

## تحلیل عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌ها درون لوله با انحنای ۹۰°

احسان ابراهیم‌نیا بجنستان

دانشجوی دکتری تبدیل انرژی

دانشگاه فردوسی مشهد

حمید نیازمند\*

دانشیار مکانیک

دانشگاه فردوسی مشهد

**چکیده:** در این مقاله شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات در یک لوله با خم ۹۰ درجه مورد تحلیل قرار گرفته است. نانوسیال مورد بررسی در این مقاله مخلوط آب و نانو ذرات  $Al_2O_3$  و جریان ورودی به لوله از نظر هیدرودینامیکی توسعه یافته است. چگالی و ظرفیت حرارت مخلوط به کمک مدل‌های کلاسیک مخلوط دو فاز محاسبه می‌شوند. لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با برازش خم بر روی داده‌های آزمایشگاهی موجود بدست می‌آید. معادلات ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر، ناپایا و آرام برای یک سیستم مختصات منطبق بر جسم با استفاده از روش حجم‌کنترلی حل شده‌اند. به منظور افزایش سرعت همگرایی عددی میدان جریان، یک تصحیح فشار جهت برقراری معادله پیوستگی در هر مقطع لوله انجام می‌گیرد. به این صورت که اختلاف دبی جرمی عبوری از هر مقطع نسبت به دبی جرمی ورودی اندازه‌گیری می‌شود و سپس با استفاده از رابطه اولر یک گرادیان فشار جهت تصحیح میدان فشار حاصل می‌گردد. در این مقاله اثر کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات و نیروی گریز از مرکز بر روی الگوی جریان، عدد ناسلت و تنش برشی جداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج، افزایش عدد ناسلت تا حدود ۷٪ در کسر حجمی ۴٪ نانوذرات و عدد رینولدز ۱۲۰۰ مشاهده می‌شود. خم لوله نیز باعث افزایش عدد ناسلت می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** نانوسیال، نانوذرات، جریان آرام، لوله خمیده، حل عددی

### ۱. مقدمه

به منظور صرفه‌جویی اقتصادی و بهینه‌سازی سیستم‌های بکار رفته در صنایعی چون صنایع الکترونیکی و فضایی، طراحی و ساخت مبدل‌های حرارتی با ابعاد کوچک، وزن سبک و راندمان بالا ضروری می‌باشد. با این وجود، ضریب هدایت پایین سیالات عامل متداول در تجهیزات حرارتی مانند آب، روغن و اتیلن گلیکول محدودیت اولیه بر سر راه توسعه و پیشرفت این تجهیزات است. روش مناسب در بهبود و افزایش هدایت حرارتی سیالات، افزودن ذرات جامد کوچک فلزی، غیر فلزی و یا پلیمری به سیال پایه است [۱]. به خوبی مشخص است که فلزات در شکل جامد خود دارای هدایت حرارتی بسیار بالایی نسبت به سیالات هستند. به عنوان مثال هدایت حرارتی مس در دمای محیط حدود ۷۰۰ برابر آب و ۳۰۰۰ برابر روغن موتور است. به همین دلیل، انتظار می‌رود که سیالات حاوی ذرات جامد معلق فلزی یا اکسید فلزی دارای هدایت حرارتی بیشتری نسبت به سیالات خالص باشند [۲].

بررسی‌ها و مدل‌سازی‌های مربوط به افزودن ذرات جامد به منظور افزایش ضریب هدایت سیالات به سال‌ها قبل بر می‌گردد، به طوری که کار تئوری و نظری ماکسول حدود ۱۰۰ سال پیش منتشر شده است. ولی تا سال‌های اخیر بررسی‌ها برای ذرات با

\* مؤلف مکاتبه کننده:

پست الکترونیکی: [hniazmand@yahoo.com](mailto:hniazmand@yahoo.com)

تلفن: ۵۱۱ ۸۷۶۳۳۰۴ (+۹۸) // فاکس: ۵۱۱ ۸۷۶۳۳۰۴ (+۹۸)

اندازه میلی متری یا میکرومتری صورت گرفته است. در این مقیاس‌ها، مشکلاتی نظیر ته‌نشینی سریع، ایجاد سایس در مسیر جریان و افزایش افت فشار دیده می‌شد. به علاوه برای سیستم‌های میکرونی انتقال حرارت، این ذرات بسیار درشت بودند [۲]. نانوسیالات نسل جدیدی از سیالات شامل ذرات با ابعاد نانو هستند که توانایی غلبه بر این مشکلات به کمک ساختن یک تعلیق پایدار را دارند [۳]. در مقایسه با ذرات میکرو، ذرات نانو مدت طولانی‌تری در سیال پایدار می‌مانند و خواص انتقال حرارتی بسیار مطلوب‌تری دارند [۴].

مفاهیم و مدل‌های مختلفی جهت توضیح رفتار نانوسیالات ارائه شده‌اند. علی‌رغم این واقعیت که نانوسیال یک مخلوط دو فازی است، از آن‌جا که ذرات جامد بسیار کوچک و کسر حجمی آن‌ها بسیار پایین می‌باشد، می‌توان مخلوط را تک فاز در نظر گرفت. به دلیل جدید بودن مبحث نانوسیالات، مطالعات کمی در زمینه جریان و انتقال حرارت اجباری نانوسیالات انجام گرفته است. مایگا<sup>۱</sup> و همکارانش [۵] جابجایی اجباری آرام نانوسیالات  $Al_2O_3$ -آب و  $Al_2O_3$ -اتیلن گلیکول داخل لوله با شار حرارتی ثابت را به صورت عددی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ضریب جابجایی محلی افزایش می‌یابد. هریس و همکارانش [۶] جریان اجباری آرام نانوسیال  $Al_2O_3$ -آب داخل لوله با دمای دیواره ثابت را به صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه کردند. نتایج آن‌ها بیانگر افزایش ضریب جابجایی با افزایش کسرهای حجمی است. هم‌چنین در تحقیق آن‌ها، افزایش ضریب جابجایی توسط مدل کلاسیک، کمتر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌گویی شد. ون<sup>۲</sup> و دینگ<sup>۳</sup> [۷] جریان داخلی آرام نانوسیال  $Al_2O_3$ -آب را صورت آزمایشگاهی در منطقه ورودی و توسعه‌یافته مورد بررسی قرار دادند و افزایش چشم‌گیر در ضریب انتقال حرارت را در دو منطقه مشاهده کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش Re جریان و کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. دینگ و همکارانش [۸] جریان نانوسیال نانولوله کربن-آب را به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند و افزایش تا ۳۵۰٪ در ضریب انتقال حرارت جابجایی برای کسر جرمی ۰٫۵٪ در عدد رینولدز ۸۰۰ مشاهده نمودند. این افزایش چشم‌گیر با تنها افزایش ضریب هدایت حرارتی قابل توجه نیست. این افزایش را می‌توان به نسبت هندسی بالای نانولوله، پخش و پایداری مناسب نانوذرات در سیال نسبت داد. آن‌ها همچنین نشان دادند که در کسر حجمی و pH معلوم، یک عدد Re مشخص برای بیشترین افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی وجود دارد.

