



Numerical Simulation of Nanofluid Heat Transfer in a Tube Equipped with Twisted Tape Using the Eulerian-Lagrangian Two-Phase Model

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sheikhzadeh Gh.A.^{*1} PhD,
Nazifard M.² PhD,
Maddahian R.³ PhD,
Kazemi Kh.¹ MSc

How to cite this article

Sheikhzadeh Gh.A, Nazifard M, Maddahian R, Kazemi Kh. Numerical Simulation of Nanofluid Heat Transfer in a Tube Equipped with Twisted Tape Using the Eulerian-Lagrangian Two-Phase Model. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(1):53-62.

¹Heat & Fluid Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran

²Energy Research Center, University of Kashan, Kashan, Iran

³Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Heat & Fluid Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Iran. Postal Code: 8731753153

Phone: +98 (31) 55912241

Fax: +98 (31) 55912242

sheikhz@kashanu.ac.ir

Article History

Received: April 17, 2018

Accepted: September 16, 2018

ePublished: January 01, 2019

ABSTRACT

Today, increasing the efficiency and optimization of energy systems in terms of economic and environmental conditions is of particular importance. So far, several methods have been proposed to increase the heat transfer in thermal systems, including the use of nanofluids and types of fluid flow turbulators. In this research, the application of both nanofluid and twisted tape to improve the heat transfer coefficient were numerically investigated. Different turbulence models were used to simulate fluid turbulence. The results showed that increasing the nanoparticle volume fraction, reducing the twisting ratio, and increasing the Reynolds number resulted in an increase in heat transfer. By reducing the twisting ratio from 15 to 5, the heat transfer rate increases from 8-16%. With rising Reynolds number from 10,000 to 20,000, maximum temperature differences decreases by 4.5%. Moving downstream of the flow, the difference between the maximum temperature of the sections decreases. Increasing the heat transfer and intensifying the effects of the twisted tape to downward are the reasons for this decline.

Keywords Tube With Twisted Tape; Nanofluid; Turbulent Flow; Forced Convection Heat Transfer; Two-Phase Eulerian-Lagrangian Model

CITATION LINKS

[1] Heat transfer mechanisms in heat pipes using nanofluids-A review [2] Experimental investigation of heat transfer and friction factor with water-propylene glycol based CuO nanofluid in a tube with twisted tape inserts [3] Comparative study on thermal performance of twisted tape and wire coil inserts in turbulent flow using CuO/water nanofluid [4] Turbulent forced convection heat transfer of nanofluids with twisted tape insert in a plain tube [5] Numerical validation of experimental heat transfer coefficient with SiO₂ nanofluid flowing in a tube with twisted tape inserts [6] Heat transfer enhancement by multiple twisted tape inserts and TiO₂/water nanofluid [7] Heat transfer enhancement of TiO₂/water nanofluid in a heat exchanger tube equipped with overlapped dual twisted-tapes [8] Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach [9] Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions [10] Numerical study of convective heat transfer of nanofluids in a circular tube two-phase model versus single-phase model [11] Brownian diffusion of submicrometer particles in the viscous sublayer [12] The lift on a small sphere in a slow shear flow [13] Thermophoresis of particles in a heated boundary layer [14] Evaporation from drops, part II [15] Convective Heat Transfer [16] Turbulent flows [17] Effect of particle size on erosion characteristics [18] Wall y+ strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists IMECS 2009, March 18-20, 2009, Hong Kong [19] Numerical heat transfer and fluid flow [20] Enhancements of the simple method for predicting incompressible fluid flows [21] Turbulent heat transfer and friction factor of Al₂O₃ Nanofluid in circular tube with twisted tape inserts [22] Introduction to turbulent currents and their its modeling

شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت نانوسیال در یک لوله مجهز به نوار پیچشی با استفاده از مدل دوفازی اوپلری-لاگرانژی

قنبرعلی شیخزاده* PhD

گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

محمد نظیفی فرد PhD

پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

رضا مداحیان PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

خدیجه کاظمی MSc

گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

امروزه افزایش کارایی و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی دارای اهمیتی ویژه است. تاکنون روش‌های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت در سیستم‌های حرارتی پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از نانوسیالات و به‌کارگیری انواع مغشوش‌کننده‌های جریان سیال اشاره نمود. در مقاله حاضر، به‌کارگیری توأمان نانوسیال و نوارهای پیچشی به‌منظور ارتقای ضریب انتقال حرارت به‌صورت عددی بررسی شده است. در شبیه‌سازی عددی از یک مدل دوفازی اوپلری-لاگرانژی استفاده شده است. همچنین، مدل‌های مختلف آشفستگی برای شبیه‌سازی آشفستگی سیال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش کسر حجمی نانوذرات، کاهش نسبت پیچش و افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود. با کاهش نسبت پیچش از ۱۵ به ۵، مقدار انتقال حرارت از ۸ تا ۱۶٪ افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰۰۰ به ۲۰۰۰۰، اختلاف دمای حداکثر مقاطع تا ۴/۵٪ کاهش را نشان می‌دهد. همچنین، مشاهده شد که با حرکت به سمت پایین‌دست جریان، مقدار اختلاف دمای حداکثر مقاطع کاهش می‌یابد. افزایش انتقال حرارت با حرکت بیشتر سیال و افزایش اثرات بیشتر نوار پیچشی به سمت پایین‌دست از دلایل این کاهش هستند.

کلیدواژه‌ها: لوله با نوار پیچشی، نانوسیال، جریان آشفته، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، مدل دوفازی اوپلری-لاگرانژی

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۲۵

*نویسنده مسئول: sheikhz@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

صنایع مختلف از جمله تجهیزات فرآوری غذا، تجهیزات فرآیندی شیمیایی، نیروگاه‌های حرارتی، تجهیزات سرمایشی و تهویه مطبوع، صنایع پتروشیمی و غیره با مسائلی از استفاده موثر، تبدیل و احیای انرژی حرارتی (استخراج انرژی از یک منبع انرژی مثل گازهای خروجی از توربین که همچنان قابلیت کاردهی دارد) روبه‌رو هستند. تولید مبدل‌های حرارتی (به‌عنوان اصلی‌ترین سیستم انتقال حرارتی) نیازمند هزینه‌های سرمایه‌گذاری بزرگ و عملکردی بهینه و اقتصادی است. از این دیدگاه، طراحی مبدل‌های حرارتی کارآ، کم‌مصرف و کم‌هزینه مورد توجه سازندگان است. فناوری‌های مختلفی به‌عنوان افزایش‌دهنده‌های انتقال حرارت برای رسیدن به مبدل‌های حرارتی با ویژگی‌های ذکرشده به کار گرفته شده است. از جمله این فناوری‌های افزایش‌دهنده انتقال حرارت، مواردی است که به افزایش طی مسیر حرکت ذرات سیال در سیستم‌های حرارتی منجر خواهد شد. یکی از روش‌های ارتقای انتقال حرارت درون لوله، به‌کارگیری مغشوش‌کننده‌های جریان نظیر نوارهای پیچشی است. همچنین استفاده از سیالات حاوی ذرات نانو به‌منظور افزایش

ضریب انتقال حرارت یکی دیگر از راهکارهای افزایش انتقال حرارت بوده که در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده واقع شده است^[1].

بررسی‌های آزمایشگاهی در زمینه استفاده همزمان نوارهای پیچشی و نانوسیالات در یک رژیم آشفته در سیستم‌های حرارتی نظیر مطالعات نایک و همکاران^[2, 3] متعدد بوده است. با این حال توجه کمتری به شبیه‌سازی عددی در این زمینه شده و تمامی شبیه‌سازی‌ها تاکنون با استفاده از مدل تک‌فاز بوده است. آزرمی و همکاران^[4] مطالعه تجربی خود در مورد اثر نوارهای پیچشی در لوله‌های ساده با نانوسیال آب و دی‌اکسیدسیلیسیم در جریان آشفته را با نتایج عددی مقایسه کردند. آزمایش‌های آنان با کسر حجمی نانوسیال حداکثر ۴٪ صورت گرفت و همخوانی خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده شد. حداکثر افزایش انتقال حرارت نسبت به سیال پایه آب در یک لوله ساده حدود ۹۴٪ برای عدد رینولدز ۱۹۰۰۰، نسبت پیچشی ۵ و کسر حجمی ۳٪ به دست آمد که البته افزایش ۱۶۰ درصدی ضریب اصطکاک را نیز در پی داشت. آزرمی و همکاران^[5] مطالعه خود را اولین بررسی عددی در این زمینه دانسته و در بررسی تجربی برای یافتن خواص نانوسیال از اندازه‌گیری و در مطالعه عددی از مدل تک‌فاز استفاده نموده‌اند.

