نشریه مهندسی مکانیک ایران، دوره 27، شماره 4، شماره پیاپی 81، زمستان 1404،
انجمن مهندسان مکانیک ایران
مقاله علمی پژوهشی

DOI: 10.30506/ijmep.2025.2061861.2018

شبیه سازی عددی جابه‌جایی ترکیبی با پرش‌های دمایی و سرعتی جریان نانوسیال در یک میکروکانال

کورش جواهرده[1]

علیرضا اسدی صدیق[2]

در این مقاله شبیه‌سازی عددی رفتار جابه‌جایی ترکیبی دو نانوسیال TiO_2 و ZnO در میکروکانال با مقطع مستطیلی و رژیم جریان آرام مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات حاکم بر این مقاله به اختصار عبارتند از معادله پیوستگی، مومنتوم در دو راستا، انرژی و... . نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب- TiO_2 با افزایش کسر حجمی حدود ۰/۸۵% افزایش می‌یابد که این افزایش در نانوسیال آب – ZnO به ۱٪ می‌رسد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت نانو سیال آب- دی اکسید تیتانیوم با افزایش عدد رینولدز حدود ۹٪ افزایش پیدا می‌کند درحالی‌که این افزایش از ۳۰۰ =Re به Re=۱۴۶۰، به ۱۳۶٪ می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: جابه‌جایی ترکیبی، نانوسیال، میکروکانال، عدد ریچاردسون، عدد گراشف، عدد نادسن.

۱. مقدمه

افزایش بازدهی دستگاه‌های سرمایشی و گرمایشی همواره در بین دانشمندان از اهمیت بالایی برخوردار بوده است[۱-۲]. کارآیی میکروکانال‌ها در پژوهش های بسیاری اثبات شده است[۳-۸]. خنک‌کاری قطعات الکترونیکی کوچک یکی از کاربرد های میکروکانال‌ها است[۹]. کاربرد دیگر استفاده از میکروکانال در ساخت دستگاه های میکروسیال مورد استفاده در علم پزشکی است[۱۰]. انتقال حرارت جابجایی ترکیبی به دلیل فعال شدن هم‌زمان نیروی شناوری و نیروی برشی یا نیروی اینرسی ایجاد می‌شود [۱۱]. برای تحقیق این مورد، دانشمندان از تعلیق ذرات ریز استفاده می‌کنند که اولین بار حدود یک قرن پیش توسط ماکسول انجام گرفت[۱۲]. اصطلاح نانوسیال نخستین بار توسط چویی [۱۳] در سال ۱۹۹۵ نامیده شد. از یک دهه گذشته، نشریات پژوهشی کاربرد نانو سیال‌ها را به دو روش عددی و تجربی معرفی کردند. [۱۴,۱۵]

[1] دانشجوی دکتری پردیس دانشگاه گیلان ، رشت، ایران، Alireza_asadi90@yahoo.com

[2] استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان ، رشت، ایران،(نویسنده مسئول Javaherdeh@guilan.ac.ir)

۲. پیشینه تحقیق

هینوجوسا و همکاران [16] تحلیل‌هایی را روی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی با جریان آشفته، جریان هوا در یک محفظهٔ هواکش انجام داد. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از ۲/۲ تا ۳/۴ W/m^2K متغیر بود و هنگام افزایش اعداد ریلی و رینولدز افزایش یافت. شاهی و همکاران [17] مطالعه‌ای بر روی مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان جابه‌جایی مختلط با استفاده از نانوذرات مس و آب به‌عنوان سیال پایه نانوسیال در یک حفرهٔ مربعی تهویه‌شده انجام دادند. افزایش غلظت نانوذره جامد، افزایش عدد ناسلت میانگین در سطح قطعه گرم که با کاهش متوسط دما مرتبط است را ارائه کرد. نسان و همکاران [18] تحقیقی در مورد انتقال گرما در کانال مس عرضی مربعی شکل با نانوسیالات ارائه کردند. نانوسیال مونوکسیدمس افزایش انتقال حرارت بیشتری را در مقایسه با نانو سیال آلومینا نشان داد. رستمانی و همکاران [19] یک مطالعه عددی در مورد جریان نانوسیال آشفته و حجم‌های مختلف کسرحجمی نانوذرات انجام دادند. با ثابت نگه داشتن غلظت حجمی و عدد رینولدز ثابت، به‌نظر می‌رسد که اثر نانوذرات CuO عدد ناسلت میانگین را افزایش می‌دهد. لطفی و همکاران [20] مطالعهٔ جابه‌جایی اجباری را در لوله‌های افقی که در آن‌ها نانوسیال جریان دارد را انجام دادند. مقایسه با استفاده از مقادیر تجربی نشان داد که ترکیبی از جابه‌جایی آزاد و اجباری دقیق‌تر است. یونگ و همکاران [21] رفتار انتقال حرارت و پارامترهای اصطکاک نانوسیال جاری در میکروکانال‌های مستطیلی شکل را بررسی کردند. هرچه عدد رینولدز بالاتر باشد، عدد ناسلت میانگین در رژیم آرام بیشتر است. عارف‌منش و محمود [۲۲] رژیم جابه‌جایی ترکیبی آرام در یک حفرهٔ مربع شکل را با دو مدل ویسکوزیته بررسی کردند. برای دو مدل ویسکوزیته مورد استفاده، تفاوت افزایش عدد ناسلت میانگین در حفره، معنی‌دار بودند. هو و چن [23] تجزیه‌وتحلیل عددی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی و اثرات ناشی از عدم قطعیت ویسکوزیته و هدایت حرارتی در یک محفظهٔ مربعی را پیشنهاد کرد. استفاده از نانوسیال سبب افزایش انتقال حرارت هدایتی گردید. ژوان ولی [24, 25] اولین رابطهٔ تجربی برای عدد ناسلت میانگین نانوسیال‌های آب– مـس، آب-اکسید تیتانیوم و آب -اکسید آلومینیوم را ارائه کردند. بهزادمهر و همکاران [26] جابه‌جایی اجباری در جریان مغشوش نانو سیال در لوله‌ای با سطح مقطع دایره با استفاده از تقریب دوفازی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها اولین بار مدل مخلوط دو فازی را برای مطالعه نانوسیال به کار بردند. مقایسهٔ نتایج آن‌ها با نتایج تجربی نشان داد که مدل مخلوط بسیار دقیق‌تر از مدل تک فازی است. ابو- نادا [۲۷] نانوسیال آب–اکسید آلومینیوم را در یک مجرای دولوله‌ای با روش تک‌فازی مورد مطالعه قرار داده است. وی از مدل ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی متغیر برای ارزیابی افزایش انتقال حرارت (افزایش عدد ناسلت میانگین) استفاده کرد. استفاده از نانوسیال سبب افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی می‌گردد. این نتیجه در پژوهش‌های بسیاری نشان داده شده است[۲۹,۲۸]. آنوپ و همکاران [۳۰] ویژگی‌های انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آب و آلومینا را در یک جریان آشفته در آزمایشگاه بررسی کردند، با بررسی چهار کسر حجمی تفاوت، کسر حجمی چهار درصد را دارای میزان انتقال حرارت بالاتر گزارش نمودند. تاکنون تأثیر همزمان چندین پارامتر از قبیل حرکت براونی و نوع سیال پایه و جنس نانوذره، در نظر گرفته نشده‌اند. در این مقاله، بررسی عددی رفتار جابه‌جایی ترکیبی دو نانوسیال مختلف TiO_2 و ZnO در میکروکانال با مقطع مستطیلی در رژیم جریان آرام مورد بررسی قرار گرفته است؛ زیرا چنین ذراتی با جنس‌های متفاوت از قبیل Cu, Fe CuO , TiO_2 , SiC , TiC, Ag , Au و Al_2O_3 متناوباً در تحقیقات نانوسیالی به‌کار

