

بررسی عددی تأثیر ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی جریان آرام

مریم ایزدی کیا^۱، میراعلم مهدی^{۲*}

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|---|
| دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۳ | انتقال حرارت جابجایی ترکیبی یک نانو سیال، شامل آب و ذرات اکسید آلومینیوم، درون یک لوله افقی، برای جریان آرام به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی با رویکرد حجم کنترل با دقت مرتبه دوم گسسته شده و کوپلینگ سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل انجام شده است. برای لحاظ کردن جابجایی آزاد، تغییرات چگالی سیال با رابطه بوسینسک برحسب دما تغییر می‌کند. از مدل دوفازی مخلوط همگن با به‌کارگیری خواص مؤثر برای مدل‌سازی جریان دوفاز نانوسیال استفاده شده است. شبکه‌بندی به صورت باسازمان انجام شده و کنار دیواره‌ها شبکه لایه‌مرزی ایجاد شده است. مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تجربی بیانگر دقت قابل قبول شبیه‌سازی عددی بوده است. شبیه‌سازی در دو حالت عدد ریچاردسون و شارحرارتی ثابت به صورت پایا انجام شده و تغییرات ضریب جابجایی و عدد ناسلت در شرایط مختلف به صورت نمودار ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در حالت شار حرارتی ثابت انتخاب رابطه مناسب برای ضریب هدایت حرارتی مؤثر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر دقت نتایج بدست آمده خواهد داشت. بررسی نتایج نشان داد که در حالت عدد ریچاردسون ثابت هر دو رابطه نتایج مشابه‌ای برای مقدار ضریب جابجایی می‌دهند به طوری که با افزایش درصد کسر حجمی نانوذره مقدار ضریب جابجایی افزایش می‌دهد. این در حالی است که در حالت شارحرارتی ثابت نتایج بدست آمده عکس یکدیگر است. به صورتی که با افزایش غلظت نانوذرات، در یک رابطه افزایش ضریب انتقال حرارت و در دیگری کاهش ضریب انتقال حرارت مشاهده می‌شود. |
| پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸ | |
| واژگان کلیدی: انتقال حرارت، جابجایی ترکیبی، جریان دوفاز، نانوسیال، لوله افقی. | |

۱- مقدمه

فلزی باشند زیرا مواد فلزی و بعضی از مواد غیر فلزی خواص انتقال حرارتی خوبی دارند و وقتی که آنها را در اندازه‌های کوچک به سیال اضافه می‌کنیم خواص گرمایی مخلوط بهبود پیدا می‌کند [۲]. در واقع مطالعات تئوری و تجربی متعددی در مورد هدایت حرارتی مؤثر اینگونه سیالات از زمانی که کار تئوری ماکسول [۳-۴] چاپ شد، انجام گردیده است. ماکسول در کار تئوری خود نشان داد که

با پیشرفت علوم مربوط به حرارت و توسعه‌ی زمینه‌های مربوط به گرما، کوشش‌های زیادی برای افزایش انتقال حرارت انجام می‌شود. از این میان، بکارگیری مواد افزودنی، برای بهبود خواصی از سیالات که مربوط به انتقال حرارت است مهم‌تر بوده و بیشتر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد [۱]. این مواد افزودنی می‌توانند ذرات جامد فلزی یا غیر

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: M.mahdi@sru.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

نانوسیال از سیالات مرسوم مورد استفاده در سیستم‌های انتقال حرارت بسیار بیشتر است، می‌توان به لی و ژوان [۸] و ژوان و لی [۹] اشاره کرد. در عین حال، تحقیقات تئوری و تجربی بسیاری برای تعیین قابلیت هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال صورت گرفته و تلاش‌های زیادی جهت ارائه‌ی یک رابطه مناسب برای پیش‌بینی این خاصیت نانوسیال انجام شده است [۱۰-۱۲]. همچنین چون و همکاران [۱۳] رابطه‌ی تجربی برای قابلیت هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال شامل ذرات جامد فلزی اکسید آلومینیوم ارائه کردند، که در این رابطه، تابعی از اندازه‌ی ذرات نانو، در محدوده‌ی دمائی بین (۲۱-۷۱) درجه‌ی سانتیگراد است.

مطالعاتی نیز در زمینه‌ی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال انجام شده است، پک و چو [۱۴] آزمایشاتی مربوط به انتقال جابجایی و اصطکاک جریان آشفته‌ی دو نوع نانوسیال انجام دادند. در مطالعات خود از آب به عنوان سیال پایه و از ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم به عنوان ذرات معلق استفاده کردند. نتایج تجربی آنها نشان داد نانوذرات معلق، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال رو افزایش می‌دهد. همچنین دریافتند که عدد ناسلت نانوسیال با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. لی و چوی [۱۵] انتقال حرارت جابجایی جریان آرام یک نانوسیال نامعلوم را در میکروکانال مورد بررسی قرار دادند و کاهش در مقاومت حرارتی را مشاهده کردند. همچنین دیده شد که توان توزیع حرارت نانوسیال، سه برابر سیال خالص است.

کامیار مکانی و روح... رفعی [۱۶] با استفاده از حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت آن، تأثیر افزودن کسر حجمی نانوذرات بر عملکرد یک مبدل حرارتی جریان مخالف از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک بررسی کرده‌اند. از مدل تکفاز برای مخلوط سیال پایه و نانوذرات استفاده شده است. برای محاسبه چگالی، ظرفیت گرمایی و ویژگی نانوسیال، لزجت و ضریب رسانش از فرمول‌های تحلیلی و تجربی موجود استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با اضافه کردن نانوذرات در قسمت حلقوی مبدل، آنتروپی تولید شده‌ی کل به میزان بسیار اندکی افزایش می‌یابد که قابل چشم پوشی است. با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب انتقال حرارت (U) و انتقال حرارت کل (Q) میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و همچنین نسبت بازگشت‌ناپذیری به گرمای مبادله شده (عدد آنتروپی (Ns)) کاهش خواهد یافت.

افزودن درصد حجمی ذرات معلق در سیال، مساوی است با افزایش انتقال حرارت هدایتی مخلوط که دلیل آن قابلیت هدایت حرارتی بالای ذرات فلزی و غیر فلزی اضافه شده به سیال، نسبت به قابلیت هدایت حرارتی سیال پایه می‌باشد. از آن زمان تاکنون مطالعات زیادی به جهت شناخت و توصیف مشخصات فیزیکی، گرمایی و هیدرودینامیکی این گونه مخلوط‌ها و بهبود راندمان حرارتی آنها صورت پذیرفته است.

در بدو امر، ذرات افزوده شده به سیالات در اندازه‌های میلی-متر و میکرومتر بودند، اما به دلیل سرعت ته‌نشینی بالا و همچنین ایجاد خوردگی و افت فشار زیاد، مورد توجه قرار نگرفتند. در حالیکه افزودن ذرات در مقیاس نانو به سیال، فاقد این مشکلات می‌باشد. کوچک بودن این ذرات و استفاده از درصد حجمی نسبتاً پایین، موجب گردیده که در بسیاری از موارد، سیال رفتار همگنی از خود به نمایش بگذارد. در حالیکه خواص فیزیکی آن با خواص فیزیکی سیال پایه یکسان نمی‌باشد. پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی نانو، منجر به تولید نوع جدیدی از سیال به نام نانوسیال شد. این سیال شامل ذرات معلق است که اندازه‌ی آنها کمتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. عبارت سیال نانو حدوداً دهه پیش برای اولین بار توسط یک گروه در ایالات متحده، بکار برده شد [۵]. قابلیت هدایت حرارتی نانوسیال، با نسبت‌های حجمی، مواد و اندازه‌های مختلف، در سیالات پایه‌ی مختلف اندازه‌گیری شده است و همگی نتایج نشان از این دارد که قابلیت هدایت حرارتی نانوسیال، بیشتر از سیال پایه است. برای مثال لی و همکاران [۶] قابلیت حرارتی نانوسیال، با سیال پایه‌ی آب و اتیلن گلیکول شامل ذرات نانو اکسید و اکسید آلومینیوم را اندازه‌گیری کردند و دریافتند که قابلیت هدایت حرارتی آنها اساساً از سیالات پایه بیشتر است. در این مطالعه بیشترین افزایش، مربوط به قابلیت هدایت حرارتی نانوسیال اتیلن گلیکول شامل ۰.۴٪ حجمی ذرات نانو اکسید مس با قطر ۳۵ نانومتر بود.