آیمسا و کیاتکتیپانگ^[6] افزایش انتقال حرارت با قراردادن نوارهای پیچشی به‌صورت چندگانه در جریان نانوسیال آب و ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم با کسرهای حجمی مختلف با استفاده از شبیه‌سازی عددی را بررسی نمودند و در کنار بررسی عددی، مطالعه آزمایشگاهی نیز انجام شد. در مطالعه آزمایشگاهی و عددی آنان کسر حجمی نانوذرات حداکثر ۲/۰٪ و عدد رینولدز در بازه ۵۴۰۰ تا ۱۵۲۰۰ تغییر می‌کرد. از مدل آشفستگی RNG k-ε بدون بررسی سایر مدل‌ها استفاده و خواص نانوسیال با استفاده از مدل تک‌فاز محاسبه شد. آیمسا و کیاتکتیپانگ^[6] در شبیه‌سازی عددی خود، دلیل افزایش بازده حرارتی در لوله با نوار پیچشی نسبت به یک لوله ساده را وجود جریان‌های چرخشی و گردابه‌های طولی چندگانه دانستند. افزایش تعداد نوارها در لوله منجر به افزایش ضریب عملکرد می‌شود که نویسندگان دلیل آن را افزایش سطح تماس، زمان اقامت نانوذرات قبل از خروج، شدت چرخش و اختلاط جریان به‌دلیل گردابه‌های طولی چندگانه برشمردند. همچنین این عوامل منجر به افزایش ضریب اصطکاک نیز شد. قرارگیری نوارهای پیچشی به‌صورتی که چرخش هم‌جهتی را ایجاد نکنند باعث ایجاد انتقال حرارت بالا و ضریب اصطکاک قابل قبول می‌شود.

آیمسا و همکاران^[7] افزایش انتقال حرارت در لوله مبدل حرارتی مجهز به نوارهای پیچشی دوگانه با نانوسیال آب و ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم را به‌صورت عددی بررسی کردند. عدد رینولدز بین ۵۴۰۰ تا ۱۵۲۰۰ و حداکثر کسر حجمی نانوذرات ۲/۰٪ بود. همچنین خواص ترموفیزیک نانوسیال به‌صورت تک‌فاز مستقل از تغییرات دما، فرض و از مدل آشفستگی RNG k-ε استفاده شد. نتایج نشان داد اختلاف کمتر بین نسبت پیچشی دو نوار منجر به شدت‌یافتن چرخش، انرژی آشفستگی بالاتر و اختلاط سیال شد. قراردادن دو نوار که یکی نسبت پیچشی ۱/۵ برابر دیگری داشت، موجب افزایش ۸۹ درصدی انتقال حرارت و ۵/۴۳ برابری ضریب اصطکاک نسبت به لوله ساده شد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات به‌دلیل افزایش سطح تماس و ضریب انتقال حرارت هدایت، انتقال حرارت افزایش می‌یافت. استفاده همزمان از هر دو راهکار نوار پیچشی و نانوذرات می‌توانست حدود ۱۱٪ انتقال حرارت را نسبت به لوله با نوار پیچشی در آن افزایش دهد.

رابطه ۵:

$$S_{p,e} = \sum n_p \frac{m_p}{\delta V} c_p \frac{dT_p}{dt}$$

که در آن پانویس p اشاره به ذرات، m_p و F به ترتیب نشان‌دهنده جرم ذره و کل نیروی عمل‌کننده بر ذره بر واحد جرم آن، δV نمایانگر حجم سلول محاسباتی و n_p تعداد ذره جامد در یک سلول است.

در رابطه ۴ مقدار F مجموع نیروهای حجمی و نیروهای هیدرودینامیک مختلف بوده که شامل گرانش، نیروی پسا، نیروی جرم مجازی، نیروی برای سافمن، نیروی ترموفورتیک و نیروی براونی به صورت رابطه ۶ است.

$$F = F_G + F_D + F_V + F_L + F_T + F_B$$

که در آن F_G نیروی گرانش است و می‌تواند به شکل رابطه ۷ محاسبه شود:

$$F_G = \frac{(\rho_p - \rho_f)g}{\rho_p}$$

در رابطه بالا g شتاب گرانش زمین است. نیروی پسا یعنی F_D می‌تواند از طریق روابط مختلف به دست آید. برای ذرات کوچک‌تر از میکرون، نوعی از قانون درگ استوکس می‌تواند استفاده شود^[12]. در این صورت، F_D به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود.

$$F_D = \frac{18\mu_f}{d_p^2 \rho_p C_c} (v_f - v_p)$$

که در آن C_c ضریب تصحیح کانینگهام به قانون درگ استوکس است که می‌تواند به صورت رابطه ۹ توسعه داده شود.

رابطه ۹:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4 \exp(-1.1 \frac{d_p}{2\lambda}))$$

که در آن λ متوسط مسیر آزاد مولکولی است. نیروی جرم مجازی عملکردی شبیه نیروی پسا دارد. در واقع، نیرویی است که به دلیل شتاب گرفتن ذره به سیال وارد می‌شود و سیال نیز متعاقباً آن را به ذره وارد می‌کند که به صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود.

رابطه ۱۰:

$$F_V = \frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{d}{dt} (v_f - v_p)$$

در واقع، نیروی جرم مجازی نیرویی است که برای شتاب گرفتن سیال اطراف ذره نیاز است. این نیرو هنگامی که نسبت چگالی سیال به ذره، بزرگ‌تر از ۰/۱ باشد باید در نظر گرفته شود و از این رو در مطالعه حاضر مد نظر بود.

نیروی برای سافمن (F_L) که ناشی از توزیع فشار روی ذره به دلیل چرخش ناشی از توزیع سرعت بوده و به شکل رابطه ۱۱ است^[13].

رابطه ۱۱:

$$F_L = \frac{2K_s v^2 \rho_f d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{ij} d_{ij})^{\frac{1}{4}}} (v_f - v_p)$$

که در آن $K_s = 2.594$ و d_{ij} تانسور تغییر شکل است. این شکل از نیروی لیفت برای اعداد رینولدز کوچک ذرات توصیه می‌شود.

نیروی ترموفورتیک (F_T) از گرادیان دما، ناشی و از طریق رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود^[14].

اولین بررسی عددی در زمینه استفاده همزمان نوارهای پیچشی و نانوسیالات در یک مبدل حرارتی برای جریان آشفته در سال ۲۰۱۳ میلادی انجام شده^[5] و طی سال‌های اخیر، بررسی‌های بسیار اندکی در این زمینه صورت گرفته و در تمام این مطالعات عددی از مدل‌های تک‌فاز برای تخمین خواص نانوسیال استفاده شده است. حال آن که چنین مدل‌هایی به علت نادیده گرفتن برخی نیروهای مهم وارد شده بر ذرات از دقت کافی برخوردار نیستند و می‌تواند عامل اختلاف نتایج عددی و تجربی باشد. این مدل‌ها به پیش‌بینی با خطای غیرقابل چشم‌پوشی در جریان‌های مایع-جامد مخصوصاً در نواحی در حال توسعه و برای کسرهای حجمی نانوسیال بالاتر از ۱٪ منجر می‌شوند^[8-10]. مدل‌های تک‌فاز جزئیات دقیقی از نحوه حرکت و سرعت ذرات فاز جامد ارایه نمی‌کنند که در مورد برخی پیش‌بینی‌ها مانند خوردگی مکانیکی مهم هستند.

تاکنون بررسی عددی دوفاز در زمینه انتقال حرارت در یک لوله با نوار پیچشی درون آن صورت نگرفته و بررسی‌های عددی در این زمینه به صورت تک‌فاز بوده است. اگرچه در بررسی‌های عددی گذشته، مدل‌های مختلف آشفته‌گی ارایه شده است ولیکن با توجه به اهمیت بالای مدل آشفته‌گی در شبیه‌سازی دقیق‌تر جریان‌های حاوی چرخش و جریان ثانویه و همچنین بررسی جریان دوفازی در هندسه حاضر، یکی از اهداف این پژوهش انتخاب مدل مناسب آشفته‌گی است. لذا در مطالعه حاضر با استفاده از یک شبیه‌سازی دوفازی به بررسی اثر برخی متغیرهای حاکم بر مساله از جمله کسر حجمی نانوذرات، نسبت پیچش و عدد رینولدز بر انتقال حرارت پرداخته شد. قبل از آن مقایسه مدل‌های آشفته‌گی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های پیشین تک‌فاز صورت گرفت تا مدل مناسب در مقایسه با نتایج تجربی برای یک شبیه‌سازی عددی دوفازی /ویلری-لاگرانژی پیشنهاد شود.

۲- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم و انرژی توصیف‌کننده قوانین بقای فیزیک هستند. در فرآیند حل عددی، سیال یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود، بدین معنی که تمام محیط اشغال شده را پر می‌کند. هنگامی که سیال در سلول‌های شبکه محاسباتی حرکت می‌کند، معادلات بقا باید در شکل دیفرانسیلی ارضا شوند.