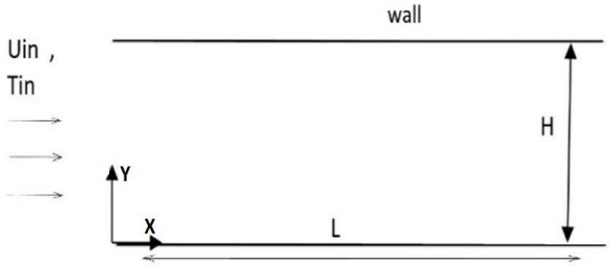
می‌روند. حرکت سیال در مجراهای با ابعاد میکرو، مستلزم انتخاب شرایط مرزی دقیق‌تر (برخلاف شرایط متداول) است. لذا در حل معادلات حاکم بر جریان نانوسیال در میکروکانال‌ها، علاوه بر اعمال خواص ترموفیزیکی دقیق نانوسیال، بایستی شرایط لغزش و پرش دمایی را در جدارهٔ میکروکانال برای نانوسیال در نظر گرفت. نوآوری این تحقیق بررسی تغییرات انتقال حرارت ترکیبی با به‌کار بردن نانوسیال‌های $TiO_2 - ZnO$ برمبنای آب درمیکروکانال با مقطع مستطیلی است.

۳. مسئله مورد مطالعه

میکروکانالی با سطح مقطع مستطیل (که در شکل ۱ نشان داده شده است)، به طول ۱۰۰ میکرومتر و عرض ۵۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. (کانال با تفاوت طول و عرض نشان‌دهندهٔ مقطع مستطیلی است) جریان با رژیم آرام (فرض می‌شود) با سرعت و دمای مشخص وارد میکروکانال شده و به‌صورت پایا و متقارن است. برای سادگی جریان به‌صورت دو بعدی در نظر گرفته می‌شود. جریان در طول محور x در نظر گرفته شده و طول کانال ۲۰ برابر عرض انتخاب شده تا در خروجی به جریان توسعه‌یافته هیدرولیکی برسد و شرایط خروجی و محوری به‌صورت عددی محاسبه شده‌است. در ورودی میکروکانال پروفیل‌های سرعت یکنواخت (V_0) و درجه حرارت (T_0) به‌صورت ثابت فرض شده در فصل مشترک جامد - مایع سرعت در راستای y ، صفر است. پرش دمای جریان نانو سیال مجاور دیوار، متناسب با گرادیان‌های دما و سرعت نرمال در فصل مشترک دیوار- سیال است و دمای ثابت برابر با دمای ورودی سیال در میکروکانال در دیواره به کار برده شده است. وجود پرش دمایی به علت اختلاف دمای مولکول‌های نانوسیال که در مجاورت دیواره میکروکانال هستند با دمای دیواره رخ می‌دهد. [۳۱] با داشتن عدد نادسن بزرگ‌تر از ۰/۰۱ شرط لغزش در جریان پیوستار برقرار است. قسمتی از شبکه محاسباتی مسئله در شکل (۲) ارائه شده است. خواص آب و نانو سیال‌های TiO_2 و ZnO در جدول (۱) آورده شده است[۳۲]. با توجه به ثابت بودن دمای دیواره و تغییرات ناچیز نانوسیال در حین فرایند تبادل گرما، فرض ثابت ماندن خواص نانوسیال می‌تواند منطقی باشد.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی سیال پایه (آب) و نانو ذرات جامد ZnO [۲۵], Tio_2 [۲۴]