وانگ و همکاران [۷]، قابلیت هدایت حرارتی نانوسیال آب مقطر و ذرات نانو اکسید آلومینیوم (۲۸ نانومتر) و اکسید مس (۲۳ نانومتر) را اندازه‌گیری کردند و دریافتند که این خاصیت علاوه بر جنس ذرات معلق، به اندازه ذرات و همچنین نحوه‌ی پخش آنها در سیالات پایه بستگی دارد و با کاهش اندازه‌ی ذرات افزایش می‌یابد. از تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی دیگر که نشان دادند قابلیت هدایت حرارتی

مختلف، مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که نانوسیال رفتار همگنی از خود نشان می‌دهد. دو دیدگاه اصلی در بررسی سیالاتی با ذرات معلق در آن (سیالات نانو و یا سیالاتی با ذرات درشت‌تر) وجود دارد. در دیدگاه اول که ساده‌ترین تقریب نیز هست، جریان با یک سیستم تک فازی و همگن بیان می‌شود و تاثیرات ذرات خود را در خصوصیات فیزیکی نشان می‌دهند. به این صورت که با روابط مشخصی، برای همه‌ی خواص فیزیکی یک مقدار معادل بدست می‌آید و از آن به عنوان خواص فیزیکی مخلوط (که نانو سیال نیز نوعی از آن است) استفاده می‌شود.

دیدگاه دوم، که ناشی از طبیعت اینگونه سیالات می‌باشد، مدل دو فازی است که در آن درک نقش هر دوفاز سیال و جامد (ذرات معلق) نسبت به تقریب تک فازی، بسیار آسانتر است. مدل مخلوط، یکی از تقریب‌های مدل دوفازی است که در بسیاری از کاربردهای عملی جریان چند فازی، یک تقریب مناسب و بسیار دقیق است. این در حالی است که نسبت به مدل تک فازی، افزایش اندکی در محاسبات دارد. این تقریب، جایگزین قابل توجهی برای مخلوط رقیق ذرات جامد یا حباب‌های کوچک معلق در سیال می‌باشد [۲۷]. این مدل، یک معادله‌ی پیوستگی، یک معادله‌ی ممنتوم و یک معادله‌ی انرژی برای مخلوط و یک معادله‌ی کسر حجمی را برای فاز دوم (ذرات معلق) در نظر می‌گیرد. همچنین در صورتی که فازها با سرعت‌های متفاوتی حرکت کنند یک بیان ریاضی را برای سرعت نسبی ارائه می‌دهد. اخیراً نیز بهزاد مهر و همکاران [۲۸] استفاده از مدل مخلوط (که در تحلیل جریان‌های دوفازی مورد استفاده قرار می‌گیرد) را جهت تحلیل رفتار یک نانوسیال پیشنهاد نمودند.

مسعود ضیائی‌راد و مریم بیگی هرچگانی [۲۹] انتقال حرارت و افت فشار در جریان نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در لوله‌ای با دندان‌های داخلی به صورت عددی بررسی کردند. اثر پارامترهای مختلف جریان و همچنین تاثیر فاصله بین دندان‌های لوله و کسر حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت در این لوله‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش میزان نانوذرات در سیال پایه، توسعه یافتگی حرارتی سریعتر اتفاق افتاده و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. مشاهده شد که افزایش ۵ درصدی کسر حجمی نانوذرات، منجر به افزایش عدد نوسلت موضعی نانوسیال به میزان حداکثر ۲۸ درصد و نوسلت

ژوان و لی [۱۷] با اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجائی نانوسیال و نانوذرات مس، افزایش ذاتی انتقال حرارت را مشاهده کردند. در مطالعه‌ی آنها برای یک عدد رینولدز معین، ضریب انتقال حرارت جابجادی نانوسیال شامل ۲٪ حجمی از ذرت مس تقریباً ۶۰٪ بیشتر از ضریب آب خالص بود. انتقال حرارت ترکیبی، به لحاظ کاربرد وسیعی که در صنایع مختلف از جمله راکتورهای فشار بالا، مبدل‌های حرارتی و غیره دارد، مورد توجه قرار گرفته و مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است [۱۸-۲۲]. تحت این شرایط در مجراهای افقی، بدلیل اختلاف چگالی سیال، جریان‌های ثانویه بوجود می‌آیند و باعث تغییر در پروفیل‌های حرارتی و هیدرودینامیکی سیال، نسبت به حالت‌های مشابه در شرایط انتقال حرارت جابجائی اجباری می‌گردند. همچنین مطالعاتی نیز در مورد انتقال حرارت ترکیبی نانوسیال انجام گرفته است که می‌توان به کار اخیر اکبری و بهزاد مهر [۲۳] و نیز اکبری‌نیا و بهزاد مهر [۲۴] اشاره کرد. ایشان در مطالعه‌ی خود، رفتار نانوسیال آب-اکسید آلومینیم را به ترتیب درون لوله‌های افقی و خمیده، تحت انتقال حرارت ترکیبی و با استفاده از مدل تک‌فازی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که افزایش درصد حجمی ذرات جامد، در یک عدد گراشهف ثابت باعث ازدیاد ضریب انتقال حرارت جابجائی می‌شود.

حسین خراسانی‌زاده و علی‌رضا آقایی [۲۵]، جریان سیال، انتقال حرارت و تولید انترپوی در جابه‌جایی توام نانوسیال آب-اکسید آلومینیم با خواص متغیر در محفظه‌ای با دومنبع گرم دایره‌ای به صورت عددی بررسی کردند. دیواره‌های عمودی محفظه و دیواره‌ی بالایی که متحرک است در دمای T_c و منابع گرم در دمای T_h ($T_h > T_c$) می‌باشند و دیواره‌ی پایینی عایق است. مطالعه برای کسر حجمی نانوذرات بین صفر تا ۰/۰۴، اعداد ریچاردسون ۰/۰۱، ۰/۱، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ و عدد گراشف ۱۰۴ انجام شده است. در تمامی اعداد ریچاردسون، عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی اعداد ریچاردسون، انترپوی کل با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد.

در مورد همگن و یکنواخت بودن توزیع نانوذرات، در سیال-پایه نیز مطالعاتی به صورت تجربی انجام شده است. به عنوان مثال، ناندی و پاترا و همکاران [۲۶] نانوسیال اکسید مس-آب و اکسید آلومینیم-آب را با نسبت‌های حجمی

جریان، تحت شار حرارتی ثابت، بر روی سطح تماس سیال و دیواره، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای بررسی انتقال حرارت از دو رابطه مختلف برای محاسبه ضریب هدایت استفاده شده است.

۲- معادلات حاکم

در این پژوهش جریان به صورت آرام و پایا در نظر گرفته می‌شود. سیال نانو، نیوتنی و غیرقابل تراکم فرض شده و خواص فیزیکی آن نیز ثابت در نظر گرفته می‌شوند. با این فرضیات معادلات بقاء به فرم بیضوی و در شرایط سه بعدی به صورت زیر بیان می‌شوند:

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot (\rho_{\text{eff}} \cdot V_m) = 0 \quad (1)$$

معادله ممنتوم:

$$\nabla(\rho_{\text{eff},0} V_m V_m) = -\nabla P + \nabla \cdot [\tau] - \rho_{\text{eff},0} \beta_{\text{eff}} (T - T_0) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_{\text{dr},k} V_{\text{dr},k} \right) \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_k V_k \rho_k E_k \right) = \nabla \cdot (K_{\text{eff}} \cdot \nabla T) \quad (3)$$

معادله نسبت حجمی فاز دوم:

$$\nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_p \rho_p V_m \right) = \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_p \rho_p V_{\text{dr},p} \right) \quad (4)$$

که در این معادلات:

$$[\tau] = \mu_{\text{eff}} \nabla V_m \quad (5)$$

$$V_m = \frac{(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_k)}{\rho_{\text{eff}}} \quad (6)$$

به ترتیب تنش برشی و سرعت متوسط جرمی هستند. ϕ نشانگر نسبت حجمی فاز k ام می‌باشد و در معادله ۲، $V_{\text{dr},k}$ بیانگر سرعت سوق، برای فاز ثانویه k ام (مانند ذرات نانو در این پژوهش) است.

$$V_{\text{dr},k} = V_k - V_m \quad (7)$$

سرعت لغزشی (سرعت نسبی) که بیانگر سرعت فاز ثانویه (P) نسبت به فاز اولیه (f) می‌باشد، به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$V_{\text{pf}} = V_p - V_f \quad (8)$$

و سرعت سوق با استفاده از رابطه زیر به سرعت لغزشی

متوسط به میزان ۱۱ درصد شده است. در همین حالت، ضریب اصطکاک روی دیوار لوله نیز در حدود ۱/۵ برابر شده است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش پنج برابری فاصله بین دندانه‌های داخلی لوله، نوسلت متوسط در عدد رینولدز ۱۰۰ به میزان ۲/۴۵ برابر افزایش داشته است.

