

## تحلیل عددی جریان آرام و انتقال حرارت نانوسیال در لوله

### مدور بادمای ثابت دیواره

محمد حجت<sup>(۱)</sup>\* محمودرضا خدنگی ماهرود<sup>(۲)</sup>

(۱) مربی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان

(۲) مربی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان

تاریخ ثبت اولیه: ۸۶/۳/۲۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۸۶/۷/۲۲، تاریخ پذیرش: ۸۷/۲/۴

**چکیده** در این تحقیق، انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال در یک لوله مدور مستقیم به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. نانوذره مورد استفاده اکسید آلومینیوم ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) و سیال پایه آب می‌باشد. با وجود این که نانوسیال یک مخلوط دوفازی است، ولی با فرض عدم لغزش بین سیال و نانوذرات و همچنین وجود تعادل حرارتی بین سیال و نانوذرات و با توجه به این که غلظت نانوذره پایین می‌باشد، می‌توان آن را به صورت تک فازی در نظر گرفت و همانند سیالات معمولی مورد بررسی قرار داد. نتایج به دست آمده نشان دهنده افزایش، چشمگیر که ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه خیلی زیادتر را نشان می‌دهند. این افزایش تابع غلظت نانوذره و عدد رینولدز می‌باشد. افزون بر این، نتایج نشان دهنده افزایش بسیار زیاد تنش برشی دیواره نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌باشند که این هم با زیاد شدن غلظت نانوذره افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی** نانوسیال، ضریب انتقال حرارت، شبیه‌سازی عددی، لوله مدور.

\*عهده دار مکاتبات

نشانی: قوچان - دانشگاه آزاد اسلامی - گروه مهندسی شیمی

تلفن: ۰۹۱۵۵۱۱۳۶۲۹ پست الکترونیکی: [md\\_hojjat@yahoo.com](mailto:md_hojjat@yahoo.com)

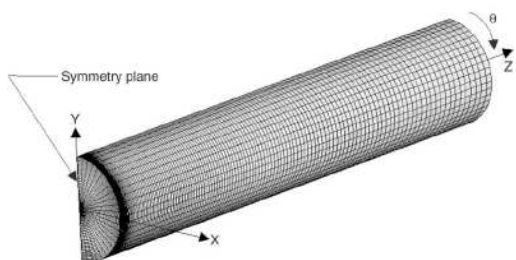
۱- مقدمه

ژوان و روتزل [6] روابط متعددی برای انتقال حرارت نانوسیالات به دست آورده‌اند. آن‌ها برای بیان مکانیزم افزایش انتقال حرارت نانوسیالات از هر دو روش تک‌فازی و دو‌فازی استفاده نمودند. لازم به ذکر است که برای تأیید یا رد این روش‌ها به نتایج تجربی بیشتری نیاز می‌باشد.

آن چه مسلم است این که تئوری‌های موجود و روش‌های عددی متداول برای مخلوط‌های دو فازی در مورد نانوسیالات دقیق نبوده و ارایه تئوری‌ها و روش‌های جدیدی برای بیان رفتار نانوسیالات مورد نیاز می‌باشد، که این خود مستلزم تحقیقات تجربی و نظری متعددی بر روی رفتار نانوسیالات می‌باشد.

## ۲- شکل هندسی مسئله

آرایش هندسی مسئله در شکل (۱) آورده شده است. جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری آرام به صورت پایا درون یک لوله مستقیم با سطح مقطع مدور مورد مطالعه قرار گرفته است. سیال با توزیع دما و سرعت محوری یکنواخت وارد لوله می‌شود. طول لوله به اندازه‌ای بلند هست که جریان در خروجی آن به صورت کاملاً توسعه یافته درآید. شرط مرزی دمای ثابت دیواره در نظر گرفته شده و میدان جریان و حرارت در جهت زاویه‌ای ( $\theta$ ) متقارن فرض شده است.



