فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک جامدات

http://jsme.iaukhsh.ac.ir

فصلنامه علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک جامدات

انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال درون میکرو لوله با شار حرارتی ثابت و سرعت لغزشی

سعیدجاوید[۱]، آرش کریمی‌پور[۲،*]

* نویسنده مسئول: arashkarimipour@gmail.com

چکیده

جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال آب-مس در یک میکرو لوله در رژیم لغزشی تحت شار حرارتی ثابت در مقادیر رینولدز پایین به‌صورت عددی موردبررسی قرار گرفته است. شرط مرزی لغزش در دیواره برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفت و نتایج به‌صورت پروفیل‌های سرعت و دما و محاسبه مقادیر ناسلت و افت فشار موضعی در ناحیه ورودی و توسعه‌یافته کانال ارائه شده است. اثر لغزش و استفاده از نانو سیالات بر انتقال حرارت در میکرو لوله بررسی گردیده است.

نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت در ناحیه توسعه‌یافته با افزایش لغزش در دیواره، افزایش و میزان افت فشار در این ناحیه کاهش می‌یابد و نتایج در این ناحیه مستقل از عدد رینولدز جریان هست. در ناحیه ورودی افزایش عدد رینولدز جریان نیز باعث افزایش این مقادیر در این ناحیه می‌گردد. همچنین در این پژوهش مشاهده گردید افزودن نانو ذرات به سیال باعث افزایش انتقال حرارت جریان گردیده اما این مقدار ناچیز است.

واژه‌های کلیدی

نانوسیال آب‌مس، میکرو لوله، جریان لغزشی، جریان آرام، جریان داخلی

تاریخ ارسال:	۹۴/۰۸/۱۵
تاریخ بازنگری:	۹۴/۱۱/۱۹
تاریخ پذیرش:	۹۵/۱۰/۰۸

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد نجف اباد، دانشگاه ازاداسلامی، نجف اباد، اصفهان، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد نجف اباد، دانشگاه ازاداسلامی، نجف اباد، اصفهان، ایران.

Archive of SID

www.SID.ir

Summer 2016/ vol. 9/ No. 2

Journal of
Solid Mechanics
in Engineering

Journal of

Solid Mechanics in Engineering

http://jsme.iaukhsh.ac.ir

Nanofluid forced convection through a microtube with constant heat flux and slip boundary

Saeid Javid[1], Arash Karimipour[2]

* Corresponding Author: arashkarimipour@gmail.com

Abstract:

In present study, the flow and heat transfer of Water-Cu nanofluid in micro-tube with slip regime with constant wall heat flux numerically simulated with low Reynolds numbers. Slip velocity and temperature jump boundary conditions are also considered along the microtube walls, for first time. The results are presented as the profiles of temperature and velocity. Nusselt number and pressure drop coefficient calculated in interance and full developed region. The effect of slip and using nano particle considerd.

It is observed that Nusselt number increases with slip velocity coefficient and pressure drop coefficient decreases; at intrance region the Raynolds of flow has effect on Nusselt and pressure drop coefficient, too.

Likewise observed nano particle adding to water has low effect to increases Nusselt number and pressure drop coefficient.

Key words:

Water-Cu nanofluid, Microtube, Slip flow, Temperature jump, Laminar flow, Internal flow.

Archive of SID

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, NajafAbad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, NajafAbad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

www.SID.ir

۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون علم و فنّاوری و ایجاد توانایی ساخت تجهیزات در ابعاد بسیار کوچک منجر شده است تا برای تأمین انتقال حرارت موردنیاز این تجهیزات، نیاز به مطالعه بیشتری بر رفتار سیالات در این ابعاد احساس شود و ازاین‌رو در سال‌های اخیر توجه زیادی به مبدل‌های حرارتی در این مقیاس شده است. از سوی دیگر با توجه به پیشرفت-های دانش انتقال حرارت یک عامل محدودکننده توانایی تجهیزات درتبادل حرارت، خواص سیال عامل است که معمولاآب،روغن موتور،اتیلن گلیکول وغیره می‌باشند [۱]. برای مقابله با این محدودیت برای اولین بار آهوجا از سوسپانسیون یک مایع عامل با ذرات یک عنصر با رسانش حرارتی بالا استفاده کرد [۲]؛ و در این راستا چوی و همکارانش توانستند ذرات با ابعاد نانو را در یک سیال پایدار کنند و برای اولین بار نام نانوسیال را استفاده کردند [۳].

عملکرد حرارتی نانو سیالات در رژیم لغزشی توسط پژوهشگران زیادی بررسی شده است و آنان به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش ضریب لغزش، عملکرد حرارتی جریان افزایش خواهد یافت [۴]. با مروری بر تحقیقات ارائه‌شده، متوجه کاربرد مفید نانو سیالات جهت خنک‌سازی می‌شویم؛ اما بررسی عملکرد حرارتی نانو سیالات درون تجهیزات با ابعاد میکرو و نانو نیاز به توجه بیشتری توسط محققان دارد[۵ و ۶].

جونگ و همکاران [۷] به‌صورت تجربی به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانو سیالات در میکرو کانال‌ها با نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم پرداختند و دریافتند که ضریب جابجایی نانوسیال با نسبت حجمی ۱/۸ درصد نانو ذرات، بیش از ۳۲ درصد نسبت به ضریب جابجایی آب خالص بالاتر است و در میکرو کانال‌های با ابعاد کوچک‌تر، ضریب انتقال حرارت در اعداد رینولدز کوچک‌تر قابل‌مقایسه و یا بزرگ‌تر از ضرایب انتقال حرارت در میکرو کانال‌های بزرگ‌تر تحت اعداد رینولدز بالاتر است که نشان‌دهنده خواص انتقال حرارت میکرو کانال است. هریس و همکاران [۸] با بررسی تجربی جریان آرام نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم نتیجه گرفتند که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به آب خالص تا ۴۰% افزایش می‌یابد، درحالی‌که ضریب هدایت حرارتی حداکثر ۱۵% افزایش یافته است.