بیانکو و مانکا [۳۰] جابجایی آشفته نانوسیال آب و Al_2O_3 داخل یک لوله تحت شرایط دما ثابت در دیواره خارجی لوله را با استفاده از مدل دوفاز بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوذرات عدد ناسلت افزایش یافته و به این ترتیب توان پمپ و انتروپی تولید شده نیز افزایش می‌یابد.

گروسی و روحانی [۳۱] جابجایی ترکیبی حالت پایا یک نانوسیال را در یک محفظه‌ی مربعی با استفاده از مدل دوفاز به صورت عددی بررسی کردند. تاثیر غلظت نانوذرات، قطر و نوع نانوذرات، عدد ریچاردسون، نرخ انتقال حرارت و توزیع نانوذرات را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش قطر نانوذرات و عدد ریچاردسون، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

آقاجنقی و مهمان دوست [۳۲] جریان اجباری آرام نانوسیال آب - اکسید مس را داخل یک کانال مثلثی به صورت عددی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که انتقال حرارت در نانوسیال به صورت قابل توجهی افزایش یافته است، همچنین ذرات اکسید مس باعث شده که افت فشار در کانال افزایش یابد و اندازه قطر نانوذرات تاثیر قابل ملاحظه-ایی روی خواص انتقال حرارت نمی‌گذارد.

کرباسی فر و اکبری [۳۳] جابجایی ترکیبی نانوسیال آب و آلومینیوم اکسید را در یک حفره زاویه دار با کلاهدک متحرک شامل سیلندر مرکزی بیضوی داغ بررسی کردند. مسئله در اعداد ریچاردسون متفاوت (۰،۱ و ۱۰) و درصد حجمی (۰،۲، ۰،۱ و ۰) و زوایای مختلف (۴۵ و ۱۵) شبیه سازی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش عدد ریچاردسون در یک درصد حجمی و زاویه مشخص، عدد ناسلت کاهش می‌یابد و افزایش زاویه حفره در یک عدد ریچاردسون و درصد حجمی ثابت، عدد ناسلت را به مقدار کمی افزایش می‌دهد.

مطالعه‌ی حاضر به بررسی انتقال حرارت ترکیبی جریان آرام یک نانوسیال درون لوله‌های افقی با نگرش دوفازی می‌پردازد. لذا اثر افزودن ذرات نانو در نسبت‌های حجمی مختلف بر روی پارامترهای حرارتی و هیدرودینامیکی

که در این رابطه، اثر قطر ذرات و حرکت براونی آنها در نظر گرفته شده است، همچنین در این رابطه داریم:

$$Pr = \frac{\mu}{\rho_{BF}\alpha} \quad (17)$$

$$Re = \frac{\rho_{BF} K_b T}{3\pi\mu^2 l_{BF}} \quad (18)$$

که l_{BF} طول مسیر متوسط آزاد نامیده می‌شود و مقدار آن برای آب در دمای آزمایشگاهی، $0.17nm$ می‌باشد.

$$\mu = A \times 10^{\frac{B}{T-C}}, C = 140, B = 247, A = 2.414e - 5 \quad (19)$$

ب) فرمول دیگری که در مقالات استفاده می‌شود، با استفاده از فرمول ماکسول [۷] به صورت زیر است:

$$\frac{K_{eff}}{K_f} = \frac{K_p + 2K_f - 2\phi \cdot (K_f - K_p)}{K_p + 2K_f + \phi \cdot (K_f - K_p)} \quad (20)$$

برای محاسبه عدد ناسلت از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (21)$$

که h ضریب انتقال حرارت جابجایی یا ضریب انتقال حرارت نامیده می‌شود و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_b)} \quad (22)$$

که در رابطه‌ی بالا q'' و T_w و T_b به ترتیب، شار حرارتی و دمای دیواره و دمای بالک سیال می‌باشد. رابطه‌ی ارائه شده برای عدد گرافش صورت زیر می‌باشد:

$$Gr_q = \frac{g \beta_{eff} q'' D^4}{K_{eff} \nu_{eff}^2} \quad (23)$$

عدد ریچاردسون در بسیاری از کتب انتقال حرارت معیاری برای تعیین نوع جابجایی جریان استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (24)$$

۳- بررسی نتایج

برای حل معادلات حاکم و گسسته‌سازی ناحیه حل، از شبکه سازمان یافته استفاده شده است. این شبکه‌بندی در راستای شعاعی و محوری غیر یکنواخت و در راستای محیطی، یکنواخت می‌باشد. با توجه به گرادیان‌های سرعت و دما در ورودی و نزدیکی دیواره‌ی لوله، این شبکه در این مناطق ریزتر انتخاب گردیده است. بررسی حالت‌های مختلف شبکه نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه از ۱۰ تا

(سرعت نسبی بین دو فاز) نسبت داده می‌شود:

$$V_{dr,k} = V_k - \frac{(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_{fk})}{\rho_{eff}} \quad (9)$$

و در نهایت سرعت نسبی بین دو فاز، از رابطه زیر که به رابطه‌ی مانینن [۲۷] معروف است، محاسبه می‌شود:

$$V_{pf} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_f f_{drag}} \frac{\rho_p - \rho_{eff}}{\rho_p} a \quad (10)$$

که رابطه‌ی ضریب درگ از رابطه‌ی شیلر و نیومن [۳۴] بدست می‌آید:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15Re_p^{0.687} & Re_p \leq 1000 \\ 0.0183Re_p & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (11)$$

و بردار شتاب (a) در معادله ۱۰، از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$a = g - (V_m \cdot \nabla) V_m \quad (12)$$

خواص فیزیکی بکار رفته در معادلات بالا بصورت زیر می‌باشند:

چگالی موثر نانوسیال:

$$\rho_{eff} = \phi \rho_s + (1 - \phi) \rho_f \quad (13)$$

ویسکوزیته‌ی موثر در نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم که به-وسیله‌ی مایگا و همکاران [۳۵] پس از مقایسه‌ی کار با بریکمن [۳۶] ارائه شده، عبارت است از:

$$\rho_{eff} = (123\phi^2 + 7.3\phi + 1) \mu_f \quad (14)$$

ضریب انبساط حرارتی که توسط خانافر [۳۷] مورد استفاده قرار گرفت:

$$\beta_{eff} = \left[\frac{1}{1 + \frac{(1-\phi)\rho_f\beta_f}{\phi\rho_s}} + \frac{\beta_s}{1 + \frac{\phi\rho_s}{(1-\phi)\rho_f}} \right] \times \beta_f \quad (15)$$

برای محاسبه‌ی قابلیت هدایت حرارتی موثر در نانوسیال چندین فرمول متفاوت وجود دارد که در این مقاله دو مورد از این فرمول ذکر شده است و به بررسی آنها پرداخته شده است.

$$\frac{K_{eff}}{K_f} = 1 + 64.7 \times \phi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{0.369} \left(\frac{K_s}{K_f} \right)^{0.7476} \times Pr^{0.9955} \times Re^{1.2321} \quad (16)$$

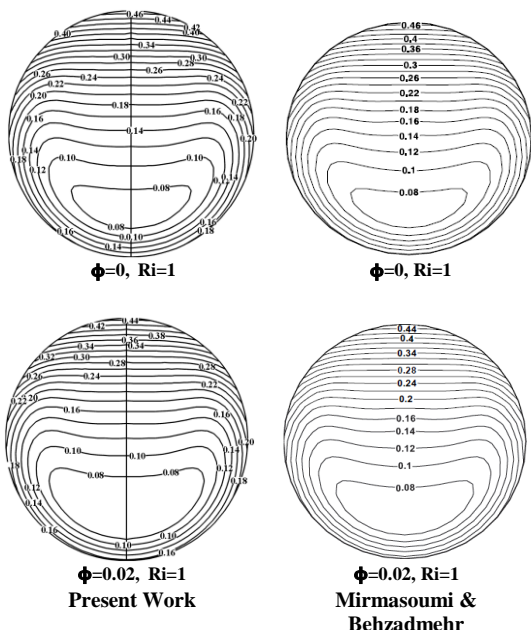
صورت زیر برای مسأله اعمال شده است.