مشخصات	آب	نانوذره (TiO_2)	نانوذره (ZnO)
ρ (kg/m^3)	۹۹۷/۱	۴۲۵۰	۵۶۰۰
C_p (J/kg.K)	۴۱۷۹	۶۸۶/۲	۴۵۹/۲
K (W/m. K)	۰/۶۱۳	۸/۹۵۳۸	۱۳
$\alpha \times 10^7$	۱/۴۷	۳۰/۷	۴۶/۸
$\beta \times 10^5$	۲۱	۰/۹	۰/۷۳



شکل ۱- **شماتیکی از میکروکانال مستطیلی دوبعدی**

۴. روش حل عددی

۱.۴ معادلات حاکم و فرضیات

معادلات حاکم بی بعد شده برای تشریح جریان سیال و انتقال حرارت در میکروکانال و مختصات دکارتی، به شکل تانسورهای زیر تشریح می‌شود [۳۳]:

(۱) معادله پیوستگی
$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

معادله مومنتم در راستای X:

$$\frac{\partial}{\partial X_j}\left(U.U_j\right) = \frac{1}{Re_{nf}}\left(\frac{\partial^2 U}{\partial {X^2}_j}\right) - \frac{\partial p}{\partial X} \quad (۲)$$

معادله مومنتم در راستای Y:

$$\frac{\partial}{\partial X_j}\left(V.U_j\right) = \frac{1}{Re_{nf}}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial {X^2}_j}\right) - \frac{\partial p}{\partial Y} \quad (۳)$$

معادله انرژی سیال:

$$\frac{\partial}{\partial X_j}\left(\rho.U_j.\theta\right) = \frac{1}{Pe_{nf}}\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial {X^2}_j}\right) + \frac{Ec}{Re} \times \Omega^* \quad (۴)$$

و Ω^* و θ عبارتند از:

$$\Omega^* = 2\left[\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Y}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X}\right)^2 \quad (۵)$$

$$\theta = \frac{T - T_{in}}{T_{wall} - T_{in}} \quad (۶)$$

رابطه اصطکاک سطحی عبارت است از:

$$c_f = \frac{2\tau_w}{\rho \tilde{U}_\infty^2} \quad (۷)$$

که در آن داریم:

$$\tau_w = \mu\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{x}} \quad (۸)$$

$$\widetilde{U}_{\infty} = \frac{\nu_{nf} Gr^{\frac{1}{2}} \tilde{x}}{L} \quad (۹)$$

اعداد رینولدز، ریچاردسون، گراشف، پرانتل، پکله و اکرت به‌ترتیب به‌صورت زیر تعریف می‌شوند [۳۱]:

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} \cdot U_{in} \cdot D_h}{\mu_{nf}} \quad (۱۰)$$

$$Ri_{nf} = \frac{Gr_{nf}}{{Re_{nf}}^2} \quad (۱۱)$$

$$Gr_{nf} = \frac{{\rho_{nf}}^2 {D_h}^3 g\beta(T_{wall} - T_{in})}{{\mu_{nf}}^2} \quad (۱۲)$$

$$Pr_{nf} = \frac{\mu_{nf} \cdot (Cp)_{nf}}{K_{nf}} \quad (۱۳)$$

$$pe_{nf} = Re_{nf} . Pr_{nf} \quad (۱۴)$$

$$Ec_{nf} = \frac{{u^2}_{in}}{{C_p}_{nf} . (T_{wall} - T_{in})} \quad (۱۵)$$

خواص نانو سیال‌ها نیز از روابط زیر محاسبه می‌شوند[32, 34]:

چگالی:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (۱۶)$$

ضریب هدایت حرارتی (برای محدوده دمایی 20 تا 71 درجه سلسیوس معتبر است):

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64{,}7\varphi^{0{,}746}\left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0{,}369}\left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0{,}7476} {Pr_f}^{0{,}9955} \times {Re_f}^{1{,}2321} \quad (۱۷)$$

ظرفیت گرمایی ویژه:

$$(\rho . c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho . c_p)_f + \varphi(\rho . c_p)_p \quad (۱۸)$$

ویسکوزیته نانوسیال:

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \varphi)^{2{,}5}} \cdot \mu_f \quad (۱۹)$$

ضریب پخش حرارتی نانوسیال:

$$(\rho\alpha)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho\alpha)_f + \varphi(\rho\alpha)_p \quad (۲۰)$$

ضریب انبساط گرمایی حجمی نانوسیال:

$$(\rho . \beta)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho . \beta)_f + \varphi(\rho . \beta)_p \quad (۲۱)$$

مدل عددی برای جریان سیال و انتقال حرارت در میکروکانال تحت فرضیات زیر ایجاد شده است:

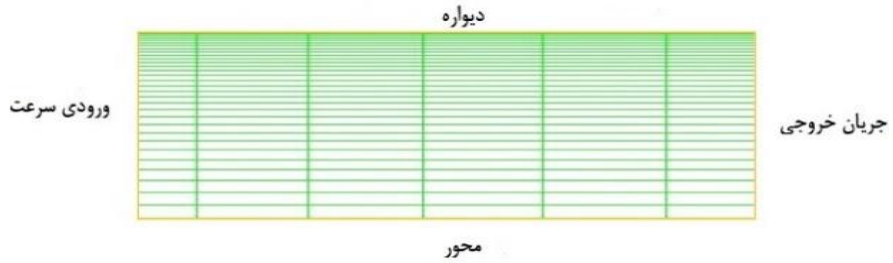
۱- انتقال حرارت و جریان سیال به‌صورت پایا.

۲- جریان به‌صورت تراکم ناپذیر و پروفیل سرعت یکنواخت.
۳- ویژگی‌های سیال ثابت، انتقال حرارت تشعشع ناچیز.
۴- نیروی حجمی و اتلاف ویسکوز ناچیز.
۵- پرش دمایی در فصل مشترک سیال- دیوار در نظر گرفته شده است.

