

مطالعه عددی انتقال حرارت و افت فشار در جریان اجباری نانوسیال داخل لوله دندانه‌دار

مسعود ضیائی‌راد^{۱*}، مریم بیگی هرچگانی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۱/۰۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۳۰	انتقال حرارت و افت فشار در جریان نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در لوله‌ای با دندانه‌های داخلی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. معادلات حاکم بر جریان آرام سیال تراکم‌ناپذیر به همراه روابط مربوط به تغییرات خواص نانوسیال به کمک روش حجم محدود با استفاده از الگوریتم سیمپل حل شده‌اند. اثر پارامترهای مختلف جریان و همچنین تاثیر فاصله بین دندانه‌های 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 بیش از ۲۰ درصد و افزایش نوسلت متوسط در حدود ۱۰ 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 بیش از دوبرابر شده است.
واژگان کلیدی: لوله دندانه‌دار، جریان نانوسیال، جابجایی اجباری، انتقال حرارت، حل عددی.	

۱- مقدمه

در کاربردهای مهندسی، انتقال حرارت در سیال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مهندسان و پژوهشگران روشهای زیادی را در جهت افزایش انتقال حرارت پیشنهاد داده‌اند. در سالهای اخیر روشهای نوینی برای این منظور به کار گرفته شده است. یکی از مهمترین آنها، استفاده از نانوذرات جامد در سیال پایه می‌باشد، که البته نانوسیال حاصل دارای خواص حرارتی بهتری نسبت به سیال پایه است. از طرفی یکی از پرکاربردترین مسایل در صنایع مرتبط با مهندسی حرارت و سیالات، جریان درون لوله‌های دندانه‌دار یا شیاردار است. از جمله کاربردهای مهم این گونه مسایل، در طراحی

مبدل‌های حرارتی است که در آنها، این دندانه‌ها می‌توانند مانند پره یا فین در جهت بهبود عملکرد حرارتی مبدل عمل کنند.

تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه‌های تحقیقاتی بیان شده انجام گرفته که از میان آنها می‌توان به جدیدترین تحقیقات انجام شده توسط فریدونی‌مهر و رشیدی [۱] در حل جریان‌های نانوسیال در حضور میدان مغناطیسی بین دیوارهای غیرموازی با استفاده از روش تحلیلی هموتوپی اشاره کرد. این پژوهشگران بیان کردند که راه حل‌های چندگانه‌ای برای بعضی از پارامترها به خصوص در کانالهای همگرا وجود دارد. در این مطالعه، آن‌ها اثر نانوذرات متفاوت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.ziaeirad@eng.ui.ac.ir

۱. استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

دیسک‌ها، تاثیر بسزایی در افزایش انتقال حرارت نانوسیال در مقایسه با سیال پایه داشته باشد.

دمیر و همکارانش [۸] مشخصه‌های انتقال حرارت جابجایی اجباری تک‌فاز نانوسیال اکسید تیتانیوم را در لوله‌های دوتایی مبدل حرارتی به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که کسر حجمی کوچکی از ذرات نانو می‌تواند قابلیت‌های انتقال حرارت سیال را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. علاوه بر آن نانوسیال‌های با کسر حجمی بالاتر، افزایش انتقال حرارت و افت فشار بالاتری را تجربه می‌کنند. کشاورز و رازورز [۹] به بررسی تجربی تاثیر نانوسیال آب-اکسید آلومینیم بر کارایی حرارتی لوله‌های حرارتی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با تزریق نانوسیال به لوله حرارتی، عملکرد حرارتی با کاهش مقاومت حرارتی و اختلاف دمای دیواره افزایش می‌یابد و همچنین کارایی حرارتی لوله حرارتی با تزریق نانوسیال، نسبت به سیال پایه بیشتر می‌شود.

جراسیم و همکاران او [۱۰] تحقیقاتی تجربی بر روی نانوسیال در جریان آرام شعاعی محدود انجام دادند و دریافتند که انتقال حرارت در یک سیستم خنک‌کننده جریان شعاعی، با استفاده از نانوسیال افزایش می‌یابد. همچنین بیان کردند که عدد نوسلت با کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله دیسک‌ها کاهش خواهد یافت. چویی و زانگ [۱۱] شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آب-اکسید آلومینیم را در لوله‌ای با خم برگشتی انجام دادند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که عدد نوسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز و پرانتل افزایش یافته و افزایش گرمای ویژه نیز منجر به افزایش انتقال حرارت می‌گردد. همچنین عدد نوسلت در خم برگشتی، به علت جریانهای ثانویه، بالاتر از ورودی و خروجی لوله است و افت فشار در لوله نیز با افزایش غلظت حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. احمد و همکارانش [۱۲] به بررسی عددی افزایش انتقال حرارت در کانالی موج دار با به‌کارگیری نانوسیال پرداختند. آن‌ها دریافتند که ضریب اصطکاک و عدد نوسلت با افزایش دامنه کانال موجی

با کسرهای حجمی و رینولدزهای مختلف و همچنین زوایه‌های متفاوت کانال را بررسی کردند. در تحقیق مشابه دیگری، رشیدی و همکارانش [۲] اثر شناوری را بر جریان نانوسیال تحت میدان مغناطیسی روی صفحه تخت تحت کشش و در حضور تابش حرارتی بررسی کردند و بر دقت نتایج خود و مطابقت آن‌ها با کارهای منتشر شده قبلی تاکید نمودند. انور بیگ و همکارانش [۳] مطالعه‌ای عددی روی مقایسه مدل‌های تک‌فاز و دو فاز برای پدیده انتقال "بیونانوسیال" انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که هر دو مدل تک‌فاز و دو فاز برای جریان سیال نتایج یکسانی می‌دهد، ولی در مورد انتقال حرارت نتایج تفاوت دارد. همچنین دریافتند که ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت ذرات نانوسیال، افزایش می‌یابد. گروسی و همکارانش [۴] از مدل جدیدی برای شبیه‌سازی عددی جابجایی آزاد نانوسیال در مبدل‌های حرارتی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که محل خنک‌کن‌ها و گرم‌کن‌ها در مبدل، تاثیر قابل توجهی بر میزان انتقال حرارت آن‌ها دارد. همچنین دریافتند که در اعداد ریلی کم، پخش ذرات نسبتاً یکنواخت و در اعداد ریلی بالا تقریباً غیریکنواخت است. هی و همکارانش [۵] به بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال اکسید تیتانیوم در جریان آرام در یک لوله ساده پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها، افزایش قابل توجه انتقال حرارت نانوسیال را نسبت به سیال پایه به‌ویژه در ناحیه ورودی لوله نشان می‌دهد. هریس و همکارانش [۶] به بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در یک لوله پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نیز حاکی از افزایش انتقال حرارت به علت استفاده از نانوسیال و همچنین افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوذرات در آب است. مایگا و همکاران وی [۷] نیز افزایش انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال را در جریان‌های جابجایی اجباری بررسی نمودند. برای جریان در لوله، نتایج آنها افزایش قابل توجه انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز را نشان می‌دهد؛ در حالی که برای جریان‌های شعاعی، به نظر نمی‌رسد که افزایش عدد رینولدز و فاصله جداسازی