در ورودی لوله ($Z=0$):

$$V_{mz} = V_0, V_{mr} = V_{m\theta} = 0, T = T_0$$

روی سطح تماس سیال و دیواره ($r=D/2$):

$$-K_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} = q_w, V_{mr} = V_{m\theta} = V_{mz} = 0$$



شکل ۲- مقایسه کانتورهای دمای بی بعد با کار عددی

میرمعصومی و بهزادمهر [۳۹]

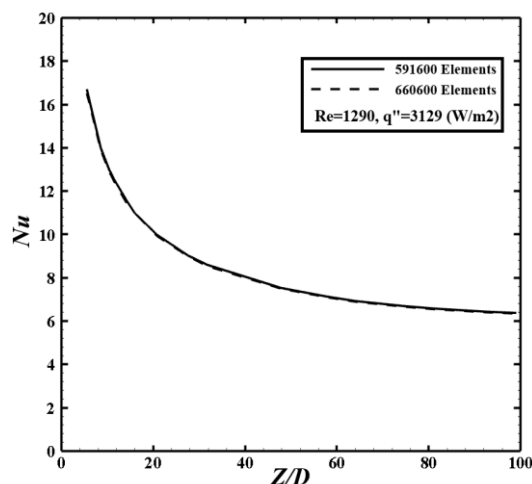
در خروجی لوله، علاوه بر بالانس جرمی:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$$

ابتدا برای اعتبارسنجی نتایج با کار تجربی از شرایط آزمایشگاهی باروزی و همکاران [۱۷] برای حالت تک فاز سیال آب استفاده شده است. در این حالت لوله ای به قطر $D=6mm$ و طول $L=100D$ استفاده شده است. شرایط فیزیکی برای ورودی لوله برای حالت $L1$ و $L5$ به ترتیب $Re=670$ و $q''=3129(W/m^2)$ و $Re=1290$ و $q''=4542(W/m^2)$ می باشد.

تغییرات عدد ناسلت در طول لوله برای دو حالت $L1$ و $L5$ در شکل ۳ آمده است. در ابتدای لوله به دلیل گرادیان دمای بالا مقدار عدد ناسلت بزرگ است و در طول لوله به مقدار ثابتی میل می کند. نتایج مربوط به کار آزمایشگاهی باروزی و همکاران [۱۷] در این شکل آمده است. روند تغییرات عدد ناسلت بدست آمده از طریق شبیه سازی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی در این دو حالت دارد. با توجه به شکل

۱۵ تأثیر زیادی بر نتایج عددی ندارد ولی تعداد سلول ها به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. بنابراین در کلیه تحلیل ها از ۱۰ لایه برای شبکه بندی استفاده شده است. نتایج حاصل از بررسی استقلال از شبکه در شکل (۱) آمده است. با توجه به متقارن بودن مدل تنها نصف لوله مدل سازی شد و با بررسی شبکه های مختلف در نهایت شبکه ای با تعداد ۶۲۳۲۳۷ گره و ۵۹۱۶۰۰ سلول دارای کمترین تغییرات در عدد ناسلت می باشد.



شکل ۱ - تغییرات عدد ناسلت در لوله ای افقی بر حسب تعداد شبکه

همچنین روش حجم محدود برای گسسته سازی به کار رفته است. طرح اختلاف بالادست مرتبه دوم برای گسسته سازی عبارات نفوذ و جابجایی معادلات حاکم، استفاده شده و برای ارتباط بین میدان سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل سی^۱ مورد استفاده قرار گرفته است. برای نشان دادن صحت و دقت الگوریتم محاسباتی به کار رفته در شبیه سازی عددی، نتایج کار حاضر با نتایج کار تجربی و نتایج کار عددی مقایسه شده است.

نتایج مقایسه شده کار حاضر با کار عددی به صورت کانتور دمای بی بعد در شکل (۲) آورده شده است. دمای بی بعد به صورت زیر تعریف شده است:

$$\frac{T - T_0}{(q_w * \frac{D}{K_{eff}})}$$

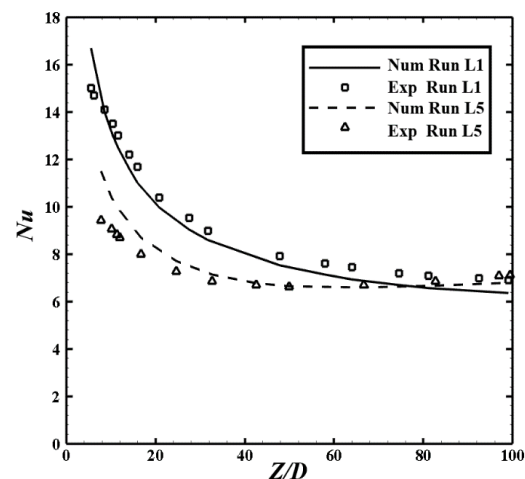
مدل استفاده شده برای شبیه سازی یک لوله افقی به قطر D و طول $L=100D$ است. جریان نانوسیال با سرعت مشخصی وارد لوله شده، در معرض انتقال حرارت قرار گرفته و از طرف دیگر خارج می شود. شرایط مرزی به

¹ SIMPLEC

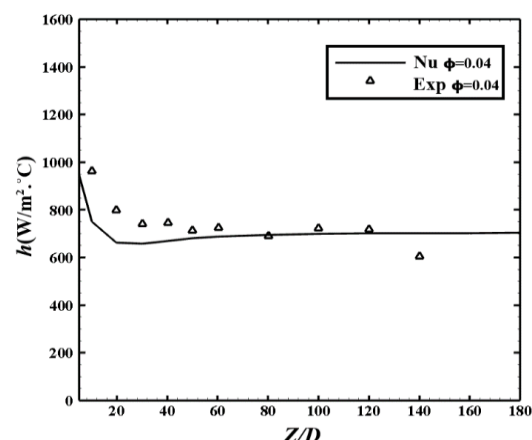
در انتقال حرارت جابجایی ترکیبی یک نانوسیال معمولاً دو مکانیزم جریان ثانویه و ضریب هدایت گرمایی سیال به دلیل وجود نانوذرات همزمان بر میزان انتقال حرارت تأثیرگذار هستند. در یک دبی جرمی و شار حرارتی معین، افزایش غلظت نانوذرات منجر به تضعیف جریان‌های ثانویه ناشی از نیروهای شناوری می‌شود، دلیل این امر این است که افزودن نانوذرات موجب افزایش لزجت نانو سیال نسبت به سیال پایه می‌شود. بنابراین افزایش درصد کسر حجمی نانوذره ممکن است به دلیل افزایش لزجت سیال باعث کاهش نرخ انتقال حرارت شود. در این حالت ارائه رابطه دقیقی که بتواند ضریب هدایت مؤثر نانوسیال را به درستی محاسبه کند دارای اهمیت است. پس از بررسی دقت نتایج بدست آمده، شبیه‌سازی عددی جریان نانو سیال درون لوله افقی در دو حالت صورت گرفته است. در حالت اول دیواره لوله در معرض شارحرارتی ثابتی قرار گرفته و به ازای دبی جرمی مشخص نانوسیال، تغییر ضریب انتقال حرارت (h) در حالت جابجایی ترکیبی بدست آمده است. در حالت دوم برای مقدار مشخص عدد ریچاردسون و رینولدز به ازای سه کسر حجمی مختلف شبیه‌سازی صورت گرفته است. روش حل عددی و شبکه‌بندی همانند حالت اعتبارسنجی می‌باشد. در ابتدا برای لوله افقی به قطر $D=6\text{mm}$ و طول $L=100D$ مقدار شار حرارتی ثابت $q''=15000\text{(W/m}^2\text{)}$ به دیواره آن اعمال شده و دبی جرمی ورودی برابر $m'=1.42\text{(g/s)}$ است. شکل (۵) بردارهای سرعت ثانویه را در مقطع $z=0.08\text{(m)}$ نشان می‌دهد. این بردارها برای درک بهتر تأثیر جابجائی آزاد، رسم شده‌اند. با گرم شدن سیال در نزدیکی دیواره در مقطع عمودی لوله، جریانی به سمت بالا، تحت تأثیر نیروی شناوری ایجاد می‌شود، سپس در قسمت مرکزی لوله به سمت پایین متمایل می‌شوند. با افزایش درصد حجمی نانوذرات از ۰٪ تا ۴٪ موجب کاهش شدت جریان ثانویه در مقطع عرضی لوله می‌شود. با افزایش درصد حجمی نانوذرات، لزجت دینامیکی ۸٪/۴۸٪ افزایش یافته و ضریب انبساط حرارتی ۱۳٪ کم می‌شود که این دو عامل بشدت نیروی شناوری را کاهش می‌دهند و در نتیجه جریان‌های ثانوی تضعیف می‌شوند. جریان ثانویه، سیال را از بالای لوله به پایین آن منتقل می‌کند و منجر به همگن‌تر شدن دمای سیال در مقطع عرضی لوله می‌شود. با افزایش شار حرارتی دیواره به مقدار $q''=25000\text{(W/m}^2\text{)}$ شدت جریان ثانویه مطابق شکل (۶) افزایش پیدا می‌کند.

(۳) بیشترین خطا برای $L5$ و در نزدیکی ورودی، برابر ۲۲٪ می‌باشد.

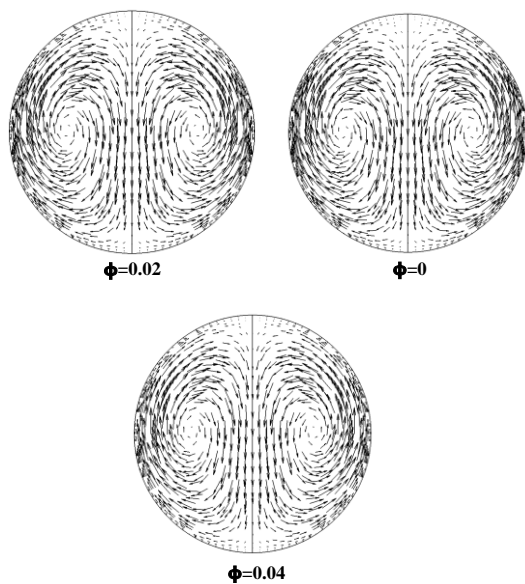
برای بررسی بیشتر دقت نتایج بدست آمده، شبیه‌سازی عددی در شرایط آزمایشگاهی بن منصور [۳۸] برای حالت دوفاز (نانوسیال) انجام شده است. در این حالت لوله ایی به قطر $D=6.35\text{mm}$ و $L=200D$ استفاده شده است. شرایط فیزیکی برای ورودی لوله $m'=1.8\text{(g/s)}$ ، $q''=11502\text{(W/m}^2\text{)}$ می‌باشد. لازم به ذکر است که برای اعتبار سنجی در شکل (۴) از رابطه‌ی ۱۶ برای محاسبه K_{eff} استفاده شده است. بیشترین خطا در ابتدای لوله و برابر ۲۰٪ می‌باشد. مشاهده می‌شود که نتایج کار عددی حاضر، با نتایج مقایسه شده، مطابقت خوبی دارد. لازم به ذکر است که برای این قیاس، نتایج عددی با استفاده از تقریب دوفازی مدل مخلوط، ولی با در نظر گرفتن مقدار بسیار جزئی برای نسبت حجمی نانو ذرات، بدست آمده‌اند.



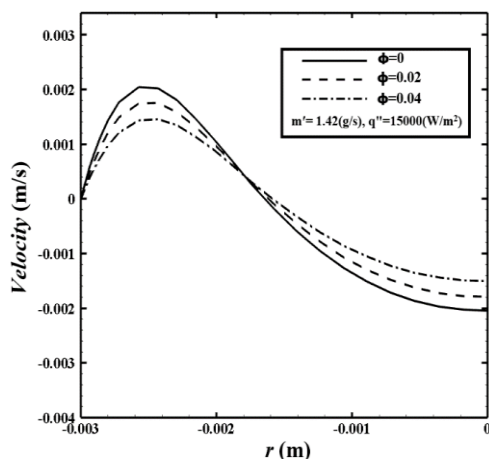
شکل ۳ - مقایسه عدد ناسلت در لوله‌ی افقی با کار تجربی باروزی و همکاران [۱۷]



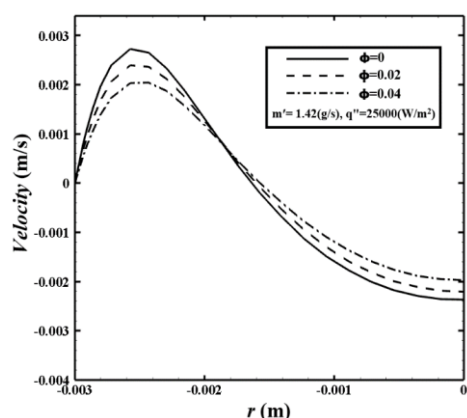
شکل ۴ - مقایسه ضریب انتقال حرارت در لوله‌ی افقی با کار تجربی بن منصور و همکاران [۳۸]



شکل ۶- بردارهای سرعت ثانویه برای درصدهای حجمی متفاوت در $m'=1.42(g/s), q''=25000(W/m^2)$

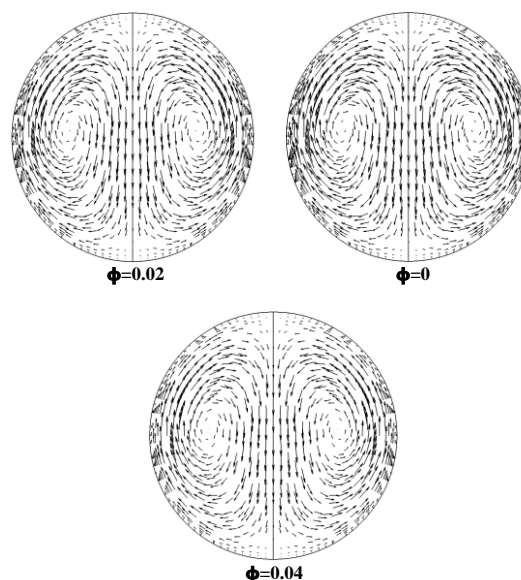


شکل ۷- سرعت مماسی در صفحه $z=0.08(m)$



شکل ۸- سرعت مماسی در صفحه $z=0.08(m)$

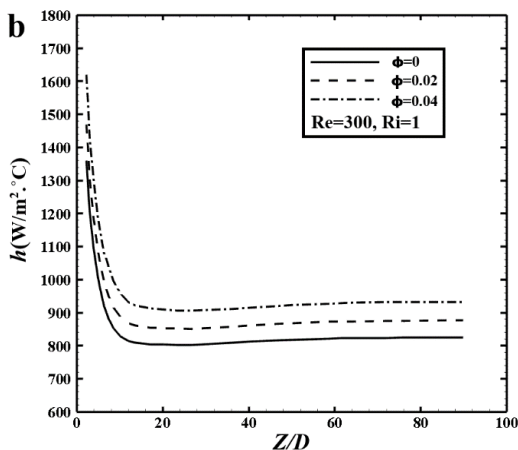
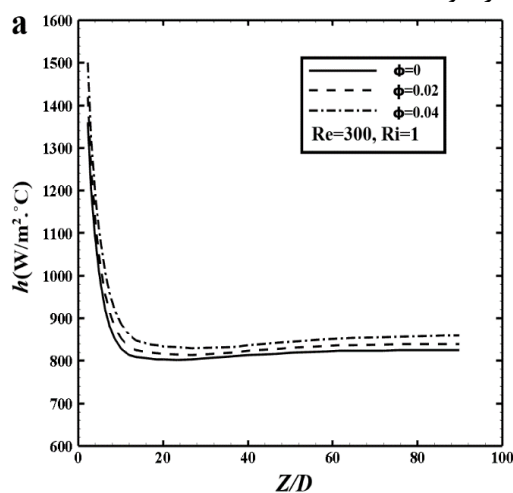
برای درک بهتر کاهش شدت جریان‌های ثانویه، پروفیل سرعت مماسی در صفحه $z=0.08(m)$ در شکل‌های (۷) و (۸) برای دو حالت $(q''=15000(W/m^2), m'=1.42(g/s))$ و $(q''=15000(W/m^2), m'=1.42(g/s))$ ترسیم شده است. مقدار سرعت عرضی بر روی دیواره لوله به علت عدم لغزش صفر است، با افزایش فاصله از دیواره، مقدار سرعت مماسی افزایش یافته و اندازه سرعت در ابتدا مثبت بوده که ناشی از آن است که جهت بردارهای ثانویه به سمت بالا است و سپس مقدار سرعت منفی می‌شود که نشان می‌دهد که جهت بردارهای ثانویه عوض شده و به سمت پایین است. با افزایش غلظت نانوذرات، مقدار سرعت مماسی کاهش پیدا کرده است، همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد جریان‌های ثانویه تحت تأثیر افزایش لزجت دینامیکی و کاهش ضریب انبساط حرارتی تضعیف شده است. برای شرایط $Ri=0.22, Re=300$ شبیه‌سازی با استفاده از دو رابطه ۱۶ و ۲۰ انجام شده است. لازم به ذکر است در حالتی که عدد ریچاردسون ثابت در نظر گرفته شده است با افزودن نانوذرات، جریان‌های ثانویه تغییر نمی‌کند، چون نیروی شناوری با ثابت ماندن عدد ریچاردسون بدون تغییر می‌ماند.



شکل ۵- بردارهای سرعت ثانویه برای درصدهای حجمی متفاوت در $m'=1.42(g/s), q''=15000(W/m^2)$

صورتی که رابطه ۱۶، ضریب هدایت حرارت موثر نانوسیال را ۱ درصد زیاد می‌کند.

شبیه‌سازی برای $Ri=1$ تکرار شده است. نتایج مربوط به این حالت در شکل (۱۰) آمده است. در مقایسه با شکل (۹) مشخص است که برای حالت $\phi=0$ افزایش عدد ریچاردسون موجب افزایش h در طول لوله می‌شود که به دلیل افزایش شدت جریان ثانویه می‌باشد. در این حالت نیز افزایش کسر حجمی نانوذره موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی شده است که همانند حالت قبل استفاده از رابطه ۲۰ موجب شده که تأثیر نانوذره در میزان انتقال حرارت بیشتر شود.

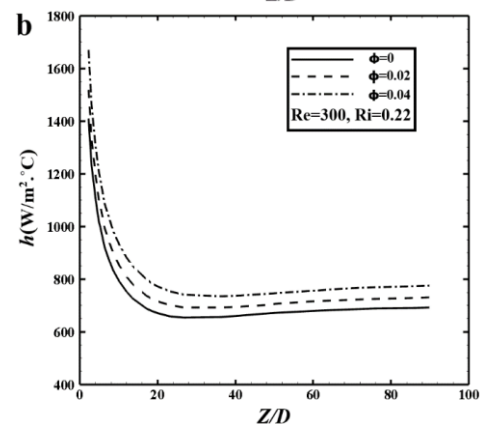
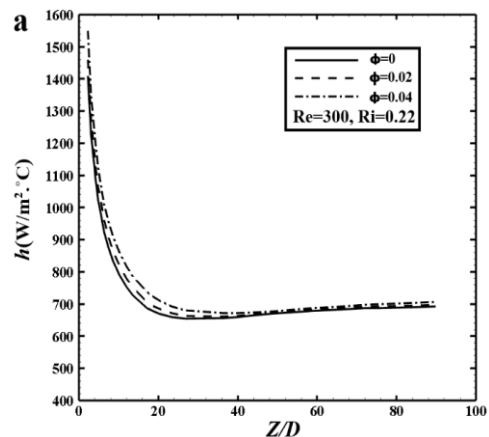


شکل ۱۰- ضریب انتقال حرارت در لوله برای $Re=300$ و

$Ri=1$ با استفاده از روابط: الف: [۱۶] و ب: [۲۰]

بررسی‌های انجام شده در شرایط ریچاردسون و عدد رینولدز ثابت با استفاده از دو رابطه ارائه شده برای ضریب هدایت حرارتی مؤثر نشان داد که روند تغییر h برحسب کسر حجمی در طول لوله یکسان بوده ولی مقادیر بدست آمده اختلاف دارند. در مرحله بعدی شبیه‌سازی جریان برای شرایطی که شار حرارتی و دبی جرمی معین انجام شده

شکل (۹) تغییرات h در طول لوله را برای کسر حجمی‌های مختلف نشان می‌دهد.

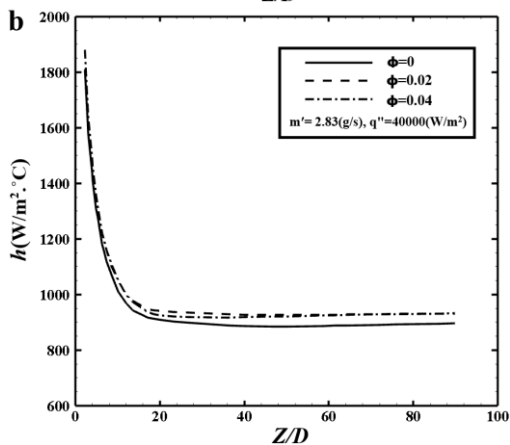
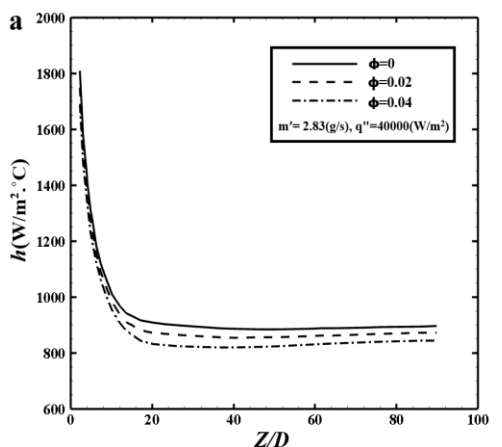


شکل ۹- ضریب انتقال حرارت در لوله برای $Re=300$ و

$Ri=0.22$ با استفاده از روابط: الف: [۱۶] و ب: [۲۰]

روند تغییرات h برای همه شرایط یکسان بوده به طوری که در ورودی لوله با شیب تندی کاهش یافته و در طول لوله تقریباً ثابت می‌ماند. در هر دو شکل 9-a و 9-b، افزایش کسر حجمی نانوذره موجب افزایش h شده است. برای حالت 9-a که از رابطه ۱۶ برای محاسبه ضریب هدایت موثر برای شبیه‌سازی استفاده شده، در حالتی که $\phi=0.04$ باشد افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی ۴٪ می‌باشد، اما در شکل 9-b که از رابطه ۲۰ برای محاسبه ضریب هدایت مؤثر استفاده شده، برای $\phi=0.04$ ، ضریب انتقال حرارت تقریباً ۱۸٪ افزایش می‌یابد و افزایش کسر حجمی تأثیر بیشتری در مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی دارد. عاملی که باعث شده است ضریب انتقال حرارت جابجایی (در صورت استفاده از رابطه ۲۰) در مقایسه با حالتی که از رابطه ۱۶ استفاده شود بیشتر تغییر کند این است که ضریب هدایت حرارتی موثر در رابطه ۲۰، ۱۱ درصد نسبت به سیال پایه افزایش یافته است، در

است چرا که دلیل افزودن نانوذره به سیال برای همین منظور می‌باشد. در صورتی که طبق تأیید نتایج آزمایشگاهی [۳۸] در جریان جابجایی ترکیبی که جریان ثانویه نقش مهمی در انتقال حرارت دارد اضافه کردن نانوذره موجب تضعیف انتقال حرارت در شرایط شارحرارتی ثابت می‌شود. بنابراین در محدوده جریان ترکیبی با افزایش ذرات نانو، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که رفتار تغییرات ضریب انتقال حرارت نانوسیال فقط با قابلیت حرارتی مؤثر نانوسیال مشخص نمی‌شود. مشخصات فیزیکی دیگر از جمله (چگالی، ضریب انبساط حرارتی، ظرفیت حرارتی) نیز می‌توانند ضریب انتقال حرارت نانوسیال را در جریان جابجایی ترکیبی تحت تأثیر قرار دهند. بنابراین طبق معادلات ۱۳-۲۰، با افزایش درصد حجمی نانوذرات از ۰٪ الی ۴٪ قابلیت حرارتی مؤثر نزدیک به یک درصد افزایش یافته و ضریب انبساط حرارتی تقریباً ۱۳٪ کم می‌شود و لزجت دینامیکی ۴۸٪ افزایش می‌یابد.