شکل ۱ آرایش هندسی مسئله مورد مطالعه

## ۳- فرضیات و معادلات حاکم

تا کنون تحقیقات تجربی و نظری گوناگونی روی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات صورت گرفته است. تقریباً همه کارهای تجربی صورت گرفته مؤید افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌باشند [1]. تحقیقات نظری مختلفی هم در این زمینه صورت پذیرفته، که شامل شبیه‌سازی‌های عددی رفتار حرکتی و حرارتی نانوسیالات می‌باشند.

در شبیه‌سازی‌های عددی دوروش مختلف برای بررسی مشخصه‌های حرکتی و حرارتی نانوسیالات به کاررفته‌اند. در روش اول فرض بر این است که نانوسیال تک فازی می‌باشد و معادلات حاکم بر سیالات معمولی برای سیالات محتوی ذرات معلق با ابعاد نانومتری نیز صادق می‌باشند. روش دیگر از یک مدل دو فازی برای تشریح رفتار نانوسیالات استفاده می‌نماید. این روش در مقالات کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. روش تک فازی ساده‌تر و از لحاظ محاسباتی مفیدتر می‌باشد. یک روش دیگر هم استفاده از تئوری بولتزن می‌باشد.

مایگا و همکارانش [2,3] مشخصه‌های حرکتی و حرارتی نانوسیالات جاری در یک لوله مدور مستقیم را در شرایط جریان آرام و درهم با شرط مرزی شار حرارتی ثابت دیواره، با مدل تک فازی به صورت عددی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان‌دهنده افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌باشند. مایگا و همکارانش [4] هم چنین نشان دادند که افزودن نانوذرات به سیال پایه موجب اثر نامطلوب افزایش تنش برشی دیواره می‌گردد.

روی و همکارانش [5] انتقال حرارت نانوسیال آب/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\gamma$  را در یک سیستم خنک کننده شعاعی به صورت عددی بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که افزودن نانوذره به سیال پایه موجب افزایش بسیار زیاد ضریب انتقال حرارت آن می‌گردد. مثلاً افزودن ۱۰ درصد حجمی نانوذره به سیال پایه نرخ انتقال حرارت آن را دو برابر می‌کند.

ویسکوز در معادله انرژی قابل صرفنظر کردن فرض شده‌اند.

تحت این شرایط معادلات بقاء به صورت زیر نوشته می‌شوند [4]:

- بقاء جرم

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

- بقاء مومنتوم

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

- بقاء انرژی

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} C_p) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

در معادلات فوق  $\mathbf{V}$ ،  $P$ ، و  $T$  به ترتیب بردارهای سرعت، فشار و دمای سیال می‌باشند.

#### ۴- شرایط مرزی

معادلات حاکم (معادلات ۱ تا ۳) یک دستگاه معادله غیرخطی و وابسته را تشکیل می‌دهند که باید تحت شرایط مرزی مناسب حل شوند. در ورودی لوله لوله سرعت محوری یکنواخت  $V_0$  و توزیع دمایی یکنواخت  $T_0$  مفروض می‌باشند. در روی دیواره شرط متداول عدم لغزش اعمال می‌شود.

#### ۵- خواص فیزیکی نانوسیالات

با فرض این که نانوذرات به خوبی در سیال پراکنده شده‌اند، غلظت ذره در تمام دامنه را می‌توان یکنواخت در نظر گرفت. با دانستن غلظت ذره و خواص اجزاء تشکیل دهنده خواص فیزیکی مؤثر مخلوط را می‌توان از بعضی از روابط کلاسیک سیالات دوفازی و روابط ارائه شده برای نانوسیالات به صورت زیر به دست آورد [7,9,10,11]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (4)$$

$$C_{p,nf} = (1 - \phi)C_{p,bf} + \phi C_{p,p} \quad (5)$$

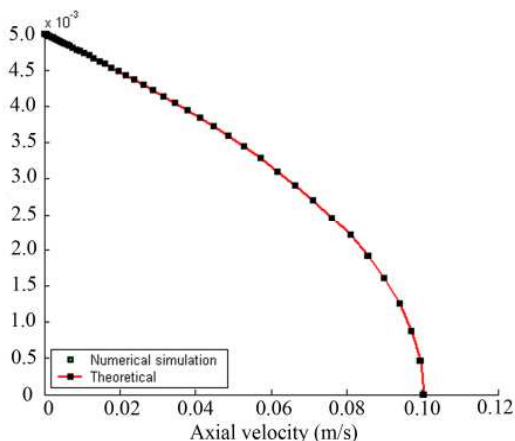
$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (123 \phi^2 + 7.3 \phi + 1) \quad (6)$$