برای سیال لزج و غیرقابل تراکم در مساله حاضر در غیاب نیروهای خارجی، معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی به ترتیب به صورت روابط ۱، ۲ و ۳ در زیر هستند:

رابطه ۱:

$$\nabla \cdot (\rho_f v_f) = 0$$

رابطه ۲:

$$\nabla \cdot (\rho_f v_f v_f) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_f \nabla v_f) + S_{p,m}$$

رابطه ۳:

$$\nabla \cdot (\rho_f c_{p,f} v_f T_f) = \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + S_{p,e}$$

که در آن p فشار، v سرعت، ρ چگالی، k هدایت حرارت و c_p حرارت ویژه است. پانویس f نیز به معنی سیال است. $S_{p,e}$ و $S_{p,m}$ به ترتیب نشان‌دهنده چشمه‌های انتقال مومنتوم و انتقال انرژی بین سیال و ذرات هستند. این چشمه‌ها به صورت روابط ۴ و ۵ در زیر تعیین می‌شوند^[11]:

رابطه ۴:

$$S_{p,m} = \sum n_p \frac{m_p}{\delta V} F$$

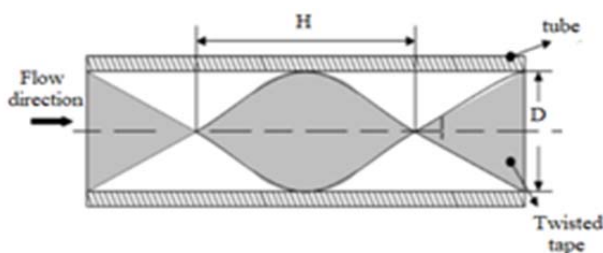
می‌شوند. از اثرات متقابل ذرات بر یکدیگر صرف نظر شده است. ذرات خنثی از طریق صفحه ورودی با ۱۴۲۰۶ بسته منطبق با سلول‌های ورودی تزریق می‌شود و مسیر موجود را می‌پیمایند.

۴- معادلات جریان آشفته

مدل‌های مختلف آشفتگی شامل $k - \epsilon$ ، Realizable $k - \epsilon$ ، Standard $k - \epsilon$ ، RNG $k - \epsilon$ و SST $k - \omega$ در شبیه‌سازی حاضر مورد بررسی قرار گرفتند [16, 17].

۵- هندسه مورد مطالعه

طرحواره هندسه لوله با نوار چرخان داخل آن نمایش داده شد (شکل ۱). قطر داخلی لوله و L طول آن است. ضخامت نوار چرخان δ و گام نوار تابیده شده برابر H لحاظ شده است. به طور پیش فرض $D=0.018\text{m}$ ، $H=0.18\text{m}$ و $L=1.5\text{m}$ هستند (مقادیر هندسی انتخاب شده براساس مطالعه مورد استفاده در تایید اعتبار انتخاب شده است). همچنین ضخامت نوار برابر یک میلی‌متر است. متغیرهای بی‌بعد هندسی که در مطالعه حاضر مطرح می‌شوند عبارت از نسبت پیچش (نسبت گام پیشروی به‌ازای پیچش 360° درجه نوار به قطر لوله به‌صورت H/D) و نسبت لقی C ؛ نسبت فاصله بین نوار چرخان و لوله به قطر داخلی لوله به‌صورت (Δ/D) ، هستند. خواص ترموفیزیکی سیال پایه وابسته به دما و خواص نانوذرات آلومینا در دمای استاندارد در جدول ۱ ارایه شده است.



شکل (۱) طرحواره هندسه مورد مطالعه

جدول (۱) خواص ترموفیزیکی نانوذرات آلومینا

واحد	مقدار
ρ (kg/m ³)	۴۰۰۰
K (W/m.K)	۳۰
C_p (J/kg.K)	۸۸۰

شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی نمایش داده شد (شکل ۲). المان‌های شش‌وجهی با سازمان با استفاده از نرم‌افزار تجاری آی-سی-ای-ام ایجاد شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود شبکه ایجاد شده در نواحی نزدیک به دیواره لوله و نوار چرخان ریزتر می‌شود تا بتوان لایه مرزی را با دقت مناسبی در این نواحی مدل کرد. در مدل‌های $k - \epsilon$ به منظور افزایش دقت و کاهش وابستگی حل به وجود شبکه بسیار ریز، در نزدیک دیواره از امکان Enhanced Wall Treatment استفاده شده است. شبکه‌بندی برای مدل‌های مبتنی بر $k - \omega$ به‌گونه‌ای ایجاد شده است که فاصله بدون بعد اولین سلول از دیواره (Y^+) کمتر از واحد برای عدد رینولدز حدود ۲۲۰۰۰ باشد [16]. نمودار سرعت بدون بعد (U^+) بر حسب فاصله عمودی بدون بعد از دیواره (Y^+) نمایش داده شد (نمودار ۱). مقدار فاصله بدون بعد اولین سلول از دیواره برابر واحد است. برای مدل‌های آشفتگی $k - \epsilon$ ، این مقدار اندک مورد نیاز

$$F_T = -6\pi\mu_f^2 d_p C_s \frac{2K_s v_z^{\frac{1}{2}} \rho_f d_{ij}}{\rho_f (1 + 3C_m Kn)} \times \frac{k_f/k_p + C_t Kn}{1 + 2k_f/k_p + 2C_t Kn} \frac{\nabla T}{m_p T}$$

که در آن $C_s = 1.17$ ، $C_m = 1.14$ و $C_t = 2.18$ است. برای ذرات کوچک‌تر از میکرون، اثرات حرکت براونی می‌تواند در یک جمله به‌صورت یک نیرو اضافه شود که با رابطه ۱۳ تعیین می‌شود. رابطه ۱۳:

$$F_B = \xi_i \left(\frac{\pi S_0}{\Delta t} \right)^{1/2}$$

که در آن ξ_i عدد گاوسی تصادفی با متوسط صفر است و مقدار S_0 به‌صورت رابطه ۱۴ تعریف می‌شود. رابطه ۱۴:

$$S_0 = \frac{216\theta k_B T}{\pi^2 \rho_f d_p^2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^2 C_c}$$

که در آن θ نشانگر لزجت سینماتیک است.

معادله انرژی برای ذره به‌صورت رابطه ۱۵ تعریف می‌شود.

رابطه ۱۵:

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = Nu_p \pi d_p k_f (T_f - T_p)$$

که در آن عدد ناسلت ذره، Nu_p با استفاده رابطه رانر و مارشال [15] به‌صورت رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود.

رابطه ۱۶:

$$Nu_p = 2 + 0.6 Re_p^{0.5} Pr^{0.3}$$

در رابطه بالا Re عدد رینولدز و Pr عدد پرانتل ذره هستند. عدد رینولدز برای ذره به‌صورت رابطه ۱۷ تعریف می‌شود.

رابطه ۱۷:

$$Re_p = \frac{\rho d_d |\vec{v}_p - \vec{v}_f|}{\mu}$$

۳- معادله حرکت ذرات

برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار تجاری Ansys-Fluent 14 استفاده شد. این نرم‌افزار مسیر حرکت ذرات را در روش حل لاگرانژی با انتگرال‌گیری از تعادل نیروهای وارد بر ذرات به دست می‌آورد. این تعادل نیرو بین اینرسی ذره با نیروهای وارد بر ذره که در بالا ذکر شد، برقرار می‌شود. این معادله می‌تواند به‌شکل رابطه ۱۸ نوشته شود.

رابطه ۱۸:

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = F_D (\vec{v} - \vec{v}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}$$

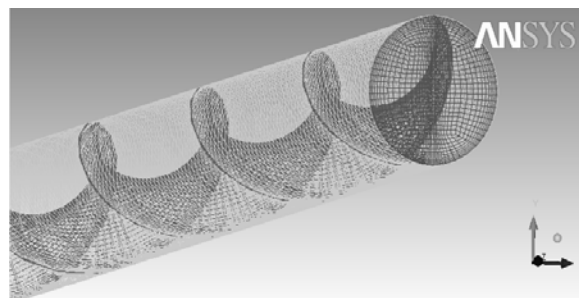
که در آن F_D نیروی پسا و F سایر نیروهاست.

با توجه به اهمیت اثرگذاری نانوذرات بر فاز پایه و بالعکس در انتقال حرارت، در شبیه‌سازی حاضر از جفت‌شدگی بین دوفاز به‌صورت دوسویه استفاده شده است. در این حالت معادلات فاز پیوسته و ذرات یکی پس از دیگری تا عدم تغییر در پاسخ‌ها حل خواهند شد. در این نوع جفت‌شدگی، اثرات متقابل ذرات و فاز پیوسته بر انتقال جرم، مومنتوم و حرارت مد نظر قرار می‌گیرد. اثرات تبادل جرم و مومنتوم در جملات چشمه معادلات مزبور وارد

شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت نانوسیال در یک لوله مجهز به نوار پیچشی با استفاده از مدل دوفازی اویلری-لاگرانژی ۵۷ افزایش تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی مقدار اختلاف کاهش می‌یابد. با در نظر داشتن دقت محاسباتی و زمان محاسباتی، شبکه با تعداد سلول‌های ۳۰۹۲۱۸ برای این شبیه‌سازی مناسب است.