دندانه، عدد نوسلت افزایش می‌یابد؛ ولی با افزایش قطر نانوذرات، این پارامتر کاهش خواهد یافت. گواتاش و همکاران وی [۱۸] تاثیر نانوسیال را بر کارایی حرارتی لوله‌های حرارتی به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده نمودند که افزایش غلظت ذرات و کاهش شعاع آن‌ها، می‌تواند موجب افت مقاومت حرارتی لوله گردد.

با نگرشی بر تحقیقات انجام شده در گذشته، می‌توان دریافت که در مقالات ارائه شده، اگرچه انتقال حرارت نانوسیال‌ها و جریان سیال در لوله‌های دندانه دار بطور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است، ولی بررسی جامعی بر روی مساله انتقال حرارت جریان نانوسیال در لوله‌های دندانه‌دار و برآوردی از میزان تاثیر نانوسیال صورت نپذیرفته است. با توجه به اهمیت این مساله و کاربردهای بی‌شمار ذکر شده برای آن در صنعت، از قبیل مبدل‌های حرارتی و همچنین در فرآیند خنک‌کاری قطعات، در این مقاله بررسی کاملی روی محاسبه ضریب اصطکاک و انتقال حرارت در این هندسه انجام شده و اثر کسرحجمی نانوذرات و فاصله دو دندانه ابتدائی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مدل فیزیکی

هندسه مورد نظر مطابق شکل ۱، یک لوله با مقطع دایروی است که دو دندانه حلقوی شکل مجزا به فاصله a بر روی جداره داخلی آن در نظر گرفته می‌شود. جریان نانوسیال با چگالی ρ_{nf} و لزجت μ_{nf} به طور یکنواخت و با سرعت u_{∞} و دمای T_{∞} وارد لوله می‌شود. دیواره‌ها در دمای ثابت T_w و دندانه‌ها عایق هستند و فرض عدم لغزش سیال برای دیواره‌ها برقرار است. با توجه به تقارن هندسی مساله، نیمی از هندسه آن از محور مرکزی لوله تا جداره، به عنوان حوزه حل عددی انتخاب می‌گردد. جریان سیال، آرام و بدون اتلاف لزجت و تولید انرژی فرض می‌شود. همچنین نانوسیال به عنوان یک محیط پیوسته و دارای تعادل گرمایی بین ذرات جامد و سیال پایه در نظر گرفته می‌شود.

افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانوذرات، عددنوسلت به میزان قابل توجه و ضریب اصطکاک به مقدار کمی افزایش خواهد یافت. ضمناً بیان کردند که افزایش انتقال حرارت اساساً بیشتر وابسته به کسر حجمی نانوذرات، دامنه موج دیواره و عدد رینولدز است تا طول موج. ماناگا و همکاران [۱۳] جابجایی اجباری نانوسیال را در کانالی دندانه‌دار با دیوار خارجی تحت شار حرارتی یکنواخت به صورت عددی مطالعه کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی ذرات و بالا رفتن عدد رینولدز افزایش می‌یابد. سورش و همکاران وی [۱۴] یک مطالعه تجربی بر روی مشخصه‌های انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک در یک لوله صاف و یک لوله با گودی مارپیچی در جریان آشفته با شار حرارتی ثابت انجام دادند. آن‌ها دریافتند که عملکرد انتقال حرارت در لوله دایروی و گود شده، با معلق‌سازی نانوذرات نسبت به آب خالص تقویت می‌گردد و در لوله صاف، ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و غلظت حجمی ذرات افزایش خواهد یافت. نامپورو و همکارانش [۱۵] جریان آشفته و انتقال حرارت سه نانوسیال مختلف را در یک مخلوط آب-اتیلن گلیکول جاری در یک لوله دایروی تحت شار حرارتی ثابت بررسی کردند. نتایج حل عددی آنها نشان داد که لزجت نانوسیال با کاهش قطر نانوذرات افزایش می‌یابد و برای غلظت‌های یکسان نانوسیال‌های بررسی شده در عدد رینولدزی خاص، نانوسیال اکسید مس کارایی انتقال حرارتی بالاتری نسبت به بقیه دارد. در مطالعه تجربی دیگری، سیام و شارما [۱۶] به بررسی انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیم با غلظت کم حجمی در لوله‌ای با نوارهای طولی پرداختند و نتیجه گرفتند که انتقال حرارت با غلظت حجمی نانوسیال و همچنین با کاهش نسبت سطح مقطع نوار افزایش می‌یابد. محمد و همکارانش [۱۷] در مقاله‌ای، مشخصه‌های حرارتی و هیدرولیکی جریان آشفته نانوسیال را در کانالی دندانه‌دار به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش کسرحجمی نانوذرات، عدد رینولدز و نسبت سطح مقطع

در این روابط، T_m دمای متوسط سیال در لوله، R_0 شعاع لوله، و $Re = 2R_0\rho_f u_{\infty}/\mu_f$ و $Pr = \nu_f/\alpha_f$ به ترتیب اعداد بدون بعد رینولدز و پرانتل هستند.