تاکنون هیچ تئوری فرموله شده‌ای که بتواند رفتار حرکتی نانوسیال را به صورت یک ماده چندجزیی پیش بینی نماید ارائه نشده است. لازم به یادآوری است که بیشتر نانوسیالات مورد استفاده در انتقال حرارت محتوی ذراتی کوچک تر از ۴۰ نانومتر می‌باشند. به دلیل ابعاد فوق العاده کوچک عقیده بر این است که این ذرات می‌توانند به سادگی سیالیت پیدا نمایند و از این رو می‌توان فرض کرد که همچون یک سیال عمل می‌نمایند [6].

بنابراین با فرض این که حرکت لغزشی بین ذره و فاز پیوسته قابل چشمپوشی می‌باشد و این که تعادل حرارتی برقرار است، نانوسیال را می‌توان به صورت یک سیال تک فازی در نظر گرفت. خواص فیزیکی مؤثر تابعی از خواص سیال پایه و ذرات و غلظت ذره می‌باشند [6,7]. نتیجه جالبی که از چنین فرضی به دست می‌آید این است که امکان بررسی نانوسیالات مانند سیالات متداول امکان پذیر است به این معنی که تئوری کلاسیک بسط یافته برای سیالات تک فازی مرسوم در مورد نانوسیالات هم قابل استفاده می‌باشد. بنابراین همه معادلات بقاء (جرم، انرژی و مومنتوم) مربوط به سیالات تک فازی در مورد نانوسیالات هم به کار می‌روند. اگر چه برای تأیید این فرض به داده‌های تجربی زیادی نیاز می‌باشد ولی به نظر می‌رسد که صحت این فرض به وسیله کارهای تجربی اخیر که روابطی شبیه به رابطه معروف دیتوس - بولتر برای پیش بینی انتقال حرارت نانوسیالات ارائه نموده‌اند [7,8]، تا حدی مورد تأیید قرار گرفته است.

با توجه به مطالب فوق الذکر در این کار پژوهشی برای بررسی رفتار حرکتی و حرارتی نانوسیالات روش تک فازی مورد پذیرش و استفاده قرار گرفته است. در کاربردهای خاص مورد نظر فرض بر این است که نانوسیالات تراکم ناپذیر و دارای خواص ثابت می‌باشند. هم چنین کار تراکم و تلفات

مقایسه شدند. نتایج مربوط به این مقایسه در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. تطابق بسیار عالی بین نتایج کاملاً مشخص می‌باشد.



شکل ۲ مقایسه سرعت محوری حاصل از شبیه سازی عددی با مقادیر تئوری در ناحیه کاملاً توسعه یافته برای آب خالص .

افزون براین، مقادیر عدد ناسلت متوسط حاصل از شبیه سازی عددی برای جریان آب خالص با مقادیر به دست آمده از معادله معروف سیدروتیت (Sieder and Tate):

$$\overline{Nu}_D = 1.86 \left( \frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$$

$$T_s = \text{constant}$$

$$0.48 < Pr < 16700$$

$$0.0044 < \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right) < 9.75$$

$$Re = \rho u D / \mu \quad (10)$$

مقایسه شدند. شکل (۳) این مقایسه را نشان می‌دهد. این شکل نشان‌دهنده دقت قابل قبول شبیه سازی عددی نیز می‌باشد.

$$k_{nf} = k_{bf} (4.97 \phi^2 + 2.72 \phi + 1) \quad (7)$$

که  $\rho$  دانسیته،  $C_p$  ظرفیت گرمایی مخصوص،  $\mu$  ویسکوزیته،  $k$  ضریب هدایت حرارتی و  $\phi$  جزء حجمی نانوذره می‌باشد. زیر نویس های  $bf$ ،  $p$  و  $nf$  به ترتیب، بیان گر مقادیر مربوط به نانوذره، سیال پایه و نانوسیال می‌باشند.