باتوجه به اینکه با تغییرات طول، دمای سیال تغییر می‌کند، بنابراین مسئلهٔ توسعه‌یافته حرارتی نیست.

۲-۴- شبیه‌سازی حل عددی

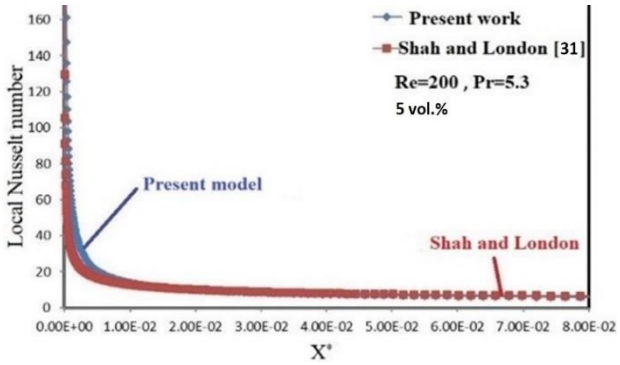
در این مقاله، شبکهٔ موردنظر پس از طراحی توسط نرم‌افزار فلوئنت خوانده شده و در حالت دو بعدی با دقت (2dp) بررسی شد. از گزینهٔ حل ضمنی برای معادلات حاکم استفاده شده‌است. گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و انرژی با استفاده از روش بالادست مرتبهٔ دوم انجام شده‌است. گسسته‌سازی فشار نیز با استفاده از درون‌یابی استاندارد انجام گردیده است. معادلات کوپل شده فشار- سرعت با الگوریتم سیمپل به کار برده شده است. همگرایی برای حل هنگامی برقرار می‌شود که باقیماندهٔ معادلات حاکم با دقت $۱۰^{-۷}$ برقرار باشد.



شکل۲ - **بخشی از شبکه محاسباتی مسئله**

۵-کنترل شبکه و اعتبارسنجی مدل

شکل ۳ نشان داد که نتایج حاصله مستقل از شبکه‌بندی هستند و افزایش تعداد شبکه در جهات مختلف تغییر چشمگیری در نتایج ندارد و فقط باعث افزایش زمان محاسبه می‌شود. بنابراین در این روش عددی با مقایسه انواع شبکه‌بندی‌ها، شبکه‌بندی 50 × 20 مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت جهت معتبرسازی، نتایج با روابط تئوریک شا و لاندن [31] مورد مقایسه قرار گرفت:



شکل ۳- مقایسه تغییرات محوری عدد ناسلت میانگین نانو سیال آب-دی اکسید تیتانیوم در طول کانال با معادلات کلاسیک شا و لاندن [۳۱]

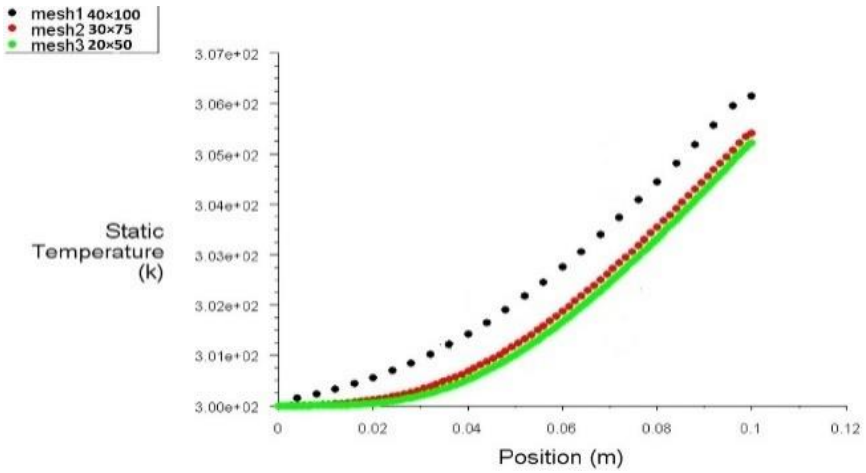
$$\mathbf{NU_x} = \begin{cases} \mathbf{3302\,x_*^{-1/3} - 1} & \mathbf{x_* \le 0.00005} \\ \mathbf{1302 x_*^{-1/3} - 0.5} & \mathbf{0.00005 < x_* < 0.0015} \\ \mathbf{4264 + 868\left(10^3 x_*^{-0.506}\right)\exp(-41 x_*)} & \mathbf{x_* > 0.001} \end{cases} \quad (۲۲)$$

که $x_* = \left[\frac{x/D}{Re.Pr}\right]$ می‌باشد. همچنین:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (۲۳)$$

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 p} \quad (۲۴)$$

نتایج نشان داده شده در شکل ۳ حاکی از تطابق خوب بین عدد ناسلت میانگین محاسبه شده به روش عددی و معادلات شا و لاندن [۳۱] است.

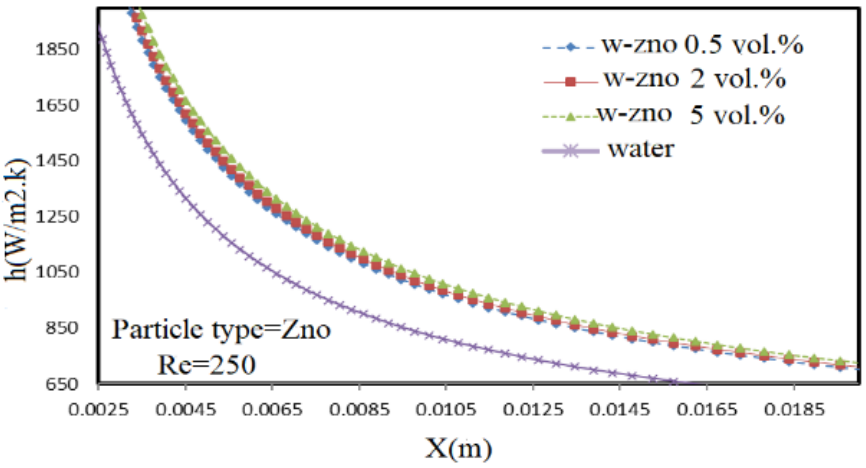


شکل ۴- بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی با سایز مش‌های مختلف (تعداد گره‌ها)