بررسی مدل‌های مختلف ارائه شده برای خصوصیات نانوسیالات نشان می‌دهد که کارایی پیش‌بینی شده از مدل‌های مختلف برای نانوسیالات نظیر قدرت پمپ یا اندازه مبدل حرارتی، متفاوت است. عدم وجود مدل مناسب و جامع برای نانوسیالات، کاربرد عملی نانوسیالات را با مشکل مواجه می‌سازد، که این لزوم توسعه، تصحیح و ارائه مدل‌های جدید و جامع برای خصوصیات نانوسیالات جهت کاربردهای عملی را ثابت می‌کند [۴].

جهت ارائه مدل مناسب، شناخت مکانیزم‌های افزایش انتقال حرارت جابجایی در نانوسیالات ضروری است که با توجه به گزارشات صورت گرفته برخی از این مکانیزم‌ها عبارتند از: الف) افزایش ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال ناشی از حضور نانوذرات: افزایش ضریب هدایت هم‌چنان به عنوان یکی از دلایل مطرح می‌شود [۹]. با این وجود مشخص شده است که افزایش ضریب هدایت سهم کوچکی از افزایش ضریب جابجایی را شامل می‌شود [۸]؛ ب) افزایش ضریب هدایت حرارتی ناشی از شرایط جریان برشی: برخی از محققین با اندازه‌گیری ضریب هدایت سوسپانسیون‌های شامل ذرات میکرو تحت شرایط جریان برشی افزایش قابل توجه در مقدار ضریب هدایت را مشاهده کردند. ممکن است ذرات نانو نیز تحت جریان برشی رفتار مشابهی را نشان دهند [۱۰ و ۱۱]؛ ج) توزیع غیریکنواخت تنش برشی در سطح مقطع لوله: در جریان داخلی بیشترین مقدار نرخ برشی در کنار دیواره و کمترین مقدار آن در مرکز اتفاق می‌افتد. در این چنین مواردی دو پدیده رخ می‌دهند. یکی این‌که، با توجه به رفتار برشی لاغری<sup>۴</sup> نانوسیالات، در نزدیک دیواره که نرخ برشی بالاست، لزجت کمتر است. در نتیجه ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد. پدیده دوم این‌که، توزیع غیریکنواخت تنش برشی باعث مهاجرت میکروذرات از قسمت تنش بالا به

<sup>1</sup> Maiga

<sup>2</sup> Wen

<sup>3</sup> Ding

<sup>4</sup> shear thinning

ناحیه تنش پایین مرکزی می‌شود. این خود عاملی بر تشدید غیر یکنواختی لزجت و ضریب هدایت در یک سطح مقطع است. ممکن است رفتار مشابهی در سوسپانسیون‌های شامل نانوذرات بروز کند [۱۰]؛ د) افزایش ضریب تری<sup>۵</sup>: آزمایشاتی جهت محاسبه زاویه تماس<sup>۶</sup> آب خالص و نانوسیال نانولوله تیتانیوم-آب بر روی سطح مسی انجام شده است. زاویه تماس آب خالص حدود ۷۰ درجه و زاویه نانوسیال ۱۵ درجه بوده است [۱۰]. این نشان دهنده ضریب تری بیشتر نانوسیال روی سطح نسبت به سیال پایه است که می‌تواند عاملی در جهت افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات باشد [۱۰، ۱۲ و ۱۳]؛ ه) شکل ذرات و کلوخه شدن ذرات: نانولوله‌ها به دلیل ضریب هندسی بالا نسبت به نانوذرات کروی افزایش بیشتری در ضرایب انتقال حرارت ایجاد می‌کنند. همچنین به هم چسبیدن اولیه نانوذرات عاملی برای افزایش ضریب هدایت و در نتیجه افزایش ضریب جابجایی معرفی می‌شود [۱۰]؛ و) حرکات تصادفی نانوذرات و پخش حرارتی<sup>۷</sup>: حرکات تصادفی نانوذرات داخل سیال باعث پخش حرارتی می‌گردد که تبادل حرارت داخل سیال را سرعت می‌دهد. در این مفهوم یک هدایت ساختگی به نام ضریب پخش حرارتی (با فرض وجود سرعت لغزشی بین نانوذرات و مایع و فرض ایجاد یک اغتشاش دمایی و سرعتی در اثر حرکات نانوذرات) به هدایت حرارتی موثر در جریان نانوسیالات اضافه می‌گردد [۱۴]؛ ز) مهاجرت ذرات<sup>۸</sup>: مدلی برای پیش‌گویی مهاجرت ذرات موجود در نانوسیالات، در جریان آرام و فشار محرک داخل لوله به صورت نسبتاً دقیق ارائه شده است و نشان می‌دهد مهاجرت ذرات که ناشی از تنش برشی، گرادیان لزجت و گرادیان غلظت ذرات است، عامل تغییرات زیاد در توزیع شعاعی ذرات، لزجت و ضریب هدایت می‌باشد [۱۵]؛ ح) سایر مکانیزم‌ها: برخی دیگر بر این عقیده‌اند که نفوذ ناشی از حرکات براونی و نفوذ ناشی از اختلاف دما، مکانیزم‌های مهم در جریان آرام و زیر لایه لزج جریان مغشوش هستند. اما در حوزه مغشوش گرداب‌های جریان مغشوش عامل مهم در جابجایی نانوذرات هستند [۱۶].

با توجه به موارد مذکور، هنوز دلایل افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی در نانوسیالات به روشنی مشخص نشده است. عوامل متعدد ارائه شده نیاز به بررسی مجزا و دقیق دارند، که در این مقاله به کمک روش عددی، اثر تغییر خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال، نظیر ضریب هدایت و لزجت دینامیکی و همچنین اثر هندسه جریان بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. جریان داخل لوله‌های خمیده یکی از مسائلی است که در صنایع مختلف دیده می‌شود. در مورد الگوی جریان و انتقال حرارت در نانوسیالات درون لوله‌های خمیده اطلاعات ناچیزی در دسترس است [۱۷]. در این مقاله شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات در یک لوله با خم ۹۰ درجه مورد تحلیل قرار گرفته که طبق مطالعات نویسندگان تاکنون ارائه نشده است. نانوسیال مورد بررسی در این مقاله مخلوط آب و نانوذرات  $Al_2O_3$  است. جریان ورودی به لوله از نظر هیدرودینامیکی توسعه یافته می‌باشد. چگالی و ظرفیت حرارت مخلوط به کمک مدل‌های کلاسیک مخلوط دو فاز محاسبه می‌شوند. از آنجایی که تاکنون مدل جامعی برای پیش‌گویی لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ارائه نشده است، مقدار این دو خصوصیت با برازش خم بر روی داده‌های آزمایشگاهی موجود بدست می‌آیند.

