مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 13، ص‌ص 47-58

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل تک فاز و دو فاز جابجایی مختلط نانو سیال در کانال قائم مستطیلی تحت شرایط مرزی گرمایی نامتقارن

فرزاد بازدیدی تهرانی[1*]، محمد صداقت نژاد[2]، نعیم اکرامی[2]، ایمان واصفی[3]

1- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
3- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی 13114-16846، bazdid@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 اردیبهشت 1393
پذیرش: 25 خرداد 1393
ارائه در سایت: 12 مهر 1393

کلید واژگان:
نانو سیالات
کانال قائم
انتقال حرارت جابجایی مختلط
اویلر-لاگرانژ
شرایط گرمایی نامتقارن

چکیده

در مقاله حاضر به مدل‌سازی عددی جریان آرام توأم با جابجایی مختلط نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم در کانال قائم مستطیلی پرداخته شده است. بدین منظور از دو دیدگاه تک فاز و دو فاز استفاده شده است. در بخش دو فاز روش اویلر-لاگرانژ برای شبیه‌سازی پخش ذرات در سیال پایه به کار رفته است. این روش به گونه‌ایست که در آن سیال پایه به صورت فاز پیوسته و نانو ذرات به صورت فاز گسسته معلق در آن مدل می‌شوند، به طوری که اثر ذرات بر سیال پایه به صورت ترم چشمه در معادلات مومنتوم و انرژی لحاظ می‌شود. معادلات حاکم به روش حجم کنترل بر پایه المان محدود (CVFEM) گسسته سازی شده‌اند. اثر درصد حجمی و اندازه نانو ذرات، نسبت منظری سطح مقطع کانال، شرایط مرزی نامتقارن و اثر نیروی شناوری بر پارامترهای هیدرودینامیکی و حرارتی ارائه و مورد بحث قرار گرفت. در مقایسه بین مدل تک فاز و دو فاز مشخص شده است که مدل دو فاز نتایج دقیقتری را نسبت به مدل تک فاز در اختیار می‌گذارد. مشاهده می‌شود که افزایش درصد حجمی نانو ذرات، باعث بهبود ضریب انتقال حرارت می‌شود و این اثر در نسبت‌های منظری بالاتر، پررنگ‌تر است. همچنین در عدد ریچاردسون پایین تر که اثر جابجایی اجباری بیشتر از جابجایی آزاد است، پخش نانو ذرات آب-اکسید تیتانیوم در سیال پایه به نحوی است که بهبود انتقال حرارت بیشتر خواهد بود. در حالی که بهبود انتقال حرارت جابجایی برای 1% درصد حجمی نانو ذرات و $Ri=0.5$ در حدود 6/5% می‌باشد، برای $Ri=5$ به 4% هم نمی‌رسد.

Single Phase and Two Phase Analysis of Mixed Convection of Nanofluid Flow in Vertical Rectangular Duct under an Asymmetric Thermal Boundary Condition

Farzad Bazdidi-Tehrani[1*], Mohammad Sedaghatnejad[2], Naeem Ekrami[2], Iman Vasefi[3]

1- Prof., School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2- M.Sc. Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
3- Ph.D. Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16846-13114 Tehran, Iran, bazdid@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 May 2014
Accepted 15 June 2014
Available Online 04 October 2014

Keywords:
Nanofluids
Vertical duct
Mixed convection
Euler-Lagrange
Asymmetric Thermal Boundary Condition

ABSTRACT

In the present paper, mixed convection of TiO_2-water nanofluid in a laminar flow within a vertical rectangular duct is investigated numerically. A single phase and a two phase method is applied to simulate nanoparticles dispersion in the base fluid. An Euler-Lagrange approach is employed to track particles individually. In this approach, the base fluid is assumed to be a continuous phase while the particles are dispersed through it. The presence of particles in the base fluid is modeled as a source term in the momentum and energy equations. Governing equations are discretized using Control Volume based Finite Element Method (CVFEM). Effects of nanoparticles concentration, particles size, aspect ratio of cross section, asymmetrical boundary condition and buoyancy on the hydrodynamics and thermal parameters are presented and discussed. It is observed that increasing nanoparticles concentration enhances heat transfer rate and this enhancement is more considerable in higher aspect ratios. Also, at smaller values of Richardson number (Ri) where the effect of forced convection is more than natural convection, dispersion of nanoparticles in the base fluid improves heat transfer rate more considerably. Whilst an improvement in convective heat transfer is shown to be more than 6.5% at $Ri=0.5$, it does not exceed 4% at $Ri=5$.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

F. Bazdidi Tehrani, M. Sedaghatnejad, N. Ekrami, I. Vasefi, Single Phase and Two Phase Analysis of Mixed Convection of Nanofluid Flow in Vertical Rectangular Duct under an Asymmetric Thermal Boundary Condition, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 13, pp. 47-58, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]

1- مقدمه

در سال‌های اخیر همواره افزایش بازده و کاهش اندازه ادوات و ابزارهای مهندسی از جمله وسایل خنک‌کننده، رآکتورهای اتمی، مبادله‌گرهای گرمایی و کلکتورهای خورشیدی مورد توجه بوده است. نیل به این مهم به دلیل محدودیت‌های گرمایی سیالات عامل رایج در صنعت با دشواری‌هایی مواجه است. استفاده از پره‌های حرارتی، مکش یا تزریق سیال و ارتعاش سطوح گرم شده از جمله روش‌های مورد استفاده جهت افزایش میزان انتقال حرارت می‌باشد. اولین بار ماکسول [1] در سال 1873 این ایده را مطرح کرد که اضافه کردن ذرات جامد به سیال پایه، افزایش هدایت حرارتی آن را به دنبال خواهد داشت، و البته مشکلاتی نظیر افت فشار و سایش را نیز ایجاد می‌کند. نانو سیال واژه‌ای بود که اولین بار چوی [2] به سیال چند فازی اطلاق کرد که ذرات با مقیاس نانو به طور یکنواخت در آن پخش شده‌اند. بعدها محققین زیادی با استفاده از نانو ذرات مختلف در اندازه‌ها و درصدهای حجمی متفاوت، به بررسی خواص هیدرودینامیکی و حرارتی نانو سیالات پرداختند.

انگوین و همکاران [3] به صورت آزمایشگاهی، انتقال حرارت جابجایی نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم را در خنک کاری ریزپردازنده‌ها و سایر قطعات الکترونیکی بررسی کردند. رژیم جریان آشفته در نظر گرفته شد. داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که به عنوان نمونه، برای درصد حجمی 6/8 از نانو ذرات، ضریب انتقال حرارت،40 درصد در مقایسه با آب افزایش یافت. همچنین مشخص شد که ذرات 36 نانو متری، ضریب انتقال حرارت را در مقایسه با ذرات 47 نانو متری، بیشتر افزایش می‌دهند.

به منظور مدل‌سازی جریان‌های شامل نانو ذرات عمدتاً از دو نگرش کلی تک فاز و دو فاز استفاده می‌گردد، که روش تک فاز خود به دو صورت همگن و یا پخشی تقسیم می‌شود. در روش تک فاز به دلیل کوچک بودن اندازه ذرات معلق در سیال پایه، از حرکت نسبی بین ذرات و سیال پایه صرف نظر شده و اثر حضور نانوذرات در خواص ظاهری در نظر گرفته می‌شود.

هریس و همکاران [4] با استفاده از مدل تک فاز همگن انتقال حرارت جابجای آرام نانو سیال در یک لوله با شرط مرزی دمای سطح ثابت را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. با چشم‌پوشی از نفوذ و پخش محوری، معادله‌ی انرژی برای جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته در یک لوله‌ی دایروی در اعداد پکلت مختلف (6500-2500) برای نانو سیالات آب- اکسید آلومینیوم، آب- مس و آب- اکسید مس حل شده و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن نانو ذرات به مایع به طرز بارزی ضریب انتقال حرارت جابجایی را افزایش می‌دهد، همچنین ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت و با کاهش اندازه‌ی نانو ذرات، افزایش می‌یافت.

خانافر و همکاران [5] به صورت عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد نانو سیال را در داخل یک سیستم دو بعدی بررسی کردند. نتایج حاصل بیانگر افزایش عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانو ذرات در اعداد گراشف مختلف، می‌باشد. بنگ و هو [6] در تحقیقی متفاوت به بررسی پارامترهای مطرح در طراحی یک سیستم با استفاده از نانو سیال پرداختند. آن‌ها با اشاره به روابط حاکم بر مشخصات ترموفیزیکی نانو سیالات گوناگون، بیان کردند که مطالعات و آزمایش‌های بیشتری نیاز است تا بتوان از عملکرد سیستمی که بر اساس استفاده از نانو سیال طراحی شده است مطمئن گردید.

پیشکار و قاسمی [7] به بررسی جریان جابجایی مختلط نانو سیال و سیال خالص در یک کانال افقی حاوی یک منبع حرارتی به روش عددی تک فاز پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که استفاده از نانو سیال موجب پخش بهتر حرارت و افزایش دمای میانگین منبع می‌شود. همچنین افزایش درصد حجمی نانو ذرات موجب افزایش انتقال حرارت می‌گردد، که این امر در رینولدزهای بالاتر، پررنگ تر است.

با وجود مزیت‌های روش تک فاز از جمله سرعت بالای تحلیل و پایین آمدن هزینه‌ها، به دلیل وجود سرعت نسبی میان ذرات و سیال پایه و همچنین حرکت نامنظم ذرات در سیال پایه، تبادل انرژی افزایش می‌یابد که نمی‌توان از آن به راحتی صرف‌نظر کرد. بنا بر همین اصل نگرش دیگر استفاده از روش دو فاز است که خود به طرق مختلفی از جمله روش‌های ترکیبی، اویلر-اویلر، اویلر-لاگرانژ و ... به‌کار برده می‌شود.

میرمعصومی و بهزادمهر [8] جریان آرام جابجایی مختلط آب-اکسید آلومینیوم را در یک لوله مدور افقی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از روش ترکیبی دو فاز استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که در ناحیه کاملاً توسعه‌یافته نانو ذرات اثری بر پارامترهای هیدرودینامیکی جریان نداشته اما اثر آن‌ها بر پارامترهای حرارتی چشمگیر است.

روش دو فاز اویلر-لاگرانژ توسط هی و همکاران [9] برای تحلیل جریان آرام جابجایی اجباری نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم در لوله افقی مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها تحلیل خود را به روش تک فاز تکرار کرده و نتایج را با نتایج عددی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها بهبود قابل‌توجه انتقال حرارت را به خصوص در ناحیه در حال توسعه نشان می‌داد. همچنین دقت تحلیل انجام‌شده به روش دو فاز به مراتب بیشتر از روش تک فاز گزارش شد.