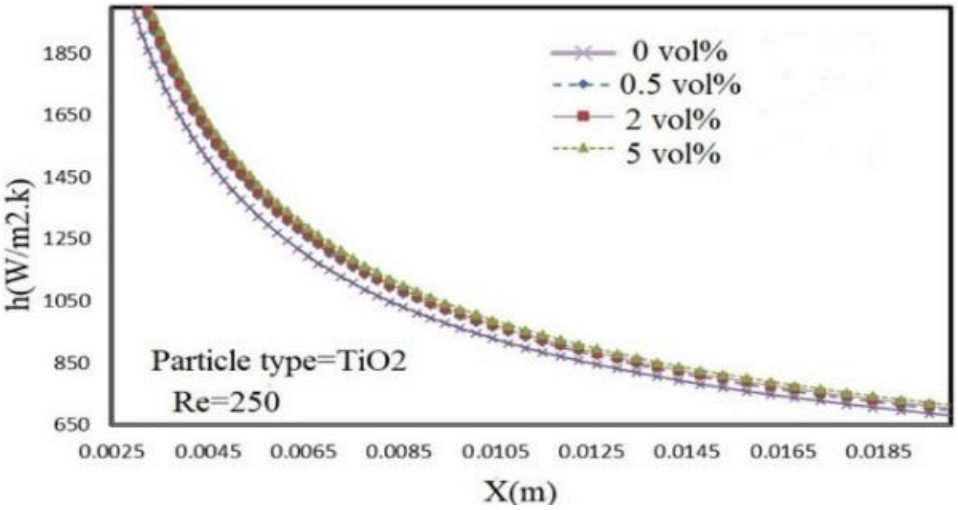
۶- نتایج

شکل‌های (۵) و (۶) تأثیر کسر حجمی نانو ذرات ZnO و TiO_2 بر ضریب انتقال حرارت در طول میکروکانال برای عدد رینولدز ۲۵۰ و عدد نادسن ۰/۰۴ را نشان می‌دهند. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب- TiO_2 با افزایش کسر حجمی حدود ۰/۸۵% افزایش می‌یابد که این افزایش در نانوسیال آب – ZnO به ۱٪ می‌رسد. همان‌طورکه در نمودارها نیز مشاهده شد، این تغییرات در نانو سیال آب- ZnO محسوس‌تر از نانو سیال آب- TiO_2 است. همچنین با افزایش کسر حجمی نانو ذره در سیال پایه، با افزایش عدد ریچاردسون مواجه می‌شویم که بیانگر غالب شدن جریان جابه‌جایی آزاد به جابه‌جایی اجباری است. بنابراین از این داده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانوسیال با کسر حجمی بالاتر سبب افزایش انتقال حرارت می‌گردد. به

گونه‌ای که جابه‌جایی آزاد بیشتر از جابه‌جایی اجباری می‌شود و این یعنی مقدار انتقال حرارت بدون صرف انرژی افزایش یافته است.

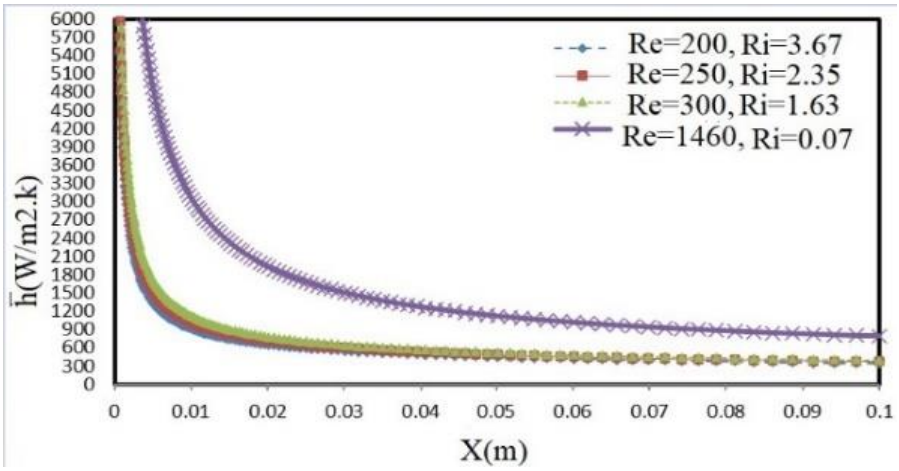


شکل ۵- تغییرات محوری ضریب انتقال حرارت برای کسرهای حجمی مختلف از نانو سیال آب-ZnO در Re= ۲۵۰



شکل ۶- تغییرات محوری ضریب انتقال حرارت برای کسرهای حجمی مختلف نانو سیال آب-TiO2 در Re=۲۵۰