### ۶- روش عددی

معادلات حاکم (معادلات ۱ تا ۳) با توجه به شرایط مرزی مناسب با استفاده از روش عددی مبتنی بر "حجم محدود" حل شده‌اند. روش حل به صورت کامل در مراجع یافت می‌شود [12]. این روش بر انتگرال گیری فضایی از معادلات بقاء روی حجم‌های محدود مبتنی می‌باشد. در شبیه سازی عددی انجام شده در این پژوهش برای حل معادلات حاکم از روش حل تفکیکی استفاده شده است [13].

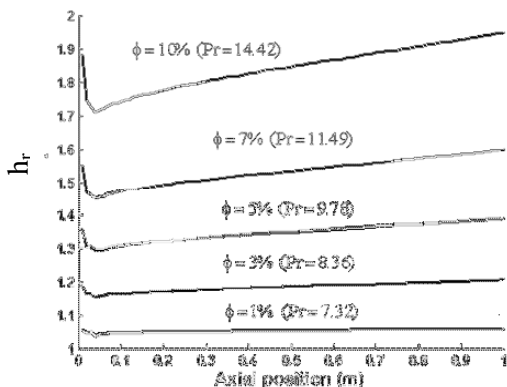
### ۷- مطالعه حساسیت شبکه و صحت شبیه سازی

به منظور اطمینان از دقت و سازگاری نتایج عددی چندین شبکه غیر یکنواخت مورد بررسی قرار گرفتند. مشخص شد که تغییرات نتایج حاصل از شبیه سازی با افزایش تعداد نقاط به بیش از ۳۰ نقطه در جهت شعاعی و ۱۰۰ نقطه در جهت محوری قابل چشمپوشی می‌باشند. بنابر این شبکه  $100 \times 30$  مورد پذیرش و استفاده قرار گرفت.

برای تأیید صحت شبیه سازی سرعت محوری حاصل از شبیه سازی عددی در ناحیه کاملاً توسعه یافته با مقادیر به دست آمده از رابطه تئوری مربوط به جریان آرام کاملاً توسعه یافته به صورت زیر:

$$\frac{u}{u_m} = 2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (8)$$

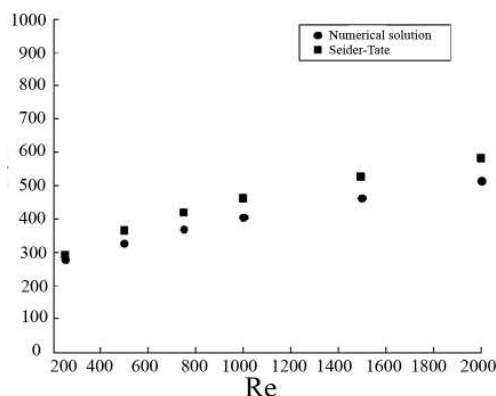
حرارت آن را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. به عنوان مثال در غلظت ۷ درصد حجمی از نانوذره نسبت ضرایب انتقال حرارت در نزدیکی انتهای لوله حدود ۱/۶ می‌باشد، یعنی ضریب انتقال حرارت نانوسیال حدود ۶۰ درصد نسبت به سیال پایه افزایش یافته است. این نسبت با افزایش  $\phi$  افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در فاصله کوتاهی از ابتدای لوله  $(h_r (= h_{nf} / h_{bf}))$  از اهمیت زیادی برخوردار است و به سرعت کاهش می‌یابد ولی در بقیه لوله تقریباً ثابت می‌ماند به جز در غلظت‌های بالا که به سمت انتهای لوله افزایش نشان می‌دهد.



شکل ۴ نسبت ضرایب انتقال حرارت جا به جایی محلی در  $Re=500$  غلظت‌های متفاوت نانوذره در

نتایج عددی در مورد تنش برشی دیواره نشان دهنده افزایش بسیار زیاد آن در اثر افزودن نانوذره به سیال پایه می‌باشند.