میکرو جریان‌ها برحسب میزان عددی نادسن ($Kn = \lambda / D_H$) طبقه‌بندی‌شده. DH قطر هیدرولیکی (طول مشخصه) و λ فاصله پویش آزاد متوسط مولکولی است [۹]. بررسی آزمایشگاهی خواص حرکتی و حرارتی جریان، منجر به ارائه حدود مشخصی برای رژیم‌های مختلف جریان برحسب عدد نادسن شده است [۱۰]. به ازای مقادیر نادسن کوچک‌تر از ۰/۰۰۱ سیال پیوسته بوده و معادلات ناویر-استوکس به‌طور کامل صادق است. جریان با مقادیر نادسن بین ۰/۰۰۱ و ۰/۱ یک جریان لغزشی در نظر گرفته می‌شود و در این محدوده معادلات ناویر-استوکس همچنان برقرارند اما به یک سری اصلاحات در شرایط مرزی نیاز است. به ازای نادسن بین ۰/۱ و ۱۰ جریان گذرا و برای نادسن بزرگ‌تر از ۱۰ جریان آزاد مولکولی برقرار است [۱۱ و ۱۲]. چوی وژانگ [۱۳] به بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم و جریان آرام دریک لوله باخم ۹۰ درجه پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که با افزایش عدد رینولدز و پرانتل، عدد ناسلت میانگین افزایش پیدا می کند و همچنین عدد ناسلت میانگین در خم لوله بیشتر از نواحی ورودی و خروجی لوله است و عدد ناسلت میانگین تابعی از عدد پرانتل است. تهیرومیتال[۱۴] به بررسی عددی جابجایی اجباری در یک جریان آرام توسعه‌یافته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک لوله دایره‌ی با شار حرارتی ثابت پرداختند؛ و اثر قطر ذرات، عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات بر روی ضریب انتقال حرارت میانگین را موردبررسی قرار داده و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی به‌طور خطی افزایش می‌یابد و با افزایش اندازه ذرات به‌طور غیرخطی کاهش می‌یابد. اکبری نیا و لور [۱۵] مطالعه عددی روی انتقال حرارت جابجایی -

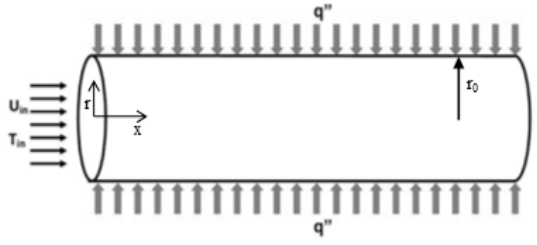
Archive of SID

www.SID.ir

ترکیبی جریان آرام نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم در یک لوله دایره‌ای شکل را انجام دادند. آن‌ها از مدل مخلوط دوفازی استفاده کردند و تأثیر قطر ذرات نانو را روی رفتارهای حرارتی و حرکتی نانوسیال بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که برای یک کسر حجمی مشخص، با افزایش قطر ذرات نانو، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک پوسته‌ای کاهش می‌یابد. کوماروجنسن [۱۶] به بررسی عددی نرخ انتقال حرارت جریان ترکیبی یک نانوسیال تک فازی آب-اکسیدآلومینیوم داخل یک لوله پرداخته‌اند. نتایج نشان می-دهد که با افزایش ذرات نانویی به یک سیال پایه نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت میانگین افزایش یافته است. دووان ومیوزیک [۱۷] جریان لغزشی در میکروکانال‌های غیر دایره‌ای را مورد بررسی قراردادند آن‌ها چندین هندسه‌ی غیر دایره‌ای رایج برای میکرو کانال را بررسی نموده و از مدل توسعه‌یافته جریان درون کانال، برای پیش‌بینی اثرات اصطکاک و عدد رینولدز، تحت شرایط مرزی لغزشی استفاده کردند. پژوهش‌های پیشین نشان داد که تابه اکنون بررسی سرعت لغزشی در یک میکرو لوله تحت شار ثابت تاکنون موردبررسی قرار نگرفته است (براساس اطلاعات نویسنده). لذا در کار حاضر به مسئله مذکور برای اولین بار است که مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد.

۲- بیان مسئله

مسئله حاضر شبیه‌سازی جریان نانوسیال آب – مس در یک میکرو لوله است. غلظت‌های دو و چهار درصد نانو در لغزش‌های صفر، ۰/۰۱ و ۰/۱ موردمطالعه قرارگرفته و شماتیک مسئله در شکل ۱ ارائه‌شده است. قطر لوله برابر با ۱۵۰ میکرومتر است.



شکل (۱)- شماتیک مسئله

دمای ورودی سیال برابر با ۲۹۳ کلوین و شار دیواره‌ها ۳/۵ W/m^2 است. جریان در مقادیر رینولدز ۱، ۲۵ و ۵۰ مدل شده است.

آب و نانو ذرات مس در تعادل گرمایی قرار دارند و فرض می‌شود. نانو ذرات مس دارای شکل یکنواخت و کروی هستند و جریان در میکرو کانال به‌صورت آرام، نیوتونی و تراکم ناپذیر و اثرات تشعشع قابل‌چشم‌پوشی است. خواص ترموفیزیکی آب خالص (سیال پایه) و نانو ذرات مس در دمای ۲۹۸ کلوین در جدول (۱) نشان داده‌شده است.