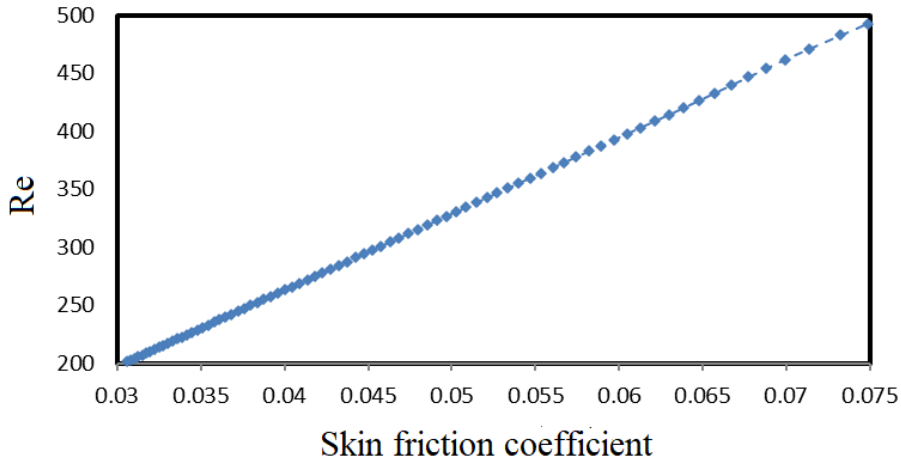
همچنین نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت نانو سیال آب- دی اکسید تیتانیوم با افزایش عدد رینولدز حدود ۹٪ افزایش پیدا می‌کند درحالی‌که این افزایش از Re= ۳۰۰ به Re=۱۴۶۰، به ۱۳۶٪ می‌رسد (شکل ۷).



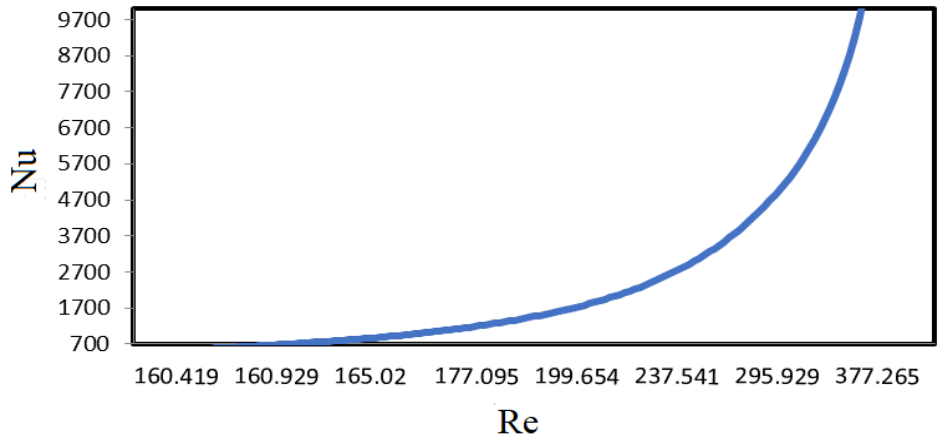
شکل ۷- تغییرات محوری میانگین ضریب انتقال حرارت برحسب عدد رینولدزهای مختلف در طول کانال.

همچنین با افزایش عدد رینولدز، عدد ریچاردسون کاهش پیدا کرده و به سمت صفر میل می‌کند که بیانگر غلبهٔ جریان جابه‌جایی اجباری (ناشی از اختلاف فشار) به جریان جابه‌جایی آزاد (ناشی از نیروی شناوری) است. این یافته نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز که معمولاً با صرف انرژی حاصل می‌شود، می‌تواند انتقال حرارت جابه‌جایی را به شکل اجباری افزایش دهد.

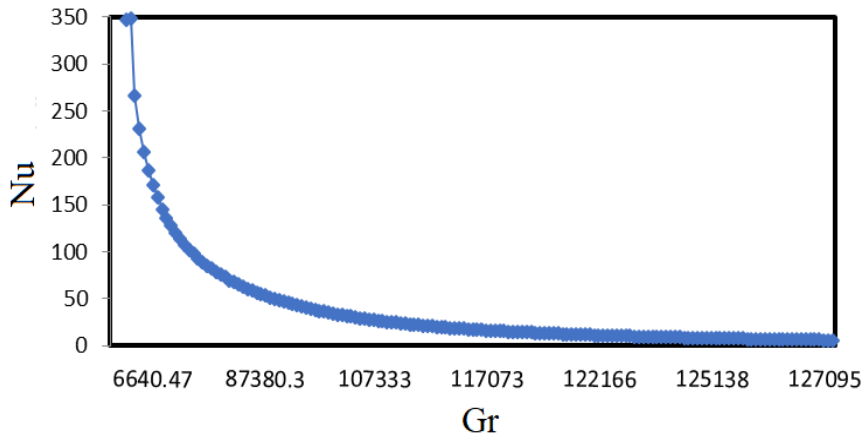
در ادامه نمودارهای (۸ - ۱۰) ضریب اصطکاک سطحی (که با استفاده از محاسبات عددی با رابطه ضریب اصطحکاک سطحی در نرم افزار اکسل به‌دست آمده است) و عدد ناسلت میانگین برحسب عدد رینولدز و نمودار عدد گراشف (در طول کانال) برحسب عدد ناسلت میانگین رسم گردیده است؛ همان‌طورکه نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت میانگین و ضریب اصطکاک سطحی بر روی دیواره (در طول کانال) افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش عدد گراشف، عدد ناسلت میانگین کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش عدد رینولدز با بالابردن اصطکاک با دیواره می‌تواند در درازمدت باعث فرسایش دیوارهٔ کانال شود؛ اما از طرفی رسوب‌گیری دیواره را کاهش می‌دهد (اعداد رینولدز شکل ۸ به‌صورت تصادفی در محدودهٔ موردنظر تغییرات عدد رینولدز انتخاب شده‌اند).