در شکل (۵) نسبت تنش‌های برشی دیواره در غلظت‌های متفاوت نانوذره در  $Re = 500$  نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که در یک غلظت مشخص از نانوذره این نسبت تقریباً در تمام طول لوله - به جز طول کوتاهی از ابتدای لوله که در شکل قابل مشاهده نمی‌باشد - ثابت است و این که با افزایش غلظت نانوذره  $(\tau_r (= \tau_{nf} / \tau_{bf}))$  به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و این موضوع در تمام طول لوله صادق است. مثلاً در غلظت ۷ درصد حجمی از نانوذره  $\tau_r$



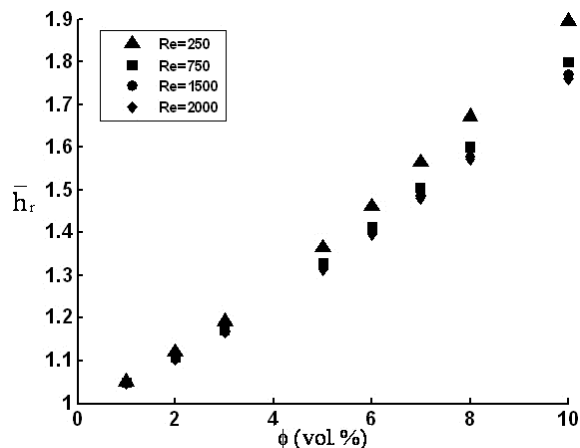
شکل ۳ مقایسه ضریب انتقال حرارت متوسط حاصل از شبیه‌سازی عددی با مقادیر حاصل از معادله سیدر و تیت برای آب خالص.

### ۸- نتایج

در این تحقیق شبیه‌سازی‌های عددی زیادی در مورد جریان آرام نانوسیال آب/ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  در لوله مدور با شرط مرزی دمای ثابت دیواره صورت پذیرفت. قطر لوله ۰/۰۱ متر و طول آن ۱ متر در نظر گرفته شد. برای در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر جریان سیال و انتقال حرارت شبیه‌سازی‌ها در اعداد رینولدز ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ انجام گرفت. دمای سیال ورودی ۲۹۳/۱۵ K و دمای دیواره ۳۷۳/۱۵ K در نظر گرفته شد. برای بررسی اثر غلظت نانوذره بر رفتار حرکتی و حرارتی، غلظت‌های مختلف ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۱۰ درصد حجمی از نانوذره مورد بررسی قرار گرفتند.

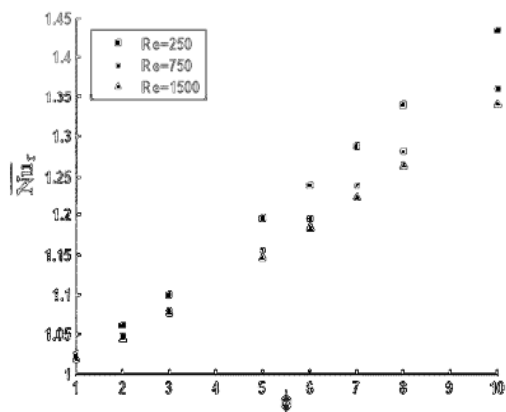
### ۹- اثر غلظت نانوذره بر رفتار حرکتی و حرارتی نانوسیال

نتایج به دست آمده به روشنی نشان می‌دهند که وجود نانوذرات اثر قابل ملاحظه‌ای روی رفتار حرارتی مخلوط دارد. شکل (۴) نشان‌دهنده نسبت ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی در غلظت‌های مختلف نانوذره در  $Re = 500$  می‌باشد. این شکل به وضوح بیان می‌دارد که افزودن نانوذره به سیال پایه ضریب انتقال



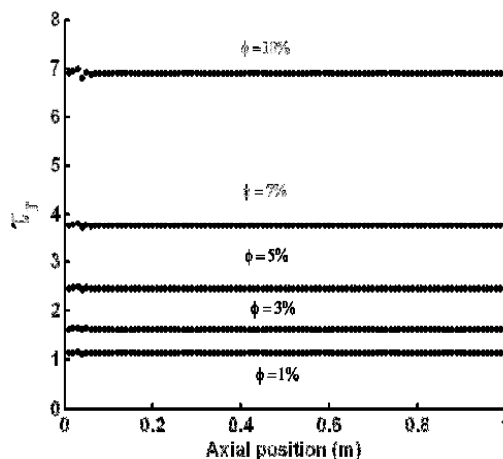
شکل ۶ نسبت ضرایب انتقال حرارت متوسط برحسب غلظت نانوذره در اعداد رینولدز متفاوت.