وانگ و همکاران [10] مقایسه‌ای میان سه روش عددی تک فاز، دو فاز اویلر-اویلر و دو فاز اویلر-لاگرانژ انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که نگرش دو فاز اویلر-لاگرانژ به مراتب از دقت بیشتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است.

واصفی و علیزاده [11] تاثیر نانو ذرات اکسید مس را بر روی انتقال حرارت آنهم فقط جابجایی اجباری جریان آب در کانال‌های افقی با سطح مقطع‌های مختلف و با استفاده از روش دو فاز اویلر-لاگرانژ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها بهبود انتقال حرارت را در اثر حضور نانوذرات نشان می‌داد. به علاوه، آن‌ها نشان دادند که شکل سطح مقطع کانال افقی در میزان انتقال حرارت موثر است.

هیهات و کوثری [12] در یک مقاله دیگر به بررسی اثر مهاجرت ذرات نانو و توزیع غیریکنواخت آن‌ها بر پارامترهای جریانی و حرارتی نانو سیال آب-آلومینا در یک لوله مدور پرداختند. آن‌ها از یک روش دو مولفه‌ای که توسط بونجیورنو [13] ارائه شده بود، استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان‌گر این بود که توزیع غیریکنواخت نانو ذرات انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد در حالی که تنش برشی دیواره را کاهش می‌دهد.

مقاله حاضر به تحلیل جریان آرام توأم با جابجایی مختلط (طبیعی-اجباری) نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم در کانال قائم مستطیلی سه بعدی تحت شرایط مرزی گرمایی نامتقارن می‌پردازد. روش تکفاز همگن و روش دو فاز اویلر-لاگرانژ برای شبیه‌سازی چنین جریانی مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل عددی به کمک روش حجم کنترل بر پایه المان محدود[1] [14] انجام شده است که از مزیت‌های هر دو روش حجم محدود و المان محدود بهره می‌برد. با توجه به دشواری‌های موجود در تحلیل‌های دو فازی، برای همگرایی بهتر جواب‌ها از شبکه یکپارچه[2] استفاده شده است و برای حفظ

1- CVFEM
2- Co-located Grid

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]

کوپلینگ میدان‌های سرعت و فشار از الگوریتم رای-چو[1] [15] کمک گرفته شده است. همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی به وسیله روش دو فاز با نتایج حاصل از شبیه سازی تک فاز مقایسه شده است. در این پژوهش تأثیر درصد حجمی و اندازه نانو ذرات، نسبت منظری[2] سطح مقطع، تأثیر شرایط گرمایی نامتقارن و عدد گراشف بر روی انتقال حرارت، افت فشار و نحوه توزیع ذرات مورد بررسی و بحث قرار گرفته است.

2- معادلات حاکم بر جریان نانو سیال

2-1- روش تک فاز

در روش تک فاز صورت کلی معادلات بقا شبیه به سیالات معمولی است، اما برای چگالی، ضریب هدایت حرارتی، لزجت و گرمای ویژه از خواص ظاهری نانو سیال که در ادامه توضیح داده می‌شود، استفاده می‌گردد. در این روش از لغزش بین سیال پایه و نانوذرات صرفنظر می‌شود و اثر حضور ذرات در خواص ظاهری دیده می‌شود. نابراین معادلات بقا به فرم زیر ارائه می شوند:

پیوستگی

$$\nabla.\left(\rho_{\text{eff}}\vec{V}\right)=0 \qquad (1)$$

معادله مومنتوم

$$\nabla.\left(\rho_{\text{eff}}\vec{V}\vec{V}\right)=-\nabla p+\nabla.\left(\mu_{\text{eff}}\nabla\vec{V}\right)+\rho_{\text{eff}}\vec{g}\beta(T-T_{\text{i}}) \qquad (2)$$

معادله انرژی

$$\nabla.\left(\rho_{\text{eff}}c_{\text{p,eff}}\vec{V}T\right)=\nabla.\left(k_{\text{eff}}\nabla T\right) \qquad (3)$$

بررسی خواص نانو سیال در چند سال گذشته مورد توجه قرار گرفته است. برخی تحقیقات اخیر، بحث وابستگی خواص ظاهری به دما را مورد توجه قرار داده‌اند. در ادامه مدل‌های خواص فیزیکی و حرارتی نانو سیالات که در پژوهش حاضر از آن‌ها استفاده شده، ارائه گردیده است.

چگالی

برای چگالی نانو سیالات، مقادیر ثابت مستقل از دما بر اساس کسر حجمی نانو ذرات به طریقه‌ی زیر پیشنهاد شده است [5].

$$\rho_{\text{nf}}=(1-\phi)\rho_{\text{f}}+\phi\rho_{\text{p}} \qquad (4)$$

گرمای ویژه

برای گرمای ویژه‌ی نانو سیالات، مقادیر ثابت مستقل از دما بر اساس کسر حجمی نانو ذرات به طریقه‌ی زیر پیشنهاد شده است [5].

$$(\rho c_{\text{p}})_{\text{nf}}=(1-\phi)(\rho c_{\text{p}})_{\text{f}}+\phi(\rho c_{\text{p}})_{\text{p}} \qquad (5)$$

لزجت دینامیکی

برای لزجت دینامیکی نیز رابطه‌ای به صورت زیر، وابسته به دما در نظر گرفته می‌شود [16].

$$\mu_{\text{nf}}=\frac{\mu_{\text{f}}}{1-34.87\left(d_{\text{p}}/d_{\text{f}}\right)^{-0.3}.\phi^{1.03}} \qquad (6)$$

که در آن μ_{f}، لزجت سیال پایه بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود و به عنوان مثال برای سیال پایه آب از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\mu_{\text{f}}=562.77\left(\ln\left(T+62.756\right)\right)^{-8.9137} \qquad (7)$$

d_{p} قطر نانو ذرات و d_{f} نیز قطر معادل مولکول‌های سیال پایه می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d_{\text{f}}=0.1\left(\frac{6M}{N\pi\rho_{\text{f0}}}\right)^{1/3} \qquad (8)$$

که در آن M جرم مولکولی سیال پایه، N عدد آووگادرو ($N=6.022\times10^{23}\,\text{mol}^{-1}$) و ρ_{f0} چگالی جرمی سیال پایه می‌باشد که در دمای 293 کلوین محاسبه می‌شود.

ضریب هدایت حرارتی

برای ضریب هدایت حرارتی نیز رابطه‌ای وابسته به دما به صورت زیر ارائه شده است [16].

$$\frac{k_{\text{nf}}}{k_{\text{f}}}=1+4.4\text{Re}^{0.4}\text{Pr}^{0.66}\left(\frac{T}{T_{\text{fr}}}\right)^{10}\left(\frac{k_{\text{p}}}{k_{\text{f}}}\right)^{0.3}\phi^{0.66} \qquad (9)$$

که در آن Re عدد رینولدز نانو ذرات، عدد پرانتل Pr سیال پایه، T دمای نانوسیال، T_{fr} دمای انجماد سیال پایه، k_{p} و k_{f} به ترتیب ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات و سیال پایه، و ϕ کسر حجمی ذرات نانو می‌باشد. اعداد رینولدز و پرانتل نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\text{Pr}=\frac{\mu_{\text{f}}}{\rho_{\text{f}}\alpha_{\text{f}}} \qquad (10)$$

$$\text{Re}=\frac{2\rho_{\text{f}}k_{\text{B}}T}{\pi\mu_{\text{f}}^2d_{\text{p}}} \qquad (11)$$

در رابطه با لا k_{B} ثابت بولتزمان ($k_B=1.38066\times10^{-23}\,\text{J/K}$) می‌باشد. α_{f} نیز ضریب پخش حرارتی سیال پایه می‌باشند. همچنین باید دقت کرد که تمام خواص فیزیکی در دمای نانو سیال T محاسبه می‌شوند.

ضریب انبساط حجمی

برای ضریب انبساط حجمی نانوسیال، رابطه زیر که بر اساس کسر حجمی ذرات نانو بوده و مستقل از دما می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است [5].

$$\beta_{\text{nf}}=\left[\frac{1}{1+\frac{(1-\phi)\rho_{\text{f}}}{\phi\rho_{\text{p}}}}\frac{\beta_{\text{p}}}{\beta_{\text{f}}}+\frac{1}{1+\frac{\phi}{(1-\phi)}\frac{\rho_{\text{p}}}{\rho_{\text{f}}}}\right].\beta_{\text{f}} \qquad (12)$$

که در آن β_{p} و β_{f} به ترتیب ضریب انبساط حجمی نانو ذرات و سیال پایه است.

2-2- روش دو فاز اویلر-لاگرانژ

در این روش حضور و پخش ذرات در سیال پایه به صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شود. از این رو معادلات بقاء برای فاز پیوسته نوشته می‌شود و اثرات حضور و پخش نانوذرات در سیال پایه به صورت ترم چشمه در معادلات ممنتوم و انرژی در نظر گرفته می‌شود.

این روش همان طور که از نامش مشخص است از تئوری اویلر و لاگرانژ پیروی می‌کند. فاز مایع به عنوان فاز پیوسته عمل می‌کند که مشخصاتش با حل معادلات ناویر استوکس معین می‌گردد، در حالی که مشخصات فاز پخش‌شده با بررسی تعداد زیادی از ذرات در میدان جریان و در نظر گرفتن قانون دوم نیوتن برای هر ذره معلوم می‌شود. فاز پخش‌شده می‌تواند با فاز مایع تبادل مومنتوم، جرم و انرژی داشته باشد [17]. برای فاز مایع معادلات بقا به صورت زیر بیان می‌شود:

1- Rhie-chow interpolation algorithm
2- Aspect Ratio

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]

پیوستگی

$$\nabla.\left(\rho_{\mathrm{f}}\vec{V}_{\mathrm{f}}\right)=0 \tag{13}$$

معادله مومنتوم

$$\nabla.\left(\rho_{\mathrm{f}}\vec{V}_{\mathrm{f}}\vec{V}_{\mathrm{f}}\right)=-\nabla p+\nabla.\left(\mu_{\mathrm{f}}\nabla\vec{V}_{\mathrm{f}}\right)+\rho_{\mathrm{f}}\vec{g}\beta(T-T_{\mathrm{i}})+\vec{S}_{\mathrm{m}} \tag{14}$$

در رابطه (14)، $\mathbf{S}_m$ ترم چشمه، بیان‌کننده مومنتوم انتقال‌یافته بین فاز سیال و فاز ذرات است که به وسیله محاسبه تغییر مومنتوم ذرات در گذر از حجم کنترل تعیین می‌شود.

$$\vec{S}_{\mathrm{m}}=\sum\vec{F}m_{\mathrm{p}}\Delta t \tag{15}$$

که m_{p} جرم ذره و $\vec{F}$ بیان‌کننده حاصل جمع تمام نیروهایی بر واحد جرم نانو ذره است که بر ذره وارد می‌شود و عبارت‌اند از: $\vec{F}_{\mathrm{D}}$ نیروی پسا، $\vec{F}_{\mathrm{G}}$ نیروی گرانش، $\vec{F}_{\mathrm{V}}$ نیروی جرم مجازی، $\vec{F}_{\mathrm{L}}$ نیروی برآی سافمن، $\vec{F}_{\mathrm{T}}$ نیروی ترموفورتیک، $\vec{F}_{\mathrm{B}}$ نیروی براونی و $\vec{F}_{\mathrm{P}}$ نیروی گرادیان فشار می‌باشد، که در ادامه روابط مورد استفاده برای هر یک بیان شده است.