شکل ۸- تأثیر عدد رینولدز بر ضریب اصطکاک سطحی جهت نانو سیال آب – اکسید زینک ۲۰ نانومتر $d_p =$ و φ=۲٪



شکل ۹- تغییرات عدد ناسلت میانگین برحسب عدد رینولدز بر روی دیواره میکرو کانال جهت نانو سیال آب – دی اکسید تیتانیم20 نانومتر= d_p و φ=۲%



شکل ۱۰- عدد ناسلت میانگین برحسب عدد گراشف جهت نانو سیال آب – دی اکسید تیتانیم ۲۰ نانومتر $\mathbf{d_p}$ = و ۲$\boldsymbol{\varphi}$=%

۷- جمع‌بندی

در این تحقیق رفتار جابه‌جایی ترکیبی دو نانوسیالTiO_2و ZnO در میکروکانال با مقطع مستطیلی و رژیم جریان آرام مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذره و افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت رشد صعودی می‌کند؛ ولی افزایش قطر نانو ذرات جامد اثر معکوس بر افزایش ضریب انتقال حرارت دارد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، عدد ریچاردسون کاهش به‌سزایی می‌یابد و سبب غلبهٔ جابه‌جایی اجباری بر جابه‌جایی آزاد می‌گردد. در نهایت تأثیر عدد رینولدز بر ضریب اصطکاک سطحی و عدد ناسلت میانگین بررسی گردید که در هردو مورد با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت میانگین و میزان ضریب اصطکاک سطحی بر روی دیوارهٔ میکروکانال افزایش یافتند. تأثیرات عدد گراشف بر عدد ناسلت میانگین نیز بررسی گردید به‌طوری‌که با افزایش عدد گراشف، عدد ناسلت میانگین در انتقال حرارت با جابه‌جایی ترکیبی کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

h, l	ارتفاع و طول میکروکانال(m)
L=l/h	طول بی‌بعد میکروکانال
X, Y=x/h, y/h	طول و عرض بی‌بعد
u, v	سرعت طولی و عرضی (m/s)
u_c	سرعت ورودی جریان (m/s)
u_B	سرعت بروانی (m/s)
U, V	سرعت بی‌بعد طولی و عرضی
K	ضریب هدایت حرارتی (W/m. k)
P	فشار(Pa)
c_p	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg. K)
T	دما (K)
T_c	دمای ورودی (K)
T_h	دمای منبع حرارتی (K)
T_{fr}	دمای انجماد سیال خالص (K)
Nu	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز
Pr	عدد پرانتل
N	عدد آووگادرو
M	جرم مولکولی (g/mol)

نمادهای یونانی

μ	ویسکوزیته دینامیکی (Pa. s)
A	ضریب پخش حرارتی (m^2/s)
B	ضریب ارتفاع دندانه
Φ	کسر حجمی ٪
Θ	دمای بی‌بعد
P	چگالی (kg/m^3)
Y	ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)
κ_b	ثابت استفان بولتزمن (J/K)

زیرنویس‌ها

F	سیال
P	نانو ذره جامد
Nf	نانوسیال
H	گرم
C	سرد (ورودی)

مراجع

[1Keshavarz M, Habibi S, Amini Y. Heat transfer enhancement in a microchannel using active vibrating pieZoelectric vorteX generator. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2023 Jan 21;12(6):191-204.

[2] Rahmati AR, Molaei A. Numerical simulation of forced heat transfer of liquid metals in a microchannel heat sink under a magnetic field. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2024 Jan 21;13(6):121-37.

[3] نعمتی، محمد، سفید، محمد. بررسی انتقال حرارت و آنتروپی تولیدشده ناشی از جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال ترکیبی درون حفرهٔ نیم بیضی شکل متمایل؛ اثر اعمال میدان مغناطیسی غیر یکنواخت. *نشریه مهندسی مکانیک ایران*, 1401; 24(2): 46-76. doi: 10.30506/ijmep.2022.537431.1818

[4]اعلمی نیا، امین، قنبری ارزیلی، محمدحسین. بررسی عددی مبدل حرارتی دو لوله‌ای با نانو سیال داخل لوله شیاردار مارپیچی در حضور میدان مغناطیسی. *نشریه مهندسی مکانیک ایران*, 1402; 25(3): 52-83. doi: 10.30506/ijmep.2023.552909.1873

[5] شفیعی دیزجی، آیت، زابلی، سهراب، امین فر، حبیب. بهینه‌سازی انتقال حرارت میکرومبادله کن دو لایه‌ای مستقیم و مارپیچ. *نشریه مهندسی مکانیک ایران*, 1398; 21(2): 6-28.

[6] Kalteh M, Abbassi A, Saffar-Avval M, Frijns A, Darhuber A, Harting J. Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink. Applied Thermal Engineering. 2012 Apr 1;36:260-8.

[7] Moradi F, Pournaderi P. Simulation of nanofluid flow at low Reynolds number in a microchannel with one-sided sudden expansion under the effect of a magnetic field. Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics. 2023 Sep 23;35(3):85-100.

[8] Jahanbakhshi A, Nodooshan AA, Bayareh M. The Effects of Microtube Addition on Thermal and Hydrodynamic Behavior of Microchannel Heatsink for Nanofluid Flow. Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics. 2022 Jan 1;34(1):21-36.

[9] Jamshidmofid M, Bahiraei M. Hydrothermal performance of single and hybrid nanofluids in Left-Right and Up-Down wavy microchannels using two-phase mixture approach. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2021 Dec 1;129:105752.

[10] Reshadi M, Saidi MH. Investigation of Mixed Electro-Osmotic/Poiseuille Slip Flows of Viscoelastic Fluids in Rectangular Microchannels with Hydrophobic Surfaces. AUT Journal of Mechanical Engineering. 2017 Jun 1;1(1):3-12.

[11] Ali MM, Akhter R, Miah MM. Hydromagnetic mixed convective flow in a horizontal channel equipped with Cu-water nanofluid and alternated baffles. International Journal of Thermofluids. 2021 Nov 1;12:100118.[12] J.C. Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, Oxford: Clarendon Press, (1873).

[13] Choi SU, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States); 1995 Oct 1.

