تماس با دیواره سرعت بالاتری پیدا می‌کند. در نتیجه، ضخامت لایه مرزی بر روی دیواره کاهش یافته و انتقال 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

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،



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

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 10^{-5} ، عدد ناسلت محلی در محل موانع متخلخل پایین‌تر از مقدار آن در عدد دارسی 10^{-4} می‌باشد.

۷-۴- تأثیر کسرجمعی نانوذرات

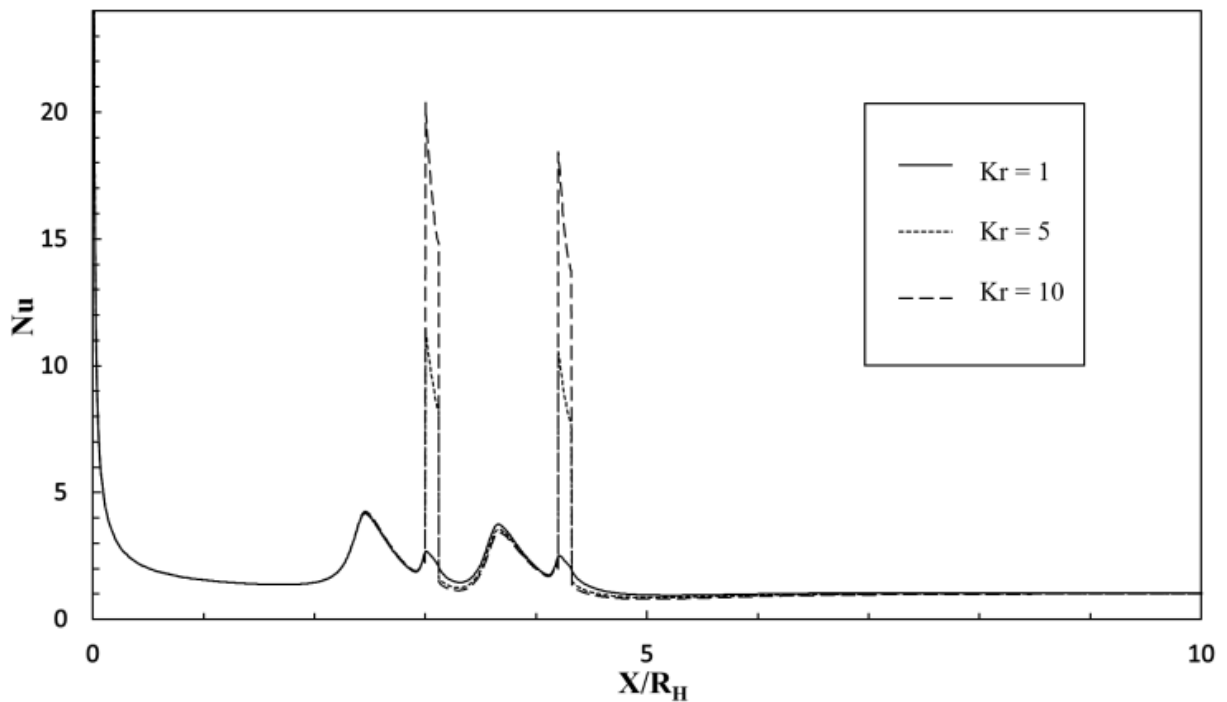
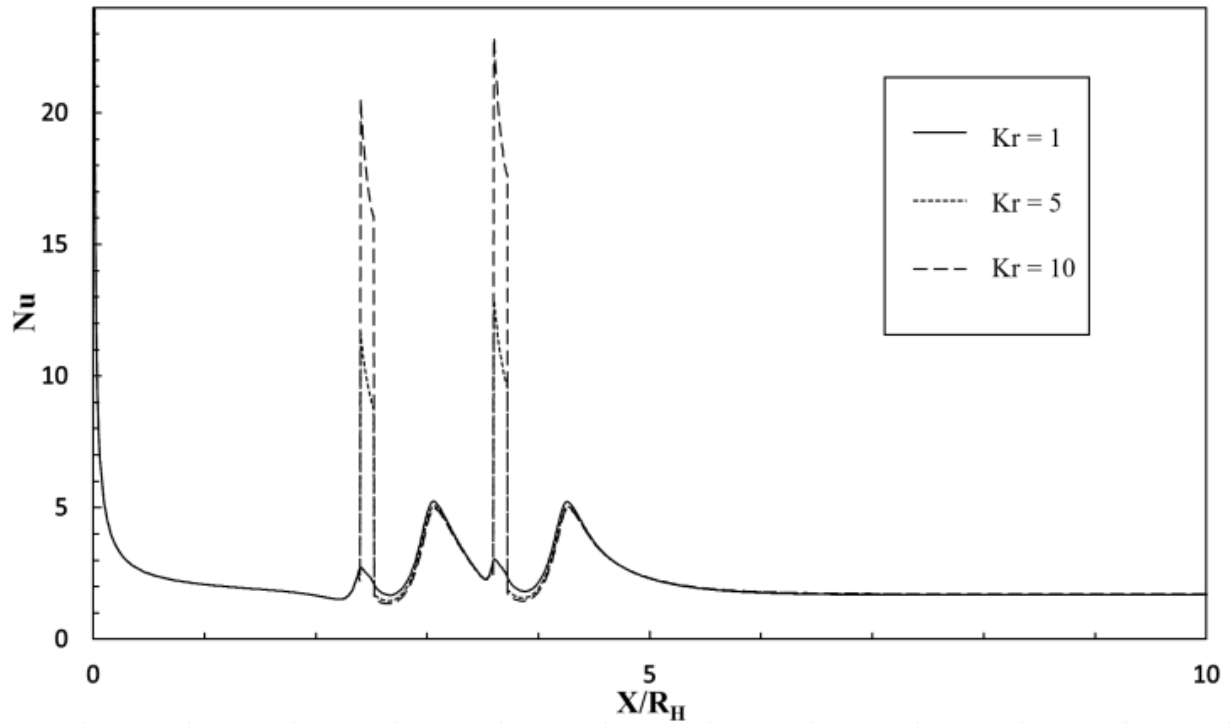
اثر کسرجمعی نانوذرات بر روی عدد ناسلت میانگین در بازه عدد رینولدز ۱۰۰ تا ۵۰۰ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نانوسیال آب/ Al_2O_3 در کسرجمعی‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق انتظار، با افزایش عدد رینولدز و کسرجمعی نانوذرات، عدد ناسلت میانگین افزایش می‌یابد. همچنین، تمامی