برای نانو ذرات نیز معادله حرکت ذره بر اساس قانون دوم نیوتون بیان می‌شود:

$$\vec{F}=\frac{d\vec{V}_{\mathrm{p}}}{dt} \tag{16}$$

برای ذرات زیر میکرون، به دلیل کم بودن عدد رینولدز نسبی با استفاده از قانون استوکس نیروی دراگ به طریق زیر معین می‌شود [18]:

$$\vec{F}_{\mathrm{D}}=\frac{18\mu}{d_{\mathrm{p}}^2\rho_{\mathrm{p}}C_{\mathrm{c}}}(\vec{V}_{\mathrm{f}}-\vec{V}_{\mathrm{p}}) \tag{17}$$

$$C_{\mathrm{c}}=1+\frac{2\lambda}{d_{\mathrm{p}}}(1.257+0.4\mathrm{e}^{-(1.1d_{\mathrm{p}}/2\lambda)}) \tag{18}$$

که در این رابطه λ مسیر آزاد متوسط مولکولی می‌باشد.

نیروی برآ بر روی یک ذره به دلیل چرخش حاصل از گرادیان سرعت ایجاد می‌شود و از رابطه زیر قابل محاسبه است [19].

$$\vec{F}_{\mathrm{L}}=\frac{2K\upsilon^{1/2}\rho d_{\mathrm{ij}}}{\rho_{\mathrm{p}}d_{\mathrm{p}}(d_{\mathrm{lk}}d_{\mathrm{kl}})^{1/4}}(\vec{V}_{\mathrm{f}}-\vec{V}_{\mathrm{p}}) \tag{19}$$

که $K=2.594$ و d_{ij} تانسور تغییر شکل می‌باشد. این فرم نیروی لیفت برای ذرات ریز دارای مفهوم است. لازم به توضیح است که این رابطه برای ذرات زیر میکرون قابل استفاده است [20].

نیروی دیگری که بر ذرات ریز پخش‌شده در سیال وارد می‌شود، نیروی براونی می‌باشد. برای ذرات زیر میکرون، برخورد ذرات با مولکول‌های سیال و بنابراین تأثیر حرکت براونی پررنگ می‌شود. اجزای نیروی براونی به وسیله فرایند اختلالی گاوسی با شدت طیف $S_{\mathrm{n,ij}}$ مدل می‌شود که بر طبق آن [21]:

$$S_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{n}}=S_0\delta_{\mathrm{ij}} \tag{20}$$

که δ_{ij}، دلتای کرونکر می‌باشد و

$$S_0=\frac{216\nu k_{\mathrm{B}}T}{\pi^2\rho_{\mathrm{f}}d^5\left(\rho_{\mathrm{p}}/\rho_{\mathrm{f}}\right)^2C_{\mathrm{c}}} \tag{21}$$

که T دمای مطلق سیال، ν ویسکوزیته سینماتیکی، و k_{B} ثابت بولتزمان می‌باشد. بزرگی اجزای نیروی براونی به فرم زیر می‌باشد که:

$$\vec{F}_{\mathrm{B,i}}=\zeta_{\mathrm{i}}\sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \tag{22}$$

که ζ_{i} اعداد تصادفی گوس با واریانس مستقل واحد و متوسط صفر می‌باشد.

نیروی دیگری که بر ذرات ریز پخش‌شده در سیال وارد می‌شود، نیروی ترموفورتیک می‌باشد. این نیرو به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{F}_{\mathrm{T}}=-D_{\mathrm{T,p}}\frac{1}{m_{\mathrm{p}}T}\nabla.T \tag{23}$$

که $D_{\mathrm{T,p}}$ ضریب ترموفورتیک می‌باشد. تالبوت [22] مقدار زیر را برای آن پیشنهاد داده است:

$$D_{\mathrm{T,p}}=\frac{6\pi d_{\mathrm{p}}\mu_{\mathrm{f}}^2C_{\mathrm{s}}\left(k_{\mathrm{f}}/k_{\mathrm{p}}+2C_{\mathrm{t}}\mathrm{Kn}\right)}{\rho_{\mathrm{f}}\left(1+6C_{\mathrm{m}}\mathrm{Kn}\right)\left(1+2k_{\mathrm{f}}/k_{\mathrm{p}}+4C_{\mathrm{t}}\mathrm{Kn}\right)} \tag{24}$$

در رابطه بالا $C_{\mathrm{m}}=2.28$، $C_{\mathrm{s}}=1.17$ و $C_{\mathrm{t}}=4.36$ به ترتیب ضریب مبادله مومنتوم، ضریب لغزش گرمایی و ضریب جهش گرمایی می‌باشند. $\mathrm{Kn}=2\lambda/d_{\mathrm{p}}$ نیز عدد نادسن می‌باشد.

نیروی جرم مجازی که برای شتاب دادن به سیال اطراف ذره لازم است، به صورت زیر بیان می‌شود [20]:

$$\vec{F}_{\mathrm{V}}=\frac{1}{2}\frac{\rho_{\mathrm{f}}}{\rho_{\mathrm{p}}}\frac{d}{dt}\left(\vec{V}_{\mathrm{f}}-\vec{V}_{\mathrm{p}}\right) \tag{25}$$

نیروی گرانش و نیروی گرادیان فشار نیز به ترتیب توسط روابط (26) و (27) محاسبه می‌شوند:

$$\vec{F}_{\mathrm{G}}=\frac{\vec{g}\left(\rho_{\mathrm{p}}-\rho_{\mathrm{f}}\right)}{\rho_{\mathrm{p}}} \tag{26}$$

$$\vec{F}_{\mathrm{P}}=\left(\frac{\rho_{\mathrm{f}}}{\rho_{\mathrm{p}}}\right)\vec{V}_{\mathrm{p}}.\nabla v_{\mathrm{f}} \tag{27}$$

معادله انرژی

$$\nabla.\left(\rho_{\mathrm{f}}c_{\mathrm{p,f}}\vec{V}_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{f}}\right)=\nabla.\left(k_{\mathrm{f}}\nabla T_{\mathrm{f}}\right)+S_{\mathrm{e}} \tag{28}$$

در رابطه (28)، ترم $S_{P,e}$ بیانگر ترم چشمه در اثر تبادل انرژی گرمایی ذره و سیال می‌باشد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S_{\mathrm{e}}=\sum\dot{Q}\Delta t \tag{29}$$

که $\dot{Q}$ نرخ شار کلی حرارتی تبادل شده میان ذره و سیال است که به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}=\mathrm{Nu}\pi d_{\mathrm{p}}k_{\mathrm{f}}\left(T_{\mathrm{p}}-T_{\mathrm{f}}\right) \tag{30}$$

که در آن Nu از طریق رابطه رنز و مارشال [23] به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{Nu}=2.0+0.6\mathrm{Re}_{\mathrm{d}}^{1/2}\mathrm{Pr}^{1/3} \tag{31}$$

با در نظر گرفتن یک حجم کنترل اطراف ذره و نوشتن قانون بقای انرژی برای ذره، نتیجه می‌شود که:

$$m_{\mathrm{p}}c_{\mathrm{p,p}}\frac{dT_{\mathrm{p}}}{dt}=\dot{Q} \tag{32}$$

3- هندسه جریان و شرایط مرزی

هندسه مورد نظر در تحلیل حاضر که شماتیک آن در شکل 1 ارائه شده است، عبارت است از کانالی با سطح مقطع مستطیل به طول یک متر و قطر هیدرولیکی یک سانتی‌متر. در ورودی کانال شرط سرعت ورودی یکنواخت و دمای ثابت و در خروجی نیز شرط فشار صفر نسبت به فشار جو اعمال گردید. سرعت و دمای ورودی ذرات برابر با سرعت و دمای سیال پایه در نظر گرفته شده است. برای دیواره‌ها نیز شرط عدم لغزش و شار حرارتی ثابت به صورت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

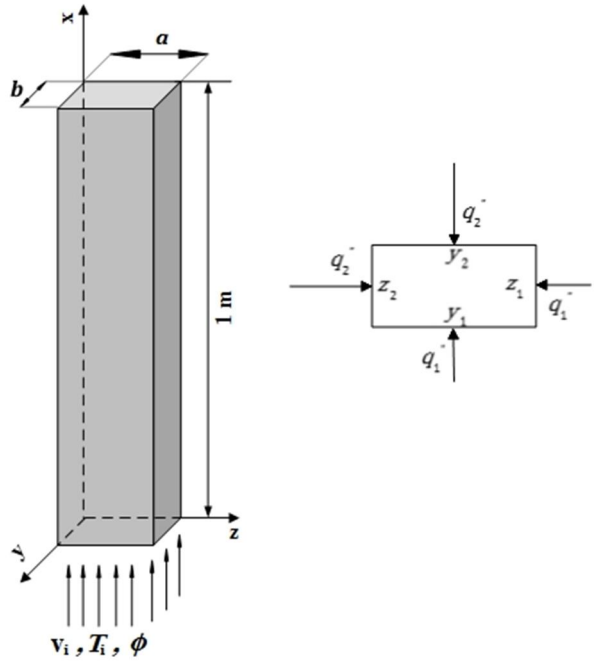
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]

نامتقارن فرض شده است. بدین صورت که q_1'' از q_2'' بزرگ‌تر بوده و نسبت آن به صورت $Q_r = \frac{q_1''}{q_2''}$ تعریف شده است. همچنین دیواره به گونه‌ای تعریف می‌شود که ذرات پس از برخورد به آن بازگشت داشته باشند. شرایط به گونه ای است که رژیم جریان آرام و لایه‌های مرزی سرعت و دما در حال توسعه می‌باشند.