معادلات ناویر-استوکس غیرقابل‌تراکم و ناپایا و آرام برای یک سیستم مختصات منطبق بر جسم با استفاده از روش حجم‌کنترلی حل شده‌اند. به منظور افزایش سرعت همگرایی عددی میدان جریان، یک تصحیح فشار جهت برقراری معادله پیوستگی در هر مقطع لوله انجام می‌گیرد. به این صورت که اختلاف دبی جرمی عبوری از هر مقطع نسبت به دبی جرمی ورودی اندازه‌گیری می‌شود و سپس با استفاده از رابطه اولر یک گرادیان فشار جهت تصحیح میدان فشار حاصل می‌گردد. در این مقاله اثر خم لوله و کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات بر روی الگوی جریان، انتقال حرارت، عدد ناسلت و تنش برشی جداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

<sup>5</sup> wettability

<sup>6</sup> Contact angle

<sup>7</sup> thermal dispersion

<sup>8</sup> particle migration

## ۲. شرح مساله

هندسه مورد بررسی یک لوله خمیده ۹۰ درجه، دارای دو قسمت مستقیم ورودی و خروجی است (شکل ۱). جریان در ورودی لوله، توسعه یافته است. دیواره لوله با توجه به مقادیر گزارش شده توسط مرجع [۵]، در شرایط دما ثابت  $T_w = 363.15K$  و دمای جریان ورودی به لوله  $T_i = 293.15K$  می‌باشد. نانوسیال نیوتنی مورد مطالعه مخلوط آب و نانوذرات  $Al_2O_3$  با کسر حجمی‌ها مختلف ۱٪ تا ۴٪ است که در اعداد رینولدز ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ داخل لوله جریان می‌یابد.

## ۳. مدل ریاضی و روش عددی

معادلات ناویر-استوکس برای جریان آرام و ناپایا هستند که در شکل انتگرالی ارائه شده‌اند:

$$\iint \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1)$$

$$\int_V \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} dV + \iint \vec{V} \rho_e \vec{V} \cdot d\vec{A} = - \iint P \vec{n} \cdot d\vec{A} + \iint \mu_e \nabla \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

که در آن  $\vec{V}$  سرعت،  $\rho_e$  چگالی موثر نانوسیال،  $\mu_e$  لزجت دینامیکی موثر نانوسیال،  $\vec{n}$  بردار عمود بر سطح  $A$  و  $P$  فشار دینامیکی می‌باشند

معادله انرژی عبارت است از:

$$\int_V (\rho Cp)_e \frac{\partial T}{\partial t} dV + \iint (\rho Cp)_e T \vec{V} \cdot d\vec{A} = \iint k_e \nabla T \cdot d\vec{A} \quad (3)$$

در این رابطه  $T$  دما و  $k_e$  ضریب هدایت موثر نانوسیال هستند. معادلات حاکم جهت ایجاد شبکه ساخت یافته، به سیستم مختصات عمومی انتقال داده می‌شوند.

خصوصیات موثر نانوسیال مورد بررسی به صورت زیر تعیین می‌شوند:

چگالی:

$$\rho_e = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (4)$$

بهترین رابطه جهت پیش‌گویی ظرفیت حرارتی موثر نانوسیالات عبارت است از [۱۸]:

$$Cp_e = \frac{(1 - \phi)(\rho Cp)_f + \phi(\rho Cp)_p}{(1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p} \quad (5)$$

با توجه به داده‌های آزمایشگاهی موجود و برازش خم صورت گرفته روابط زیر برای لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال  $Al_2O_3$  و آب بکار می‌رود [۵]:

$$\frac{\mu_e}{\mu_f} = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \quad (6)$$

$$\frac{k_e}{k_f} = (1 + 2.72\phi + 4.97\phi^2) \quad (7)$$

در روابط بالا  $\phi$  کسر حجمی نانوذرات،  $Cp$  ظرفیت گرمایی ویژه، زیر نویس‌های  $p$  و  $f$  به ترتیب نمایانگر نانو ذره و سیال پایه هستند. مقادیر خصوصیات ترموفیزیکی موثر در جدول ۱ در کسر حجمی‌های مختلف، با توجه به روابط مذکور ارائه شده است. به منظور افزایش سرعت همگرایی عددی میدان جریان، یک تصحیح فشار جهت برقراری معادله پیوستگی در هر مقطع لوله انجام می‌گیرد. انحراف سرعت متوسط در هر سطح مقطع از سرعت متوسط ورودی توسط رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$\Delta U' = \frac{\iint_A \bar{V} \cdot d\bar{A}}{A_{pipe}} - \bar{U} \quad (8)$$

که در آن  $\bar{U}$  سرعت متوسط ورودی،  $A_{pipe}$  سطح مقطع محلی لوله و  $\iint_A \bar{V} \cdot d\bar{A} / A_{pipe}$  سرعت متوسط هر مقطع در جهت جریان می‌باشد.  $\Delta U'$ ، نقصان مقطعی سرعت را می‌توان به یک تصحیح فشار مقطعی از طریق معادله (۹) ربط داد:

$$\rho \frac{\Delta U'}{\Delta t} = -\bar{\nabla} P' \quad (9)$$

که در آن  $\Delta t$ ، گام زمانی می‌باشد.  $P'$  تصحیح فشار بر مبنای نقصان محلی سرعت مقطعی است که برای کلیه نقاط واقع در مقطع یکسان است. این تصحیح فشار به فشار بدست آمده بر مبنای معادله پیوستگی که برای کلیه مناطق حوزه حل محاسبه می‌شود، اضافه شده و در محاسبه حوزه سرعت بکار می‌رود. این تصحیح فشار جدید، باعث افزایش سرعت همگرایی می‌شود.

### ۳. اعتبار روش عددی

به منظور ارزیابی حل عددی به کار رفته، نتایج روش عددی حاضر پس از رسیدن جریان به حالت پایا، با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۹] در یک خم ۹۰ درجه در شکل ۲ مقایسه گردیده‌است. در این بررسی شعاع لوله برابر ۴ mm و شعاع انحنای ۲۴ mm است و جریان با  $Re = 300$  وارد لوله می‌شود. با توجه به شکل ۲، پروفیل سرعت محوری در صفحه تقارن لوله برای چند مقطع مختلف لوله با توجه به زاویه  $\theta$ ، با نتایج تجربی مقایسه شده که تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد.

### ۴. ارائه نتایج و بحث

با توجه به جدول ۱ با افزایش کسر حجمی نانوذرات، مقدار گرمای ویژه نانوسیال کاهش و مقادیر چگالی، لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد که این افزایش در مورد لزجت دینامیکی چشم‌گیرتر است. لازم به ذکر است در ادامه تمام نتایج پس از رسیدن میدان به حالت پایا ارائه شده‌اند.