جدول (۱)-خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذره جامد [۴].

	ρ (kg/m^3)	c_p (J/kg-k)	k (W/mk)
آب خالص	۹۹۷/۱	۴۱۷۹	۰/۶۱۳
مس	۸۹۳۳	۳۸۵	۴۰۱

۳- فرمول‌بندی

معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی است که برای حالت دائم و آرام در مختصات استوانه‌ای حل می‌شوند که در جدول ۲ آورده شده‌اند.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول (۲) - معادلات حاکم بر مسئله

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\rho r u_r)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x)=0 \quad (۱)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho u_x u_x)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r u_x) = -\frac{\partial P}{\partial x}+2\mu\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(\frac{\partial u_r}{\partial x}+\frac{\partial u_x}{\partial r}\right)\right] \quad (۲)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho u_r u_x)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r u_r) = -\frac{\partial P}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[2r\mu\left(\frac{\partial u_r}{\partial r}\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(\frac{\partial u_r}{\partial x}+\frac{\partial u_x}{\partial r}\right)\right]-2\mu\frac{u_r}{r^2} \quad (۳)$$

$$\rho C_p\left(u_r\frac{\partial T}{\partial r}+u_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)=\left(\frac{1}{r}\frac{\partial(rq)}{\partial r}-\frac{\partial q}{\partial x}\right) \quad (۴)$$

$$q=-k\nabla T \quad (۵)$$

از رابطه زیر جهت محاسبه چگالی نانوسیال استفاده می‌شود [۱۸]،

$$\rho_{nf}=(1-\varphi)\rho_f+\varphi\rho_s \quad (۶)$$

از رابطه برینکمن جهت محاسبه لزجت مؤثر دینامیکی نانوسیال استفاده می‌شود [۱۹]،

$$\mu_{nf}=\frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (۷)$$

ضریب پخش حرارتی مؤثر نانوسیال با فرمول زیر محاسبه می‌شود [۱۸]،

$$\alpha_{nf}=\frac{k_{eff}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (۸)$$

ظرفیت گرمای ویژه نانوسیال با فرمول زیر محاسبه می‌شود [۱۸]،

$$(\rho C_p)_{nf}=(1-\varphi)(\rho C_p)_f+\varphi(\rho C_p)_s \quad (۹)$$

برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی مؤثر نانوسیال برای سوسپانسیون‌هایی که دارای ذرات کروی شکل هستند از رابطه پاتل و همکاران [۱۹] استفاده می‌شود،

$$k_{eff}=k_f\left[1+\frac{k_s A_s}{k_f A_f}+ck_s Pe\frac{A_s}{k_f A_f}\right] \quad (۱۰)$$

که در رابطه (۱۰) ثابت تجربی c= ۳۶۰۰۰ است،

$$\frac{A_s}{A_f}=\frac{d_f}{d_s}\frac{\varphi}{1-\varphi} \quad (۱۱)$$

$$Pe=\frac{u_s d_s}{\alpha_f} \quad (۱۲)$$

در روابط (۱۱ و ۱۲) قطر مولکول آب برابر با d_f=2Å و قطر مولکول نانوذره مس برابر با d_s=100nm است. مقدار u_s سرعت حرکت براونی نانو ذرات است و با فرمول زیر محاسبه می‌شود،

$$u_s=\frac{2\kappa_b T}{\pi\mu_f {d_s}^2} \quad (۱۳)$$

در رابطه (۱۳) مقدار κ_b =1.3807×10^{-23}J/K ثابت بولتزمن است.

٤- شرایط مرزی دیواره

با توجه به ابعاد میکرو در هندسه مسئله، شرط عدم لغزش برای مسئله حاضر مناسب نیست. درواقع در رژیم‌های لغزش در همسایگی دیواره ناحیه‌ای وجود دارد که مولکول‌های سیال دارای نوسان هستند. این ناحیه لایه نادسن نامیده می‌شود و ضخامت آن متناسب بافاصله پویش آزاد مولکولی است. در نادسن‌های کوچک اثرات لایه نادسن قابل صرف‌نظر کردن است اما در رژیم‌های لغزشی اثرات لایه نادسن باید در نظر گرفته شود چراکه شرط مرزی لغزش بین سیال و مرز جامد می‌تواند تأثیر سطح و فعالیت ذرات مولکولی را بازتاب نماید.

Archive of SID

www.SID.ir

پویش آزاد مولکولی، میانگین فاصله ای است که یک مولکول قبل از برخورد با مولکول دیگر طی می کند.

عدد نادسن که به صورت $kn = \frac{\lambda}{De}$ (λ پویش آزاد مولکولی و De طول مشخصه) تعریف می شود. طبقه بندی متداول برای جریان در میکرولوله ها بر اساس عدد نادسن صورت می پذیرد که به شرح زیر می باشد.

$$\begin{cases} Kn < 0.001 & (I)\ \text{جریان همراه عدم لغزش و پیوستار} \\ 0.001 < Kn < 0.1 & (II)\ \text{لغزش جریان و پیوستار} \\ 0.1 < Kn < 10 & (III)\ \text{جریان در حال گذار} \\ Kn > 10 & (IV)\ \text{جریان آزاد مولکولی} \end{cases}$$

$$kn = \frac{\lambda}{D} \quad \lambda = 0.17 \times 10^{-6} \quad D = 150 \times 10^{-6}$$

$$kn = \frac{0.17}{150} = 0.0012$$

$$0.001 < 0.0012 < 0.1$$

پس با توجه به نتایج بالا سرعت لغزشی را داریم.