[14] Shahsavani E, Afrand M, Kalbasi R. Using experimental data to estimate the heat transfer and pressure drop of non-Newtonian nanofluid flow through a circular tube: applicable for use in heat exchangers. Applied Thermal Engineering. 2018 Jan 25;129:1573-81.

[15] Moradi F, Pournaderi P. Simulation of nanofluid flow at low Reynolds number in a microchannel with one-sided sudden expansion under the effect of a magnetic field. Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics. 2023 Sep 23;35(3):85-100.

[16] Hinojosa JF, Rodríguez NA, Xamán J. Heat transfer and airflow study of turbulent mixed convection in a ventilated cavity. Journal of Building Physics. 2016 Nov;40(3):204-34.

[17] Shahi M, Mahmoudi AH, Talebi F. Numerical study of mixed convective cooling in a square cavity ventilated and partially heated from the below utilizing nanofluid. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2010 Feb 1;37(2):201-13.
[18] Nassan TH, Heris SZ, Noie SH. A comparison of experimental heat transfer characteristics for Al2O3/water and CuO/water nanofluids in square cross-section duct. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2010 Aug 1;37(7):924-8.
[19] Rostamani M, Hosseinizadeh SF, Gorji M, Khodadadi JM. Numerical study of turbulent forced convection flow of nanofluids in a long horizontal duct considering variable properties. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2010 Dec 1;37(10):1426-31.
[20] Lotfi R, Saboohi Y, Rashidi AM. Numerical study of forced convective heat transfer of nanofluids: comparison of different approaches. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2010 Jan 1;37(1):74-8.
[21] Jung, Jung-Yeul, Hoo-Suk Oh, and Ho-Young Kwak. "Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels." In ASME International mechanical engineering congress and exposition, vol. 47861, pp. 327-332. 2006.
[22] Arefmanesh, Ali, and Mostafa Mahmoodi. "Effects of uncertainties of viscosity models for Al2O3–water nanofluid on mixed convection numerical simulations." International journal of Thermal sciences 50, no. 9 (2011): 1706-1719.
[23] Ho CJ, Chen MW, Li ZW. Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008 Aug 1;51(17-18):4506-16.(2008): 4506-4516.
[24] Xuan Y, Li Q. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. J. Heat transfer. 2003 Feb 1;125(1):151-5.
[25] Xuan Y, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. International Journal of heat and fluid flow. 2000 Feb 1;21(1):58-64.
[26] Behzadmehr A, Saffar-Avval M, Galanis N. Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach. International journal of heat and fluid flow. 2007 Apr 1;28(2):211-9.
[27] Abu-Nada E. Effects of variable viscosity and thermal conductivity of Al2O3–water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2009 Aug 1;30(4):679-90.
[28] Ahmadi Nadooshan A, Jahanbakhshi A, Bayareh M. The Effects of Asymmetric Slip Flow Between Parallel Plates of a Microchannel Under Uniform Heat Flux. Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2020 Aug 1;12(4):041024.
[29] Karimi H, Javaherdeh K. Optimization and thermodynamic analysis of a combined power and absorption ammonia–water Rankine cycle. MRS Energy & Sustainability. 2024 Mar;11(1):161-72.
[30] Anoop KB, Das SK, Kabelac S. Experimental convective heat transfer studies in a turbulent flow regime using alumina-water nanofluids. QScience Connect. 2014 Jan 1;2013(1):39.
[31] Shah RK. Laminar Flow Forced Convection in. Ducts, Supp. 1 of Advances in Heat Transfer. 1978:153-95.
[32] Oztop HF, Abu-Nada E. Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids. International journal of heat and fluid flow. 2008 Oct 1;29(5):1326-36.
[33] Salman BH, Mohammed HA, Kherbeet AS. Heat transfer enhancement of nanofluids flow in microtube with constant heat flux. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2012 Oct 1;39(8):1195-204.

[34] Akbarinia A, Abdolzadeh M, Laur R. Critical investigation of heat transfer enhancement using nanofluids in microchannels with slip and non-slip flow regimes. Applied Thermal Engineering. 2011 Mar 1;31(4):556-65.

Numerical simulation of mixed convection behavior of nanofluid in a microchannel

Alireza Asadi Seddigh[1], Koroush Javaherdeh[2], Mohammadreza Sharifimoghaddam[3]

[1]P.hd student,Campus faculty, University of Guilan, Rasht, Iran, Alireza_asadi90@yahoo.com

[2]Proffesor,Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran, ,Javaherdeh@guilan.ac.ir

[3]M.A,Tehran markaz Unit, Azad University, Tehran, Iran, mr.h.moghadam@gmail.com

Abstract: One of the methods to reduce the size of devices and increase their efficiency is the use of microchannels. In this paper, numerical simulation of the combined displacement behavior of two nanofluids TiO2 and ZnO in a microchannel with a rectangular cross-section and a laminar flow regime has been investigated. In this research, the combined displacement behavior of two nanofluids TiO2 and ZnO in a microchannel with a rectangular cross-section and a laminar flow regime has been investigated. The results showed that with increasing nanoparticle concentration and Reynolds number, the heat transfer coefficient increases. However, increasing the diameter of solid nanoparticles has the opposite effect on increasing the heat transfer coefficient. Also, with increasing Reynolds number, the Richardson number decreases significantly, causing forced convection to prevail over free convection. Finally, the effect of Reynolds number on the surface friction coefficient and average Nusselt number was investigated, and in both cases, with increasing Reynolds number, the average Nusselt number and the surface friction coefficient on the microchannel wall increased. The effects of Grasoff number on the average Nusselt number were also investigated, so that with increasing Grasoff number, the average Nusselt number in heat transfer by mixed convection decreases.

Keywords: Combined convection, Nanofluid, Microchannel, Richardson number, Groshof number, Knudsen number.