مشاهده می‌شود که در یک عدد رینولدز مشخص ضریب انتقال حرارت متوسط با افزایش غلظت نانوذره افزایش پیدا می‌کند؛ مثلاً در عدد رینولدز ۷۵۰ مقدار  $h_r$  در غلظت ۱۰ درصد حجمی از نانوذره حدود ۸۰ درصد بیش از مقدار مربوط به سیال پایه می‌باشد. نکته دیگر این است که با افزایش عدد رینولدز افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه کاهش پیدا می‌کند. البته این کاهش در غلظت‌های پایین نانوذره قابل ملاحظه نمی‌باشد. همین رفتار در مورد نسبت اعداد ناسلت متوسط هم قابل مشاهده می‌باشد. این موضوع در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷ نسبت اعداد ناسلت متوسط برحسب غلظت نانوذره در اعداد رینولدز متفاوت.

حدود ۳/۷۶ می‌باشد یعنی تنش برشی دیواره حدود ۴ برابر مقدار مربوط به سیال پایه در شرایط یکسان می‌باشد.



شکل ۵ نسبت تنش برشی دیواره در غلظت‌های متفاوت Re=500.

نتایج کامل این تحقیق بیانگر رفتاری مشابه برای سایر اعداد رینولدز و غلظت‌های نانوذره می‌باشند.

### ۱۰- اثر غلظت نانوذره و عدد رینولدز روی ضریب انتقال حرارت متوسط

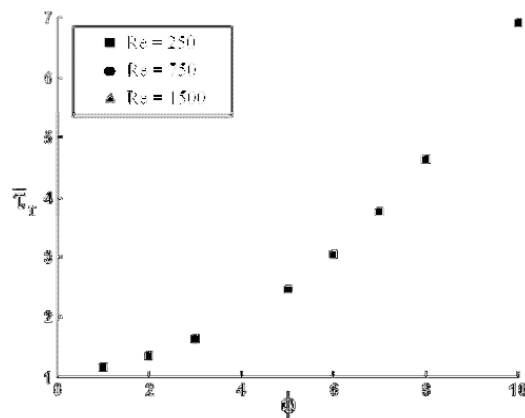
افزون بر مقادیر محلی ضرایب انتقال حرارت مقادیر متوسط این ضرایب در اعداد رینولدز و غلظت‌های متفاوت نانوذره محاسبه شده‌اند. شکل (۶) نشان دهنده نسبت ضرایب انتقال حرارت جا به جایی متوسط بر حسب غلظت نانوذره در اعداد رینولدز متفاوت می‌باشد. افزایش غلظت منجر به افزایش عدد پرانتل می‌شود. بنابراین طبق معادله (۹) افزایش آن موجب افزایش عدد ناسلت متوسط خواهد شد. اولین نکته قابل ملاحظه این است که چشم‌پوشی از مقدار عدد رینولدز، افزودن نانوذره موجب بهبود رفتار حرکتی نانوسیال می‌شود.

بر این ملاحظه می‌شود که افزودن نانو ذرات به سیال پایه اثر معکوس روی تنش برشی دیواره دارد به این معنی که با افزودن نانوذره به سیال پایه تنش برشی دیواره افزایش می‌یابد و مقدار آن با زیاد شدن غلظت نانوذره افزایش می‌یابد. افزایش قابل ملاحظه ضریب انتقال حرارت می‌تواند موجب کاهش دبی گردشی- به‌ازاء نرخ انتقال حرارت مشخص- و در نتیجه توان مصرفی پمپ گردد، افزون براین، معمولاً جزء کوچکی از انرژی‌های مبادله شده در یک فرآیند صرف پمپ کردن سیال انتقال حرارت می‌گردد بنابراین، عملاً افزایش بسیار زیاد ضریب انتقال حرارت افزایش تنش برشی دیواره را تحت الشعاع قرار می‌دهد.