4- تحلیل عددی و اعتبارسنجی

برای گسسته سازی معادلات غیرخطی بیان‌شده از روش حجم کنترل بر اساس المان محدود [14] استفاده شده است. با توجه به دشواریهای موجود در همگرایی نتایج در روش اویلر-لاگرانژ، برای همگرایی بهتر جواب‌ها از شبکه یکپارچه استفاده شده است. برای تقریب ترم‌های پخش و جابجایی از طرح بالادستی مرتبه یک و جهت حفظ کوپلینگ میدان‌های سرعت و فشار از الگوریتم میان‌یابی رای-چو [15] استفاده شده است. همچنین کوپلینگ میان سیال پایه و نانو ذرات نیز به صورت دو طرفه[1] تعریف شده است. بدین معنا که اثر متقابل ذرات و سیال پایه بر یکدیگر لحاظ شده است. به علاوه المان‌های فاز گسسته در هر تکرار فاز سیال به‌روز می‌شوند. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در مدلسازی دو فاز، از نرم‌افزار انسیس سی اف ایکس[2] کمک گرفته شده است. لازم به ذکر است که برای اعمال تمامی نیروهای ارائه شده، زیرروال‌هایی[3] به زبان فرترن کدنویسی و به نرم‌افزار اضافه شده است.

همچنین براي اينكه حل از دقت قابل قبولی برخوردار باشد، می‌بایست که بازه‌هاي زماني دنبال كردن ذرات بسيار كوچک انتخاب شوند. بازه زمانی $\Delta t = 2\times10^{-6}$ در نظر گرفته شده است. شبکه حل در تمامی جهات به صورت غیریکنواخت تنظیم گردیده و به منظور حصول اطمینان از اینکه تحلیل انجام‌شده مستقل از شبکه است، چندین توزیع متفاوت شبکه مورد آزمایش قرارگرفته که یک نمونه از آن را برای حالتی که $\mathrm{Re} = 700$، $Q_r = 1$، $\mathrm{Gr} = 5\times10^5$، $AR = 0.5$ و $\phi = 1\%$ در شکل 2 ارائه شده است. همان طور که مشخص است برای این حالت توزیع شبکه به تعداد 1000 در جهت x، 20 در راستای y و 30 در راستای z قابل‌قبول است و مشاهده می‌شود که با زیادشدن تعداد شبکه در هر جهت تفاوتی در نتایج به وجود نمی‌آید.



شکل 1 هندسه جریان و شرایط مرزی کانال مورد نظر

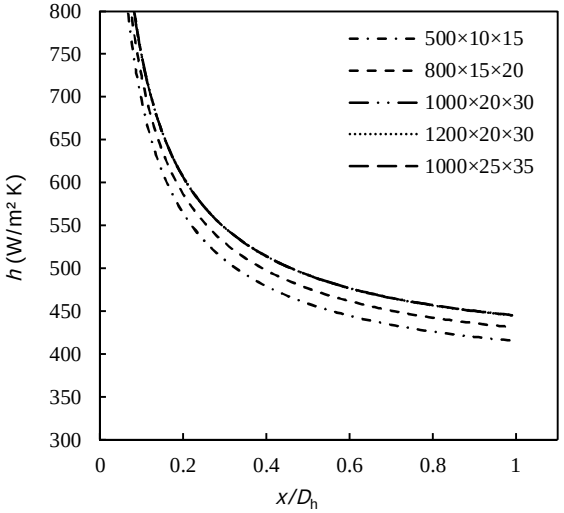
لازم به ذکر است که معیار همگرایی مورد استفاده در پژوهش حاضر به صورت $\left(\left|\psi^n - \psi^{n-1}\right| \le 10^{-6}\right)$ تعریف می‌شود که در آن ψ نماینده متغیرهای وابسته (u, v, w, T, ϕ) در معادلات غیرخطی جریان و n شماره تکرار در الگوریتم حل می‌باشد.

برای بررسی پیوستگی جریان از معیار عدد نادسن (Kn) استفاده می‌شود. با توجه به آنکه قطر نانوذرات اکسید تیتانیوم به کار رفته بین 20-60 نانومتر می‌باشد، عدد نادسن بین 0/01-0/03 به دست می‌آید که در محدوده جریان پیوسته قرار می‌گیرد (نادسن جریان پیوسته باید کمتر از 0/1 باشد).

با توجه به اینکه در حل تک فاز همگن، نانو سیال به صورت یک سیال با خواص ظاهری در نظر گرفته می‌شود، بنابراین می‌توان به مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای سیال تک فاز پرداخت. شکل 3 مقایسه نتایج حل تک فاز را با نتایج حل مارکوس و همکاران [24] نشان می‌دهد. نتایج آزمایشگاهی برای عدد ناسلت در طول کانال مستطیلی مایل با زاویه 30°، رینولدز جریان 500 و برای دو عدد رایلی مختلف ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌کنید نتایج حاصل از حل عددی حاضر تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد.

همچنین نتایج حل عددی مطابق شکل 4 با نتایج عددی ایچیمیا و ماتسوشیما [25] در کانال مایل مستطیلی مقایسه شده است. مقایسه بیشینه شدت جریان ثانویه در طول کانال برای سیال تک فاز در $\mathrm{Re} = 100$، $\mathrm{Ri} = 2.2$ انجام شد و تطابق خوبی میان نتایج مشاهده می‌شود.

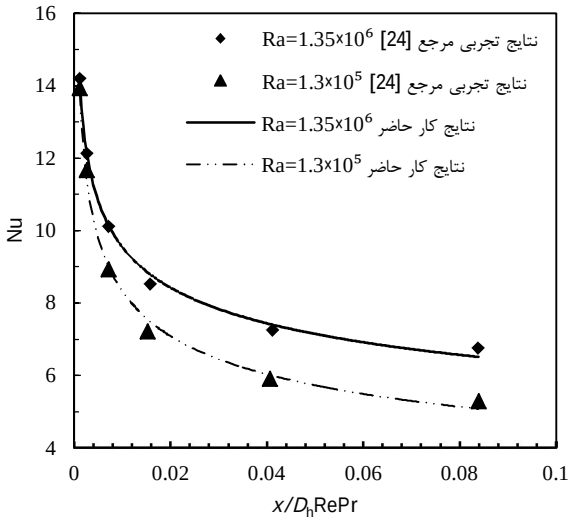
جهت حصول اطمینان از دقت تحلیل دوفازی انجام شده، مقایسه نتایج ضریب انتقال حرارت جابجایی با داده‌های آزمایشگاهی ناسن و همکاران [26] برای جریان جابجایی اجباری در کانال مربعی ($AR = 1$) انجام شد (شکل 5). این مقایسه نشان از دقت قابل‌قبول نتایج عددی دارد. به علاوه مشاهده می شود که تحلیل انجام شده به روش تک فاز از دقت کافی در قیاس با



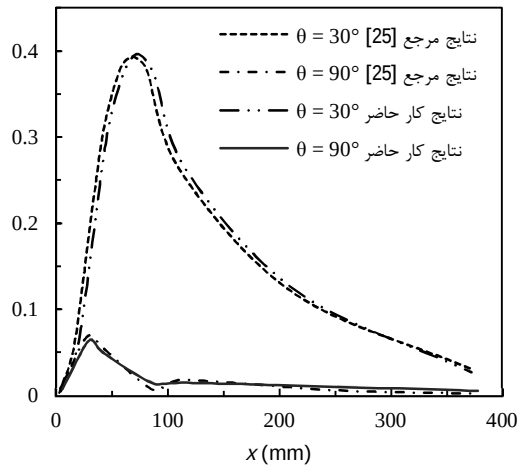
شکل 2 بررسی استقلال حل از شبکه برای h با $\mathrm{Re} = 700$، $Q_r = 1$، $\mathrm{Gr} = 5\times10^5$، $AR = 0.5$، $\phi = 1\%$ و

1- Two-Way Coupling
2- Ansys CFX
3- Subroutines

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]



شکل 3 مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مارکوس و همکاران [24] در و برای دو عدد رایلی مختلف $AR = 0.375$ ، $Re = 500$

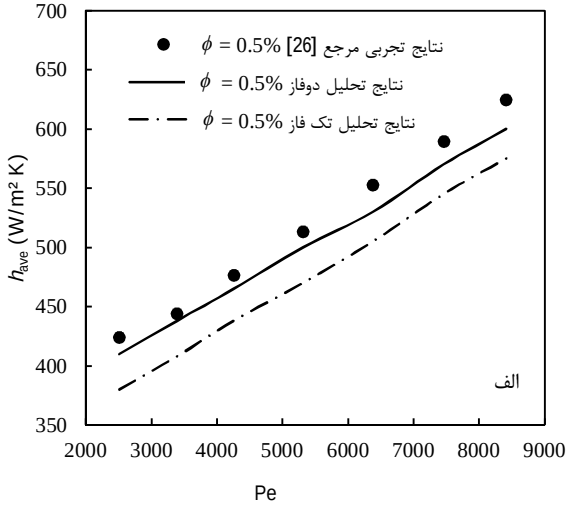


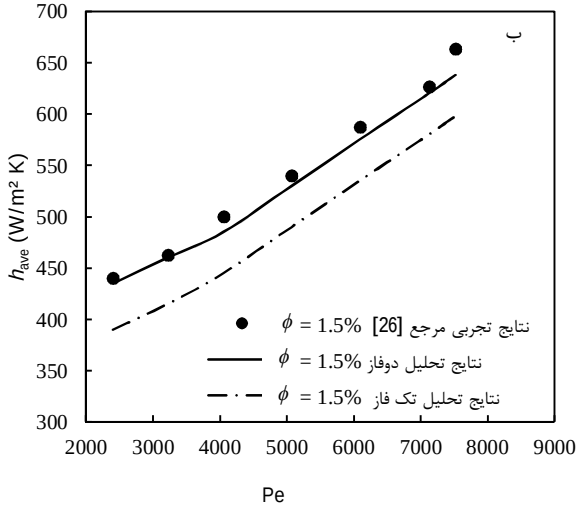
شکل 4 مقایسه شدت بیشینه جریان ثانویه با نتایج عددی ایچیمیا و ماتسوشیما[25] برای سیال تک فاز در $Re = 100$ ، $Ri = 2.2$

روش دو فاز برخوردار نیست. حداکثر خطای حاصل از حل دو فاز % 4/1 و حداکثر خطای حاصل از حل تک فاز % 11/5 است. بنابراین از روش تک فاز می‌توان به عنوان یک تخمین اولیه در پیش‌بینی رفتار نانو سیالات استفاده کرد، اما زمانی که تغییرات دمایی چشمگیر است و نیاز به پیش‌بینی دقیق رفتار نانو سیالات باشد، کارایی این روش پایین می‌آید. بنابراین در ارائه و تحلیل نتایج روش دو فاز مورد استفاده قرار گرفته است.