جدول ۲) بررسی استقلال نتایج حل عددی از شبکه محاسباتی

ردیف	تعداد سلول‌های شبکه	عدد ناسلت متوسط بر دیواره لوله	$\left \frac{Nu_{i+1} - Nu_i}{Nu_i} \right \times 100$
۱	۱۶۲۴۸۱	۲۴۴/۱	-
۲	۲۶۳۵۸۷	۲۵۵/۳	۴/۵
۳	۳۰۹۲۱۸	۲۶۱/۰	۲/۲
۴	۵۷۰۵۵۱	۲۶۲/۴	۰/۵

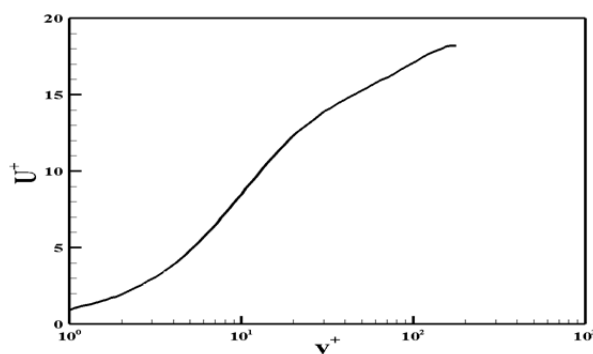


شکل ۲) شبکه‌بندی میدان محاسباتی مورد مطالعه

۸- نتایج و بحث

پیشنهاد مدل آشفتگی مناسب برای مقایسه نتایج عددی حاضر با داده‌های تجربی سیام‌ساندر و شارما [21] انجام گرفت. مدل‌های مورد استفاده با توجه به بررسی‌های پیشین تک‌فاز در این زمینه انتخاب شده‌اند. لوله مورد بررسی دارای نوار چرخان با لقی صفر و $H/D = 10$ لحاظ شده و شار حرارتی بر دیواره $1000 W/m^2$ و قطر نانوذرات ۴۷ نانومتر است. مقایسه نتایج عددی و تجربی بررسی حاضر برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب در دو بخش انجام شد. چنان که در مقدمه بیان شد، تاکنون بررسی عددی در زمینه نانوسیال دوفاز در هندسه مورد مطالعه قرار نگرفته است، از این رو مدل‌های مختلف آشفتگی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شد تا بهترین مدل برای شبیه‌سازی عددی هندسه حاضر پیشنهاد شود. مدل‌های مورد استفاده در این بخش با توجه به پیشینه تحقیق‌ها در هندسه‌های مشابه با سیال تک‌فاز انتخاب شده است. با توجه به هدف بررسی حاضر که مطالعه عملکرد حرارتی سیستم‌ها با نوار پیچشی بوده، عدد ناسلت متوسط (Nu_{avg}) برای سه کسر حجمی مختلف بر حسب عدد رینولدز ورودی مقایسه شده است (نمودارهای ۴-۲).

روند افزایشی عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز ورودی در تمام کسرهای حجمی نانوسیال و همه مدل‌های آشفتگی وجود دارد. همچنین روند افزایشی انتقال حرارت جابه‌جایی (افزایش عدد ناسلت متوسط) با افزایش کسر حجمی نانوسیال برای همه مدل‌های آشفتگی مشاهده می‌شود. در این میان، مدل‌های $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ Standard و $k-\omega$ Realizable پیش‌بینی کمتر از واقع و مدل‌های $k-\varepsilon$ RNG و $k-\omega$ SST پیش‌بینی بیشتر از مقادیر تجربی دارند. پیش‌بینی‌های مدل $k-\varepsilon$ Realizable اختلاف بیشتری با نتایج تجربی نسبت به سایر مدل‌ها دارند. مخصوصاً این اختلاف با افزایش کسر حجمی بیشتر می‌شود و در کسر حجمی ۰/۵ به ۱۷٪ می‌رسد. اختلاف نتایج دو مدل $k-\varepsilon$ RNG و $k-\omega$ SST با نتایج تجربی تا کسر حجمی ۰/۱٪ اندک است، اما برای کسر حجمی ۰/۵٪ این اختلاف برای مدل $k-\varepsilon$ RNG افزایش چشمگیری دارد. این افزایش خطای عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی در مورد مدل آشفتگی $k-\omega$ Standard نیز صادق است. بنابراین، این مدل‌ها احتمالاً در زمینه انتقال حرارت در کسرهای حجمی بالا نقص دارند. تنها مدلی که در مجموع، پیش‌بینی قابل قبولی با حدود خطای ۲٪ از خود ارائه می‌دهد، مدل آشفتگی $k-\omega$ SST است. این مدل راهنمای انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای محققان در مطالعات دوفازی نانوسیالات در سیستم‌های حرارتی با نوار پیچشی خواهد بود.



نمودار (۱) نمودار سرعت بدون بعد سیال (U^+) بر حسب فاصله بدون بعد عمودی از دیواره

۶- شرایط مرزی و روش عددی

توزیع شار حرارتی روی جداره خارجی لوله یکنواخت در نظر گرفته شده است و سایر شرایط مرزی به صورت موارد زیر هستند:

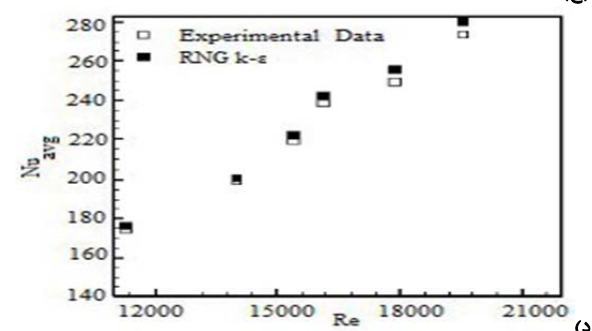
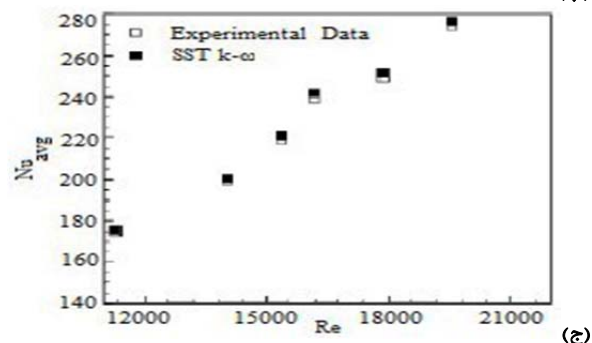
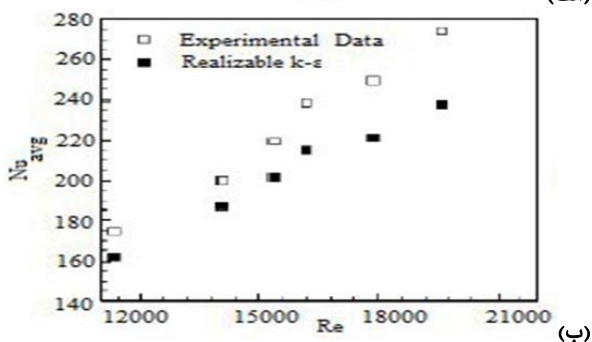
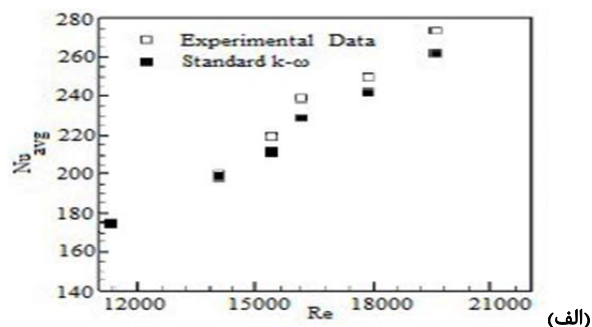
- ۱- در ورودی لوله، شرط مرزی سرعت و دمای یکنواخت برای هر دو فاز پیوسته و نانوذرات انتخاب شده است.
- ۲- در خروجی فشار نسبی صفر و برای ذرات شرط خروج در نظر گرفته شده است.
- ۳- سطح لوله و نوار چرخان برای معادله مومنتوم دارای شرط عدم لغزش با انعکاس برخورد ذرات است. برای معادله انرژی در این نواحی شرط جفت‌شدگی در نظر گرفته شده است.

سیال غیرقابل تراکم و پایا در نظر گرفته شده است. سیال عامل پایه مورد استفاده در این مطالعه آب و ذرات نانوسیال محلول در آن آلومینا هستند. تمام جملات جابه‌جایی در معادلات بالا توسط طرح بالادست مرتبه دوم گسسته می‌شوند که دارای دقت مرتبه دو بوده و از روش‌های مرتبه اول و نمایی دقیق‌تر است [19]. برای اصلاح ترم فشار از الگوریتم سیمپل [20] در روش حجم محدود استفاده و معیار همگرایی برای تمام معادلات 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

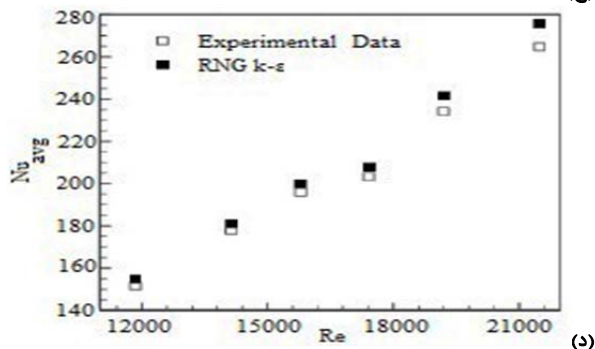
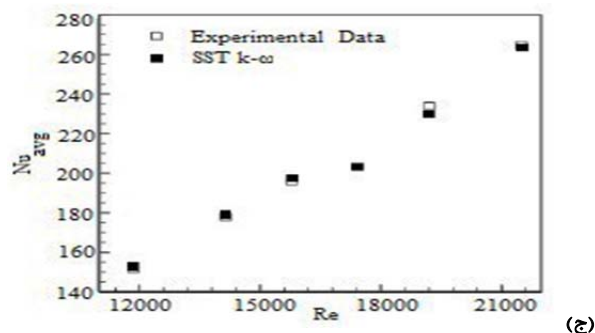
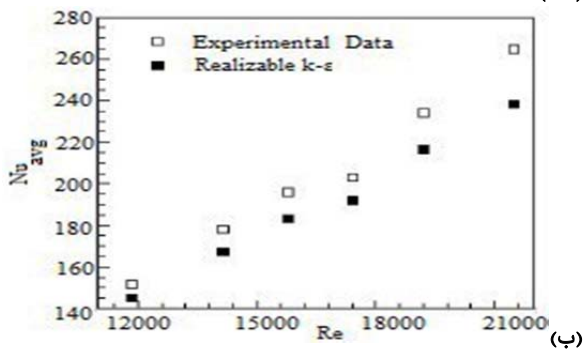
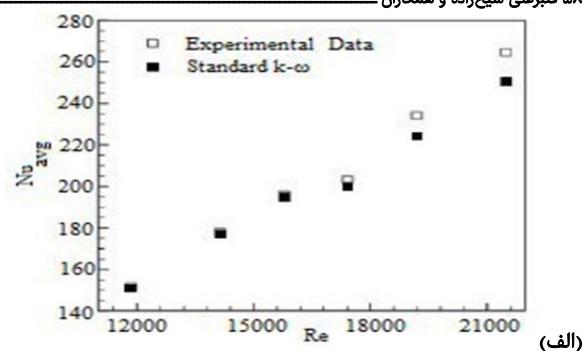
۷- استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

برای بررسی مستقل بودن حل عددی از تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی، مقدار عدد ناسلت متوسط بر دیواره لوله (Nu_{avg}) برای شبکه‌های مختلف، محاسبه و استقلال حل برای حالت $H/D = 10$ و لقی صفر ارائه شده است (جدول ۲). سیال عامل ترکیبی از آب و نانوذرات آلومینا با کسر حجمی ۰/۱٪ بوده و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ فرض شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با

با ایجاد لایه مرزی دارای انحنا موجب کرنش زیاد و جدایش جریان خواهد شد که این موارد به دلیل پیش‌بینی ضعیف در مدل‌های $k-\epsilon$ از منابع ایجاد اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی است. مدل‌های $k-\omega$ به دلیل اصلاح جمله اتلاف، نتایج بهتری نسبت به مدل‌های $k-\epsilon$ در برخی جریان‌ها داشته است و در مطالعه حاضر نیز نتایج بهتری ارائه می‌دهند. این مدل‌ها با اصلاح لزجت گردابه‌ای، جدایش را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کنند که این عامل نیز در کاهش اختلاف نتایج عددی و تجربی نقش داشته است. محاسبه بهتر متغیرهای جریانی در ناحیه با کرنش زیاد نظیر آنچه در مساله حاضر رخ می‌دهد نیز از ویژگی‌های مثبت مدل‌های $k-\omega$ در بهبود اختلاف با نتایج تجربی است.



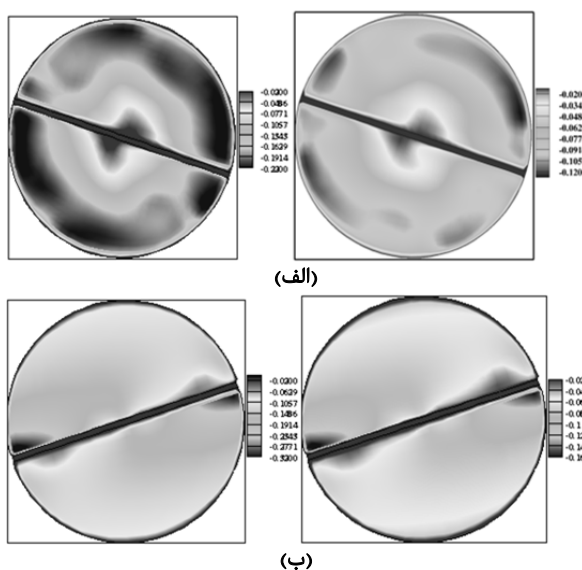
نمودار ۳ مقایسه نتایج آزمایشگاهی^[21] و عددی حاضر برای عدد ناسلت متوسط در کسر حجمی ۰/۱٪ برای مدل‌های مختلف آشفتگی، الف) Standard $k-\omega$ (ب) $k-\omega$ ؛ ج) Realizable $k-\omega$ ؛ د) SST $k-\omega$ ؛ ر) RNG $k-\epsilon$



نمودار ۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی^[21] و عددی حاضر برای عدد ناسلت متوسط در کسر حجمی ۰/۲٪ برای مدل‌های مختلف آشفتگی، الف) Standard $k-\omega$ ؛ ب) Realizable $k-\omega$ ؛ ج) SST $k-\omega$ ؛ د) RNG $k-\epsilon$

مدل‌های مبتنی بر $k-\epsilon$ ، پیش‌بینی دقیقی در مورد تنش‌های رینولدز ندارند و از این رو برای پیش‌بینی جریان‌های ثانویه نقص دارند. برای یک جریان دوفاز، این نواحی به دلیل اندرکنش فازها از اهمیت بیشتری برخوردارند و در حل عددی نیاز به پیش‌بینی دقیق‌تری دارند. اختلاف بیشتر نتایج مدل Realizable $k-\epsilon$ نسبت به سایر مدل‌ها به دلیل وجود همزمان نواحی ثابت یا با سرعت کمتر کنار نوار پیچشی و نواحی چرخان در سایر مناطق است که منجر به لزجت آشفتگی غیرفیزیکی می‌شود^[22]. این رفتارها روی روند انتقال حرارت اثرگذار است و موجب اختلاف در انتقال حرارت نسبت به حالت تجربی می‌شود. وجود نوار پیچشی در لوله

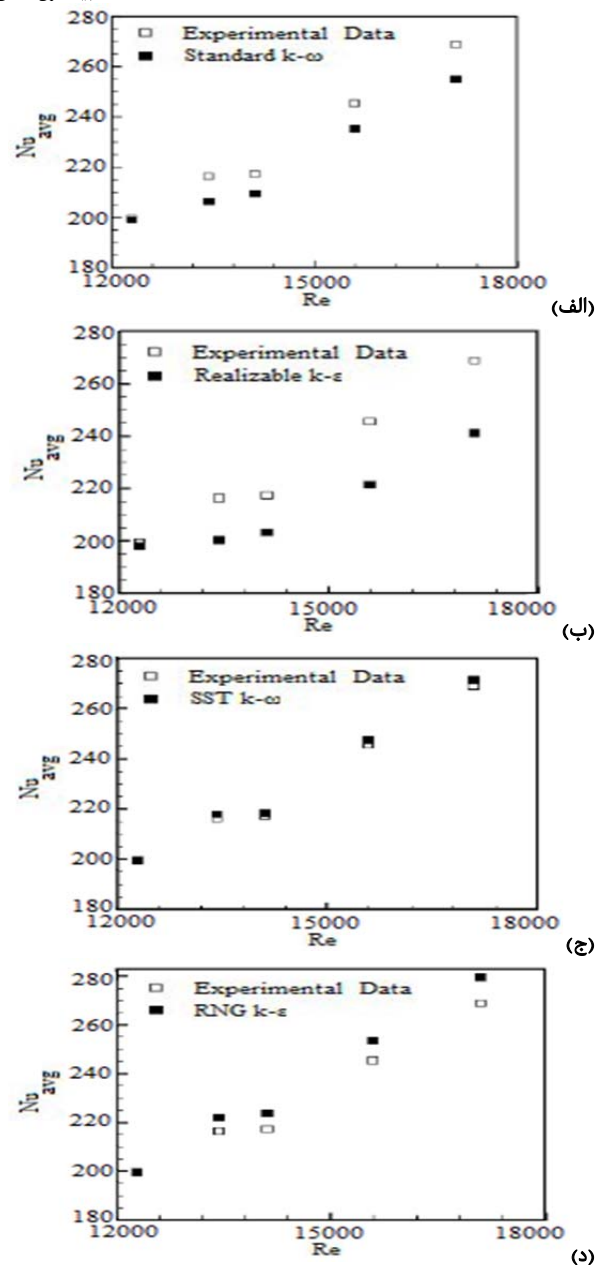
تغییرات سرعت مماسی برای حالات مختلف مورد بررسی نمایش داده شد (شکل ۳). سرعت مماسی می‌تواند به‌عنوان یک متغیر مهم و اثرگذار در افزایش انتقال حرارت باشد. با حرکت به سمت پایین‌دست، مقدار سرعت مماسی حداکثر افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش اثر نوار پیچشی در ایجاد سرعت پیچشی (و در نتیجه سرعت مماسی) با حرکت سیال به سمت پایین‌دست است. با این حال در نواحی دورتر از ورودی، توزیع سرعت مماسی بیشتر شامل مناطق کم‌سرعت بوده که ناشی از توسعه لایه مرزی بر نوار پیچشی است. افزایش مقدار سرعت مماسی جریان پایه، موجب افزایش شدت برخورد ذرات به دیواره می‌شود. همچنین با حرکت به سمت دیواره‌ها مقدار سرعت مماسی، افزایش و البته در نزدیکی دیواره به دلیل شرط عدم لغزش مجدداً سرعت کاهش می‌یابد. در واقع با ایجاد یک سرعت چرخشی و چرخش سیال نسبت به مرکز لوله انتظار می‌رود با افزایش شعاع چرخش (نزدیک شدن به دیواره) سرعت مماسی افزایش یابد. در عدد رینولدز بالاتر، مناطق بیشتری از سطح مقطع دارای سرعت مماسی بالاتری هستند. نوار پیچشی، بخشی از اینرسی محوری سیال در ورودی را به اینرسی پیچشی تبدیل می‌کند که با افزایش اینرسی اولیه، سهم این تبدیل افزایش خواهد یافت و سرعت مماسی در عدد رینولدز بزرگ‌تر بیشتر خواهد شد. این نتایج نشان می‌دهد که نوار پیچشی نقش موثری در ایجاد یک سرعت مماسی بالا و در نتیجه افزایش انتقال حرارت دارد.



شکل ۳ توزیع سرعت مماسی (m/s) برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ (سمت چپ) و ۲۰۰۰۰ (سمت راست)، الف) $x/L = 0.01$ ب) $x/L = 0.99$

تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی در سطوح مختلف لوله با نوار پیچشی نشان داده شد (شکل ۴). به علت رابطه مستقیم سرعت میانگین و انرژی جنبشی آشفتگی، افزایش عدد رینولدز موجب افزایش انرژی جنبشی آشفتگی می‌شود. انرژی جنبشی آشفتگی می‌تواند معیاری در مورد افزایش قدرت جریان آشفته باشد که خود افزایش‌دهنده انتقال حرارت است. انرژی جنبشی آشفتگی در کنار دیواره‌ها مقدار بیشتری دارد. افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰۰۰ به ۲۰۰۰۰ موجب افزایش حدود ۴ برابری مقدار این انرژی می‌شود.

توزیع حجمی نانوذرات در هندسه مورد مطالعه در دو مقدار متفاوت عدد رینولدز و فاصله طولی از ورودی نشان داده شد (شکل ۵). ذرات بیشتر حول نوار و دیواره تجمع دارند و توزیع ذرات در سایر



نمودار ۴ مقایسه نتایج آزمایشگاهی^[21] و عددی حاضر برای عدد ناسلت متوسط در کسر حجمی ۵٪ برای مدل‌های مختلف آشفتگی، الف) Standard k- ω ؛ ب) Realizable k- ϵ ؛ ج) SST k- ω ؛ د) RNG k- ϵ

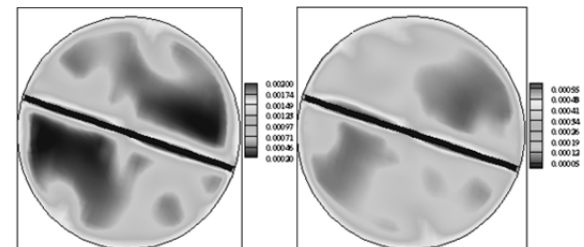
برخی مطالعات پیشین به نقص مدل‌های تک‌فاز نسبت به دوفاز در پیش‌بینی انتقال حرارت در سیستم‌های حاوی نانوذرات اذعان دارند^[8-10]. در بررسی حاضر مقایسه بین نتایج مدل تک‌فاز و دوفاز نشان داد که اختلاف نتایج روش عددی با داده‌های روش آزمایشگاهی برای مدل تک‌فاز از یک تا ۱۰٪ بیش از آنچه برای شبیه‌سازی دوفاز گزارش شده (نمودار ۲)، بوده است. به منظور حفظ اختصار، این نتایج به تفصیل بیان نشد. بر این اساس به منظور دقیق‌تر کردن پیش‌بینی‌ها، بررسی حاضر به صورت دوفازی ارائه شده است. ضمناً یک مدل دوفازی امکان وارد شدن تبادل مومنتوم و انتقال حرارت در شبیه‌سازی عددی به منظور دقیق‌تر شدن حل و محاسبه برخی تغییرات از جمله میزان خوردگی (که از اهداف بعدی تحقیق حاضر است) را دارد. در ادامه به بررسی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی حاضر پرداخته می‌شود. متغیرهای مستقل در این بررسی، عدد رینولدز، نسبت پیچش و

می‌شود. افزایش تعداد نانوذرات منجر به افزایش سطح تماس و اختلاط خواهد شد. همچنین با افزایش نسبت پیچش، اثر نوار پیچشی برای ایجاد چرخش در سیال بیشتر می‌شود و در نتیجه سرعت مماسی و انتقال حرارت ناشی از آن افزایش می‌یابد. همچنین در اعداد رینولدز بزرگ‌تر، لایه مرزی هیدرودینامیک کوچک‌تر می‌شود که این به معنی قدرت گرفتن مکانیزم قوی‌تر انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به مکانیزم ضعیف‌تر هدایت است. این افزایش با بیشتر شدن نسبت پیچش بیشتر می‌شود. چنان که با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰۰۰ به ۲۰۰۰۰ مقدار ناسلت در حدود ۰.۴۳، ۰.۵ و ۰.۵۳٪ به ترتیب برای نسبت پیچش ۵، ۱۰ و ۱۵ و کسر حجمی ۰/۵٪ افزایش می‌یابد. در این حالت افزایش انتقال حرارت تقریباً به صورت خطی با افزایش عدد رینولدز انجام می‌شود. این امر نشان می‌دهد برای پیش‌بینی انتقال حرارت با تغییرات عدد رینولدز می‌توان از یک تقریب خطی استفاده کرد و فرایندهای غیرخطی اغتشاشی نقش غالبی در این روند ندارند.

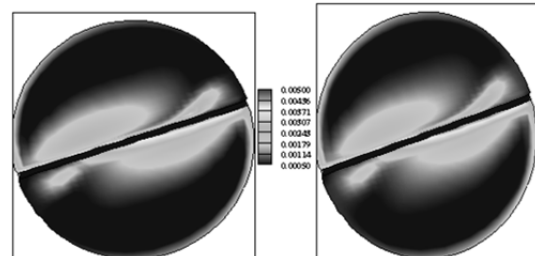
افزایش سرعت مماسی و انرژی جنبشی آشفتگی با افزایش عدد رینولدز مشاهده شد (شکل‌های ۳ و ۴) و از عوامل دیگر افزایش عدد ناسلت است. افزایش سرعت مماسی منجر به افزایش تماس سیال با سطوح و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌شود. افزایش انرژی جنبشی آشفتگی نیز موجب افزایش قابلیت تحرک ادی‌ها می‌شود که از عوامل اختلاط بیشتر و افزایش انتقال حرارت است. چنان چه مشهود است، با افزایش کسر حجمی مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد که این افزایش برای اعداد رینولدز بالاتر، بیشتر است (۱۹٪) با افزایش کسر حجمی از ۰/۵ به ۲٪ برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۲۳٪ برای عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ برای نسبت پیچش ۵. این افزایش برای نسبت پیچش بالاتر بیشتر است. با افزایش نسبت پیچش از حرکات پیچشی ذرات در یک دور کامل ۳۶۰ درجه کاسته می‌شود و از این رو مقدار انتقال حرارت کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت پیچش از ۵ به ۱۵، مقدار عدد ناسلت حدود ۲۴ و ۱۷٪ به ترتیب برای اعداد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ کاهش می‌یابد. اختلاف بین مقادیر مختلف عدد ناسلت با افزایش نسبت پیچش در کسرهای حجمی متفاوت تغییر محسوسی نمی‌کند. کاهش نسبت پیچش منجر به تشدید ناحیه چرخشی درون لوله با نوار چرخشی می‌شود که خود عامل افزایش انتقال حرارت است. نسبت پیچش کوچک‌تر، عدد رینولدز و کسر حجمی بالاتر موجب افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی خواهد شد.

نسبت عدد ناسلت متوسط برای لوله با نوار داخل آن نسبت به لوله ساده نشان داده شد (نمودار ۵). با افزایش عدد رینولدز، مقدار نسبت ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. در اعداد رینولدز کوچک‌تر، لایه مرزی حرارتی ضخیم‌تر است و بنابراین جریان چرخشی ناشی از نوار پیچشی اثر بیشتری روی برهم‌زدن لایه مرزی حرارتی دارد. تغییرات نسبت عدد ناسلت متوسط نشان می‌دهد که افزایش نسبی عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز در لوله با نوار پیچشی، کمتر از آن در لوله ساده بوده و تغییرات این نسبت با تغییر عدد رینولدز تقریباً خطی است. با افزایش عدد رینولدز مقدار نسبت عدد ناسلت متوسط در حدود ۱۸ تا ۳۰٪ کاهش می‌یابد که مقادیر کمتر برای کسر حجمی بزرگ‌تر هستند. افزایش عدد رینولدز موجب پیشی گرفتن اثرات آشفتگی در لوله ساده بر تاثیرات نوار پیچشی بوده و به معنی نقش عمده جریان آشفته در بازه رینولدز مورد بررسی نسبت به هندسه است. با کاهش نسبت پیچش از ۱۵ به ۵، مقدار نسبت عدد ناسلت متوسط حدود ۸ تا ۱۶٪ افزایش می‌یابد و البته این افزایش نظم قابل گزارشی ندارد.

نواحی عدد رینولدز کوچک‌تر تقریباً یکنواخت است. در اعداد رینولدز بزرگ‌تر، اثر نوار پیچشی بر توزیع ذرات مشهودتر بوده و پراکندگی ذرات نیز بیشتر است. با توجه به توزیع ذرات می‌توان نتیجه گرفت که نیروی گریز از مرکز (که بخشی از نیروی جرم مجازی است) در جای‌گیری ذرات مهم و اثرگذار است. البته این به معنی عدم اثرگذاری سایر نیروها که در بخش ۲ بیان شد نیست، چرا که تمام این نیروها مسلماً بر ذرات نیز وارد می‌شوند و توزیع ذرات تابعی از همه این نیروهاست.

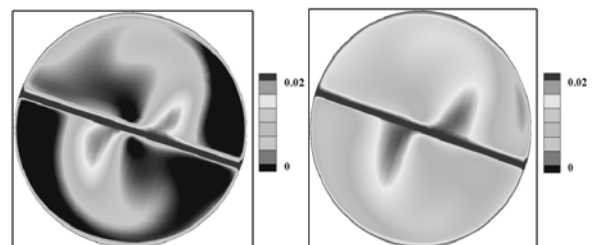


(الف)

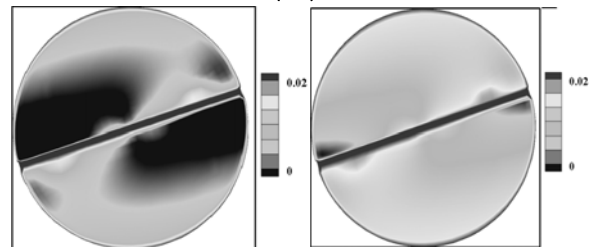


(ب)

شکل ۴) توزیع انرژی جنبشی آشفتگی (m^2/s^2) برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ (سمت چپ) و ۲۰۰۰۰ (سمت راست)، (الف) $x/L = 0.01$; (ب) $x/L = 0.99$



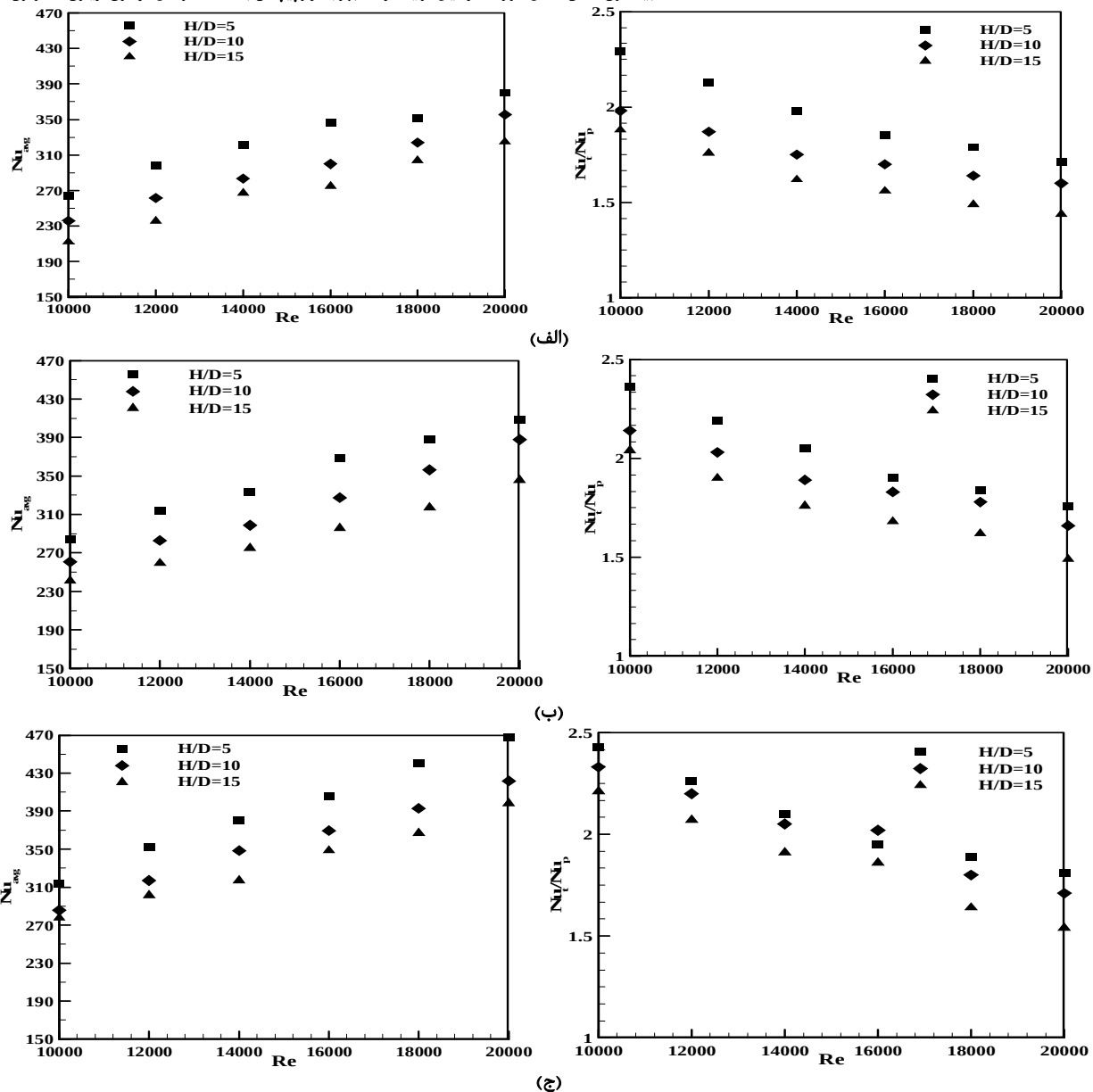
(الف)



(ب)

شکل ۵) توزیع کسر حجمی نانو ذرات برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ (سمت چپ) و ۲۰۰۰۰ (سمت راست)، (الف) $x/L = 0.01$; (ب) $x/L = 0.99$

تغییرات انتقال حرارت (عدد ناسلت متوسط) درون لوله برای نانوذرات آلومینا با قطر ۴۷ نانومتر نشان داده شد (نمودار ۵). با افزایش عدد رینولدز، مقدار انتقال حرارت به دلیل شدت آشفتگی بیشتر و اختلاط بهتر سیال افزایش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش عدد رینولدز، ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد که منجر به افزایش اثر انتقال حرارت جابه‌جایی بر سطح و افزایش عدد ناسلت می‌شود. با افزایش کسر حجمی و نسبت پیچش، مقدار این افزایش بیشتر



نمودار ۵) تغییرات عدد ناسلت متوسط (چپ) و نسبت عدد ناسلت متوسط برای لوله با نوار پیچشی نسبت به لوله ساده (راست)، (الف) کسر حجمی ۵٪؛ (ب) کسر حجمی ۱۰٪؛ (ج) کسر حجمی ۲۰٪

۹- نتیجه‌گیری

چنان چه بیان شد افزایش انتقال حرارت یکی از اهداف توسعه سیستم‌های مورد نظر است. از جمله روش‌های انفعالی افزایش انتقال حرارت، استفاده از نانوسیالات و تغییرات هندسی مانند استفاده از نوارهای چرخان هستند. در مطالعه حاضر به شبیه‌سازی حرارتی یک لوله با نوار چرخان داخل آن با استفاده از مدل دوفازی اویلری-لاگرانژی پرداخته شد. تاکنون تمام شبیه‌سازی‌های عددی در این زمینه به صورت تک‌فاز بوده است. یکی از مشکلاتی که در این زمینه وجود دارد انتخاب یک مدل آشفتگی مناسب با توجه به هندسه مورد مطالعه و پیچش‌های متوالی سیال درون آن است. شبیه‌سازی‌های عددی تک‌فاز پیشین، مدل‌های آشفتگی متفاوتی را پیشنهاد داده‌اند. مطالعه حاضر با مقایسه داده‌های تجربی با نتایج عددی، برای اولین بار مدل مناسب آشفتگی را برای بررسی حرارتی دوفازی اویلری-لاگرانژی پیشنهاد داده است. در موارد زیر به اختصار به نتایج مهم این مطالعه اشاره می‌شود:

۱- مدل آشفتگی $k-\omega$ SST در شبیه‌سازی عددی دوفازی

اویلری-لاگرانژی لوله با نوار پیچشی پیشنهاد شد.

۲- افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز و کاهش نسبت پیچش موجب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود.

۳- نسبت ناسلت متوسط نیز رفتاری مشابه عدد ناسلت به‌جز در عدد رینولدز دارد، زیرا با افزایش عدد رینولدز مقدار نسبت ناسلت کاهش می‌یابد.

۴- با حرکت به سمت پایین‌دست جریان، از مقدار اختلاف دمای حداکثر مقاطع کاسته می‌شود. افزایش انتقال حرارت با حرکت بیشتر سیال و افزایش اثرات بیشتر نوار پیچشی به سمت پایین‌دست از دلایل این کاهش هستند.

تشکر و قدردانی: نویسندگان برخود لازم می‌دانند از پژوهشکده انرژی و معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان به سبب حمایت مالی از این تحقیق تقدیر و تشکر نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است و همچنین جهت بررسی یا

5- Azmi WH, Sharma KV, Sarma PK, Mamat R, Anuar S, Syam Sundar L. Numerical validation of experimental heat transfer coefficient with SiO₂ nanofluid flowing in a tube with twisted tape inserts. Applied Thermal Engineering. 2014;73(1):296-306.

6- Eiamsa-ard S, Kiatkittipong K. Heat transfer enhancement by multiple twisted tape inserts and TiO₂/water nanofluid. Applied Thermal Engineering. 2014;70(1):896-924.

7- Eiamsa-ard S, Kiatkittipong K, Jedsadaratanachai W. Heat transfer enhancement of TiO₂/water nanofluid in a heat exchanger tube equipped with overlapped dual twisted-tapes. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2015;18(3):336-350.

8- Behzadmehr A, Saffar-Avval M, Galanis N. 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. 2007;28(2):211-219.

9- He Y, Men Y, Zhao Y, Lu H, Ding Y. Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions. Applied Thermal Engineering. 2009;29(10):1965-1972.

10- Haghshenas M, Nasr Esfahany M, Talaie MR. Numerical study of convective heat transfer of nanofluids in a circular tube two-phase model versus single-phase model. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2010;37(1):91-97.

11- Bejan A. Convective Heat Transfer. 4th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 2013.

12- Ounis H, Ahmadi G, McLaughlin JB. Brownian diffusion of submicrometer particles in the viscous sublayer. Journal of Colloid and Interface Science. 1991;143(1):266-277.

13- Saffman PG. The lift on a small sphere in a slow shear flow. Journal of Fluid Mechanics. 1965;22(2):385-400.

14- Talbot L, Cheng RK, Schefer RW, Willis DR. Thermophoresis of particles in a heated boundary layer. Journal of Fluid Mechanics. 1980;101(4):737-758.

15- Ranz WE, Marshall WR Jr. Evaporation from drops, part II. Chemical Engineering Progress. 1952;48(173):173-180.

16- Pope SB. Turbulent flows. Cambridge: Cambridge University Press; 2000.

17- Nguyen VB, Nguyen QB, Zhang YW, Lim CYH, Khoo BC. Effect of particle size on erosion characteristics. Wear. 2016;348-349:126-137.

18- Salim SM, Cheah SC. Wall y+ strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists IMECS 2009, March 18-20, 2009, Hong Kong. Hong Kong: Newswood Limited; 2009.

19- Patankar SV, Spalding DB. A calculation procedure for heat mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1972;15(10):1787-1806.

20- Van Doormaal JP, Raithby GD. Enhancements of the simple method for predicting incompressible fluid flows. Numerical Heat Transfer. 1984;7(2):147-163.

21- Syam Sundar L, Sharma KV. Turbulent heat transfer and friction factor of Al₂O₃ Nanofluid in circular tube with twisted tape inserts. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010;53(7-8):1409-1416.

22- Shojaeefard MH, Tahani M. Introduction to turbulent currents and their its modeling. Tehran: Iran University of Science and Technology; 2012. [Persian]

چاپ برای نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: این اثر حاصل یک پژوهش مستقل بوده و هیچگونه تضاد منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگری ندارد.

سهم نویسندگان: قنبرعلی شیخزاده (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ محمد نظیفی‌فرد (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۰٪)؛ رضا مداحیان (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (۱۰٪)؛ خدیجه کاظمی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)

منابع مالی: هزینه‌های این پژوهش از بودجه "هزینه‌های پژوهشی دانشگاه کاشان" تامین شده است.

۱۰- پی‌نوشت

نوع علائم	اختصاری
سطح انتقال حرارت (m^2)	A
لقی نوار پیچشی در لوله	$c = H/D$
ضریب انتقال حرارت ویژه سیال (I/kgK)	c_p
قطر داخلی لوله (m)	D
ضریب اصطکاک	$f = \Delta P / (L/D) / \rho U^2$
گام پیچش نوار (m)	H
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (W/m^2K)	h
ضریب انتقال حرارت هدایت (W/mK)	k
طول لوله (m)	L
دبی جرمی (kg/s)	$\dot{m}$
عدد ناسلت	$Nu = hD/k$
فشار سیال در لوله (Pa)	P
افت فشار (Pa)	ΔP
نرخ انتقال حرارت (W)	Q
عدد رینولدز	$Re = \rho U D / \mu$
دما (K)	T
سرعت در سه جهت استاندارد	U, V, W
نرخ حجمی جریان (m^3/s)	$\dot{V}$
چگالی سیال (kg/m^3)	ρ
ضخامت نوار پیچشی (mm)	δ
لزجت دینامیکی سیال (kg/ms)	μ
بازده	η
کسر حجمی نانوسیال (درصد حجمی)	φ
سیال	f
ذرات	p

منابع

- 1- Kumar Gupta N, Kumar Tiwari A, Kumar Ghosh S. Heat transfer mechanisms in heat pipes using nanofluids-A review. Experimental Thermal and Fluid Science. 2018;90:84-100.
- 2- Naik MT, Ranga Janardana G, Syam Sundar L. Experimental investigation of heat transfer and friction factor with water-propylene glycol based CuO nanofluid in a tube with twisted tape inserts. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2013;46:13-21.
- 3- Naik MT, Fahad SS, Syam Sundar L, Singh MK. Comparative study on thermal performance of twisted tape and wire coil inserts in turbulent flow using CuO/water nanofluid. Experimental Thermal and Fluid Science. 2014;57:65-76.
- 4- Azmi WH, Sharma KV, Mamat R, Anuar S. Turbulent forced convection heat transfer of nanofluids with twisted tape insert in a plain tube. Energy procedia. 2014;52:296-307.