## ۱۱- اثر غلظت نانوذره و عدد رینولدز بر تنش

### برشی متوسط دیواره

این اثر در شکل (۸) قابل مشاهده می‌باشد. نتایج برای اعداد رینولدز ۲۵۰، ۷۵۰ و ۱۵۰۰ ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که عدد رینولدز تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی نسبت تنش برشی متوسط دیواره ندارد و دیگر این که با افزایش غلظت نانوذره در یک عدد رینولدز مشخص، نسبت تنش برشی متوسط دیواره به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. مثلاً در  $Re = 500$  تنش برشی متوسط دیواره نانوسیال با غلظت ۱۰ درصد حجمی از نانوذره حدود ۶/۹ برابر مقدار مربوط به سیال پایه می‌باشد.



شکل ۸ نسبت تنش‌های برشی متوسط دیواره برحسب غلظت نانوذره در اعداد رینولدز متفاوت.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر افزودن نانوذره به سیال پایه بر روی رفتار حرکتی و حرارتی آن در یک لوله مدور مستقیم به صورت شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان ملاحظه کرد که افزودن نانوذره به سیال پایه موجب افزایش قابل ملاحظه ضریب انتقال حرارت آن می‌گردد و مقدار این ضریب با افزایش غلظت نانوذره زیاد می‌شود.

نتایج نشان می‌دهند که عدد رینولدز اثر زیادی روی نسبت ضرایب انتقال حرارت متوسط ندارد. افزون

1. X.Q. Wang, A. S. Mujumdar, "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review", International Journal of Thermal Sciences, (2006).
2. S.E.B Maiga, C.T. Nguyen, N. Galanis, G Roy, "Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube", Superlattices and Microstructures, vol. 35, pp.543-557, (2004).
3. S.E.B. Maiga, C.T. Nguyen, N. Galanis, G. Roy, "Hydrodynamic and thermal behaviours of a nanofluid in a uniformly heated tube, in: Computational Studies", vol. 5, WIT Press, Southampton, SO40 7AA, pp. 453–462, , (2004).
4. S.E.B. Maiga, S.J. Palm, C.T. Nguyen, G. Roy, N. Galanis, "Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows", Int. J Heat Fluid flow, vol. 26, pp.530-546, (2005).
5. G. Roy, C.T. Nguyen, P. Lajoie, "Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluid, Superlattices and Microstructures", vol.35, pp. 497-511, (2004).
6. Y. Xuan, W. Roetzel, "Conception for heat transfer correlation of nanofluids, Int. J Heat Mass Transfer", vol. 43, pp. 3701-3707, (2000).
7. B.C. Pak, Y.I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", Experiment. Heat Transfer vol. 11. No. 2, pp.151–170, (1998).
8. Q. Li, Y. Xuan, "Convective heat transfer performances of fluids with nano-particles", In: Proc. 12<sup>th</sup> Int. Heat Transfer Conference, Grenoble, France, pp. 483–488, (2002).
9. X. Wang, X. Xu, S.U. Choi, "Thermal conductivity of nanoparticles–fluid mixture", J. Thermophys. Heat Transfer, vol. 13, No. 4, pp. 474–480, (1999).
10. H.C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solution, J. Chem. Phys. 20, 571–581, (1952).
11. G.K. Batchelor, "The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles", J. Fluid Mech. vol. 83, No.1, pp. 97–117, (1977).
12. S.V. Patankar, "Numerical heat transfer and fluid flow", McGraw-Hill, (1980).
13. "Fluent 6 User's Guide", Fluent Inc., NH, USA, (2002).

### ارائه یک مدار BiCMOS جدید برای راندن بارهای خازنی بزرگ

امید هاشمی پور<sup>(۳)</sup>

کیوان ناوی<sup>(۲)\*</sup>

محمد رشتیان<sup>(۱)</sup>