شرایط مرزی: جریان در ورودی یکنواخت فرض می شود و طول لوله پس از دندانه دوم تا جایی ادامه یافته که در خروجی جریان شرط توسعه یافتگی برقرار است. روی دیواره های لوله شرط عدم لغزش و دمای ثابت در نظر گرفته شده و بر روی محور تقارن لوله، شرط تقارن شامل گرادیان دما و سرعت صفر در راستای شعاعی منظور گردیده است.

$$\begin{aligned} x^* = 0 : u^* = 1, v^* = 0, T^* = 1 \\ x^* = \frac{L}{R_0} : \frac{\partial u^*}{\partial x} = 0, v^* = 0, \frac{\partial T^*}{\partial x} = 0 \\ r^* = 0 : \frac{\partial u^*}{\partial r} = 0, v^* = 0, \frac{\partial T^*}{\partial r} = 0 \\ r^* = 1 : u^* = 0, v^* = 0, T^* \Big|_{\frac{\partial}{\partial r}} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

محاسبه انتقال حرارت به کمک تعریف عدد بدون بعد نوسلت انجام پذیر است. با توجه به تعریف پارامترهای بی بعد، پارامتر بدون بعد نوسلت موضعی به صورت زیر تعریف می شود [۱۹].

$$Nu_x = -\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{dT^*}{dr^*} \Big|_{x^*,1} \quad (7)$$

و نوسلت متوسط نیز با انتگرال گیری روی سطح بدست می آید.

$$Nu_m = -\frac{2}{L} \int_0^L Nu_x dx^* \Big|_{r^*=1} \quad (8)$$

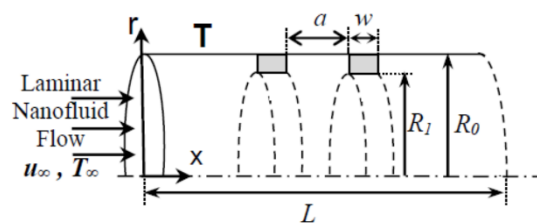
ضریب اصطکاک روی دیواره داخلی لوله نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۹].

$$f_x = 8 \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{Re} \frac{du^*}{dr^*} \Big|_{x^*,1} \quad (9)$$

و مقدار متوسط آن نیز با متوسط گیری از رابطه فوق در طول لوله قابل دستیابی است.

۴- بررسی خواص نانو سیال

برای کامل شدن معادلات حاکم بر مساله، نیاز به روابطی جهت محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال است. چگالی، ظرفیت گرمایی و ضریب پخش حرارتی نانوسیال به صورت



شکل ۱- نمائی از جریان نانوسیال در لوله ای دایروی با دو دندانه داخلی

۳- شبیه سازی ریاضی

معادلات حاکم بر جریان نانوسیال تراکم ناپذیر در لوله برای حالت دوبعدی در مختصات استوانه ای به شکل بدون بعد به صورت زیر نوشته می شوند:

معادله پیوستگی

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial(r^* v^*)}{\partial r^*} + \frac{\partial u^*}{\partial x^*} = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت شعاعی

$$\begin{aligned} \left[v^* \frac{\partial v^*}{\partial r^*} + u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right] + \frac{\partial p^*}{\partial r^*} \\ = \left(\frac{2}{Re} \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \right) \left[\frac{\partial}{\partial r^*} \left(\frac{1}{r^*} \frac{\partial(r^* v^*)}{\partial r^*} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} - \frac{v^*}{r^{*2}} \right] + S_v \end{aligned} \quad (2)$$

معادله اندازه حرکت محوری

$$\begin{aligned} \left[v^* \frac{\partial u^*}{\partial r^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right] + \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \\ = \frac{2}{Re} \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \left[\frac{\partial}{\partial r^*} \left(\frac{1}{r^*} \frac{\partial r^* u^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} \right] \\ + S_u \end{aligned} \quad (3)$$

معادله انرژی

$$\begin{aligned} \left[v^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} + u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} \right] \\ = \left(\frac{2}{Re Pr \alpha_f} \right) \left[\frac{\partial}{\partial r^*} \left(\frac{1}{r^*} \frac{\partial r^* T^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} \right] \\ + S_T \end{aligned} \quad (4)$$

که در بی بعدسازی معادلات حاکم فوق، از تعریف پارامترهای بی بعد زیر استفاده شده است.

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{x}{R_0}, & r^* &= \frac{r}{R_0} \\ v^* &= \frac{v}{u_{\infty}}, & u^* &= \frac{u}{u_{\infty}} \\ p^* &= \frac{p}{\rho_{nf} u_{\infty}^2}, & T^* &= \frac{T - T_w}{T_m - T_w} \end{aligned} \quad (5)$$

برابر با $(1/10 \times 3807 \times 10^{-23})$ ، و l_f فاصله متوسط پوشش آزاد مولکول های آب است.

در کلیه روابط فوق زیر نویس f اشاره به سیال خالص، p اشاره به نانوذره و nf اشاره به نانوسیال دارد. خواص سیال پایه (آب) و نانوذره (اکسید آلومینیم) در جدول ۳ آورده شده است [۲۲]. عدد پراکتل برای آب خالص برابر با $6/2$ در نظر گرفته می شود.

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی آب و نانوذره اکسید آلومینیم

ماده	ρ (Kg/m ³)	k (W/m.K)	C_p (J/Kg.K)
آب	۹۹۷/۱	۰/۶۱۳	۴۱۷۹
آلومینا	۳۹۷۰	۴۰	۷۶۵

۵- روش حل عددی

شکل عمومی کلیه معادلات به صورت زیر می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi \quad (15)$$

که ϕ نمایانگر متغیر وابسته بدون بعد، و Γ و S شکل های بی بعد ضریب پخش و جمله چشمه می باشند. از مقایسه معادلات با شکل عمومی عبارتهای Γ ، ϕ و S_ϕ به صورت جدول زیر تعریف می شوند.

جدول ۳- تعریف مولفه های معادله جبری (۱۵) برای هر

معادله بقا

معادله	ϕ	Γ	S_ϕ
پیوستگی	۱	۰	۰
x -mom.	u^*	$\frac{2\mu_{nf}}{\rho_{nf} v_f Re}$	$-\frac{\partial P^*}{\partial x^*}$
r -mom.	v^*	$\frac{2\mu_{nf}}{\rho_{nf} v_f Re}$	$-\frac{\partial P^*}{\partial r^*} - \left(\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} v_f Re} \right) \frac{v^*}{r^{*2}}$
انرژی	T^*	$\frac{2\alpha_{nf}}{\alpha_f Re Pr}$	-

برای حل عددی معادلات جبری گسسته شده، یک کد کامپیوتری به زبان فرترن با استفاده از روش حجم کنترل نوشته شده است. در این روش، معادلات حاکم بر روی یک شبکه هم مکان، گسسته شده است؛ بدین معنی که تمامی اطلاعات جریان اعم از متغیرهای برداری و اسکالر، همگی

تابعی از خواص ترموفیزیکی نانوذره و سیال پایه، به صورت زیر نوشته می شوند [۲۰].