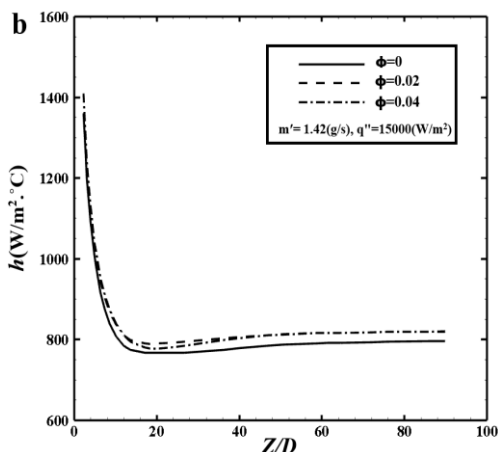
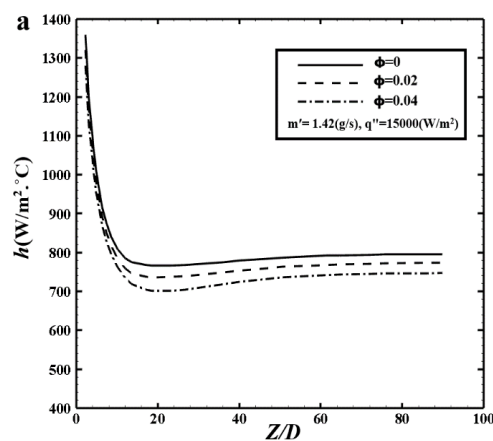


شکل ۱۲- ضریب انتقال حرارت در لوله برای

$m'=2.83(g/s)$ و $q''=40000(W/m^2)$ با استفاده از روابط:

الف: [۱۶] و ب: [۲۰]

است. شکل (۱۱) تغییرات h را برای $q=15000(W/m^2)$ نشان می‌دهد. در شکل 11-a با افزایش کسر حجمی نانوذره ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد در صورتیکه در شکل 11-b افزایش کسر حجمی موجب کاهش ضریب انتقال حرارت شده است. شرایط اعمال شده برای هر دو حالت یکسان بوده و تنها رابطه بکارگرفته برای محاسبه ضریب هدایت مؤثر نانوسیال متفاوت می‌باشد



شکل ۱۱- ضریب انتقال حرارت در لوله برای

$m'=1.42(g/s)$ و $q''=15000(W/m^2)$ با استفاده از روابط:

الف: [۱۶] و ب: [۲۰]

با افزایش مقدار شار حرارتی به $q=25000(W/m^2)$ روند مشابه‌ای در نتایج بدست آمده که در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

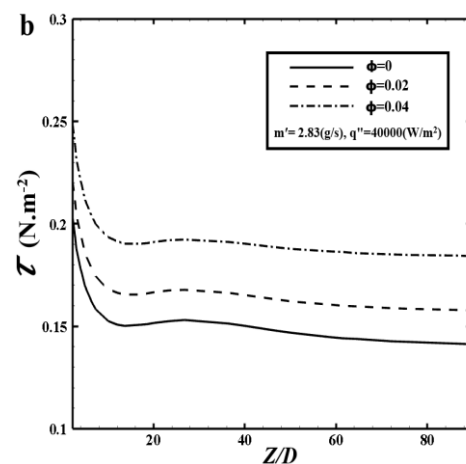
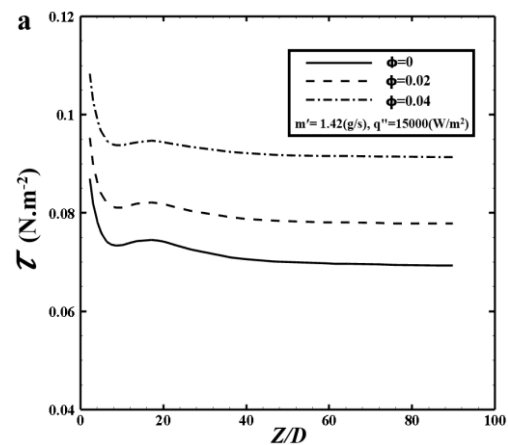
برای بررسی بیشتر نتایج، علاوه بر افزایش مقدار شار حرارتی، مقدار دبی جرمی نانوسیال نیز افزایش داده شده، همانطوری که در شکل (۱۲) مشخص است دو رابطه رفتار کاملاً متفاوتی از تأثیر افزایش درصد کسر حجمی نانوذره به نانوسیال پیش بینی می‌کنند. شاید به نظر برسد که نتایج مربوط به رابطه ۱۶ درست باشد که در آن افزایش نانوذره موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی شده

مدل دوفازی مخلوط، جریان نانوسیال شامل آب و ذرات Al2O3 درون لوله‌ای افقی در حالت انتقال حرارت ترکیبی، به صورت عددی شبیه‌سازی شد. در دو حالت عدد ریچاردسون و شارحرارتی ثابت، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از دو رابطه (۲۰ و ۱۶) ارائه شده در مراجع مختلف برای ضریب هدایت مؤثر نانوسیال محاسبه شد. بررسی نتایج نشان داد که در حالت عدد ریچاردسون ثابت هر دو رابطه رفتار مشابه‌ای برای مقدار ضریب جابجایی نشان می‌دهند به طوری که با افزایش درصد کسر حجمی نانوذره مقدار ضریب جابجایی افزایش می‌دهد، ولی مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در حالتی که از رابطه ۲۰ استفاده شود نسبت به حالتی که از رابطه ۱۶ استفاده شود ۴/۵ برابر بیشتر است. در رابطه ۲۰ ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال ۱۱ درصد و در رابطه ۱۶ حدود ۱ درصد زیاد می‌شود، بهمین دلیل مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت در دو حالت متفاوت است. این در حالی است که در حالت شارحرارتی ثابت نتایج بدست آمده عکس یکدیگر است. با افزایش کسر حجمی مقدار ضریب جابجایی با استفاده از رابطه ۲۰ افزایش می‌یابد در صورتی که با استفاده از رابطه ۱۶ مقدار ضریب جابجایی کاهش می‌یابد. نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در مرجع [۳۸] برای جابجایی ترکیبی در حالت شارحرارتی ثابت بیانگر کاهش ضریب انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی است که دلیل آن افزایش لزجت مؤثر سیال و کاهش ضریب انبساط حرارتی و در نتیجه کاهش شدت جریان ثانویه است. بنابراین برای شبیه‌سازی جریان نانوسیال با جابجایی ترکیبی در حالت شارحرارتی ثابت، استفاده از رابطه ۱۶ برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی مؤثر پیشنهاد می‌شود.

نمادها

| | |
|-------|------------------------------------|
| C_f | ضریب اصطکاک سطحی |
| C_p | حرارت مخصوص (J/Kg K) |
| D | قطر لوله (m) |
| d_p | قطر ذرات معلق جامد نانو (nm) |
| d_f | قطر مولکول سیال پایه (nm) |
| E | انرژی (J/Kg) |
| g | شتاب ثقل ($m.s^{-2}$) |
| K | قابلیت هدایت حرارتی (W/m K) |
| K_b | ثابت بولتزمن (J/K), $(1.3807e-23)$ |

افزایش نانوذره موجب افزایش لزجت مؤثر سیال شده که در جریان جابجایی ترکیبی علاوه بر این که موجب کاهش ضریب انتقال حرارت شده باعث افزایش تنش برشی سیال بر سطح لوله نیز می‌شود. برای دو شار حرارتی مختلف مقدار تنش برشی روی دیواره لوله محاسبه شده که نتایج مربوطه در شکل (۱۳) تنش برشی روی دیواره نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد حجمی نانوذرات، تنش برشی روی دیواره افزایش می‌یابد، برای کمترین درصد حجمی، $\phi = 2\%$ ، افزایش تنش برشی دیواره حدود ۱۳٪ می‌باشد. در صورتی که برای $\phi = 4\%$ ، این افزایش حدود ۱۰۰٪ می‌باشد. تنش برشی روی دیواره به این دلیل افزایش می‌یابد که با افزایش درصد حجمی نانو ذرات، لزجت سیال زیاد شده و با افزایش لزجت، در نتیجه تنش برشی زیاد می‌شود.