سرعت میانگین ورودی به گونه‌ای تنظیم شده است که عدد رینولدز در کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات یکسان باشد. لذا باید توجه داشت که میدان سرعت در این مقاله مستقل از کسر حجمی نانوذرات است، زیرا در عدد رینولدز یکسان، حوزه سرعت تغییری نمی‌کند. تنها اثر کسر حجمی بر روی حوزه دمایی و انتقال حرارت، در اثر تغییر خصوصیات ترموفیزیکی و در نتیجه عدد پرانتل سیال مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۳ بیانگر پروفیل‌های سه بعدی سرعت محوری بی‌بعد (بر اساس سرعت میانگین) در مقاطع مختلف لوله (مشخص شده در شکل ۱) در عدد رینولدز ۳۰۰ می‌باشند که با توجه به راستای حرکت جریان در لوله رسم شده‌اند. پروفیل سرعت جریان توسعه یافته ورودی به لوله تا ورودی خم تغییری نمی‌کند (مقاطع a تا c). در ورود به خم، جریان تا حدی به سمت دیواره داخلی خم متمایل می‌شود (مقطع c) که علت آن را می‌توان به عملکرد خم به عنوان یک مانع در جهت جریان مستقیم ورودی نسبت داد که منجر به افزایش فشار در ناحیه دیواره خارجی ورودی خم و راندن سیال به سمت دیواره داخلی می‌گردد. ولی سیال پس از ورود به خم تحت تاثیر شتاب گریز از مرکز ناشی از انحنای خم قرار می‌گیرد که باعث تمایل نقطه حداکثر سرعت از مرکز به سمت دیواره خارجی می‌شود (مقاطع d تا e). این تغییر در پروفیل سرعت محوری متناظر با ایجاد جریان ثانویه در جهت عمود بر جریان است. جریان ثانویه تحت تاثیر شتاب گریز از مرکز ناشی از انحنای خم داخلی به طرف خم خارجی شکل می‌گیرد و سیال را در ناحیه مرکزی از طرف خم داخلی به طرف خم خارجی می‌راند که منجر به ایجاد یک ناحیه فشار بالا در خم خارجی می‌گردد. در نتیجه این گرادیان فشار به وجود آمده، سیال از کناره دیواره جانبی به طرف خم داخلی منتقل می‌شود. این جریان چرخشی در واقع گردابه‌های کلاسیک "دین" را تشکیل می‌دهد. جریان پس از خم به دلیل وجود اثرات جریان ثانویه، همچنان رفتار مشابه قبل دارد که به تدریج از میزان آن کاسته شده و به سمت پروفیل جریان توسعه یافته متقارن پیش می‌رود (مقاطع e تا f).

با توجه به شکل ۴ که پروفیل سرعت محوری بی‌بعد در مقاطع وسط خم (d) و خروجی لوله (i) را نشان می‌دهد، انتقال نقطه حداکثر سرعت به سمت دیواره خارجی در اثر شتاب گریز از مرکز خم مشاهده می‌شود. افزایش عدد رینولدز باعث تقویت جریان ثانویه می‌گردد و این تمایل بیشتر جریان به دیواره خارجی را در پی دارد. با توجه به شکل ۴-الف (مقطع i) اثرات خم با افزایش عدد رینولدز روی جریان پایین دست بعد از خم افزایش یافته که این خود موید جریان‌های ثانویه قوی‌تر در اعداد رینولدز بالاتر است.

شکل‌های ۵-الف تا ۵-ج بیانگر تنش برشی جداری بی‌بعد  $WSS = \tau_w / (2\mu_e U_{ave} / D)$  در خط دیواره داخلی، خارجی و جانبی بر حسب طول بی‌بعد شده (بر اساس قطر لوله،  $s/D$ ) در اعداد رینولدز مختلف می‌باشد. با توجه به شکل‌ها تنش برشی در لوله راست ورودی ثابت می‌ماند (مقاطع b تا c). در ورود خم، جریان به دیواره داخلی متمایل و گرادیان سرعت و تنش برشی در آن افزایش و برعکس در دیواره خارجی کاهش می‌یابد (مقطع c در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب). سپس با تمایل جریان به دیواره خارجی خم، تنش برشی در دیواره خارجی افزایش و در دیواره داخلی کاهش می‌یابد. هم‌چنین با تقویت جریان ثانویه و حرکت جریان روی جداره جانبی، تنش برشی روی جداره جانبی افزایش پیدا می‌کند. این رفتار در دیواره داخلی و جانبی تا مقطع d ادامه می‌یابد. در دیواره خارجی تنش با نزدیک شدن به مقطع d کاهش می‌یابد. در مقطع d تنش برای جداره خارجی و داخلی به صفر می‌رسد. بعد از مقطع d تنش در جداره خارجی افزایش شدیدی می‌یابد و تا مقطع خروجی خم ادامه می‌یابد. سرعت پس از خم، رفته رفته با حذف اثرات خم روی جریان به سمت پروفیل متقارن حرکت می‌کند و لذا گرادیان سرعت و در نتیجه تنش برشی در دیواره‌های خارجی و جانبی از مقطع e به بعد کاهش و در دیواره داخلی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌ها، افزایش عدد Re باعث تشدید گرادیان‌های سرعت و در نتیجه تنش برشی جداری می‌شود.

در شکل ۶ پروفیل‌های سه‌بعدی دما در مقاطع مختلف لوله در  $Re = 300$  و  $\phi = 4\%$  ارائه شده‌اند. پروفیل‌های دما بر پروفیل‌های سرعت محوری شکل ۳ منطبق هستند. با توجه به شکل، هر کجا که گرادیان‌های سرعت شدیدتر است، ضخامت لایه مرزی حرارتی کاهش و نرخ برداشت حرارت افزایش می‌یابد. پروفیل دما بعد از خم به سمت پروفیل متقارن حرکت می‌کند. در شکل ۷ پروفیل دما در وسط خم (مقطع d) و خروجی لوله (مقطع i) نشان داده شده‌است. با افزایش کسر حجمی، گرادیان دمایی شعاعی دیواره بیشتر می‌شود که این افزایش نرخ حرارت و عدد ناسلت را در پی دارد. با افزایش عدد رینولدز گرادیان دمایی شعاعی دیواره افزایش می‌یابد.

شکل ۸ بیانگر دمای میانگین هر مقطع در طول لوله برای اعداد Re و  $\phi$  مختلف است. افزایش عدد رینولدز و در نتیجه سرعت در نزدیک دیواره لوله، کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی و افزایش اختلاف دمایی دیواره و سیال را در پی دارد لذا دمای میانگین مقطع کاهش پیدا می‌کند. این مطلب را با توجه به این که با افزایش عدد رینولدز و در نتیجه افزایش سرعت متوسط سیال که منجر به کاهش زمان تماس سیال با دیواره و در نتیجه کاهش زمان تبادل حرارت می‌شود نیز توضیح داد. در واقع با افزایش عدد رینولدز، زمان اقامت و تبادل حرارت ذرات سیال با دیواره لوله کم و در نتیجه دمای متوسط سیال کاهش می‌یابد. این نکته بدین معنی نیست که مقدار انتقال حرارت کاهش یافته است زیرا با افزایش عدد رینولدز مقدار سیال بیشتری تحت تاثیر انتقال حرارت قرار می‌گیرد. هر چند که دمای متوسط سیال تا حدی کاهش یافته است، ولی این کاهش با افزایش دبی جریان جبران می‌شود که اثر کلی آن، افزایش انتقال حرارت در اثر افزایش عدد رینولدز است. نکته قابل توجه این است که ملاحظه می‌شود که در قسمت خم به دلیل اثر جریان‌های ثانویه، دمای میانگین سیال با شیب بیشتری افزایش می‌یابد (مقطع c تا e). با افزایش کسر حجمی نانوذرات دمای میانگین مقطع کاهش می‌یابد. اثر افزایش کسر حجمی نانوذرات بر دمای میانگین کاملاً مشابه اثر افزایش عدد رینولدز بر دمای میانگین سیال می‌باشد زیرا هر دو باعث می‌شوند که سرعت متوسط جریان افزایش و در نتیجه زمان تبادل حرارت کاهش یابد که همان‌طور که در بالا توضیح داده شده منجر به کاهش دمای متوسط سیال می‌شود.