$$\rho_{nf} = (1 - \Phi)\rho_f + \Phi\rho_p \quad (10)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \Phi)(\rho c_p)_f + \Phi(\rho c_p)_p \quad (11)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (12)$$

که در آنها Φ بیانگر کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه می باشد. لزجت موثر نانوسیال را نیز می توان به صورت زیر تعریف کرد [۲۰].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + \frac{\rho_p V_b d_p^2}{72 N \delta} \quad (13)$$

که در آن V_b ، سرعت براونی نانوذرات، برابر است با:

$$V_b = \left(\frac{1}{d_p} \right) \sqrt{\frac{18 k_b T}{\pi \rho_p d_p}}$$

در این روابط d_p قطر نانوذرات، $\delta = d_p(\pi/6\Phi)^{1/3}$ متوسط فاصله مراکز نانوذرات از یکدیگر و $N = (C_1\Phi + C_2)d_p + (C_3\Phi + C_4)$ پارامتری برای تطبیق نتایج با داده های آزمایشگاهی است. ضرایب C_1, C_2, C_3 و C_4 موجود در این پارامتر، در جدول ۱ جمع آوری شده است.

جدول ۱- ضرایب موجود در رابطه پارامتر N

C_1	C_2	C_3	C_4
$1/10 \times 133^{-6}$	$0/10 \times 771^{-6}$	$9/10 \times 0^{-8}$	$-3/10 \times 93^{-7}$

ضریب هدایت گرمایی نانوسیال با دقت خوبی با استفاده از معادله ارائه شده توسط چون و همکاران [۲۱] قابل محاسبه است.

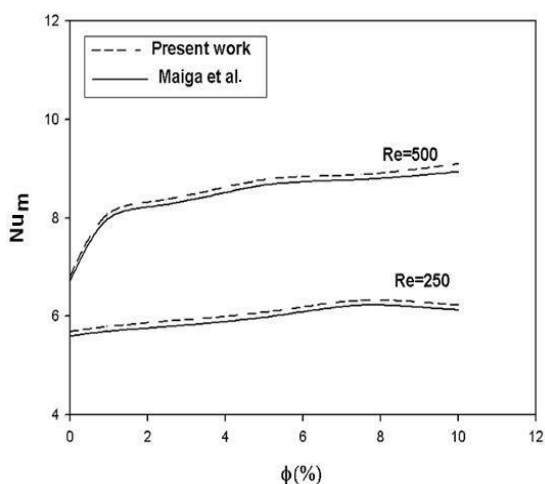
$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7\Phi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{0.369} \times \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.747} Pr^{0.9955} Re_p^{1.23221} \quad (14)$$

که در رابطه فوق $Re_p = \rho_f k_b T / (3 \pi \mu_f^2 l_f)$ عدد رینولدز نانوذرات، شامل T دمای تعادل، k_b ثابت بولتزمن

وجود دارد که این مطلب، تاییدی بر دقت مناسب حل عددی حاضر است.

جدول ۴- بررسی تاثیر تعداد نقاط شبکه روی عدد نوسلت متوسط و انتخاب شبکه حل عددی مناسب

تعداد نقاط شبکه ($r \times x$)	نوسلت متوسط Nu_m
40×100	3/873
50×200	3/962
60×300	3/983
70×400	4/001
80×500	4/006
90×600	4/008



شکل ۲- مقایسه تغییرات نوسلت متوسط بر حسب کسر حجمی نانوذرات در دو عدد رینولدز مختلف

در شکل ۳ بردارهای سرعت و خطوط جریان حول دندانه‌های لوله در سه عدد رینولدز مختلف رسم شده است. مشاهده می‌شود که هرچه عدد رینولدز بالاتر می‌رود، ناحیه چرخش پشت موانع بزرگتر می‌شود و البته هرچه قدرت چرخش این نواحی بیشتر شود، انتقال حرارت بیشتری صورت می‌پذیرد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، تراکم خطوط همدمای در نزدیکی دیواره نیز افزایش خواهد یافت که این هردو بیانگر نتیجه قابل انتظار افزایش انتقال حرارت در اعداد رینولدز بالاتر است.

در مراکز سلول نگهداری شده و از روش میانمایی رای-چو برای محاسبه شار روی سطوح استفاده می‌گردد. برای حل میدان فشار و سرعت همبسته در معادلات حاکم، الگوریتم شناخته شده SIMPLE بکار گرفته می‌شود [۲۳]. میدان حل یا استفاده از یک رابطه جبری مناسب، به یک شبکه با ساختار گسسته تبدیل شده است. با وجود اینکه دلیل آرام بودن جریان، استفاده از شبکه یکنواخت نیز دقت کافی خواهد داشت، شبکه حل گسسته برای دستیابی به دقت بیشتر در محاسبه پارامترهای جریان مجاور دیوار، با استفاده از رابطه‌ای جبری با بکارگیری یک ضریب تراکم، در مجاورت دیوار لوله و دندانه‌ها اندکی متراکم شده است.

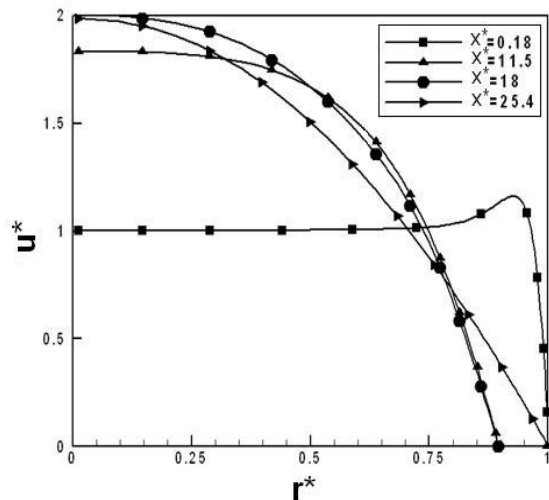
۶- بررسی و تحلیل نتایج

به منظور انتخاب تعداد نقاط مناسب برای شبکه حل عددی، مطالعه‌ای بر روی تعداد نقاط شبکه صورت گرفته است که در آن تاثیر تعداد نقاط شبکه روی مقدار نوسلت متوسط بررسی شد. بررسی‌ها برای مقادیر مختلف عدد رینولدز انجام گرفته است. نمونه‌ای از آن برای سیال پایه به ازای $Re=100$ در جدول ۴ آورده شده است. با نگاهی به داده‌های این جدول، می‌توان دریافت که تعداد نقاط شبکه مناسب و مقرون به صرفه از نظر زمان محاسبه، 80×500 خواهد بود و لذا از این تعداد گره در کلیه محاسبات پیش رو استفاده شده است.