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 موانع متخلخل $a = 0.18R_H$ 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 در نتیجه آن، افت فشار افزایش می‌یابد. افت فشار در ارتفاع‌های کم به تدریج افزایش می‌یابد. از ارتفاع $a = 0.06R_H$ افزایش افت فشار قابل‌ملاحظه است.

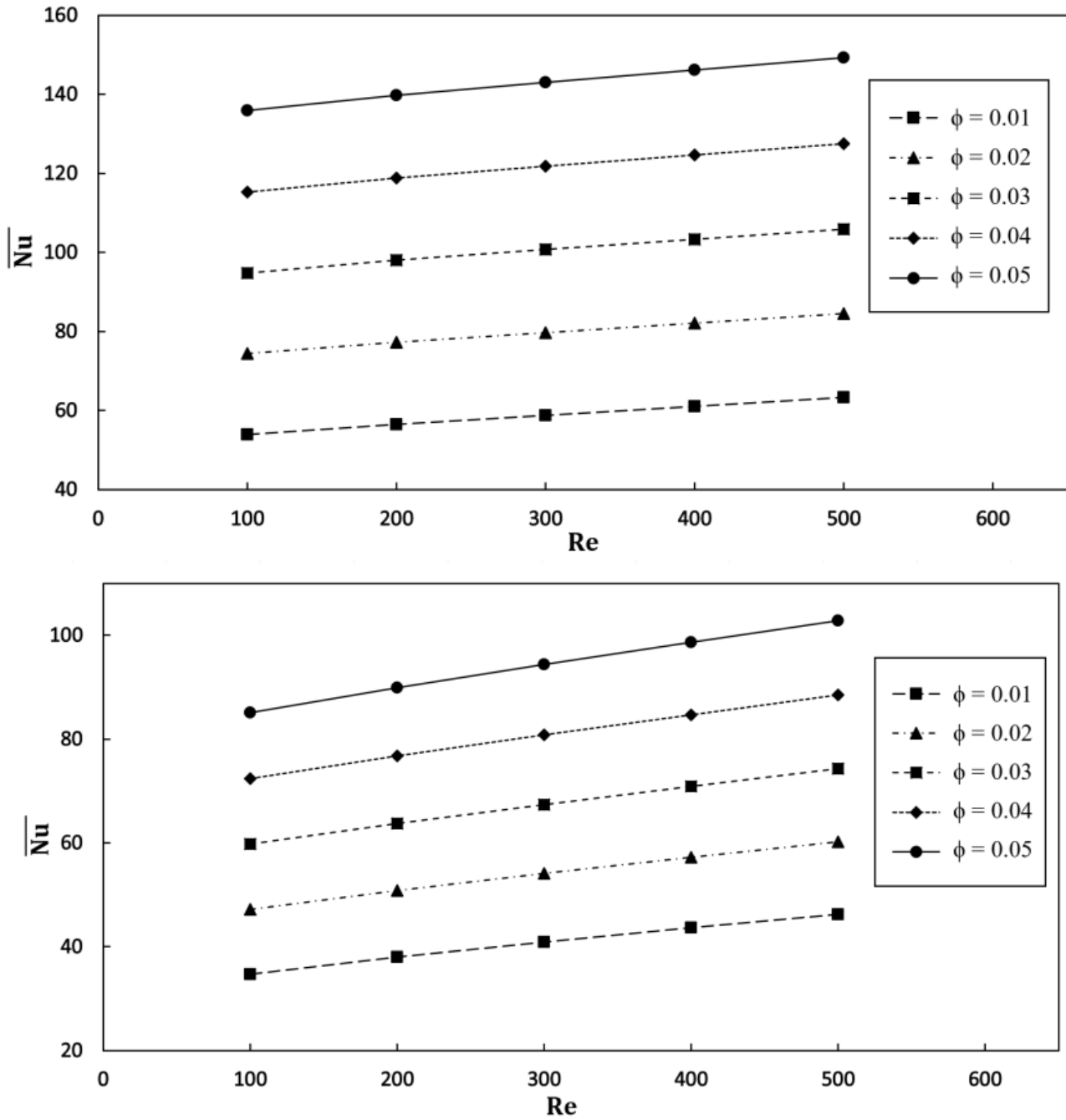
۷-۳- تأثیر نسبت هدایت حرارتی ناحیه متخلخل به سیال

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 10^{-4} در شکل ۹ آمده است. با افزایش هدایت حرارتی موانع متخلخل، قابلیت آن برای جذب حرارت



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

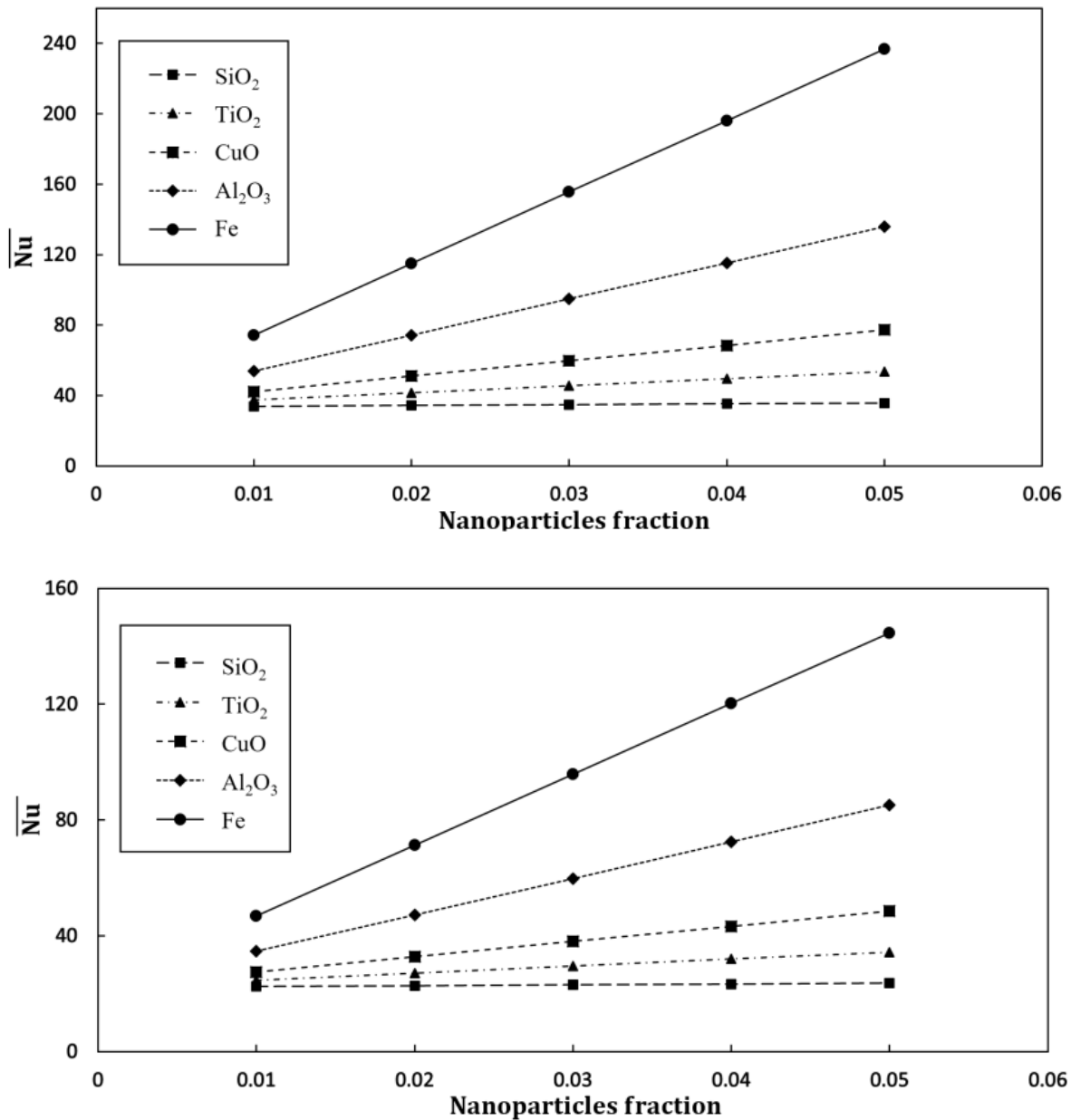


شکل ۱۰: عدد ناسلت میانگین در (الف) دیواره داخلی و (ب) دیواره خارجی

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

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

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،



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

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

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

۷-۵- تأثیر نوع نانوذرات

<p>فهرست علائم</p> <p>علائم انگلیسی</p> <p>ارتفاع مانع متخلخل، m</p> <p>شتاب فاز ثانویه، m/s^2</p> <p>فاصله بین موانع متخلخل، m</p> <p>ضریب اینرسی محیط متخلخل</p> <p>قطر نانوذرات، m</p> <p>عدد دارسی</p> <p>قطر هیدرولیکی کانال حلقوی، m</p> <p>ضریب پسا</p> <p>بردار شتاب گرانش، m/s^2</p> <p>ضریب هدایت حرارتی، W/m.K</p> <p>نفوذپذیری محیط متخلخل، m^2</p> <p>نسبت هدایت حرارتی مؤثر به هدایت حرارتی نانوسیال</p> <p>طول کانال، m</p> <p>فشار، Pa</p> <p>شعاع هیدرولیکی کانال حلقوی، m</p> <p>دمای، K</p> <p>سرعت فاز اولیه، m/s</p> <p>سرعت میانگین جرمی، m/s</p> <p>سرعت رانشی فاز k، m/s</p> <p>سرعت نسبی، m/s</p> <p>سرعت فاز ثانویه، m/s</p> <p>ضخامت موانع متخلخل، m</p> <p>نسبت تخلخل</p> <p>چگالی مخلوط، kg/m^3</p> <p>کسر حجمی فاز k</p> <p>لزجت مؤثر مخلوط، Pa.s</p> <p>هدایت حرارتی مؤثر مخلوط، kW/m.K</p> <p>محیط غیرمتخلخل</p> <p>خواص مؤثر نانوسیال در محیط متخلخل</p>	<p>a</p> <p>\bar{a}</p> <p>b</p> <p>C_d</p> <p>d_p</p> <p>Da</p> <p>D_H</p> <p>f_{drag}</p> <p>\bar{g}</p> <p>k</p> <p>K</p> <p>Kr</p> <p>L</p> <p>p</p> <p>R_H</p> <p>T</p> <p>\vec{v}_{bf}</p> <p>\vec{V}_m</p> <p>$\vec{v}_{dr,k}$</p> <p>$\vec{v}_{np,bf}$</p> <p>\vec{v}_{np}</p> <p>W</p> <p>علائم یونانی</p> <p>ε</p> <p>ρ_m</p> <p>ϕ_k</p> <p>μ_m</p> <p>λ_m</p> <p>زیرنویس</p> <p>c</p> <p>eff</p>	<p>نانوسیال آب/Fe است که ناشی از هدایت حرارتی بالای این نانوذرات می‌باشد. همچنین، کمترین عدد ناسلت در نانوسیال آب/SiO₂ مشاهده می‌شود. هرچه هدایت حرارتی نانوذرات افزایش می‌یابد، تأثیر افزایش کسر حجمی بر روی افزایش عدد ناسلت بیشتر می‌شود.</p> <p>۸- نتیجه‌گیری</p> <p>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 کسر حجمی نانوذرات و جنس آنها در اعداد رینولدز متفاوت مطالعه شد. بر این اساس، نتایج زیر به‌دست آمد:</p> <p>۱- در تمامی موارد، استفاده از موانع متخلخل باعث افزایش انتقال حرارت و زیاد شدن افت فشار جریان می‌شود.</p> <p>۲- موانع متخلخل باعث ایجاد گردابه در ناحیه موانع متخلخل می‌شود. این گردابه‌ها باعث تغییر شدید در مشخصه‌های میدان جریان و انتقال حرارت می‌شوند.</p> <p>۳- با کاهش عدد دارسی، نواحی گردابه‌ای قوی‌تر و با ارتفاع بیشتری ایجاد شده و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.</p> <p>۴- ماکزیمم انتقال حرارت در نزدیکی موانع و گردابه‌های ایجادشده اتفاق می‌افتد.</p> <p>۵- افزایش ارتفاع موانع متخلخل باعث تضعیف و از بین رفتن گردابه‌ها می‌شود. افزایش ارتفاع تا میزان $a = 0.18R_H$ منجر به افزایش انتقال حرارت جریان می‌شود.</p> <p>۶- با افزایش نسبت هدایت حرارتی ماتریس متخلخل به سیال، انتقال حرارت در اطراف موانع به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.</p> <p>۷- با افزایش کسر حجمی نانوذرات، انتقال حرارت افزایش می‌یابد؛ البته افزودن نانوذرات تأثیر چندانی بر افت فشار ندارد. از میان نانوسیالات آب/Fe، آب/Al₂O₃، آب/CuO، آب/TiO₂، آب/SiO₂، نانوسیال آب/Fe بیشترین انتقال حرارت را ایجاد می‌کند.</p>
---	---	--

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

مراجع

- 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. Shahsavari, 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.
- [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

International Journal of Thermal Sciences, 49(6) (2010)
950-962.

[19]H. Li, K. Leong, L. Jin, J. Chai, Analysis of fluid flow and
heat transfer in a channel with staggered porous blocks,

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](https://doi.org/10.22060/mej.2020.16065.6276)