شرط سرعت لغزشی با توجه به مطالب بالا در حالت $0.001 < Kn < 0.1$ می باشد که در این مقاله با توجه به محاسبات انجام شده $Kn = 0.0012$ می باشد.

سرعت لغزشی در دیواره یک میکرو لوله به‌وسیله فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند [۲۲-۲۰]. برای حل سرعت لغزشی β^* و U_s به ترتیب ضریب سرعت لغزشی بی‌بعد و سرعت لغزشی است.

$$U_{s=-}\beta^*(\frac{\partial U}{\partial R})_{R=0.5} \qquad (۱۴)$$

برای ارائه بهتر نتایج، از بی‌بعد سازی‌های زیر استفاده‌شده است.

$$U = \frac{u}{u_{in}} \qquad X = \frac{x}{2r_0}$$
$$R = \frac{r}{2r_0} \qquad \theta = -\frac{T - T_w}{T_b - T_w} \qquad (۱۵)$$
$$Re = \frac{\rho u_{in} D}{\mu} \qquad Cf = \frac{\tau_{wall}}{0.5\rho u_{in}^2}$$

$$\psi = \frac{T - T_{in}}{\frac{q'D}{k}} \qquad Nu = \frac{hd}{k_f}$$
$$h = \frac{q'}{T_b - T_w}$$

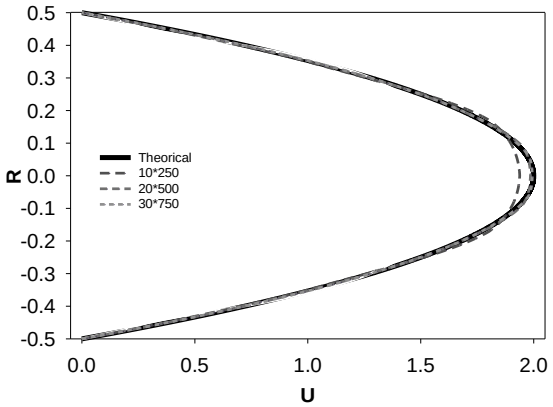
در معادلات بالا T_b دمای بالک بوده و به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$T_b = \frac{\int \rho u T \, dA}{\dot{m}} \qquad (۱۶)$$

۵- بررسی شبکه و اعتبار سنجی نتایج

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه انتخابی و همچنین صحت نتایج، پروفیل سرعت بی‌بعد شده در حالت شرط عدم لغزش دیواره‌ها در شبکه‌های مختلف همراه با حل تحلیلی آن‌ها [۲۳] در شکل ۲ مقایسه شده است. در حل مسئله برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر از شبکه ۳۰×۷۵۰ استفاده‌شده است.

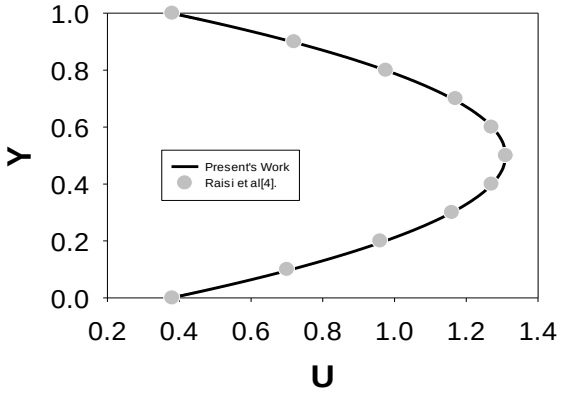
همچنین برای صحت مدل‌سازی جریان لغزشی و خواص نانوسیال کار رئیسی و همکاران [۴] مدل‌سازی گردید. در شکل ۳ پروفیل سرعت توسعه‌یافته جریان با ضریب لغزش بی‌بعد $\beta^* =$ ۰/۱ ارائه‌شده است.



شکل(۲) – منحنی سرعت بدون بعد در شبکه‌های مختلف.

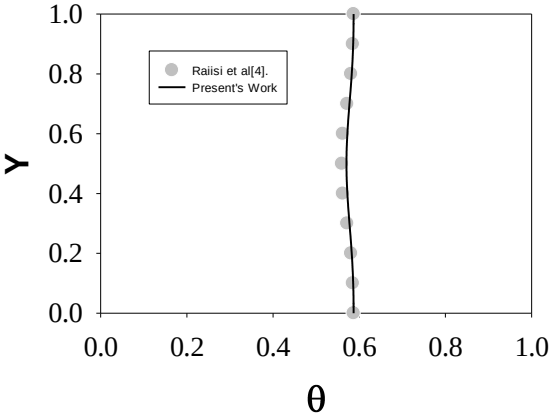
Archive of SID

www.SID.ir



شکل(۳)- اعتبار سنجی پروفیل سرعت باکار رئیسی و همکاران [۴].

در شکل ۴ نیز پروفیل دمای بی‌بعد در خروجی کانال بین کار حاضر و کار رئیسی و همکاران [۴] مقایسه شده است.



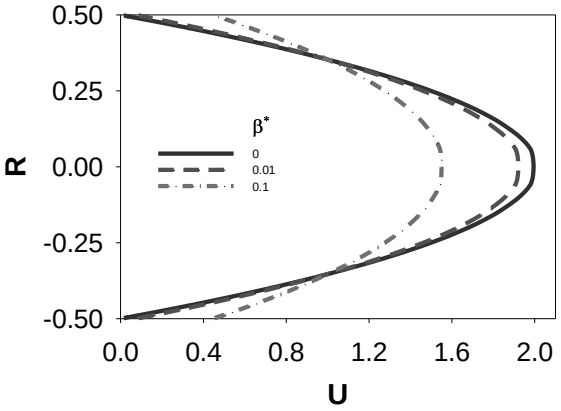
شکل (۴)- اعتبار سنجی پروفیل دما باکار رئیسی و همکاران [۴].