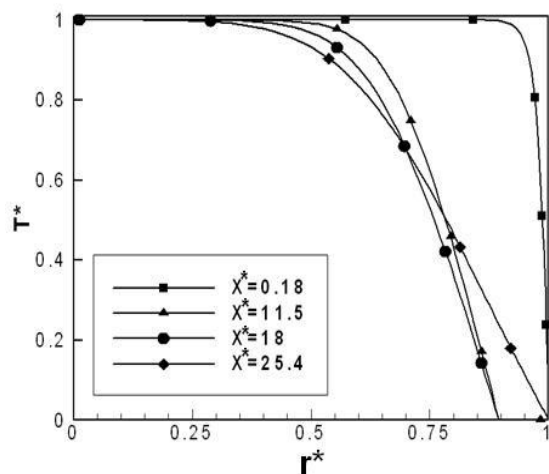
همچنین جهت اثبات کارایی روش و همچنین اطمینان از درستی کد عددی نوشته شده به زبان فرترن، نتیجه حاصل از حل عددی در محاسبه عدد نوسلت متوسط با نتیجه مشابه انجام شده توسط مایگا و همکاران وی [۷] برای جریان جابجایی اجباری در لوله‌ای با نسبت طول به قطر $L/D=100$ و شار حرارتی ثابت روی دیوار برابر با $10^4 W/m^2$ مقایسه شده است.

در این مقایسه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، عدد نوسلت متوسط بر حسب کسر حجمی نانوذرات رسم شده است. نتایج حاصل از این بررسی به ازای دو عدد رینولدز مختلف، نشان می‌دهد که اختلاف اندک و قابل قبولی بین نتایج

لذا شرط مرزی توسعه یافتگی حرارتی اعمال شده در خروجی دقت کافی خواهد داشت.



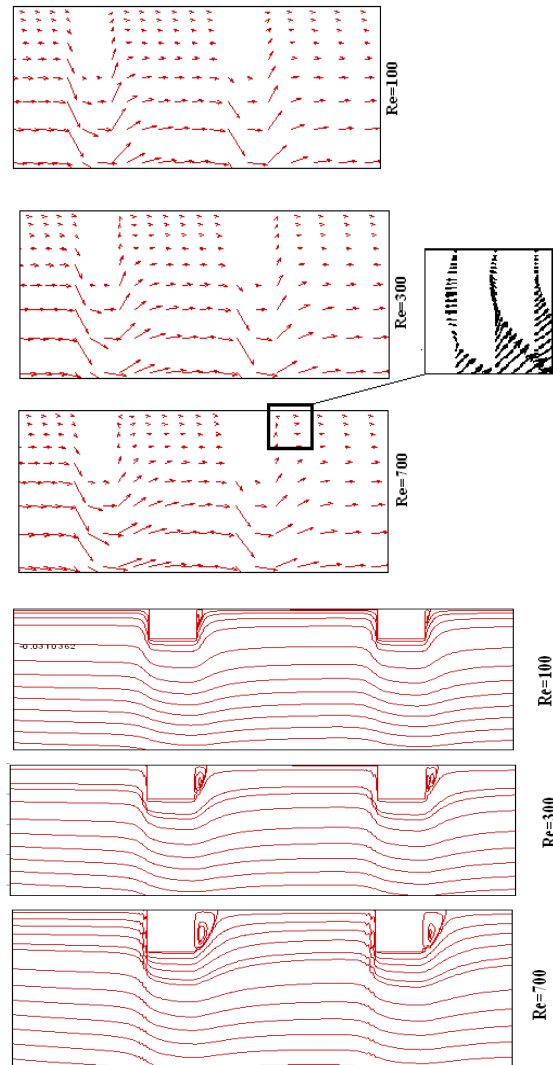
شکل ۴- پروفیل سرعت بدون بعد جریان سیال پایه در مقاطع مختلف در طول لوله به ازای $Re = 300$



شکل ۵- دمای بی بعد در مقاطع مختلف در طول لوله در $Re = 300$ برای سیال پایه

در شکل (۶) تغییر ایجاد شده در پروفیل دما بر اثر تغییر کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه در موقعیت $X^*=18$ پیش از رسیدن به توسعه یافتگی حرارتی نشان داده شده است. در این شکل می‌توان دید که با افزایش میزان نانوذرات در سیال پایه، توسعه یافتگی حرارتی جریان سریعتر وقوع می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که افزایش کسر حجمی نانوذرات موجب افزایش انتقال حرارت از سطح به جریان سیال شده است.

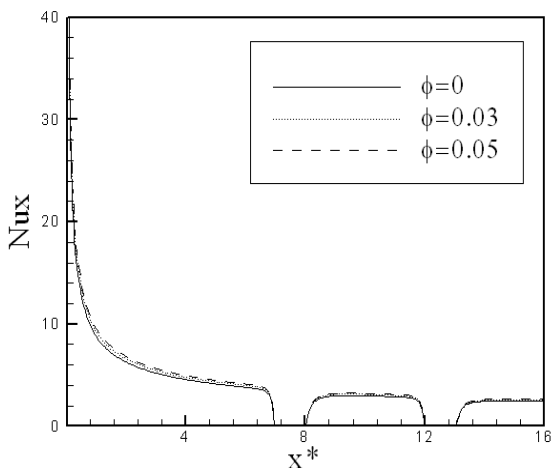
پروفیل سرعت جریان سیال پایه ($\phi = 0$) در مقاطع مختلف طولی لوله به ازای $Re = 300$ در شکل (۴) نشان داده شده است. توسعه یافتگی هیدرولیکی جریان در طول انتخاب شده برای لوله در این شکل قابل مشاهده است که این تاییدی بر انتخاب مناسب طول حوزه حل عددی و موقعیت اعمال شرط مرزی خروجی، از نظر هیدرولیکی می‌باشد.