تعریف عدد ناسلت محلی  $Nu$ ، عدد ناسلت محیطی در هر مقطع  $Nu_p$ ، عدد ناسلت متوسط کل  $Nu_{ave}$ ، عدد ناسلت متوسط کل نسبی  $(Nu_{ave})_r$ ، عبارتند از:

$$(Nu_{ave})_r = \frac{(Nu_{ave})_e}{(Nu_{ave})_f} \quad \text{و} \quad Nu_{ave} = \frac{1}{S} \int Nu_c ds \quad , \quad Nu_p = \frac{1}{P} \int Nu dp \quad , \quad Nu = \frac{hD}{k} = D \frac{\partial T / \partial n}{(T_w - T_m)}$$

در روابط مذکور  $h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی،  $T_m$  دمای میانگین مقطع،  $P$  محیط مقطع لوله و  $S$  طول لوله هستند. شکل ۹ عدد ناسلت میانگین هر مقطع از لوله را در طول لوله برای اعداد  $Re$  و  $\phi$  مختلف نشان می‌دهد. عدد ناسلت در لوله راست به دلیل رشد ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد. در خم لوله به دلیل سرعت بالا در دیواره خم و کاهش ضخامت لایه مرزی، خصوصاً در دیواره خارجی، نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش می‌یابد (تا مقطع  $d$ ). در خروجی خم (مقطع  $e$ ) با توجه به شکل ۵-ب گرادیان سرعت شدیدی داریم که باعث افزایش مقطعی عدد ناسلت می‌شود. با ورود به لوله راست خروجی و افزایش ضخامت لایه مرزی حرارتی، عدد ناسلت رو به کاهش می‌گذارد. با توجه به شکل با افزایش کسر حجمی نانوذرات عدد ناسلت افزایش می‌یابد که این افزایش در اعداد رینولدز بالاتر مشهودتر است. برای ارزیابی کلی عملکرد حرارتی نانوذرات عدد ناسلت متوسط کل لوله به عنوان یک معیار محاسبه شده است. شکل ۱۰ عدد ناسلت میانگین کل لوله را نسبت به حالت سیال پایه نشان می‌دهد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات عدد ناسلت میانگین افزایش یافته است که این بهبود خصوصیات انتقال حرارتی توسط نانوسیال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در کسرهای حجمی بالاتر نانوذرات، وابستگی  $Nu$  به  $Re$  بیشتر می‌گردد. در عدد رینولدز ۱۲۰۰ و کسر حجمی ۴٪، عدد ناسلت تا ۷٪ افزایش می‌یابد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب - نانو ذرات  $Al_2O_3$  در یک لوله با خم ۹۰ درجه به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفت. چگالی، ظرفیت، لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال تابعی از کسر حجمی نانوذرات در نظر گرفته شدند. طبق نتایج، افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث بهبود خواص انتقال حرارتی می‌شود که این افزایش در اعداد رینولدز بالا چشم‌گیرتر است. وجود خم باعث تغییر ضخامت لایه مرزی، پروفیل دما و نرخ انتقال حرارت می‌شود که در این مقاله باعث بهبود انتقال حرارت به سیال گردید.

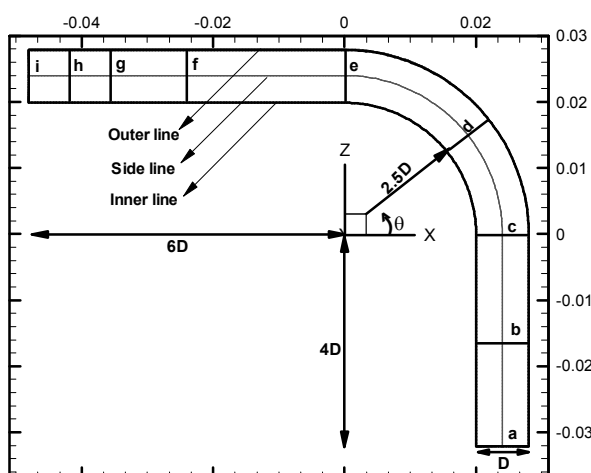
## مراجع

- [1] Murshed, S.M.S., Leong, K.C., and Yang, C., "Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review, Applied Thermal Engineering", Vol. 28, pp. 2109-2125, 2008.
- [۲] اعتماد، سید غلامرضا، نصیری، محمد، حجت، محمد، "نانوسیال؛ محیط جدید انتقال حرارت"، انتشارات ارکان دانش، سال ۱۳۸۶، ص ۱۶۸.
- [3] Choi, S.U.S., "Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles, developments and applications of non-Newtonian flow", ASME, FED 231/MD 66, pp. 99–105, 1995.
- [4] Das, S.K., Choi, S.U.S., Yu, W., and Pradeep, T., "NANOFLUIDS, Science and Technology, John Wiley & Son Publication", 2007.
- [5] Maiga, S.E.B., Palm, S.J., Nguyen, C.T., Roy, G. and Galanis, N., "Heat Transfer Enhancement by Using Nanofluids in Forced Convection Flows", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 26, pp. 530-546, 2005.
- [6] Heris, S.Z., Esfahany, M.N., and Etemad, S.Gh., "Experimental investigation of convective heat transfer of  $Al_2O_3$ /water nanofluid in circular tube", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, pp. 203–210, 2007.
- [7] Wen, D., and Ding, Y., "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp. 5181–5188, 2004.
- [8] Ding, Y., Alias, H., Wen, D., and Williams, R.A., "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT Nanofluids)", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp.240-250, 2006.
- [9] Keblinski, P., Eastman, J.A., and Cahill, D.G., "Nanofluids for Thermal Transport", Materials Today, pp. 36-44, 2005.