٦- نتایج

جریان جابه‌جایی اجباری نانوسیال درون میکرو لوله با شرط مرزی سرعت لغزشی شبیه‌سازی گردید. به این منظور مقادیر ۱، ۲۵ و ۵۰ برای عدد رینولدز جریان و مقادیر ۰، ۰/۰۱ و ۰/۱ برای ضریب لغزش جریان مورداستفاده قرارگرفته است. نتایج بر اساس دو ناحیه توسعه‌یافته و ورودی لوله ارائه‌شده است.

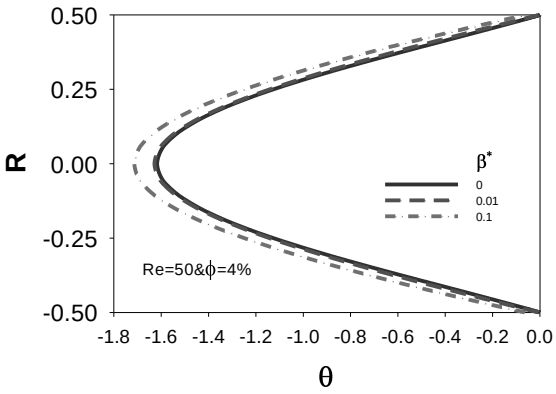
٦-۱- ناحیه توسعه‌یافته

شکل ۵ پروفیل سرعت در ناحیه توسعه‌یافته را نشان می‌دهد و نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دهد که شکل این پروفیل مستقل از مقدار رینولدز و درصد نانو ذرات بوده و تنها وابسته به مقدار ضریب لغزش است و با افزایش این ضریب پروفیل به سمت تخت شدن می‌رود.



شکل (۵)- پروفیل سرعت توسعه‌یافته برای لغزش‌های مختلف

اثر لغزش بر پروفیل دما در شکل ۶ نشان داده‌شده است. با افزایش لغزش در مقطع جریان پروفیل دما شکل خود را حفظ می‌کند ولی مکان آن تغییر می‌کند و به سمت مقادیر کمتر کشیده می‌شود و این امر با توجه به ثابت بودن شار حرارتی توجیه می‌شود زیرا که شار حرارتی وابسته به شیب دما است پس این شیب در تمامی پروفیل‌ها ثابت است اما با افزایش ضریب لغزش دمای دیواره نیز بایستی دمای بیشتری به خود بگیرد تا بتواند شار موردنظر را به سیال وارد نماید.

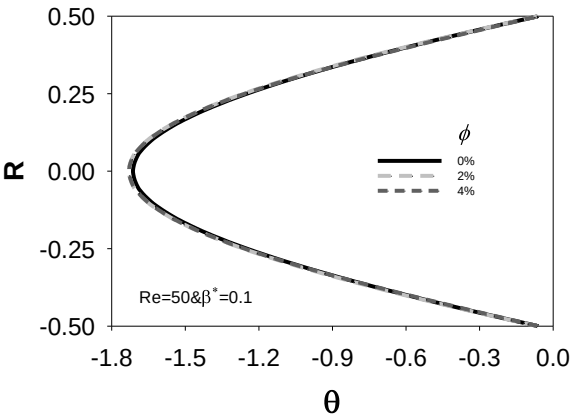


شکل (۶)- پروفیل دمای توسعه‌یافته برای مقادیر مختلف لغزش

افزایش ذرات نانو و همچنین تغییر رینولدز در پروفیل دمای بدون بعد در ناحیه توسعه‌یافته نیز تأثیری ندارد و این نکته در شکل‌های ۷ و ۸ قابل مشاهده است.

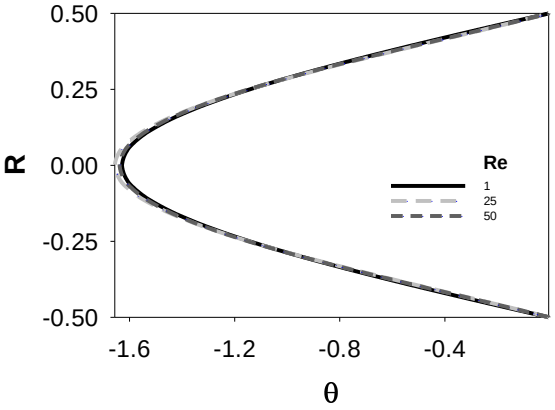
Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۷)- تأثیر درصد حجمی نانو ذرات بر پروفیل دمای توسعه‌یافته

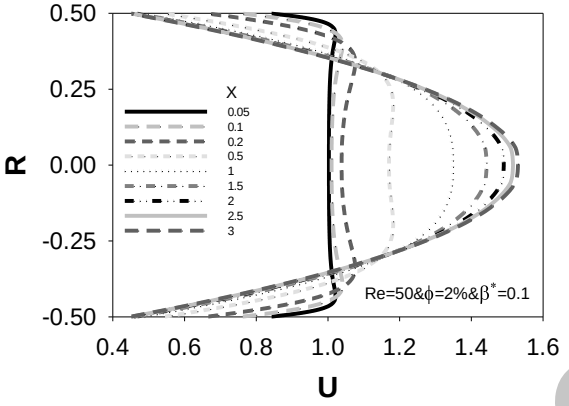
با توجه به شکل‌های ۷ و۸، پروفیل دما نیز مانند پروفیل سرعت، در ناحیه توسعه یافته تنها به ضریب لغزش وابسته است؛ اما نکته موردتوجه وابسته بودن مقدار دمای دیواره و دمای بالک سیال به مقطع موردسنجش است و این مقادیر از درصد نانو ذرات و مقدار رینولدز جریان نیز اثر می‌گیرند اما در بی‌بعد سازی این اثر به‌صورت ضمنی حذف می‌گردد که در قسمت مربوط به ناحیه درحال‌توسعه توضیح بیشتری ارائه‌شده است.