5- نتایج و بحث

با توجه به مطالب عنوان‌شده، اثر پنج پارامتر درصد حجمی، نسبت منظری، شرایط مرزی نامتقارن، تغییرات عدد گراشف و اندازه ذرات نانو بر روی ویژگی‌های جریان و مشخصات انتقال حرارت نانوسیال آب و اکسید تیتانیوم بررسی خواهد شد. در هر قسمت تلاش شده است که با انتخاب مقادیر مناسب برای هر متغیر، اثر پارامتر مورد نظر به خوبی در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که به جز در حالتی که اندازه ذرات به عنوان متغیر مطرح است، در تمامی بخش‌ها اندازه نانو ذرات 40 نانومتر در نظر گرفته شده است.





شکل 5 مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی ناسن و همکاران [26] برای جابجایی اجباری در کانال مربعی در الف) $\phi = 0.5\%$ ، ب) $\phi = 1.5\%$

5-1- اثر درصد حجمی نانو ذرات

در این قسمت برای حالتی که عدد رینولدز جریان 700، عدد گراشف 5×10^5، نسبت منظری 0/5 و شرایط مرزی متقارن می‌باشد، درصد حجمی نانو ذرات افزایش داده شده است و اثر تغییرات آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

شکل6 نمودار تغییرات ضریب اصطکاک در طول کانال را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک در ابتدای کانال از مقادیر بسیار زیاد که ناشی از ضخامت کوچک لایه مرزی است، به یک مقدار کمینه رسیده و سپس به دلیل پررنگ شدن نقش نیروی شناوری و افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. همچنین از نتایج چنین بر می‌آید که تغییرات غلظت نانو ذرات تأثیر قابل‌توجهی بر ضریب اصطکاک ندارد. شکل 7 نمودار تغییرات نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال به ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال پایه در طول کانال را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است افزایش درصد حجمی ذرات نانو، افزایش ضریب انتقال حرارت را نسبت به حالت پایه به دنبال خواهد داشت. این بهبود ضریب انتقال حرارت به گونه ایست که در ابتدای کانال اثر آن کمتر و با پیشروی در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]

طول کانال رفته‌رفته به دلیل افزایش اثر نیروی شناوری و حرکت بروانی ذرات این اثر بیشتر می‌شود. به طور مثال برای درصد حجمی % 0/5 افزایش ضریب انتقال حرارت در ابتدای کانال % 2/4 بوده که در انتهای کانال به % 9/4 می‌رسد. همچنین در غلظت % 2 بهبود ضریب انتقال حرارت جابجایی در ابتدای کانال % 9/9 و در انتهای کانال به %23 می‌رسد.

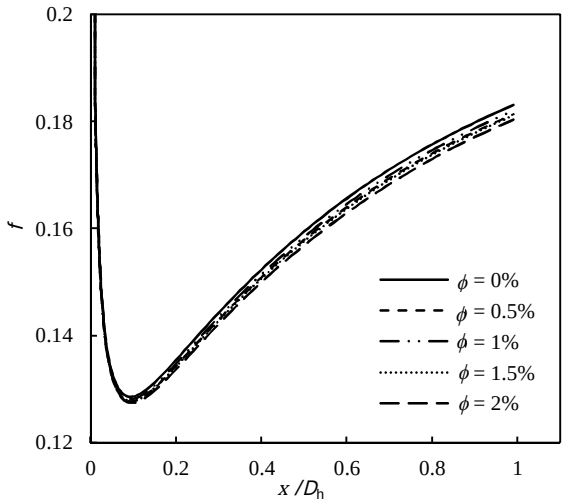
5-2- اثر نسبت منظری سطح مقطع

سپس اثر نسبت منظری سطح مقطع کانال بر روی جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب و اکسید تیتانیوم بررسی می‌شود. بدین منظور در حالتی که رینولدز جریان 300، عدد گراشف $4/5\times10^4$، درصد حجمی نانو ذرات % 1/5 و شرایط مرزی متقارن می‌باشد، تأثیر مقادیر مختلف نسبت منظری مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

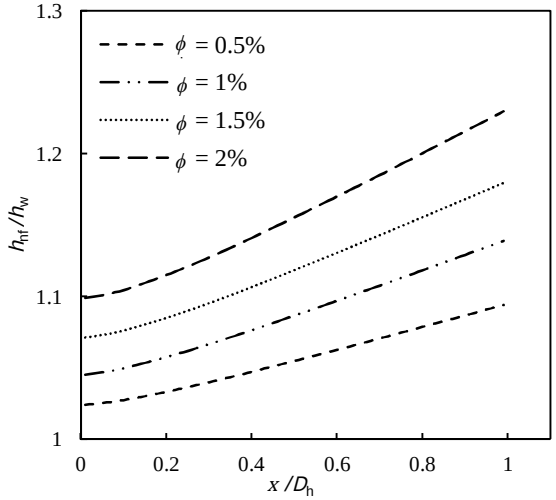
شکل 8 نمودار تغییرات ضریب اصطکاک را در طول کانال نشان می‌دهد. به وضوح مشخص است که این ضریب با کوچک شدن نسبت منظری افزایش می‌یابد. با نزدیک شدن دیواره‌های کانال به یکدیگر، اثر نیروی شناوری بیشتر شده، گرادیان‌های سرعت نزدیک دیواره افزایش یافته و تنش برشی دیواره بیشتر می‌شود، همچنین تعداد برخوردهای ذرات نانو با دیواره افزایش یافته و ضریب اصطکاک بیشتر می‌شود. شکل 9 نمودار تغییرات نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال به ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال پایه در طول کانال را برای مقادیر مختلف نسبت منظری نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، بهبود ضریب انتقال حرارت جابجایی با پیشروی در طول کانال رفته‌رفته بیشتر خواهد بود، که این امر برای مقاطع با نسبت منظری بالاتر، بیشتر است. دلیل این امر توزیع بهتر فاز گسسته بوده، پخش ذرات یکنواخت صورت گرفته و ضریب انتقال حرارت را با توان بیشتری بهبود می‌بخشد (متوسط بهبود انتقال حرارت در نسبت منظری 0/25 حدود % 14/9 و در نسبت منظری 1 در حدود % 15/5 است).

5-3- اثر شرایط مرزی نامتقارن

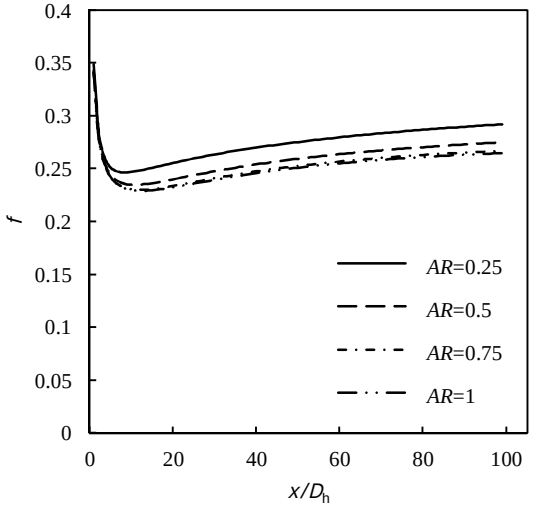
در این بخش اثر شرایط مرزی نامتقارن بر روی پروفیل‌های سرعت و دما و همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی بررسی می‌شود. شرایط به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که برای تمامی حالت‌ها، درصد حجمی نانو ذرات % 2، عدد گراشف 5×10^5، عدد رینولدز 700 و نسبت منظری 0/5 باشد. شرایط



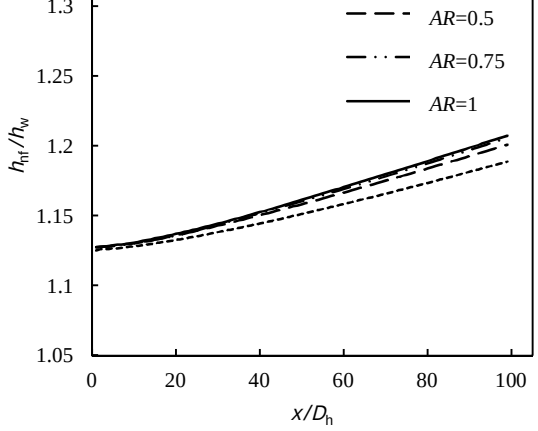
شکل 6 تغییرات ضریب اصطکاک در طول کانال برای مقادیر مختلف درصد حجمی نانو ذرات در شرایط $\mathrm{Re}=700$، $Q_r=1$، $\mathrm{Gr}=5\times10^5$ و $AR=0.5$



شکل 7 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در طول کانال برای مقادیر مختلف درصد حجمی نانو ذرات در شرایط $\mathrm{Re}=700$، $Q_r=1$، $\mathrm{Gr}=5\times10^5$ و $AR=0.5$



شکل 8 تغییرات ضریب اصطکاک در طول کانال برای مقادیر مختلف نسبت منظری نانو ذرات در شرایط $\mathrm{Re}=700$، $Q_r=1$، $\mathrm{Gr}=5\times10^5$ و $\phi=3\%$



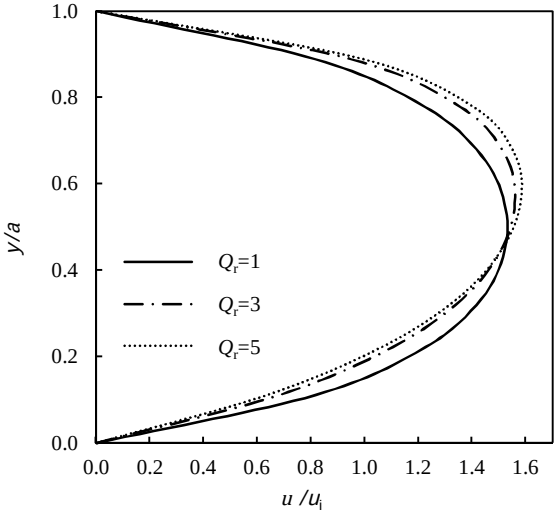
شکل 9 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در طول کانال برای مقادیر مختلف نسبت منظری نانو ذرات در شرایط $\mathrm{Re}=700$، $Q_r=1$، $\mathrm{Gr}=5\times10^5$ و $\phi=3\%$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]

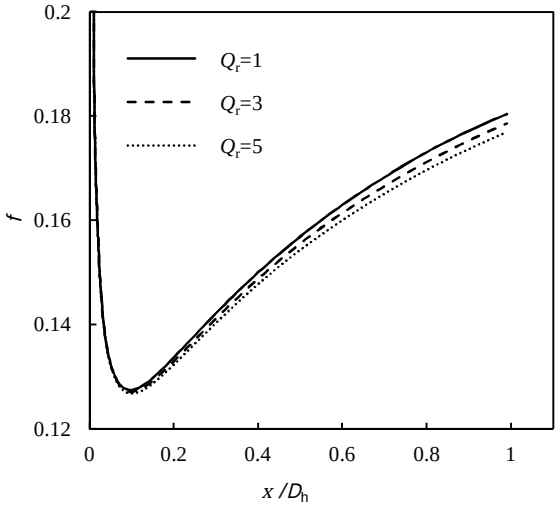
مرزی نیز مطابق با آنچه در شکل 1 نشان داده شده، در نظر گرفته شده است که در آن $Q_r = \frac{q_1''}{q_2''}$. بنابراین نتایج برای مقادیر مختلف نسبت Q_r ارائه شده است.