شکل ۱۳- تاثیر غلظت ذرات بر روی تنش برشی برای حالت‌های الف: $m'=1.42(g/s)$, $q''=15000(W/m^2)$ و ب: $m'=2.83(g/s)$, $q''=40000(W/m^2)$

۴- نتیجه گیری

با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی با رویکرد

| | |
|--------------|----------|
| راستای محیطی | θ |
| نسبت حجمی | ϕ |
| متغیر دلخواه | Φ |
| زیرنویس‌ها | |
| میانگین | b |
| دریفت | dr |
| مؤثر | eff |
| سیال پایه | b |
| مخلوط | m |
| شرایط ورودی | 0 |
| ذره | p |
| ذرات جامد | s |
| دیواره | W |

| | |
|------------------------------------|----------|
| عدد پرانتل | Pr |
| فشار (pa) | P |
| شار حرارتی ($W.m^{-2}$) | q'' |
| عدد رینولدز | Re |
| دما (K) | T |
| سرعت (ms^{-1}) | V |
| راستای محوری | Z |
| علائم یونانی | |
| لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$) | μ |
| لزجت سینماتیکی ($m^2.s^{-1}$) | ν |
| چگالی (kgm^{-3}) | ρ |
| ضریب نفوذ حرارتی | α |
| ضریب انبساط حرارتی، (K^{-1}) | β |

مراجع

- [1] K. Liu, U. Choi and K.E. Kasza, Measurements of pressure drop and heat transfer in turbulent pipe flows of particulate slurries, NASA STI/Recon Technical Report N, Vol. 89, 1988.
- [2] H. S. Nalwa, Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Volume 10, American Scientific Publishers, 2004.
- [3] J. Maxwell, Electricity and Magnetism Clarendon Press, UK, Oxford, 1873.
- [4] J. C. Maxwell, J. J. Thompson, A treatise on electricity and magnetism: Clarendon, 1904.
- [5] S. Choi, "Enhancing conductivity of fluids with nanoparticles", ASME Fluid Eng, Division, Vol. 231, 1995, pp. 99-105.
- [6] S. Lee, S.-S. Choi, S. Li, and, J. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles", Journal of Heat transfer, Vol. 121, No. 2, 1999, pp. 280-289.
- [7] X. Wang, X. Xu, S. U. S. Choi, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture", Journal of thermophysics and heat transfer, Vol. 13, No. 4, 1999, pp. 474-480.
- [8] Q. Li, Y. Xuan, "Experimental investigation on transport properties of nanofluids", Heat transfer science and technology, Vol. 2000, pp. 757-762.
- [9] Y. Xuan, Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids", International Journal of heat and fluid flow, Vol. 21, No. 1, 2000, pp. 58-64.
- [10] R. L. Hamilton, O. Crosser, "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems", Industrial & Engineering chemistry fundamentals, Vol. 1, No. 3, 1962, pp. 187-191.
- [11] Y. Xuan, Q. Li and W. Hu, "Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids", AIChE Journal, Vol. 49, No. 4, 2003, pp. 1038-1043.
- [12] Q.-Z. Xue, "Model for effective thermal conductivity of nanofluids, Physics letters A", Vol. 307, No. 5-6, 2003, pp. 313-317.
- [13] C. H. Chon, K. D. Kihm, S. P. Lee and S. U. Choi, "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement", Applied Physics Letters, Vol. 87, No. 15, 2005, pp. 153107-1531073.
- [14] B. C. Pak and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", Experimental Heat Transfer an International Journal, Vol. 11, No. 2, 1998, pp. 151-170.

- [15] S. Lee and S. U. Choi, Application of metallic nanoparticle suspensions in advanced cooling systems, Argonne National Lab., IL (United States), 1996.
- [16] Y. Xuan and Q. Li, "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids", Journal of Heat transfer, Vol. 125, No. 1, 2003, pp. 151-155.
- [۱۷] کامیار کمانی و روح... رفعی، "بررسی انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک در یک مبدل حرارتی جریان مخالف"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۴۵-۵۷.
- [18] G. S. Barozzi, E. Zanchini and M. Mariotti, "Experimental investigation of combined forced and free convection in horizontal and inclined tubes, Meccanica, Vol. 20, No. 1, 1985, pp. 18-27.
- [19] D. Choudhury and S. Patankar, "Combined forced and free laminar convection in the entrance region of an inclined isothermal tube", Journal of heat transfer, Vol. 110, No. 4a, 1988, pp. 901-909.
- [20] E. Del Casal and W. N. Gill, "A note on natural convection effects in fully developed horizontal tube flow", AIChE Journal, Vol. 8, No. 4, 1962, pp. 570-574.
- [21] W. N. Gill and E. Del Casal, "A theoretical investigation of natural convection effects in forced horizontal flows", AIChE Journal, Vol. 8, No. 4, 1962, pp. 513-518.
- [22] B. Morton, "Laminar convection in uniformly heated horizontal pipes at low Rayleigh numbers", The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 12, No. 4, 1959, pp. 410-420.
- [23] M. Akbari and A. Behzadmehr, "Developing mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube with uniform heat flux", International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, Vol. 17, No. 6, 2007, pp. 566-586.
- [24] A. Akbarinia and A. Behzadmehr, "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, No. 8-9, 2007, pp. 1327-1337.
- [۲۵] حسن خراسانی زاده، علیرضا آقایی و حمیدرضا احترام، "بررسی عددی جریان سیال، انتقال حرارت و تولید انترپی در جابجایی توام سیال با خواص متغیر در محفظه‌ای با دو منبع گرم دایره‌ای"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۹۹-۲۱۱.
- [26] N. Putra, W. Roetzel and S. K. Das, "Natural convection of nano-fluids", Heat and mass transfer, Vol. 39, No. 8-9, 2003, pp. 775-784.
- [27] M. Manninen, V. Taivassalo, S. Kallio, on the mixture model for multiphase flow, Technical Research Centre of Finland Finland, 1996.
- [28] A. Behzadmehr, M. Saffar-Avval, N. Galanis, "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, Vol. 28, No. 2, 2007, pp. 211-219.
- [۲۹] مسعود ضیائی‌راد و مریم بیگی هرچگانی، "مطالعه عددی انتقال حرارت و افت فشار در جریان جابجایی اجباری نانوسیال داخل لوله دنداندار"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۶۵-۷۶.
- [30] V. Bianco, O. Manca, S. Nardini, "Performance analysis of turbulent convection heat transfer of Al₂O₃ water-nanofluid in circular tubes at constant wall temperature", Energy, Vol. 77, 2014, pp. 403-413.
- [31] F. Garoosi, B. Rohani and M. M. Rashidi, "Two-phase mixture modeling of mixed convection of nanofluids in a square cavity with internal and external heating", Powder Technology, Vol. 275, 2015, pp. 304-321.
- [32] A. Aghanajafi, D. Toghraie, B. Mehmandoust, "Numerical simulation of laminar forced convection of water-CuO nanofluid inside a triangular duct", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, Vol. 85, 2017, pp. 103-108.
- [33] B. Karbasifar, M. Akbari and D. Toghraie, "Mixed convection of Water-Aluminum oxide nanofluid in an inclined lid-driven cavity containing a hot elliptical centric cylinder", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 116, 2018, pp. 1237-1249.
- [34] L. Schiller, A. Nuemann, "A Drag Coefficient Correlation", Z. Ver. Deutsch. Ing, Vol. 77, 1935, pp. 318-320.
- [35] S. E. B. Maïga, C. T. Nguyen, N. Galanis and G. Roy, "Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube", Superlattices and Microstructures, Vol. 35, No. 3, 2004, pp. 543-557.

- [36] H. Brinkman, "The Viscosity of Concentrated Solutions and suspension", J Chem Physics, Vol. 20, 1952, pp. 571-578.
- [37] K. Khanafer, K. Vafai and M. Lightstone, "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids", International journal of heat and mass transfer, Vol. 46, No. 19, 2003, pp. 3639-3653.
- [38] R. B. Mansour, N. Galanis, C. Nguyen and C. Aouina, Experimental Study of Mixed Convection Laminar Flow of Water-Al₂O₃ Nanofluid in Horizontal Tube with Uniform Wall Heat Flux, in Proceeding.
- [39] S. Mirmasoumi, A. Behzadmehr, "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model", Applied Thermal Engineering, Vol. 28, No. 7, 2008, pp. 717-727.