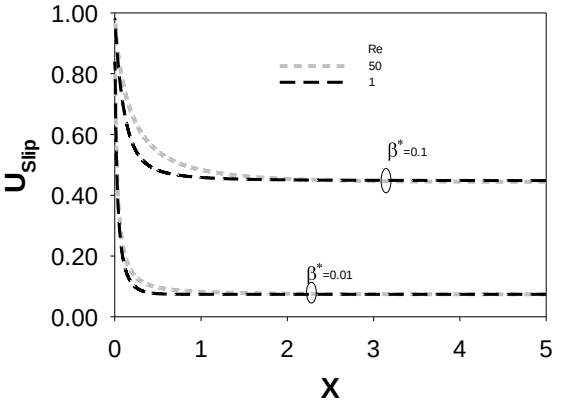
شکل (۸)- پروفیل دما توسعه‌یافته در مقادیر رینولدز مختلف

٦-۲- جریان در طول ورودی

پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف میکرو لوله در شکل ۹ ارائه‌شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود در ناحیه ورودی به علت یکنواختی سرعت ورودی دیواره میکرو لوله دچار تنش بیشتری می‌شود که این امر منجر به افزایش سرعت لغزش نسبت به قسمت توسعه‌یافته شده است و با شکل گرفتن پروفیل سرعت جریان به دیواره بهتر چسبیده و سرعت لغزشی کم شده است. برای مشاهده بهتر این موضوع در شکل ۱۰ منحنی سرعت لغزشی روی دیواره رسم شده است. در این شکل همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز جریان میزان سرعت لغزشی در ناحیه ورودی افزایش می‌یابد و درواقع بابیان بهتر نرخ کاهش سرعت لغزشی دیواره با افزایش رینولدز جریان کاهش می‌یابد و این امر منجر می‌شود که طول ناحیه ورودی افزایش یابد.



شکل(۹)- پروفیل سرعت درمقاطع مختلف میکرولوله



شکل (۱۰)- سرعت لغزشی روی دیواره میکرو لوله در ناحیه درحال‌توسعه

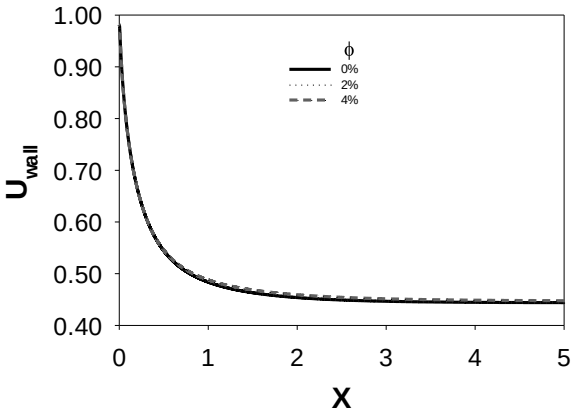
در شکل ۱۱ اثر نانو ذرات بر سرعت لغزشی ارائه‌شده است. بنا به این اشکال افزایش ضریب لغزش منجر به افزایش سرعت لغزشی می‌شود که این امر بدیهی است ولی مقدار سرعت لغزشی در ناحیه توسعه‌یافته مستقل از رینولدز است اما در ناحیه درحال‌توسعه افزایش رینولدز منجر به

Archive of SID

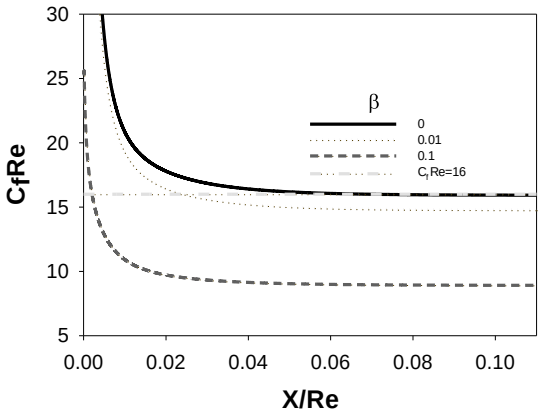
www.SID.ir

افزایش سرعت لغزشی دیواره می‌شود و درصد نانو ذرات نیز تأثیر قابل مشهودی بر این سرعت نمی‌گذارد.

برای بررسی تنش دیواره و افت فشار در میکرو لوله منحنی C_fRe در شکل ۱۲ رسم شده است. این منحنی صرفاً تابع ضریب لغزش بوده و با افزایش این ضریب کاهش چشم‌گیری می‌یابد. علت امر نیز کاهش تنش وارده به خاطر سرعت داشتن سیال روی دیواره است که منجر به کاهش گرادیان سرعت و درنتیجه کاهش تنش دیواره و افت کمتر فشار است.