شکل 10 پروفیل‌های سرعت بی بعد را در مقطع کانال و در محلی که $x / D_h = 50$ است را برای مقادیر مختلف Q_r نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با زیادشدن نسبت Q_r بیشینه سرعت به سمت دیواره با شار حرارتی بیشتر متمایل می‌شود، که دلیل آن افزایش اثر نیروی شناوری در آن دیواره است. همچنین شکل 11 نمودار تغییرات ضریب اصطکاک در طول کانال را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود به طور کلی افزایش این ضریب کمی موجب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود (کاهش ضریب اصطکاک در حالتی که $Q_r = 5$ نسبت به حالتی که $Q_r = 1$ باشد، در حدود % 1/4 است).

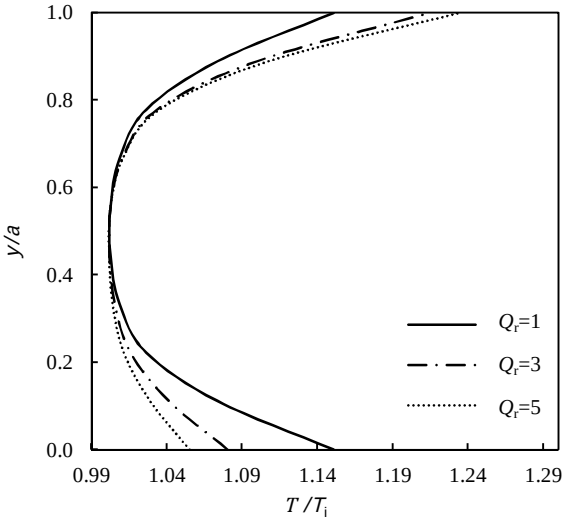
شکل 12 پروفیل‌های دمای بی بعد را در مقطع کانال و در محلی که $x / D_h = 50$ است را برای مقادیر مختلف Q_r نشان می‌دهد. همان طور که



شکل 10 پروفیل سرعت بی بعد در مقطع $x / D_h = 50$ برای مقادیر مختلف Q_r برای حالت $\mathrm{Re} = 700$، $\mathrm{Gr} = 5\times10^5$، $\phi = 1.5\%$ و $AR = 0.5$



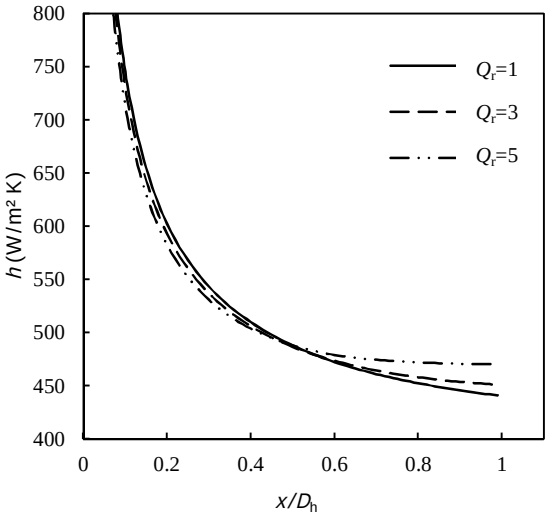
شکل 11 تغییرات ضریب اصطکاک در طول کانال برای مقادیر مختلف نسبت Q_r برای حالت $\mathrm{Re} = 700$، $\mathrm{Gr} = 5\times10^5$، $\phi = 1.5\%$ و $AR = 0.5$



شکل 12 پروفیل سرعت بی بعد در مقطع $x / D_h = 50$ برای مقادیر مختلف Q_r برای حالت $\mathrm{Re} = 700$، $\mathrm{Gr} = 5\times10^5$، $\phi = 1.5\%$ و $AR = 0.5$

انتظار می‌رود، بیشینه‌ی دما بر روی دیواره با شار حرارتی بیشتر اتفاق می‌افتد، که اثرات آن را می‌توان در انتقال حرارت از دیواره‌های مختلف که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت، دید.

شکل 13 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در طول کانال را نشان می‌دهد. همچنین جدول 1 مقادیر ضریب انتقال حرارت میانگین را در طول کانال برای نسبت‌های مختلف شار حرارتی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی به گونه ایست که برای مقادیر بزرگ‌تر Q_r، میزان انتقال حرارت در انتهای کانال بیشتر است. دلیل این امر ایجاد گرادیان دما و افزایش اثر نیروی ترموفورتیک می‌باشد. لازم به ذکر است که پروفیل‌های ارائه شده همه در ناحیه در حال توسعه قرار دارند، و شکل های ارائه شده تنها نمای تغییرات را در راستای y نمایش می‌دهد.



شکل 13 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در طول کانال برای مقادیر مختلف نسبت Q_r برای حالت $\mathrm{Re} = 700$، $\mathrm{Gr} = 5\times10^5$، $\phi = 1.5\%$ و $AR = 0.5$

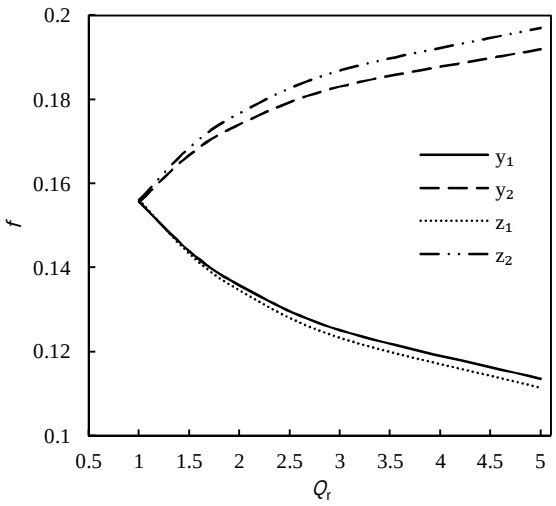
جدول 1 ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط برای مقادیر مختلف Q_r

Q_r	1	1/5	2	3	5
$h_{ave}\left(\mathrm{W/m^2K}\right)$	509/3	508/8	508	507/4	506/8

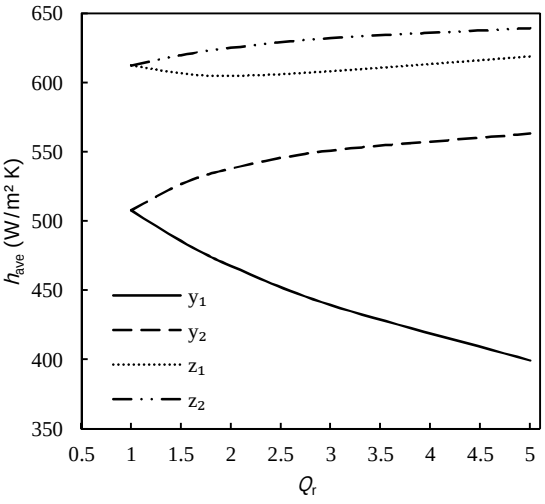
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]

حال اثر شار حرارتی نامتقارن در هر یک از دیواره‌ها به طور جداگانه بررسی می‌شود. به همین منظور شکل 14 تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای را بر روی چهار دیواره نسبت به مقادیر مختلف Q_r نشان می‌دهد. مطابق انتظار با افزایش نسبت شار ، دیواره‌های با شار کمتر، ضریب اصطکاک کمتری دارند و بلعکس، که این مسئله با توجه به تغییرات پروفیل سرعت نشان داده‌شده در شکل 8 قابل توجیه است. همچنین مشاهده می‌شود که بیشینه سرعت با افزایش هر چه بیشتر نسبت شارهای حرارتی به سمت دیواره‌های با شار بیشتر متمایل می‌شود.

همچنین شکل 15 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی را برای چهار دیواره بر حسب مقادیر مختلف نسبت شار نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود با زیادشدن نسبت شار حرارتی میزان انتقال حرارت بر روی دیواره‌های با شار بیشتر، افزایش، و بر روی دیواره‌های با شار کمتر، کاهش می‌یابد. اما با افزایش نسبت شار حرارتی بیشتر از 3 مشاهده می‌شود که بر خلاف انتظار انتقال حرارت بر روی دیواره z_1 کاهش پیدا نمی‌کند که امر به دلیل کوچک بودن طول دیواره و قرار گرفتن در معرض شار بالای دیواره‌های مجاور می‌باشد.



شکل 14 تغییرات ضریب اصطکاک میانگین با Q_r بر روی دیواره‌های مختلف کانال برای حالت $\mathrm{Re}=700$ ، $\mathrm{Gr}=5\times10^5$ ، $\phi=1.5\%$ و $AR=0.5$

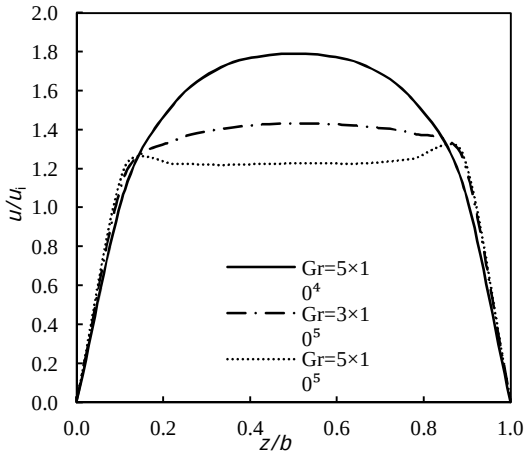


شکل 15 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین با Q_r بر روی دیواره‌های مختلف کانال برای حالت $\mathrm{Re}=700$ ، $\mathrm{Gr}=5\times10^5$ ، $\phi=1.5\%$ و $AR=0.5$

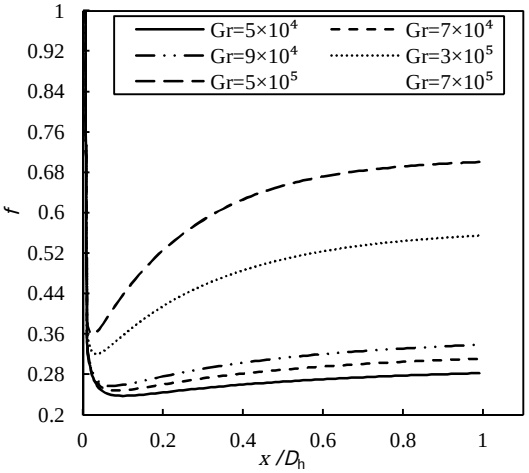
5-4- اثر تغییرات عدد گراشف

در این بخش به بررسی اثر تغییرات عدد گراشف برای حالتی که عدد رینولدز جریان 300، درصد حجمی ذرات نانو % 1/5، نسبت منظری 0/5 و نسبت شارهای حرارتی 1/5 در نظر گرفته شده است، پرداخته می‌شود..

شکل 16 پروفیل‌های سرعت را در مقطع $x/D_h=20$ برای مقادیر مختلف عدد گراشف در جایی که جریان در حال توسعه می‌باشد، نشان می‌دهد. همچنین شکل 17 تغییرات ضریب اصطکاک را در طول کانال نشان می‌دهد. همانطور که از شکل برمی‌آید هر چه عدد گراشف افزایش می‌یابد، ضریب اصطکاک بیشتر می‌شود، که این افزایش به واسطه زیادشدن اثر نیروی شناوری و غلبه جابجایی آزاد به جابجایی اجباری است که موجب افزایش گرادیان سرعت نزدیک دیواره می‌گردد. مشخص است که با بالا رفتن عدد گراشف توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی به تعویق می‌افتد. شکل‌های 18 و 19 پروفیل‌های دما در دو مقطع ابتدایی و انتهایی کانال و تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی را در طول کانال را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد گراشف جریان سریع‌تر میل به توسعه‌یافتگی حرارتی پیدا می‌کند، که در واقع این امر در ارتباط مستقیم با زیاد شدن عدد ریچاردسون و کمرنگ شدن جابجایی اجباری قرار دارد. همچنین افزایش عدد گراشف جریان، افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی را به دنبال خواهد داشت.

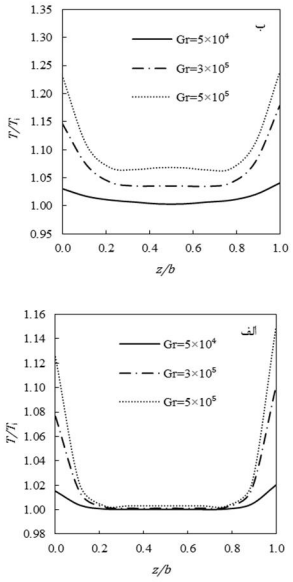


شکل 16 پروفیل سرعت در مقطع $x/D_h=20$ برای مقادیر مختلف عدد گراشف در شرایط $AR=0.5$ ، $\mathrm{Re}=700$ ، $Q_r=1.5$ و $\phi=1.5\%$

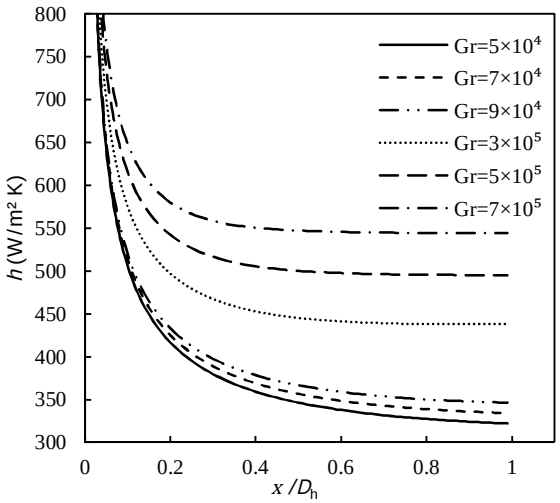


شکل 17 تغییرات ضریب اصطکاک در طول کانال برای مقادیر مختلف عدد گراشف در شرایط $AR=0.5$ ، $\mathrm{Re}=700$ ، $Q_r=1.5$ و $\phi=1.5\%$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]



شکل 18 پروفیل‌های دما برای مقادیر مختلف عدد گراشف در شرایط $AR = 0.5$ ، $\mathrm{Re} = 700$ ، $Q_r = 1.5$ و $\phi = 1.5\%$ ، الف) در $x / D_h = 20$ ، ب) در $x / D_h = 80$



شکل 19 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در طول کانال برای مقادیر مختلف عدد گراشف در شرایط $AR = 0.5$ ، $\mathrm{Re} = 700$ ، $Q_r = 1.5$ و $\phi = 1.5\%$

با توجه به مطالب بیان‌شده در مورد اثر تغییرات اعداد گراشف و رینولدز، می‌توان با توجه به تعریف عدد ریچاردسون، به بررسی روند بهبود انتقال حرارت پرداخت. شکل20 نسبت ضریب انتقال حرارت میانگین نانو سیال به ضریب انتقال حرارت سیال پایه در همان شرایط را نشان می‌دهد. نمودار برای سه مقدار مختلف عدد ریچاردسون، عدد رینولدز 300، درصد حجمی % 1 و نسبت منظری 0/5 ارائه شده است.

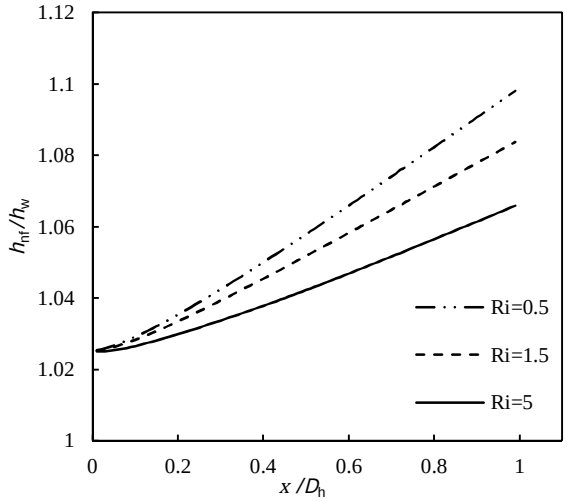
همان طور که مشاهده می‌شود افزایش عدد ریچاردسون روند بهبود ضریب انتقال حرارت را کند می‌کند، زیرا افزایش این ترم بی بعد، کاهش اثر جابجایی اجباری را به دنبال دارد. همچنین با توجه به شکل 21 که نحوه پخش ذرات را در همان شرایط در سطح مقطعی از کانال با $x / D_h = 50$ نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد که با افزایش عدد ریچاردسون و شدت گرفتن گرادیان‌های سرعت در نزدیکی دیواره، ذرات از دیواره‌ها فاصله گرفته و به سمت مرکز کانال متمایل می‌شوند. همین امر موجب می‌شود که در مقادیر پایین‌تر عدد ریچاردسون شاهد بهبود بیش‌تر انتقال حرارت در جریان نانو سیال باشیم.

این توزیع ذرات مربوط به دیفیوژن براونی، دیفیوژن در اثر پدیده ترموفورسیس و پخش در اثر القای برشی می‌باشد که مجموع این شارهای جرمی طبق معادله بقای جرم برای فاز ذره ثابت می‌باشد. در عین حال این حضور ذرات در نواحی مرکزی کانال، به دلیل کسر حجمی بسیار پایین تاثیری بر روی پیوستگی جریان نخواهد داشت ($\mathrm{Kn} < 0.1$).

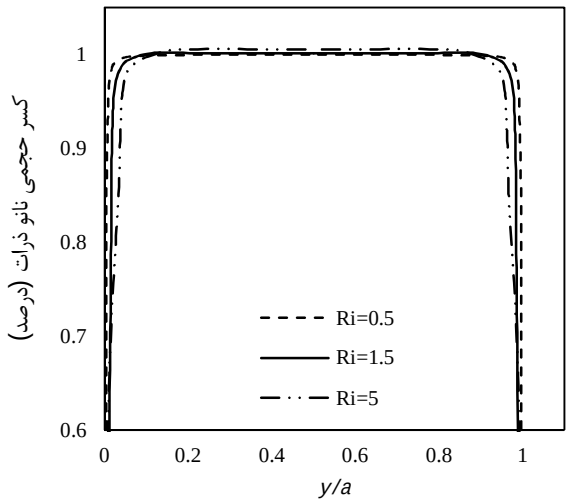
5-5- اثر تغییر اندازه ذرات نانو

در این قسمت برای حالتی که عدد رینولدز جریان 700، عدد گراشف 5×10^5، نسبت منظری 0/5، درصد حجمی ذرات نانو 2% و شرایط مرزی متقارن می‌باشد، اندازه ذرات نانو تغییر داده شده است. نتایج به دست آمده به صورت جداول 2 و 3 ارائه شده‌اند.

جدول 2 اثر تغییرات اندازه ذرات نانو بر ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می شود، افزایش قطر ذرات به



شکل 20 نسبت تغییرات ضریب انتقال حرارت نانو سیال به ضریب انتقال حرارت سیال پایه برای مقادیر مختلف عدد ریچاردسون در شرایط $AR = 0.5$ ، $\mathrm{Re} = 300$ ، $\phi = 1\%$ و $Q_r = 1$



شکل 21 نحوه پخش ذرات نانو برای مقادیر مختلف عدد ریچاردسون برای شرایط $AR = 0.5$ ، $\mathrm{Re} = 300$ ، $Q_r = 1$ و $\phi = 1\%$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]

دلیل کاهش نسبت سطح به حجم، کاهش میزان انتقال حرارت را به دنبال خواهد داشت.

جدول 3 تغییرات ضریب اصطکاک متوسط را نسبت به تغییرات اندازه ذرات نشان می‌دهد. از داده‌های ارائه شده به خوبی مشخص است که هر چه اندازه ذرات بزرگتر می‌شوند، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از ذرات کوچکتر بهرمندی از انتقال حرارت بیشتر و ضریب اصطکاک کمتر را به دنبال خواهد داشت. مسلما این مهم کمتر شدن ساییدگی و گرفتگی کانال را نیز به دست می‌دهد.

6- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر مدل‌سازی جریان آرام جابجایی مختلط نانو سیال آب-اکسید تیتانیوم در کانال قائم مستطیلی انجام گرفته است. شبیه‌سازی جریان به روش دو فاز اویلر-لاگرانژ صورت پذیرفته است. اثر تغییرات غلظت نانو ذرات، نسبت منظری سطح مقطع کانال و همچنین تأثیر شرایط مرزی نامتقارن مورد بررسی قرار گرفته است. جمع‌بندی نتایج حاصل به صورت زیر می‌باشد:

1- در شبیه‌سازی جریان به روش تک فاز همگن مشخص شد که از این روش می‌توان به عنوان یک تخمین اولیه در پیش‌بینی رفتار نانو سیالات استفاده کرد، اما زمانی که تغییرات دمایی چشمگیر است و نیاز به پیش‌بینی دقیق رفتار نانو سیالات باشد، این روش از دقت کمی برخوردار است. همچنین در مقایسه روش‌های تک فاز و دو فاز مشخص شد که نتایج حاصل از شبیه سازی با روش دو فاز نتایج دقیقتری را نسبت به روش تک فاز در اختیار می‌گذارد.

2- افزایش درصد حجمی نانو ذرات افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی را به همراه خواهد داشت، این بهبود به گونه‌ای است که اثر آن در ابتدای کانال کمتر و با پیشروی در طول کانال به دلیل افزایش اثر نیروی شناوری و حرکت براونی ذرات این اثر بیشتر می‌شود. همچنین از نتایج چنین استنباط شد که افزایش غلظت نانو ذرات اثر قابل‌توجهی بر ضریب اصطکاک ندارد.

3- با تغییر نسبت منظری سطح مقطع کانال مشاهده گردید که ضریب اصطکاک در نسبت‌های پایین، به دلیل افزایش اثر نیروی شناوری و قوی تر شدن گرادیان‌های سرعت در نزدیکی دیواره، افزایش می‌یابد. درحالی‌که اثر نانو ذرات در بهبود انتقال حرارت در نسبت‌های منظری بالاتر، بیشتر به چشم می‌خورد.

جدول 2 ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط برای مقادیر مختلف d_p

d_p (nm)	20	30	40	60
$h_{ave}\left(W/m^2K\right)$	541/4	523/5	509/2	483/2

جدول 3 ضریب اصطکاک متوسط برای مقادیر مختلف d_p

d_p (nm)	20	30	40	60
f_{ave}	0/041	0/04106	0/04118	0/04141

4- به واسطه ایجاد شرایط مرزی نامتقارن، مشاهده گردید که افزایش نسبت شار حرارتی واردشده به دیواره‌ها، بیشینه پروفیل‌های سرعت و دما را به سمت دیواره‌های با شار حرارتی بیشتر سوق می‌دهد، و انتقال حرارت از طریق آن دیوارها بیشتر می‌شود. این در حالی است که این امر اثر چندانی بر ضریب انتقال حرارت میانگین نخواهد داشت، اما اندکی ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد.

5- تاثیر عدد بی‌بعد گراشف به گونه‌ای است که افزایش آن بهبود ضریب انتقال حرارت را به دنبال خواهد داشت. همچنین، بهبود ضریب انتقال حرارت در اعداد ریچاردسون پایین‌تر که اثر جابجایی اجباری پررنگ تر است، بیشتر خواهد بود. این مهم به واسطه الگوی پخش ذرات متفاوت در ریچاردسون‌های پایین‌تر اتفاق می‌افتد.

6- افزایش قطر ذرات به دلیل کاهش نسبت سطح به حجم، کاهش انتقال حرارت را به دنبال خواهد داشت. همچنین بزرگتر شدن ذرات نانو ضریب اصطکاک را اندکی افزایش می‌دهد.

7- فهرست علائم

AR	نسبت منظری (=a/b)
a	طول سطح مقطع (m)
b	عرض سطح مقطع (m)
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
C_C	ضریب کانینگهام
C_S	ضریب
C_t	ضریب
C_m	ضریب
d_p	قطر ذرات (nm)
d_{ij}	تانسور تغییر شکل
D_h	قطر هیدرولیکی (m) ($=2a.b/(a+b)$)
f	ضریب اصطکاک
F	نیرو (N)
F_B	نیروی براونی (N)
F_D	نیروی دراگ (N)
F_G	نیروی گرانش (N)
F_L	نیروی لیفت (N)
F_P	نیروی گرادیان فشار (N)
F_T	نیروی ترموفورتیک (N)
F_V	نیروی جرم مجازی (N)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
Gr	عدد گراشف ($=g\beta\, q''D_h^4/k\upsilon^2$)
h	ضریب انتقال گرمای جابجایی ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
k	هدایت گرمایی ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]

k_B	ضریب بولتزمان
Kn	عدد نادسن ($=\lambda / d_p$)
K_s	ضریب
m	جرم (kg)
n	شماره تکرار
Nu	عدد ناسلت ($=hD_h / k$)
p	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Pr	عدد پرانتل ($=\upsilon / \alpha$)
Pe	عدد پکلت ($=\mathrm{Re.Pr}$)
q''	شار گرما ($W.m^{-2}$)
Q_r	نسبت شار حرارتی دیواره‌ها ($=q_1.q_2^{-1}$)
Ra	عدد رایلی ($=\mathrm{Gr.Pr}$)
Ri	عدد ریچاردسون ($=\mathrm{Gr.Re^{-2}}$)
Re	عدد رینولدز ($=vD_h / \upsilon$)
S_0	شدت طیفی پایه
S_{nij}	شدت طیفی
S_m	ترم چشمه
S_e	ترم چشمه
t	زمان (s)
T	دما (K)
u, v, w	سرعت در سه راستا (ms^{-1})
x, y, z	جهات مختصات

علایم یونانی

α	ضریب پخش گرما (m^2s^{-1})
β	ضریب انبساط حجمی(K^{-1})
δ_{ij}	تابع دلتای کرونکر
ϕ	کسر حجمی ذرات نانو
λ	مسیر آزاد میانگین (m)
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
θ	زاویه انحنای کانال
ρ	چگالی ($kg.m^{-3}$)
υ	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
ψ	متغیر وابسته در معادلات دیفرانسیل پاره‌ای
ζ_i	عدد تصادفی گوس

زیرنویس‌ها

ave	مقدار متوسط
f	سیال
i	شرایط ورودی
nf	نانو سیال
p	ذرات
w	آب

8- مراجع

[1] J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed. Oxford, UK: Clarendon Press, 1891.

[2] S. U. S. Choi and J. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," *ASME*, vol. 231 FED, pp. 99–105, NY, USA, 1995.

[3] C. T. Nguyen, G. Roy, C. Gauthier, and N. Galanis, "Heat transfer enhancement using Al2O3–water nanofluid for an electronic liquid cooling system," *Appl. Therm. Eng.,* vol. 27, no. 8–9, pp. 1501–1506, Jun. 2007.

[4] S. Z. Heris, M. N. Esfahany, and G. Etemad, "Numerical Investigation of Nanofluid Laminar Convective Heat Transfer through a Circular Tube," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.,* vol. 52, no. 11, pp. 1043–1058, Sep. 2007.

[5] K. Khanafer, K. Vafai, and M. Lightstone, "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 46, no. 19, pp. 3639–3653, Sep. 2003.

[6] I. C. Bang and G. Heo, "An axiomatic design approach in development of nanofluid coolants," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 1, pp. 75–90, Jan. 2009.

[7] I. Pishkar and B. Ghasemi, "Effect of nanoparticles on mixed convection heat transfer in a horizontal channel with heat source," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 95–108, 2012. (In Persian)

[8] S. Mirmasoumi and A. Behzadmehr, "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model," *Appl. Therm. Eng.,* vol. 28, pp. 717–727, 2008.

[9] Y. He, Y. Men, Y. Zhao, H. Lu, and Y. Ding, "Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO2 nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions," *Appl. Therm. Eng.,* vol. 29, no. 10, pp. 1965–1972, Jul. 2009.

[10] W. Peng, B. Minli, L. Jizu, Z. Liang, C. Wenzheng, and L. Guojie, "Comparison of Multidimensional Simulation Models for Nanofluids Flow Characteristics," *Numer. Heat Transf. Part B Fundam.,* vol. 63, no. 1, pp. 62–83, Jan. 2013.

[11] I. Vasefi and M. Alizadeh, "A Numerical Investigation of Cuo-Water Nanofluid in Different Geometries by Two-Phase Euler-Lagrange Method," *World Appl. Sci. J.,* vol. 26, no. 10, pp. 1323–1329, 2013.

[12] M. M. Heyhat and F. Kowsary, "Effect of Particle Migration on Flow and Convective Heat Transfer of Nanofluids Flowing Through a Circular Pipe," *J. Heat Transfer,* vol. 132, no. 6, p. 062401, 2010.

[13] J. Buongiorno, "Convective Transport in Nanofluids," *J. Heat Transfer,* vol. 128, no. 3, pp. 240-250, 2006.

[14] B. R. Baliga, Control-volume finite element methods for fluid flow and heat transfer, in: W.J. Minkowycz, E.M. Sparrow , *Advances in Numerical Heat Transfer,* vol. 1, Taylor & Francis, pp. 97–136, New York, 1996.

[15] C. M. Rhie and W. L. Chow, "Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation," *AIAA J.,* vol. 21, no. 11, pp. 1525–1532, Nov. 1983.

[16] M. Corcione, "Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids," *Energy Convers. Manag.,* vol. 52, no. 1, pp. 789–793, 2011.

[17] Q. Zhou and M. A. Leschziner, "An improved particle-locating algorithm for Eulerian-Lagrangian computations of two-phase flows in general coordinates," *Int. J. Multiph. Flow,* vol. 25, no. 5, pp. 813–825, 1999.

[18] H. Ounis, G. Ahmadi, and J. B. McLaughlin, "Brownian diffusion of submicrometer particles in the viscous sublayer," *J. Colloid Interface Sci.,* vol. 143, no. 1, pp. 266–277, 1991.

[19] P. G. Saffman, "The lift on a small sphere in a slow shear flow," *J. Fluid Mech.,* vol. 22, no. 02, pp. 385–400, Jun. 1965.

[20] C. T. Crowe, J. D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, and Y. Tsuji, *Multiphase Flows with Droplets and Particles, Second Edition*. CRC Press, 2011.

[21] A. Li and G. Ahmadi, "Dispersion and Deposition of Spherical Particles from Point Sources in a Turbulent Channel Flow," *Aerosol Sci. Technol.,* vol. 16, no. 4, pp. 209–226, Jan. 1992.

[22] L. Talbot, R. K. Cheng, R. W. Schefer, and D. R. Willis, "Thermophoresis of particles in a heated boundary layer," *J. Fluid Mech.,* vol. 101, no. 04, pp. 737–758, Apr. 1980.

[23] W. Ranz and W. Marshall, "Evaporation from drops," *Chem. Eng. Prog,* vol. 48, no. 3, pp. 141–146, 1952.

[24] S. M. Morcos, M. M. Hilal, M. M. Kamel, and M. S. Soliman, "Experimental Investigation of Mixed Laminar Convection in the Entrance Region of Inclined Rectangular Channels," *J. Heat Transfer,* vol. 108, no. 3, pp. 574–579, 1986.

[25] K. Ichimiya and Y. Matsushima, "Performance evaluation of mixed convection in an inclined square channel with uniform temperature walls," *Int. J. Heat Mass Transf.,* vol. 52, no. 7–8, pp. 1802–1810, Mar. 2009.

[26] T. H. Nassan, S. Z. Heris, and S. H. Noie, "A comparison of experimental heat transfer characteristics for Al_2O_3/water and CuO/water nanofluids in square cross-section duct," *Int. Commun. Heat Mass Transf.,* vol. 37, no. 7, pp. 924–928, 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.3.6]