- [10] Chen, H., Yang, W., He, Y., Ding, Y., Zhang, L., Tan, Ch., Lapkin, A.A., and Bavykin, D.V., "Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids)", Powder Technology, Vol. 183, pp. 63–72, 2008.
- [11] Shin, S., and Lee, S., "Thermal conductivity of suspensions in shear flow fields", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 4275–4284, 2000.
- [12] Kim, S.J., Bang, I.C., Buongiorno, J., and Hu, L.W., "Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 4105–4116, 2007.
- [13] Xue, H.S., Fan, J.R., Hong, R.H., and Hu, Y.C., "Characteristic boiling curve of carbon nanotube nanofluid as determined by the transient calorimeter technique", Applied Physics Letters, Vol. 90, No. 184107, pp. 1–3, 2007.
- [14] Xuana, Y., and Roetzel, W. "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 3701-3707, 2000.
- [15] Ding, Y., and Wen, D., "Particle migration in a flow of nanoparticle suspensions", Powder Technology, Vol. 149, pp. 84–92, 2005.
- [16] Buongiorno, J., "Convective Transport in Nanofluids", Journal of Heat Transfer, Vol. 128, pp. 240-250, 2006.
- [17] Akbarina, M., Behzadmehr, A., and Shahraki, F., "Fully developed mixed convection in horizontal and inclined tubes with uniform heat flux using nanofluid", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 29, pp. 545–556, 2008.
- [18] Zhou, S.Q., and Rui, N. "Measurement of the Specific Heat Capacity of Water-based  $Al_2O_3$  Nanofluid", Applied Physics Letters, Vol. 92, No. 093123, pp. 1-3, 2008.
- [19] Van de Vosse, F. N., Van Steenhoven, A.A., Segal, A., and Janssen, J.D., "A Finite Element Analysis Of The Steady Laminar Entrance Flow In a 90 Curved Tube", International Journal for Numerical Methods In Fluids, VOL. 9, pp. 275-287, 1989.

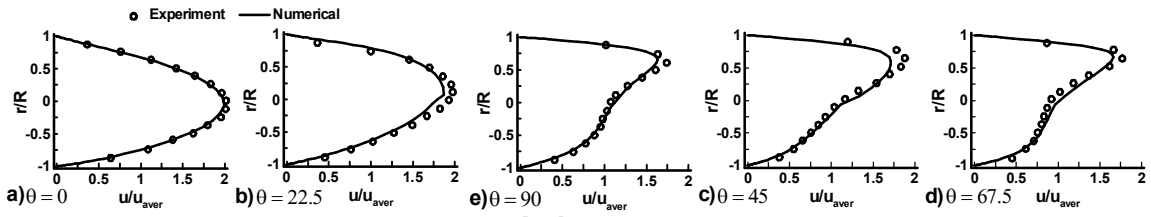
جدول ۱. خصوصیات ترموفیزیکی مواد

| Pr   | $C_p(J.kg^{-1}.K^{-1})$ | $\rho(kg.m^{-3})$ | $\mu(Pa.s)$ | $k(W.m^{-1}.K^{-1})$ |                           |
|------|-------------------------|-------------------|-------------|----------------------|---------------------------|
| -    | ۷۶۵                     | ۳۹۷۰              | -           | ۳۶                   | $Al_2O_3$                 |
| ۵,۹۳ | ۴۱۸۳                    | ۱۰۰۰              | ۰,۰۰۰۸۵۱۳   | ۰,۶                  | آب                        |
| ۶,۰۷ | ۴۰۵۱,۲۲                 | ۱۰۲۹,۷            | ۰,۰۰۰۹۲۴    | ۰,۶۱۶۶               | نانوسیال ( $\phi = ۱\%$ ) |
| ۶,۳۰ | ۳۹۲۶,۸۳                 | ۱۰۵۹,۴            | ۰,۰۰۱۰۱۷    | ۰,۶۳۳۸               | نانوسیال ( $\phi = ۲\%$ ) |
| ۶,۶۲ | ۳۸۰۹,۲۲                 | ۱۰۸۹,۱            | ۰,۰۰۱۱۳۲    | ۰,۶۵۱۶               | نانوسیال ( $\phi = ۳\%$ ) |
| ۶,۹۹ | ۳۶۹۷,۵۶                 | ۱۱۱۸,۸            | ۰,۰۰۱۲۶۷    | ۰,۶۷                 | نانوسیال ( $\phi = ۴\%$ ) |