شکل (۱۱)- اثرکسرحجمی نانوذرات بر سرعت لغزشی روی دیوار

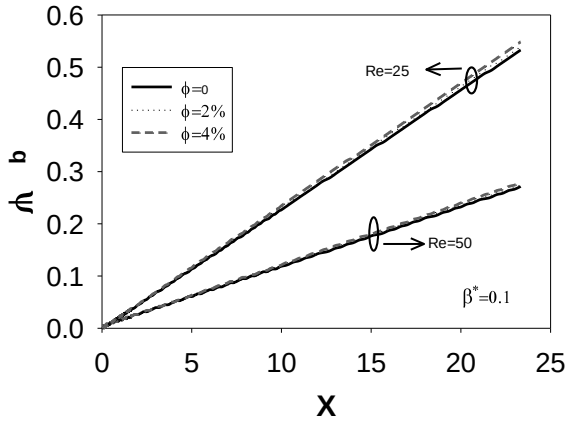


شکل (۱۲)- منحنی C_fRe در ناحیه درحال‌توسعه

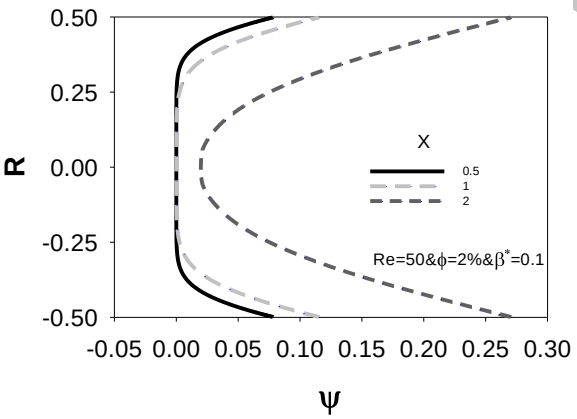
۶-۳- انتقال حرارت در ناحیه ورودی

با توجه به متغیر بودن دمای بالک در مقاطع مختلف برای بیان بهتر نتایج به‌جای استفاده از دمای بی‌بعد θ که به دمای بالک مقطع وابسته است از تعریف ψ که بر اساس شار دیواره بی‌بعد می‌گردد، استفاده‌شده است. تغییرات دمای بالک بی‌بعد در ناحیه ورودی در شکل ۱۳ نمایش داده‌شده است.

از این شکل نتیجه گرفته می‌شود که شیب منحنی دمای بالک که نشان‌دهنده نرخ تغییر دما در راستای جریان است در راستای لوله با مقدار رینولدز رابطه عکس و با درصد نانو ذرات رابطه مستقیم دارد. ضریب لغزش روی این شیب اثری نمی‌گذارد که بر اساس قانون بقای انرژی قابل توضیح است. پروفیل دما در مقاطع مختلف ورودی نیز در شکل ۱۴ دیده می‌شود.



شکل (۱۳)- تغییرات دمای بالک بی‌بعد در مقادیر مختلف رینولدز و درصد کسر حجمی نانو ذرات

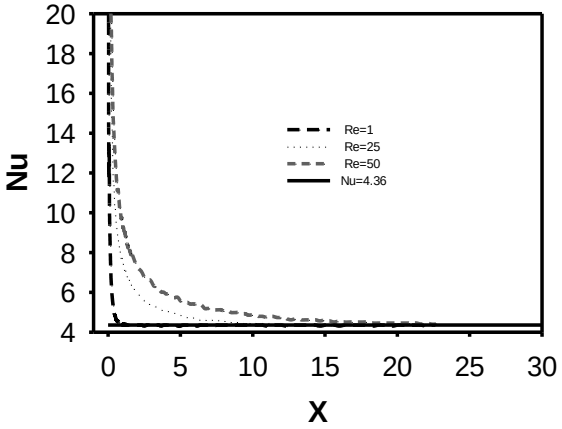


شکل (۱۴)- پروفیل دما در ناحیه ورودی

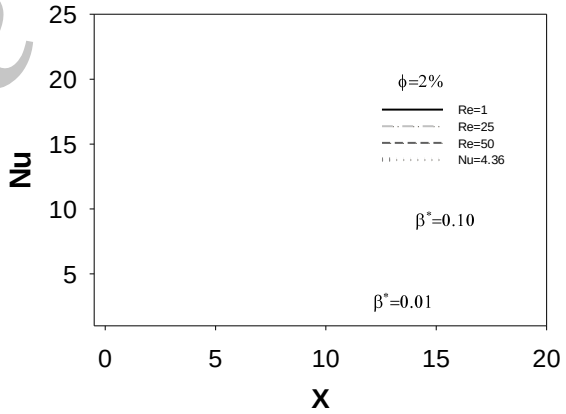
در شکل ۱۵ مقدار عدد ناسلت برای جریان آب خالص و شرط مرزی بدون لغزش ارائه‌شده است و مشاهده می‌گردد که عدد ناسلت جریان در هر سه مقدار عدد رینولدز به مقدار تحلیلی خود یعنی ۴/۳۶ رسیده است. این شکل برای نشان دادن صحت محاسبه مقدار عدد ناسلت جریان ارائه‌شده است. همچنین مقدار ناسلت موضعی در طول

www.SID.ir

کانال برای نانوسیال با کسر حجمی ۲% با شرط مرزی لغزش در شکل ۱۶ نمایش داده‌شده است. بنا به این شکل مقدار ناسلت در ناحیه توسعه یافته تنها وابسته به مقدار لغزش است اما رفتار آن در ناحیه درحال توسعه با مقدار رینولدز نیز رابطه مستقیم داشته و افزایش می‌یابد.



شکل (۱۵)- مقدار عدد ناسلت آب خالص در طول لوله بدون اثر لغزش



شکل (۱۶)- اثر لغزش بر مقدار عدد ناسلت موضعی در طول کانال

اثر نانو ذرات در مقدار ناسلت اثر قابل توجهی نداشته و در نتایج شبیه‌سازی تغییر قابل توجهی در مقدار ناسلت دیده نشد و درواقع عدد ناسلت در حدود یک درصد افزایش یافت و این نتیجه‌ای است که رییسی و همکارانش برای انتقال حرارت بین دو صفحه موازی با دمای ثابت نیز به دست آورده‌اند [۴]؛ و درنتیجه استفاده از نانوسیال در جریان‌های با عدد رینولدز پایین بهره چندانی به همراه نخواهد داشت.