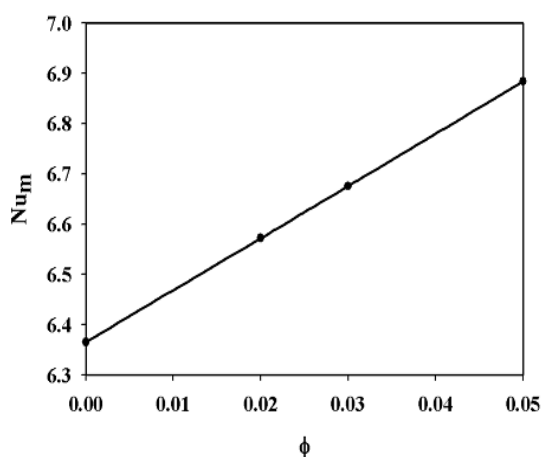
شکل ۳- بردارها (بالا) و خطوط جریان (پایین) در اعداد رینولدز مختلف برای سیال پایه آب

در شکل (۵) نیز پروفیل دمای بی‌بعد در مقاطع مختلف طولی لوله به ازای $\phi = 0$ و در $Re = 300$ رسم شده است. این شکل نیز نشان می‌دهد که در طول لوله انتخاب شده، جریان از نظر حرارتی نیز به توسعه یافتگی رسیده است و

حرارت است. در این شکل می‌توان دید که به ازای افزایش ۵ درصدی کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه، نوسلت متوسط در حدود ۱۱٪ افزایش یافته است.



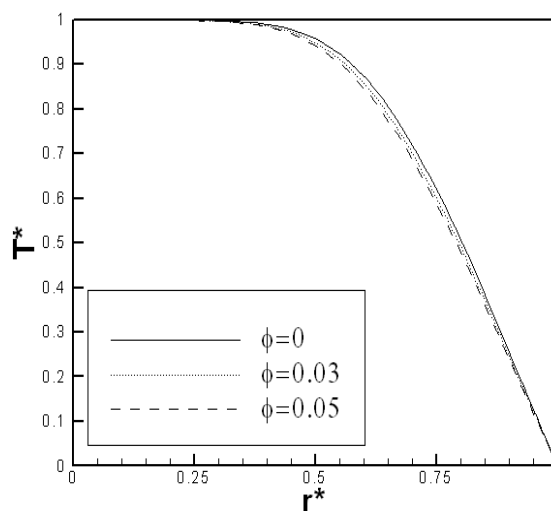
شکل ۷- تغییرات عدد نوسلت موضعی در طول لوله به ازای کسرهای حجمی مختلف نانوذرات در $Re = 300$



شکل ۸- عدد نوسلت متوسط برحسب غلظت حجمی نانوسیال آب- آلومینا به ازای $Re = 300$

در شکل (۹) نیز عدد نوسلت متوسط برحسب عدد رینولدز در کسرهای حجمی مختلف نانوذره رسم شده است. روند تاثیر افزایش عدد رینولدز بر افزایش عدد نوسلت را می‌توان در این شکل به خوبی مشاهده نمود، ضمن آنکه می‌توان گفت به ازای افزایش ۷ برابری عدد رینولدز جریان، عدد نوسلت متوسط و در نتیجه انتقال حرارت از جریان، برای سیال پایه ۲/۳ برابر و برای نانوسیال با ترکیب ۵ درصدی نانوذرات، در حدود ۲/۵ برابر افزایش داشته است که این

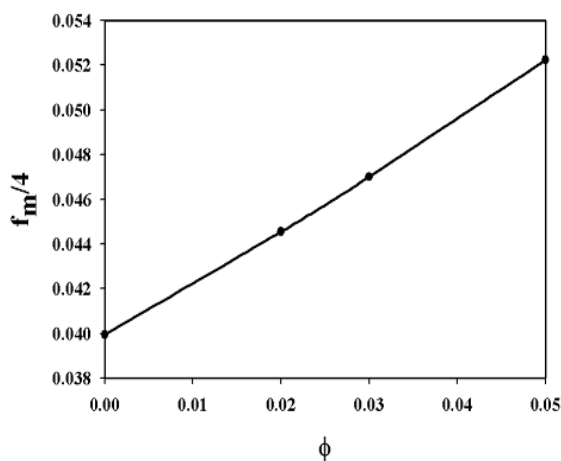
شکل (۷) تغییرات عدد نوسلت محلی را در طول لوله به ازای کسرهای حجمی مختلف از نانوذره در سیال پایه نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، در ابتدا با افزایش فاصله از ابتدای لوله و به دلیل روند نزدیک شدن دمای سیال به دمای سطح لوله در ناحیه درحال توسعه، عدد نوسلت به تدریج کاهش می‌یابد. در روی دندانه‌ها، به دلیل اعمال شرط مرزی عایق، انتقال حرارت به صفر رسیده و مجدداً پس از دندانه‌ها مجدداً افزایش می‌یابد. با نزدیک شدن به خروجی و رسیدن به توسعه یافتگی حرارتی نیز، عدد نوسلت به مقدار ثابتی می‌رسد. در این شکل می‌توان دید که افزایش کسر حجمی نانوذرات در تمامی موقعیتهای باعث افزایش عدد نوسلت موضعی نانوسیال نسبت به سیال پایه شده و در نتیجه افزایش بیشتر انتقال حرارت نانوسیال را نسبت به سیال پایه به همراه خواهد داشت. همان گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین میزان افزایش عدد نوسلت به ازای ۵٪ افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه، نزدیک به ۲۸٪ می‌باشد.



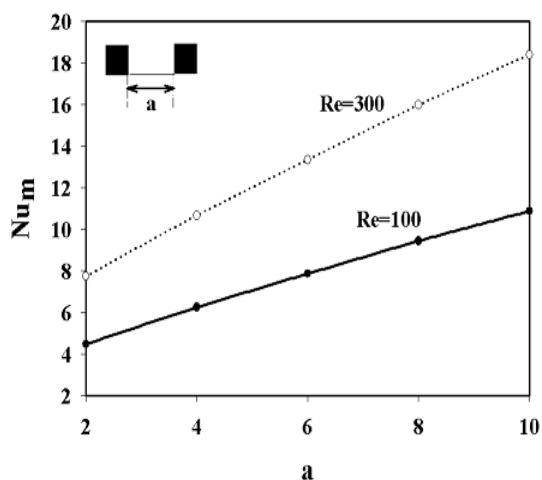
شکل ۶- تغییر شکل پروفیل دمای بی‌بعد با تغییر در کسر حجمی نانوذرات به ازای $Re = 300$

شکل (۸) نیز تغییر در عدد نوسلت متوسط را در غلظت‌های مختلف نانوذرات نشان می‌دهد. می‌توان ملاحظه نمود که افزایش عدد نوسلت متوسط در جریان نانوسیال با افزایش غلظت حجمی نانوذرات به صورت خطی خواهد بود که این خود نشان از تاثیر بسزای حضور نانوذرات در افزایش انتقال

۳۰۰ به مقدار ۲/۳۵ برابر افزایش داشته است. همچنین با نگاهی بر خطوط همدم در جریان اطراف دندانه‌ها نیز می‌توان تراکم خطوط در نزدیکی سطح را مشاهده نمود که آن هم تاییدی بر افزایش انتقال حرارت با افزایش فاصله دندانه‌هاست. دلیل این افزایش را می‌توان علاوه بر افزایش سطح تبادل حرارت در فضای بین دندانه‌ها، ایجاد فضای کافی برای تشکیل کامل نواحی چرخش در مجاورت دندانه‌های داخلی لوله دانست که همانگونه که قبلاً نیز در تفصیل شکل (۳) تاکید شد، ایجاد این نواحی و شدت چرخش در آنها می‌تواند بطور محسوسی در افزایش انتقال حرارت موثر باشد. همچنین در این شکل می‌توان دید که اثر افزایش فاصله دندانه‌ها بر افزایش انتقال حرارت، در اعداد رینولدز پایین‌تر، بیشتر خواهد بود.



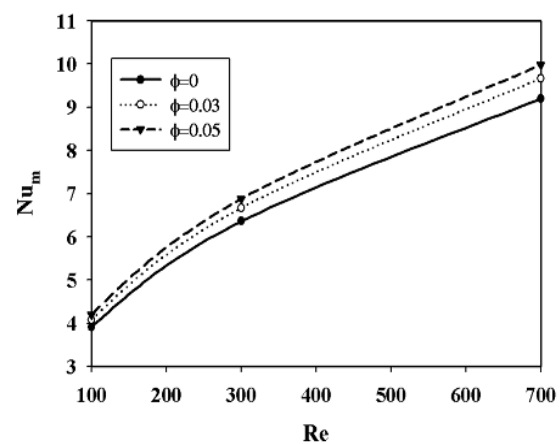
شکل ۱۰- ضریب اصطکاک متوسط در جریان نانوسیال
برحسب کسر حجمی نانوذرات، $Re = 300$



شکل ۱۱- عدد نوسلت متوسط برحسب فاصله بین دو دندانه
در رینولدزهای مختلف برای نانوسیال، $\phi = 0/05$

مقایسه نیز تاییدی بر نقش نانوذرات در افزایش انتقال حرارت از جریان است.

شکل (۱۰) تاثیر حضور نانوذرات در سیال پایه را بر ضریب اصطکاک متوسط در جریان نانوسیال نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه، ضریب اصطکاک روی دیوار افزایش یافته است. این افزایش البته به واسطه افزایش لزجت سیال با افزایش حجم نانوذرات در سیال قابل انتظار است. می‌توان دید که با افزایش ۵ درصدی نانوذرات در سیال پایه، ضریب اصطکاک روی دیوار لوله در حدود ۱/۵ برابر شده است که البته افزایش قابل توجهی است. لذا افزایش حجم نانوذرات اگرچه با افزایش انتقال حرارت همراه است، ولی افزایش لزجت سیال و به دنبال آن ضریب اصطکاک در جریان، موجب ایجاد محدودیت در میزان افزایش نانوذرات در جریان نانوسیال خواهد شد.



شکل ۹- تغییر در عدد نوسلت متوسط با عدد رینولدز به ازای
کسرهای حجمی مختلف نانوذره در نانوسیال

یکی از پارامترهای دارای اهمیت در طراحی لوله‌های دندانه‌دار، تعیین فاصله بین دندانه‌ها به منظور دست‌یابی به بیشترین میزان انتقال حرارت در جریان نانوسیال در لوله است که این پارامتر در شکل (۱۱) مطالعه شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، با افزایش فاصله بین دندانه‌ها، عدد نوسلت متوسط جریان در هر دو عدد رینولدز مطالعه شده، افزایش یافته است، به طوری که به ازای افزایش ۵ برابری فواصل دندانه‌ها، نوسلت متوسط در عدد رینولدز ۱۰۰ به میزان ۲/۴۵ برابر و در عدد رینولدز

۷- نتیجه گیری

بطوری که به ازای افزایش پنج برابری فواصل دندانه‌ها، نوسلت متوسط در عدد رینولدز ۱۰۰ به میزان ۲/۴۵ برابر بیشتر شده است.

لوله‌های با دندانه‌های داخلی یا شیاردار دارای کاربرد وسیعی در صنعت از جمله در مبدل‌های حرارتی هستند که با توجه به اهمیت و کاربرد آنها و ارائه راهکارهای بیشمار در جهت افزایش انتقال حرارت از آنها در مسائل مهندسی، در این مقاله به بررسی تاثیر حضور نانوسیال در افزایش انتقال حرارت در جریان داخل این لوله‌ها پرداخته شده است. با نوشتن برنامه‌ای عددی به زبان فرترن، معادلات حاکم بر جریان به همراه معادلات خواص نانوسیال به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم محدود جبری شدند و توسط الگوریتم سیمپل به طور هم زمان حل شدند. نتایج بدست آمده را از این بررسی عددی را می‌توان به صورت زیر جمع بندی کرد:

- با افزایش میزان نانوذرات در سیال پایه، توسعه یافتگی حرارتی جریان جلو می‌افتد، لذا افزایش کسر حجمی نانوذرات موجب افزایش انتقال حرارت در جریان سیال می‌گردد.

- افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش عدد نوسلت موضعی در نانوسیال می‌شود. بیشترین میزان افزایش عدد نوسلت موضعی به ازای ۵٪ افزایش در کسر حجمی نانوذرات، نزدیک به ۲۸ درصد و برای نوسلت متوسط به میزان ۱۱ درصد محاسبه شد.

- افزایش عدد رینولدز در نانوسیال موجب افزایش بیشتری در عدد نوسلت نسبت به جریان سیال پایه می‌شود، بطوری که به ازای افزایش ۷ برابری عدد رینولدز جریان، عدد نوسلت متوسط برای سیال پایه ۲/۳ برابر و برای نانوسیال با ترکیب ۵ درصدی از نانوذرات، در حدود ۲/۵ برابر افزایش داشته است.

- با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ضریب اصطکاک روی دیوار افزایش یافته است، بطوریکه با افزایش ۵ درصدی نانوذرات در سیال پایه، ضریب اصطکاک روی دیوار لوله در حدود یک ونیم برابر شده است.

- با افزایش فاصله بین دندانه‌های داخلی لوله، عدد نوسلت متوسط جریان در همه اعداد رینولدز افزایش می‌یابد،

نمادها

a	فاصله بین دو دندانه، m
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه، $JKg^{-1}K^{-1}$
f	ضریب اصطکاک سطحی
k	ضریب هدایت حرارتی، $Wm^{-1}K^{-1}$
L	طول لوله، m
Nu	عدد نوسلت، بدون بعد
p	فشار، Pa
Pr	عدد پرانتل، بدون بعد
r	مختصه شعاعی، m
R_0	شعاع لوله، m
R_1	فاصله شعاعی دندانه تا محور مرکزی لوله، m
Re	عدد رینولدز، بدون بعد
S	جمله چشمه معادلات بقا
t	زمان، s
T	دما، K
u	سرعت در راستای x، ms^{-1}
v	سرعت در راستای r، ms^{-1}
w	عرض دندانه‌ها، m
x	مختصه افقی، m

نمادهای لاتین

α	ضریب پخش حرارتی، m^2s^{-1}
Γ	ضریب پخش
μ	لزجت دینامیکی، Pa.s
ν	لزجت سینماتیکی، m^2s^{-1}
ρ	چگالی، kgm^{-3}
ϕ	کسر حجمی نانوذرات
φ	متغیر عمومی

زیر نویس‌ها

f	سیال پایه
m	متوسط
nf	نانوسیال
p	نانوذرات
w	دیوار
∞	محیط

۸- مراجع

- [1] Freidoonimehr, N., Rashidi, M.M. (2016) "Dual Solutions for MHD Jeffery–Hamel Nano-fluid Flow in Non-parallel Walls using Predictor Homotopy Analysis Method". *Applied Fluid Mechanics*, Vol. 9 (1).
- [2] Rashidi, M.M., Vishnu Ganesh, N., Abdul Hakeem, A.K., Ganga, B. (2014) "Buoyancy effect on MHD flow of nanofluid over a stretching sheet in the presence of thermal radiation". *Molecular Liquids*, Vol. 198, pp. 234-238.
- [3] Anwar Bég, O., Rashidi, M.M., Akbari, M., Hosseini, A. (2014) "Comparative Numerical Study of Single-Phase and Two-Phase Models for Bio-Nanofluid Transport Phenomena". *Mechanics in Medicine and Biology*, Vol. 14 (1).
- [4] Garoosi, F., Jahanshaloo, L., Rashidi, M.M., Badakhsh, A., Ali, M.E. (2015) "Numerical simulation of natural convection of the nanofluid in heat exchangers using a Buongiorno model". *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 254, pp. 183-203.
- [5] He, Y., Mena, Y., Zhao, Y., Lu, H. Ding, Y. (2009) "Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions", *Applied Thermal Engineering* 29, pp. 1965–1972.
- [6] Zeinali-Heris, S., Nasr-Esfahany, M., Etemad, S. Gh. (2007) "Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube", *International Journal of Heat and Fluid Flow* 28, pp. 203–210.
- [7] Be'cayeMaiga, S.E., Palm, S.J., Nguyen, C.T., Roy, G., Galanis, N. (2005) "Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows", *International Journal of Heat and Fluid Flow* 26, pp. 530–546.
- [8] Demir, H., Dalkilic, A.S., Kürekci, N.A., Duangthongsuk, W., Wongwises, S. (2011) "Numerical investigation on the single phase forced convection heat transfer characteristics of TiO₂ nanofluids in a double-tube counter flow heat exchanger", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38, pp. 218–228.
- [9] Keshavarz-Moraveji, M., Razvarz, S. (2012) "Experimental investigation of aluminum oxide nanofluid on heat pipe thermal performance", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39, pp. 1444–1448.
- [10] Gherasim, I., Roy, G., Nguyen, C.T., Von-Goc, D. (2009) "Experimental investigation of nanofluids in confined laminar radial flows", *International Journal of Thermal Sciences* 48, pp. 1486–1493.
- [11] Choi, J., Zhang, Y. (2012) "Numerical simulation of laminar forced convection heat transfer of Al₂O₃-water nanofluid in a pipe with return bend", *International Journal of Thermal Sciences* 55, pp. 90-102.
- [12] Ahmed, M.A., Shuaib, N.H., Yusoff, M.Z. (2012) "Numerical investigations on the heat transfer enhancement in a wavy channel using nanofluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55, pp. 5891–5898.
- [13] Manca, O., Nardini, S., Ricci, D. (2012) "A numerical study of nanofluid forced convection in ribbed channels", *Applied Thermal Engineering* 37, pp. 280-292.
- [14] Suresh, S., Chandrasekar, M., Chandra Sekhar, S. (2010) "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of CuO/water nanofluid under turbulent flow in a helically dimpled tube", *Experimental Thermal and Fluid Science* 35, pp. 542–549.
- [15] Namburu, P.K., Das, D.K., Tanguturi, K.M., Vajjha, R.S. (2009) "Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties", *International Journal of Thermal Sciences* 48, pp. 290–302.
- [16] Sundar, L.S., Sharma, K.V. (2010) "Heat transfer enhancements of low volume concentration Al₂O₃ nanofluid and with longitudinal strip inserts in a circular tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, pp. 4280–4286.

- [17] Mohammed, H.A., Al-Shamani, A.N., Sheriff, J.M. (2012) "Thermal and hydraulic characteristics of turbulent nanofluids flow in a rib-groove channel", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39, pp. 1584–1594.
- [18] Gavtash, B., Hussain, K., Layeghi, M., Sadeghi, S. (2012) "Numerical Simulation of the Effects of Nanofluid on a Heat Pipe Thermal Performance", *World Academy of Science Engineering and Technology* 68.
- [19] Santra, A.K., Sen, S., Chakraborty, N. (2009) "Study of heat transfer due to laminar flow of copper-water nanofluid through two isothermally heated parallel plates", *International Journal of Thermal Sciences* 48, pp. 391–400.
- [20] Masoumi, N., Sohrabi, N., Behzadmehr, N. (2009) "New model for calculating the effective viscosity of nanofluids", *Journal of Physics D: Applied Physics* 42, pp. 055501–055506.
- [21] Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P., Choi, S.U.S. (2005) "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement", *Applied Physics Letters* 87, pp. 153107–153110.
- [22] Abu-Nada, E., Masoud, Z., Hijazi, A. (2008) "Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 (5), pp. 657–665.
- [23] Patankar, S.V. (1980) "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publishing, Washington D.C.