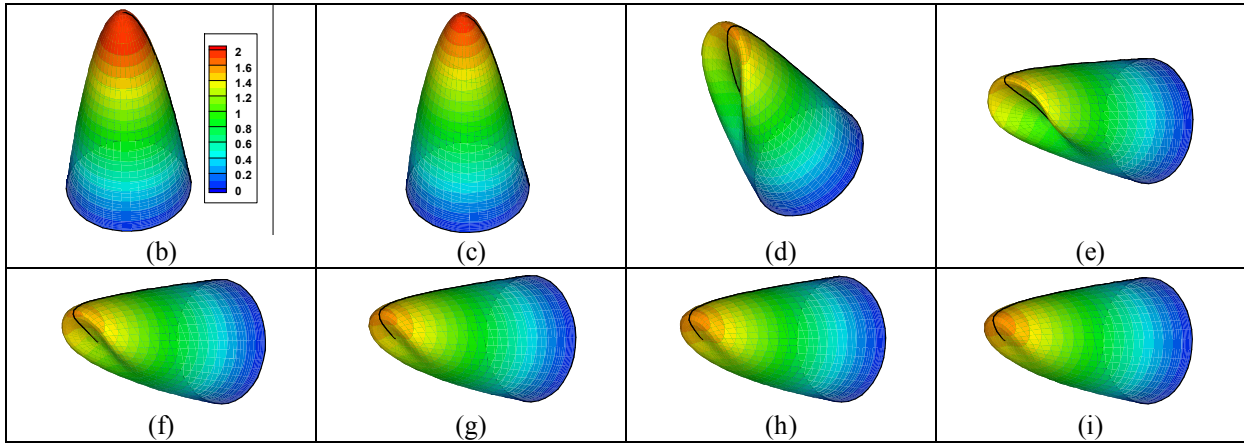


شکل ۱: هندسه مساله و سطح مقاطع مورد بررسی

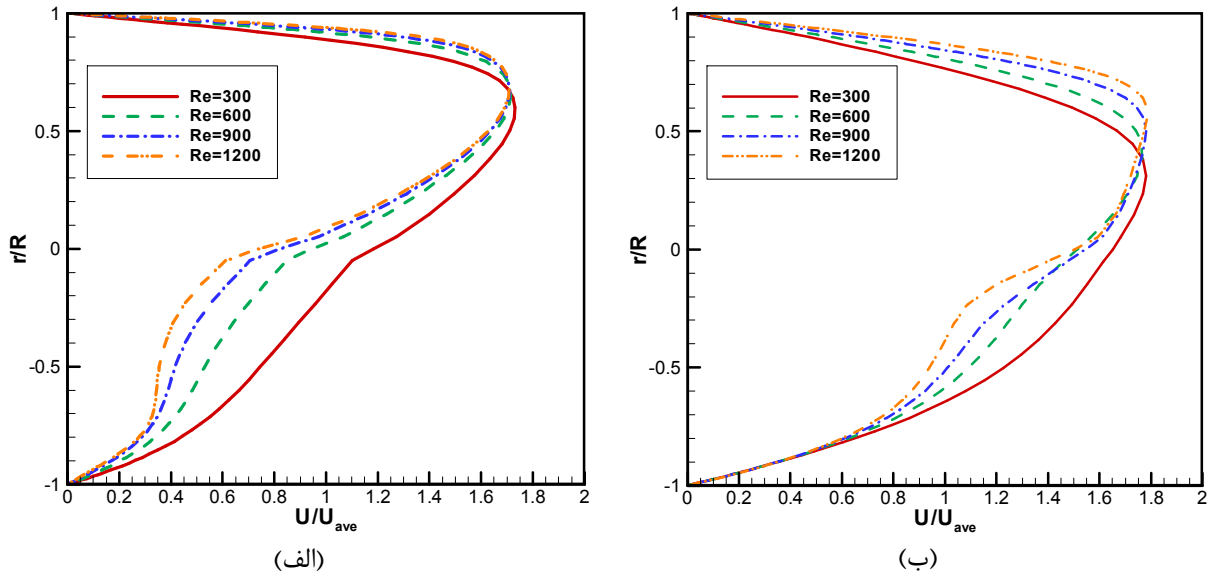




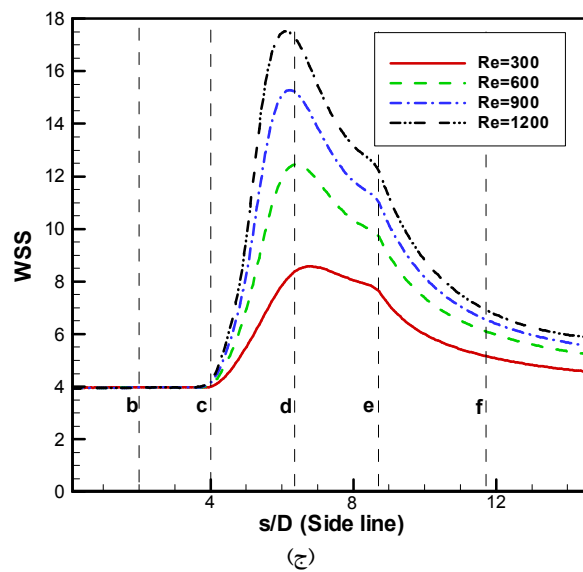
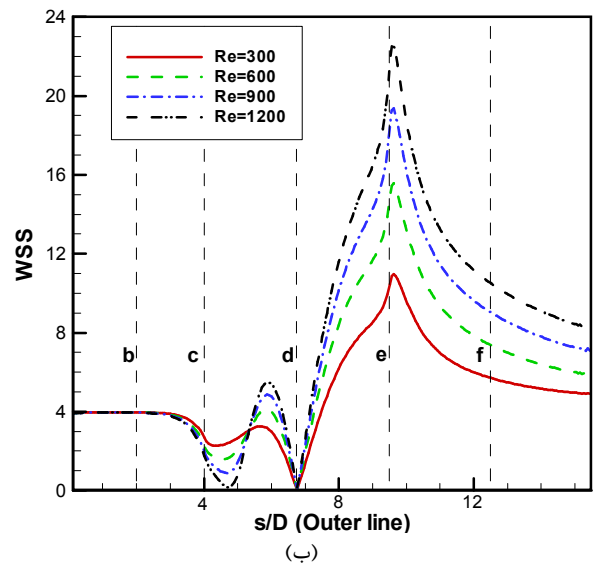
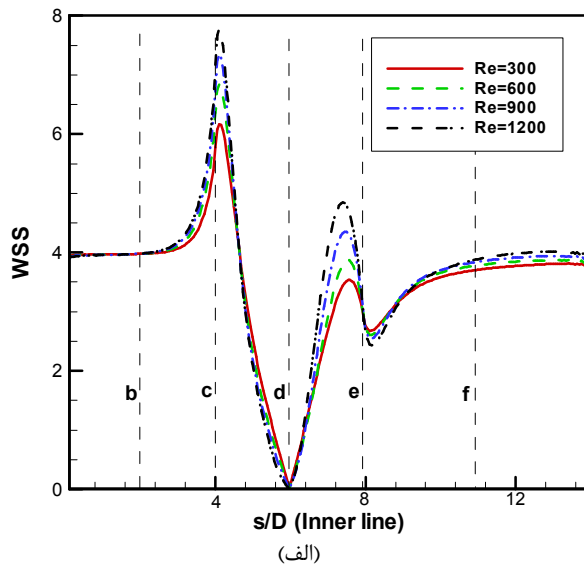
شکل ۲: ارزیابی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی [۱۹] در مقاطع مختلف خم ۹۰ درجه



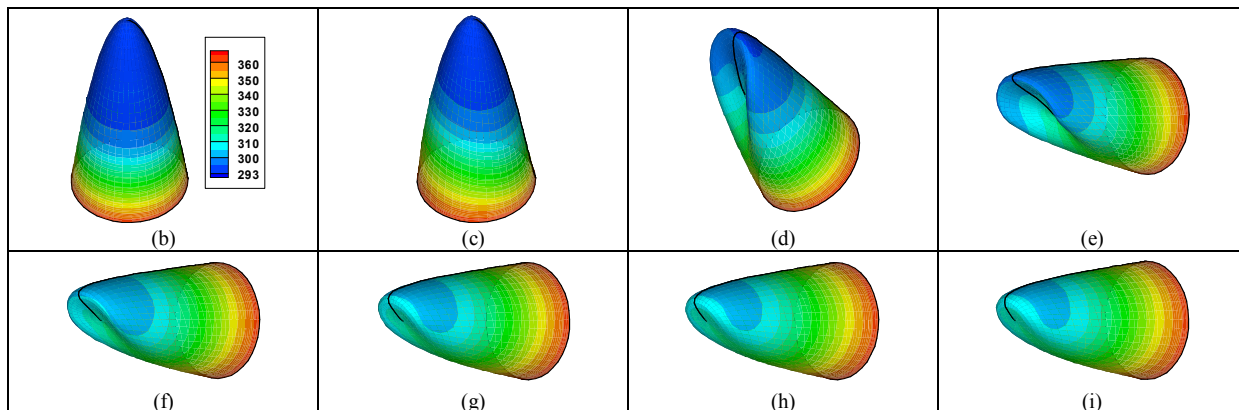
شکل ۳: پروفیل سه بعدی سرعت محوری بی بعد در مقاطع مختلف لوله برای  $Re=300$



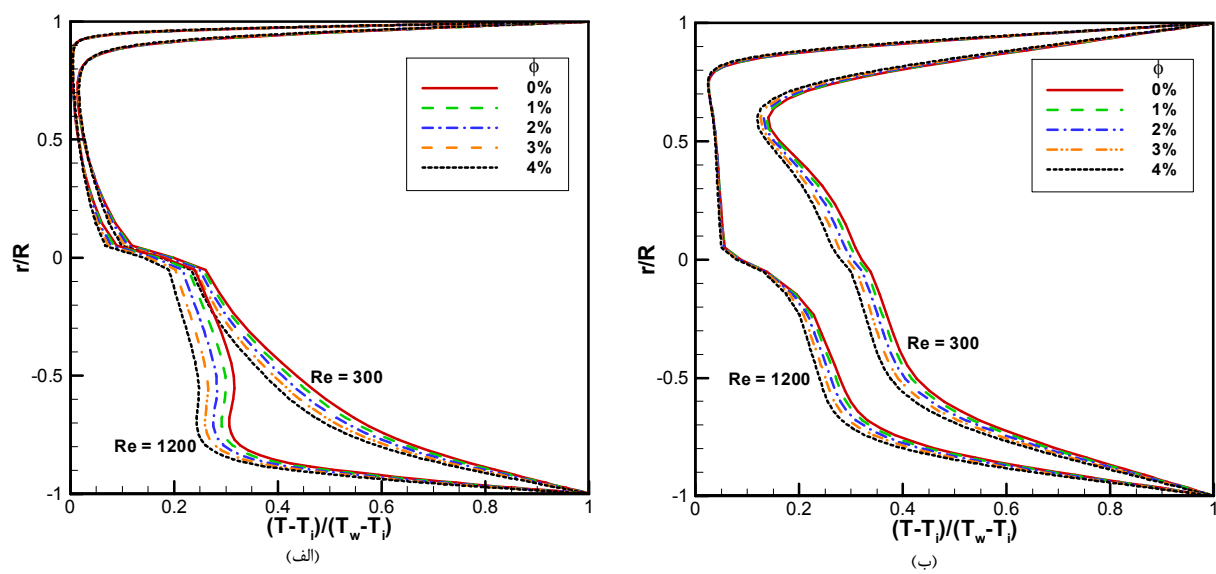
شکل ۴: پروفیل سرعت محوری در صفحه تقارن لوله برای اعداد رینولدز مختلف در مقطع الف و د و ب و i



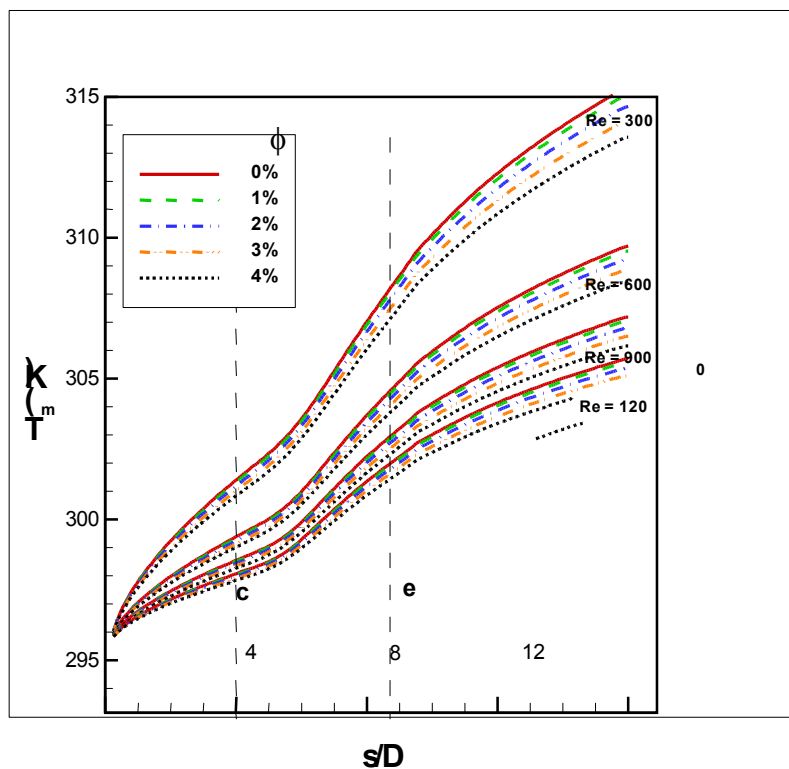
شکل ۵: تنش برشی جدار بی بعد برای اعداد رینولدز مختلف در خطوط محوری مختلف لوله  
 الف) خط داخلی لوله، ب) خط خارجی لوله، ج) خط جانبی لوله



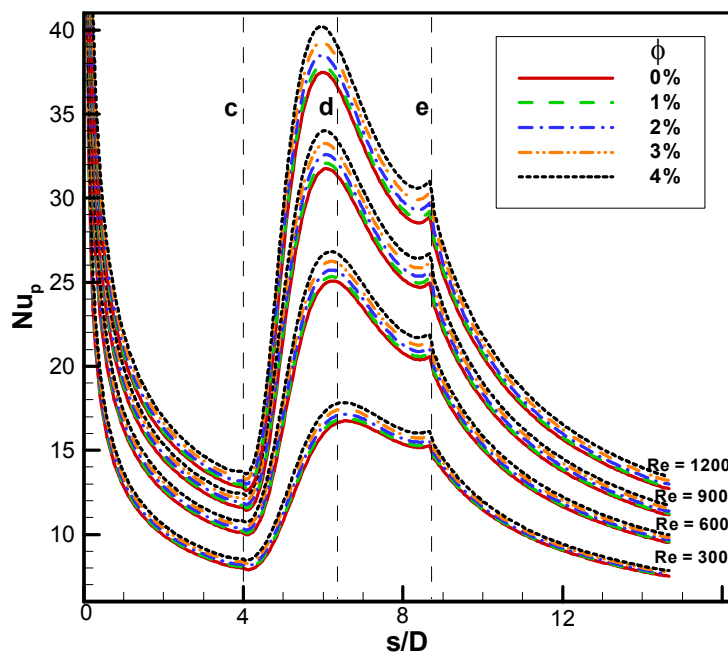
شکل ۶: پروفیل سه‌بعدی دمای بی‌بعد در مقاطع مختلف لوله برای  $Re=300$  و  $\phi = 4\%$



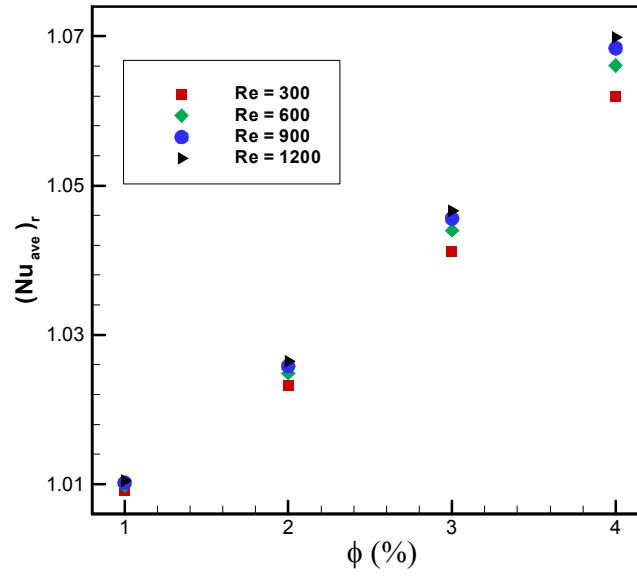
شکل ۷: پروفیل دما در صفحه تقارن لوله برای اعداد رینولدز مختلف و کسر حجمی‌های مختلف در مقطع الف (d و b) i



شکل ۸: دمای میانگین هر مقطع در طول لوله برای اعداد رینولدز و کسر حجمی‌های مختلف



شکل ۹: عدد ناسلت میانگین هر مقطع در طول لوله برای اعداد رینولدز و کسر حجمی‌های مختلف



شکل ۱۰: نسبت عدد ناسلت متوسط کل لوله حاوی نانوسیال به سیال پایه بر حسب کسر حجمی‌های مختلف برای اعداد رینولدز