۷ - نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به مطالعه جریان نانوسیال در یک میکرو لوله با رژیم لغزشی پرداخته شد و برای اولین بار از شرط مرزی لغزش در دیواره برای میکرو لوله استفاده گردید. بدین منظور نانوسیال آب-مس در درصدهای حجمی ۲%و ۴% در جریان آرام با مقادیر رینولدز ۱، ۲۵ و ۵۰ بررسی گردید و ضرایب لغزشی صفر (عدم لغزش)، ۰/۰۱ و ۰/۱ برای رژیم لغزشی استفاده گردید.

مشاهده شد که ویژگی‌های ناحیه توسعه‌یافته از قبیل پروفیل‌های دما و سرعت بدون بعد شده و مقدار ناسلت مستقل از مقادیر رینولدز و درصد حجمی نانو ذرات بوده و تنها به مقدار لغزش جریان وابسته است اما در ناحیه ورودی این مقادیر به رینولدز جریان نیز وابستگی نشان می‌دهند.

با توجه به محدوده رینولدز انتخاب شده افزایش نانو ذرات اثر قابل توجهی در انتقال حرارت نشان ندادند. درنتیجه افزایش نانو ذرات در مقادیر رینولدز پایین مفید نبوده و بهبودی در سیستم انتقال حرارت ایجاد نمی‌کند و تنها مشکلات نگهداری سیستم را افزایش می‌دهد.

۸- مراجع

[1] Sundar L.S, Singh M.K, Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review. Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013; 20: 23-35.

[2] Ahuja AS. Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspension: experiments and results. Journal of Applied Physics 1975; 46: 3408–16.

[3] Choi SUS Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: Proceedings of the 1995 ASME international mechanical engineering congress and exposition, San Francisco, CA, USA, 1995.

[4] Raisi A, Ghasemi B and Aminossadati S.M, A Numerical Study on the Forced Convection of Laminar Nanofluid in a Microchannel with Both Slip and No-Slip Conditions. Numerical Heat Transfer, 2011 Part A, 59, pp. 114-129.

Archive of SID

www.SID.ir

[5] Safaei M.R, Togun H, Vafai K, Kazi S.N, and Badarudin, A, Investigation of Heat Transfer Enchantment in a Forward-Facing contracting Channel using FMWCNT Nanofluids. Numerical Heat Transfer, 2014 Part A, 66, pp. 1321-1340.

[6] Karimipour A, Esfe M.H, Safaei, M.R, Semiromi D.T, and Kazi S.N, Mixed convection of Copper-Water nanofluid in a shallow inclined lid driven cavity using lattice Boltzmann method. Physica 2014 A, 402, pp. 150-168.

[7] Jung J.-Y, Oh H.-S, Kwak H.-Y, Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels, Int. J. Heat Mass Transfer 52 2009, 466-472.

[8] Heris S.Z, Etemad S.Gh, Esfahany M.N, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, Internationa Communication in Heat and Mass Transfer. 33 2006, 529-535. [9] Gad-el Hak M, Flow physics in MEMS, Rev. Mec. Ind., 2001, 2, 313-341.

[10] Adams T.M, Abdel-Khalik S.I, Jeter S.I, Qureshi Z.H, An experimental investigation of single-phase forced convection in microchannel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41, pp. 851-857.

[11] Xuan Y, Li Q, and Ye M, Investigation of convection heat transfer in ferrofluid microflows using lattice-Boltzmann approach, International Journal of Heat and Mass Transfer Thermal Sciences, 2007, 46, pp. 105-111.

[12] Ho C, Tia Y, Micro-electro-mechanical-system (MEMS) and fluid flows, Annu. Rev. Fluid Mech., 1998, 30, pp. 579-612.

[13] Choi Z, Zhang Y, Numerical simulation of laminar forced convection heat transfer Al2O3–water nanofluid in a pipe with return bend, 2012, 55, pp. 90-102.

[14] Tahir S, Mital M, Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel, Applied Thermal Engineering, 2012, 39, pp. 8-14.

[15] Akbarinia A, Laur R, Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach, International Journal of Heat and Fluid flow, 2009, 30, pp. 706-718.

[16] Kumar P, Ganesan R, A CFD Study of Turbulent Convection Heat Transfer Enhancement in Circular Pipeflow, Internatinal Journal of Civil and Envirronmental Engineering, 2012, 7, pp. 385-392.

[17] Duan Z, Muzychka Y.S,"Slip flow in non-circular microchannels", Microfluid Nanofluid 3(2007)473-484.

[18] Brinkman H.C, The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution, J. Chem. Phys.,1952, vol. 20, pp. 571–581.

[19] Patel H.E, Sundararajan T, Pradeep T, Dasgupta A, Dasgupta N, and Das S.K, A Micro-Convection Model for Thermal Conductivity of Nanofluids, Pramana — J. Phys.,2005, vol. 65, no. 5, pp. 863–869.

[20] Sun W, Kakac S, Yazicioglu A.G, A numerical study of Single-phase convection heat transfer in microtubes for slip flow, International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46, pp. 1084-1094.

[21] Bahrami H, Bergman T.L, Faghri A, Forced convection heat transfer in a microtubes including rarefaction, viscous dissipation and axial conduction effects, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55, pp. 6665-6675.

[22] Zhang T, Jia L, Zhicheng W, Validation of Navier-Stokes equations for slip flow analysis within transition region, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51, pp. 6323-6327.

[23] Bejan A, Convection Heat Transfer (4th Edition): John Wiley & Sons, Incorporated,. p 37

Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir