

شبیه‌سازی عددی اثر اندازه و شکل نانوذرات Al_2O_3 در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای

علیرضا میراولیایی^{1*}، کبری صادق²

¹ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

² دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

دریافت: 1397/5/17 پذیرش: 1398/2/25

چکیده

در این پژوهش اثرات اندازه و شکل نانو ذرات Al_2O_3 معلق در سیال پایه آب با کسر حجمی 2 درصد در دمای 25 درجه سانتیگراد روی عملکرد مبدل حرارتی دولوله‌ای به صورت عددی در دو رژیم جریان آرام و آشفتنه مورد بررسی قرار می‌گیرد. قطر نانو ذرات بین 10 تا 100 نانومتر می‌باشد. نانو ذرات با اشکال کروی، استوانه‌ای و ترکیبی از نانو ذرات کروی-استوانه‌ای با درصدهای 30، 50، 60، 70، 80، 90 از نانو ذرات استوانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفتند. اثر شکل نانو ذرات نشان داد با افزایش درصد نانو ذرات استوانه‌ای، میزان انتقال حرارت در مبدل حرارتی افزایش می‌یابد و نانو ذرات استوانه‌ای در رژیم جریان آشفتنه عملکرد بهتری در داخل مبدل حرارتی دارند بطوریکه عدد ناسلت آن 15/4 درصد بیش‌تر از نانو سیالات حاوی نانو ذرات کروی می‌باشد. هم‌چنین مشاهده شد این سوسپانسیون بیش‌ترین میزان افت فشار را در داخل مبدل حرارتی دارد. نتایج اندازه نانو ذرات آلومینا با قطرهای 10، 50 و 100 نانومتر نشان داد که نانو ذرات با قطر کوچک‌تر بیش‌ترین افزایش عدد ناسلت و افت فشار را دارند.

کلمات کلیدی: ترکیب نانو ذرات، شکل نانو ذره، قطر نانو ذره، مبدل حرارتی دولوله‌ای، نانوسیال

* armiroliaei@uma.ac.ir



مقدمه

در کاربردهای مهندسی و صنعتی، مبدل حرارتی دولوله‌ای نقش حیاتی را ایفا می‌کند چرا که در صنایعی مانند نیروگاه، تهویه مطبوع، صنایع پتروشیمی، صنایع تبریدی، صنایع فرآیندی، آب‌گرم‌کن خورشیدی، رآکتورهای شیمیایی و رآکتورهای هسته‌ای استفاده می‌شود. از این رو انتقال حرارت جابه‌جایی در مبدل حرارتی دولوله‌ای به عنوان یک موضوع جالب تحقیقاتی در دهه‌های گذشته مورد توجه قرار گرفته است [1]. روش‌های مرسوم برای افزایش شدت انتقال حرارت مانند افزایش سطح انتقال حرارت، ارتعاش سطح گرم، تزریق و یا مکش سیال و استفاده از میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی با مشکلاتی روبه‌رو هستند. سیالات انتقال حرارت مرسوم مانند آب، روغن و اتیلن‌گلیکول ذاتا هدایت حرارتی پایینی در مقایسه با فلزات و حتی اکسیدهای فلزی دارند. بنابراین با اضافه کردن ذرات جامد به این سیالات انتظار می‌رود که خواص انتقال حرارتی آن‌ها بهبود پیدا کند [2].

حدود 100 سال پیش کارهایی در این زمینه با مخلوط ذرات میلی‌متری و میکرومتری شروع شد. اگرچه استفاده از این مخلوط‌های دوفازی عملکرد انتقال حرارت را به میزان قابل توجهی افزایش می‌داد اما در مقابل تاثیرات نامطلوبی نیز مانند افزایش افت فشار، فرسایش خطوط لوله و مسدود شدن کانال نیز به وجود می‌آمد. تا اینکه پیشرفت‌هایی در تولید ذرات مقیاس نانومتر امکان‌پذیر شد [3]. چوی¹ [4] سوسپانسیون رقیقی از ذرات بسیار ریز در مایعات معمولی را نانوسیال نامید. در حقیقت نانوسیال مخلوط دوفازی می‌باشد که ترکیبی از یک سیال پیوسته و نانو ذره‌های منتشر شده در سوسپانسیون است. نانوذره‌ها می‌توانند اکسید، پلیمر، سیلیکا و یا حتی نانو لوله‌های کربنی با طول کمتر از 100 نانومتر باشند [5, 6]. به علت اندازه‌ی کوچک نانوذره‌ها و بزرگی سطح ویژه‌ی آن‌ها، نانوسیالات دارای خواص ویژه‌ای مانند هدایت حرارتی بالا، شار حرارت بحرانی (CHF)² بالا، انباشتگی کم در جریان و ضریب انتقال حرارت بهینه می‌باشند [7]. مارشد³ و همکارانش [8] هدایت حرارتی و ویسکوزیته سوسپانسیون نانوذره‌های TiO_2 و Al_2O_3 را در سیال پایه آب دی‌نیزه و اتیلن‌گلیکول اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ویسکوزیته و هدایت حرارتی موثر نانوسیالات به‌طور قابل توجهی با کسر حجمی نانوذره افزایش می‌یابد و افزایش هدایت حرارتی با دما به صورت خطی است. آن‌ها مشاهده کردند که علاوه بر کسر حجمی، اندازه و شکل ذره و هم‌چنین لایه‌ی میان‌سطحی و دما نیز هدایت حرارتی نانوسیال را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بیانکو⁴ و همکارانش [9] ضریب انتقال حرارت نانو سیال $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ با جریان جابه‌جایی اجباری و آرام در حال توسعه را در یک لوله مدور به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها مدل‌های تک‌فازی و دوفازی را برای خواص ثابت و هم‌چنین خواص وابسته به دما به کار گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانو سیالات بیش‌تر از سیال پایه است و با افزایش غلظت حجمی ذرات، میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. اما این افزایش همراه با افزایش میزان تنش برشی

¹ Choi

² Critical heat flux

³ Murshed

⁴ Bianco

دیواره است. بیشترین اختلاف در ضریب انتقال حرارت میانگین بین مدل‌های تک‌فازی و دوفازی حدود 11% بود. علاوه بر این آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل‌های وابسته به دما، مقادیر بیش‌تر ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت را ایجاد می‌کنند، زیرا اختلاف بین دمای دیوار و توده، حداقل است در نتیجه انتقال حرارت ماکزیمم است. تاثیر مثبت دیگر، کاهش تنش‌برشی است زیرا ویسکوزیته با افزایش دما کاهش می‌یابد. دوآن تانسک⁵ و ون وایز⁶ [10] تاثیر مدل‌های مختلف خواص ترموفیزیکی برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال TiO_2/H_2O در حال جریان در یک مبدل حرارتی دولوله ای افقی با جریان مخالف را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها از نانوذره‌های با کسر حجمی 0/2% استفاده کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد در کسر حجمی‌های خیلی پایین، مدل‌های ترموفیزیکی مختلف، تاثیر قابل توجهی روی مقدار پیش‌بینی شده ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال ندارد. آن‌ها در یک کار دیگری [11] کسر حجمی نانوذره های TiO_2 را بین (2%-0/2%) در نظر گرفتند و تاثیر غلظت ذره و عدد رینولدز را روی عملکرد انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و مشخصات جریان نانوسیال تحت رژیم جریان آشفته، به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش غلظت ذره افزایش می‌یابد همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال بالاتر از سیال پایه است و با افزایش عدد رینولدز و غلظت حجمی، افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که افت فشار نانوسیال اندکی بالاتر از سیال پایه است و با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی بیش‌تر می‌شود. کوی⁷ و همکارانش [12] تاثیرات جنس، غلظت و شکل نانوذره را روی هدایت حرارتی نانوسیال بررسی کردند و بیان کردند که این تاثیرات می‌تواند توسط آنالیز آماری سهم‌های پارانرژی نانوذرات منتشر شده پیش‌بینی شود. آن‌ها نتیجه گرفتند که نانوذره‌ای که هدایت حرارتی بیش‌تری داشته باشد، میزان هدایت حرارتی نانوسیال را بیش‌تر افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانوذرات مشابه، هدایت حرارتی نانوسیال بیش‌تر افزایش می‌یابد. نتایج آن‌ها نشان داد هنگامی که جنس نانوذره و کسر حجمی مشابه باشد، نانوذراتی که مساحت سطح ویژه‌ی بزرگ‌تری دارند، کمک بیش‌تری به افزایش هدایت حرارتی می‌کنند. سجادی و کاظمی [13] رفتار انتقال حرارت آشفته نانوسیال TiO_2/H_2O را در یک لوله مدور با شرط دمای دیواره ثابت به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در کار آن‌ها کسر حجمی نانوذره‌ها در سیال پایه کم‌تر از 0/25% بود. نتایج آن‌ها نشان داد که اضافه کردن مقادیر کمی از نانوذره‌ها به سیال پایه، انتقال حرارت را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. آن‌ها بیان کردند که ضریب انتقال حرارت در کسر حجمی 0/25% از TiO_2 و عدد رینولدز 5000، حدود 22% افزایش می‌یابد، اما افزایش کسر حجمی نانوذره‌ها در محدوده‌ی مورد مطالعه، تاثیر زیادی روی انتقال حرارت ندارد. همچنین مطالعات آن‌ها نشان داد که افت فشار نانوسیال اندکی بالاتر از سیال پایه است و با افزایش غلظت حجمی، افزایش می‌یابد. ماکزیمم افت فشار در ماکزیمم کسر حجمی (0/25%) رخ می‌دهد که 25% بالاتر از آب خالص است.

⁵ Duangthongsuk

⁶ Wongwises

⁷ Cui



اختری و همکارانش [14] انتقال حرارت نانوسیال Al_2O_3/H_2O را در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای و مبدل حرارتی پوسته و لوله، تحت شرایط جریان آرام به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تاثیرات پارامترهای مختلف مانند دبی حجمی سیال سرد و سیال گرم، دمای نانوسیال و کسر حجمی نانوذره‌ها را روی مشخصات انتقال حرارت بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد انتقال حرارت هر دو نوع مبدل حرارتی با افزایش دبی سیال سرد و سیال گرم و همچنین کسر حجمی ذره و دمای نانوسیال ورودی، افزایش می‌یابد. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال در مبدل حرارتی دولوله‌ای و مبدل حرارتی پوسته و لوله به ترتیب $13/2\%$ و $21/3\%$ بالاتر از آب است.

داوود و همکارانش [15] عملکرد انتقال حرارت و میدان جریان نانوسیالات مختلف را در داخل یک فضای حلقوی بیضوی در دو رژیم جریان آرام و آشفته به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها تاثیرات چهار نوع نانوذره Al_2O_3 ، CuO ، ZnO و SiO_2 را در سیال پایه‌ی آب با کسر حجمی بین $4\%-5/0\%$ و قطر ذرات بین $80 - 25$ نانومتر تحت شرط مرزی شار حرارتی ثابت بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوسیال SiO_2/H_2O بیش‌ترین عدد ناسلت را دارد و بعد نانوسیالات ZnO/H_2O ، CuO/H_2O ، Al_2O_3/H_2O و در نهایت آب خالص در رتبه‌های بعدی هستند. آن‌ها نتیجه گرفتند که عدد ناسلت برای همه نمونه‌ها با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز افزایش می‌یابد اما با افزایش قطر نانوذره کاهش می‌یابد.

هدف این مقاله بررسی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی نانوذره‌های Al_2O_3 در سیال پایه‌ی آب در داخل مبدل حرارتی دولوله‌ای تحت رژیم جریان آرام ($2100-300$) و آشفته ($16000-4000$) می‌باشد. برای این منظور تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل اندازه و شکل نانوذرات معلق با ترکیب درصدی مختلف روی میزان انتقال حرارت مبادله شده و افت فشار در داخل مبدل حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از دو شکل کرووی و استوانه‌ای و همچنین ترکیب نانوذرات کرووی و استوانه‌ای استفاده شد و تاثیر حضور نانوذرات استوانه‌ای در مقایسه با نانوذرات کرووی روی میزان انتقال حرارت نانوسیال در مبدل حرارتی مطالعه می‌شود.

خواص ترموفیزیکی نانوسیالات

خواص ترموفیزیکی نانوذره‌های مورد استفاده مطابق جدول 1 می‌باشند. خواص ترموفیزیکی آب با اضافه کردن نانوذره‌های Al_2O_3 دچار تغییر می‌شود که مقادیر آن‌ها توسط روابط زیر محاسبه می‌شود:

جدول 1. خواص ترموفیزیکی نانوذرات مورد استفاده [16]

ماده	$d_p (nm)$	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$C_p (\frac{J}{kgK})$	$k (\frac{W}{mK})$
Al_2O_3	10-100	3700	880	46

گرمای ویژه‌ی نانوسیال استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها با استفاده از رابطه‌ی ژان و روتزل⁸ محاسبه شد:

$$C_{nf} = \frac{\rho_f C_f (1-\phi) + \rho_p C_p \phi}{\rho_{nf}} \quad (1)$$

⁸ Xuan and Roetzel

که در آن ρ_f چگالی سیال پایه، C_f گرمای ویژه‌ی سیال پایه، ϕ کسر حجمی نانوذره، ρ_{nf} چگالی نانوسیال و C_{nf} گرمای ویژه نانوسیال می‌باشد. چگالی نانوسیال $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شد [17]:

$$\rho_{nf} = \rho_f(1 - \phi) + \rho_p \phi \quad (2)$$

برای محاسبه‌ی ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیالات روابط بسیار زیادی در مقالات توسط افراد مختلفی ارائه شده است، در این پژوهش در بررسی‌های مربوط به تاثیر شکل نانوذره برای محاسبه هدایت حرارتی سوسپانسیون نانوذره‌های کروی از رابطه‌ی هامیلتون کروسر⁹ استفاده شد:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \quad (3)$$

که در آن n ضریب شکل تجربی است و از رابطه‌ی $n = \frac{3}{\psi}$ محاسبه می‌شود. ψ کرویت ذره است که مقدار آن برای ذره‌های کروی و استوانه‌ای به ترتیب 1 و 0/5 می‌باشد [6].

برای محاسبه ویسکوزیته نانوذره‌های کروی رابطه‌ی برینکمن¹⁰ در نظر گرفته شد [6]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (4)$$

هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات حاوی نانوذره‌های استوانه‌ای مطابق روابط زیر محاسبه شدند [18]:

$$k_{nf} = k_f(1 + 3.95\phi) \quad (5)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 13.5\phi + 904.4\phi^2) \quad (6)$$

در محاسبات مربوط به بررسی تاثیر اندازه نانوذره، ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ با در نظر گرفتن اثر قطر ذرات، با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند:

هدایت حرارتی نانوسیال:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 1.0112\phi + 2.4375\phi\left(\frac{47}{d_p(nm)}\right) - 0.0248\phi_p\left(\frac{k_p}{0.613}\right) \quad (7)$$

که در این رابطه d_p قطر نانوذره و k_p هدایت حرارتی نانوذره می‌باشد [17].

ویسکوزیته نانوسیال:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87\left(\frac{d_p}{d_f}\right)^{-0.3}\phi^{1.03}} \quad (8)$$

که d_f در رابطه‌ی فوق به صورت زیر بیان می‌شود:

⁹ Hamilton and Crosser

¹⁰ Brinkman



$$d_f = 0.1 \left(\frac{6M}{N\pi\rho_{f0}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

d_p اندازه نانوذره و d_f قطر مولکولی سیال پایه، M وزن مولکولی سیال پایه، N عدد آووگادرو، ρ_{f0} چگالی سیال پایه محاسبه شده در دمای 293 کلون می‌باشند [19].

قابل ذکر است که ضریب کرویت برای نانوذرات استوانه ای را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\varphi = \left[36\pi \cdot \frac{V_p^2}{A_p^3} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

مدلسازی ریاضی

به طور کلی، عملکرد انتقال حرارت جابه جایی نانوسیالات با استفاده از دو روش تک فاز و دو فاز مدل می‌شود. مدل دو فاز، امکان فهم عملکرد هر دو فاز مایع و جامد را در فرآیند انتقال حرارت فراهم می‌آورد. مدل تک فاز فرض می‌کند که هر دو فاز جامد و مایع در تعادل حرارتی هستند و با سرعت مشابهی حرکت می‌کنند، این روش ساده تر است و به زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد [20]. در این پژوهش از روش تک فاز در شبیه سازی‌ها برای مدل سازی توصیف عملکرد مبدل حرارتی استفاده شد.

معادلات حاکم

توصیف ریاضی مدل تک فاز جریان سیال تراکم ناپذیر در حالت پایدار و سه بعدی، با استفاده از معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی به صورت زیر بیان می‌شود:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (11)$$

معادله مومنتم:

$$\rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}] \quad (12)$$

معادله انرژی:

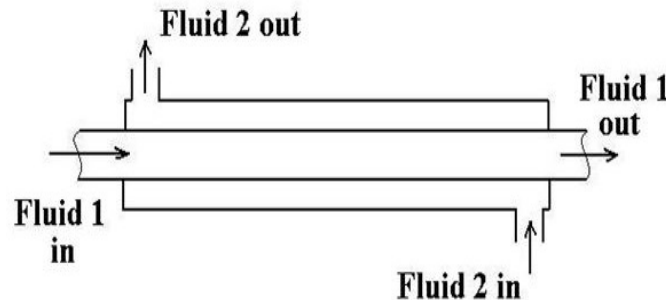
$$u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\alpha + \frac{v_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (13)$$

که در رابطه‌ی بالا $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ است و μ_t ، v_t و σ_t به ترتیب ویسکوزیته دینامیکی، ویسکوزیته سینماتیکی و ضریب نفوذ در جریان آشفته می‌باشند [21].

هندسه مبدل و شرایط مرزی

مبدل شبیه سازی شده شامل دولوله هم مرکز به طول 1 متر می‌باشد. قطر لوله داخلی 0/008 متر و قطر لوله‌ی خارجی 0/016 متر است. نانو سیال در لوله‌ی داخلی جریان دارد که ترکیبی از آب و نانو ذره های

می‌باشد. سیال گرمی که در لوله بیرونی جریان دارد آب خالص و در دمای 55 درجه سانتی‌گراد است. شماتیکی از مبدل حرارتی در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1. شماتیک مبدل حرارتی دولوله‌ای با جریان مخالف

به دلیل تقارن در هندسه‌ی موردنظر، یک‌چهارم مبدل شبیه‌سازی شده و دو شرط تقارن در هندسه اعمال شده است. شرط مرزی سرعت در ورودی‌های مبدل، شرط مرزی فشار در خروجی‌های مبدل و شرط عدم لغزش روی هر دو دیوار اعمال شد. به علت عایق بودن دیواره خارجی، شرط شار حرارتی ثابت با مقدار شار صفر بر این دیوار اعمال شد. عدد رینولدز بررسی شده در این تحقیق در محدوده بین 2100-300 (جریان آرام) و 16000-4000 (جریان آشفته) در نظر گرفته شد. از مدل انتقال تنش برشی¹¹ $k-\omega$ برای مدل‌سازی جریان در حالت آشفته استفاده شد. این مدل در واقع یک مدل ترکیبی است، به طوری که از مدل $k-\omega$ برای حل عددی جریان در داخل لایه‌های مرزی و جاهایی که تنش برشی چشم‌گیری وجود دارد استفاده می‌کند در حالی که برای پیش‌بینی ویژگی‌های جریان در مناطق دور از دیواره‌ها و جاهایی که تنش برشی قابل اغماض است از مدل $k-\varepsilon$ بهره می‌گیرد. در این مدل، برای پیوسته‌سازی معادلات در ناحیه‌ای که مرز مشترک بین دو مدل است از معادلات ترکیبی استفاده می‌شود. انجام کارهای عددی متعدد نشان داده است که دقت این مدل در حل عددی جریان‌های مختلف از دقت مدل‌های $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ بیشتر بوده و نتایج حاصل از آن به نتایج حاصل از داده‌های تجربی نزدیک‌تر است [22]. مدل SST $k-\omega$ شامل دو معادله‌ی دیگر برای انرژی جنبشی آشفته (K) و سرعت اتلاف ویژه (ω) می‌باشد.

انرژی جنبشی آشفته و سرعت اتلاف ویژه به ترتیب از روابط (14) و (15) به شرح زیر بدست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G_k - Y_k \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right\} + G_\omega - Y_\omega \quad (15)$$

¹¹ Shear stress transport (SST)



که σ_k و σ_ω به ترتیب اعداد پرانتل آشفته برای k و ω است. ویسکوزیته‌ی آشفته توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (16)$$

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_\infty^* + \text{Re}_t / R_k}{1 + \text{Re}_t / R_k} \right)$$

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \text{ و } \alpha_\infty^* = \frac{\beta_i}{3}, \beta_i = 0.072$$

قابل ذکر است که در اعداد رینولدز بزرگ‌تر، $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$ است. ترم‌های G_ω و G_k بیانگر تولید آشفته‌گی است و از روابط زیر محاسبه می‌شوند [23]:

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (17)$$

$$R_\omega = 2.95 \alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_\infty + \text{Re}_t / R_\omega}{1 + \text{Re}_t / R_\omega} \right) \quad G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \text{ و} \quad (18)$$

اعتبار سنجی مدل

برای به‌دست آمدن شبکه‌ی بهینه و اطمینان از عدم وابستگی نتایج به اندازه‌ی شبکه¹²، مبدل موردنظر با استفاده از اندازه‌های مختلف برای شبکه، شبکه‌بندی شد. با اجرای برنامه برای هر یک از آنها و با در نظر گرفتن آب به‌عنوان سیال عملیاتی و مقایسه عدد ناسلت سیال سرد، اندازه شبکه مطلوب به‌دست آمد. داده‌های مربوط به بررسی استقلال نتایج از اندازه شبکه برای هر دو جریان آرام و آشفته در جدول زیر نشان داده شده است. تعداد گره‌ها به ترتیب در جهات طولی، پیرامونی و شعاعی است.

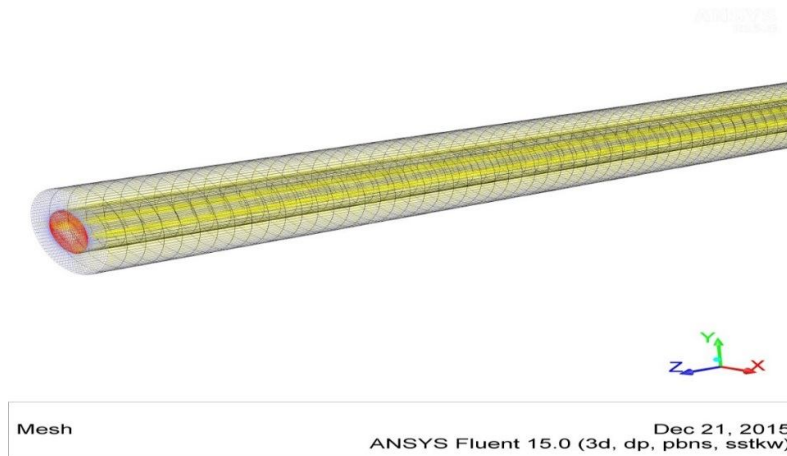
جدول 2. داده‌های حاصل از تست استقلال از مش در جریان آرام
جدول 3. داده‌های حاصل از تست استقلال از مش در جریان آشفته

تعداد گره‌ها	Nu
202074 (400-16-16)	55/749
297192 (420-18-20)	59/43
413620 (440-20-24)	61/069
577158(480-22-28)	61/292
800548 (500-26-32)	60/93
1198918 (550-30-38)	69/69

تعداد گره‌ها	Nu
58874 (700-6-6)	2/548
112126 (800-8-8)	2/525
189192 (900-10-10)	2/513
294272 (1000-12-12)	2/509
452426 (1000-14-16)	2/508

¹² Mesh independency

با توجه به نتایج به دست آمده، تعداد 294272 گره برای جریان آرام و تعداد 413620 گره برای جریان آشفته در حالت پایدار و سه بعدی در نظر گرفته شد. نمونه‌ای از مبدل حرارتی شبکه‌بندی شده در شکل 2 آورده شده است.



شکل 2. شبکه تولید شده در جریان آشفته

برای اعداد رینولدز بین 2100-300 به منظور اعتبارسازی، نتایج حل عددی با نتایج حاصل از معادله سیدرتیت¹³ که یک رابطه تئوری برای جریان آرام است، مقایسه شدند. این رابطه عدد ناسلت را به صورت تابعی از ویژگی‌های سیال و هندسه مبدل حرارتی بیان می‌کند [24]:

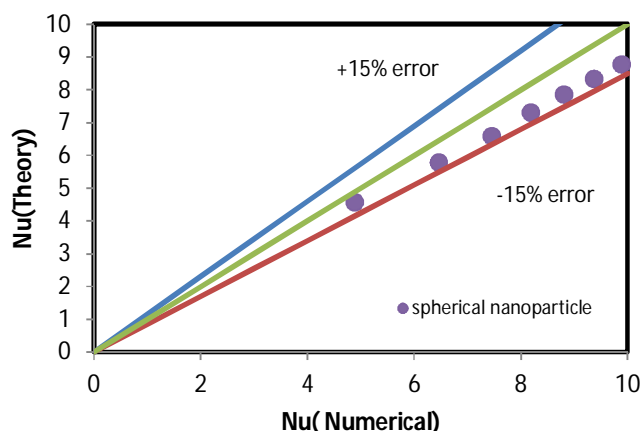
$$Nu = 1.86 \left(Re \cdot Pr \frac{D}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (19)$$

$$0.48 \leq Pr \leq 16700$$

$$0.0044 < \frac{\mu}{\mu_w} < 9.75$$

مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و رابطه سیدرتیت نشان داد که نتایج، توافق خوبی با معادله تئوری دارد و با توجه به شکل 3 حداقل و حداکثر میزان خطا برای نانوذره‌های کروی به ترتیب 7% و 12/7% می‌باشد.

¹³ Seider Tate



شکل 3. مقایسه نتایج حل عددی با رابطه‌ی تئوری در جریان آرام

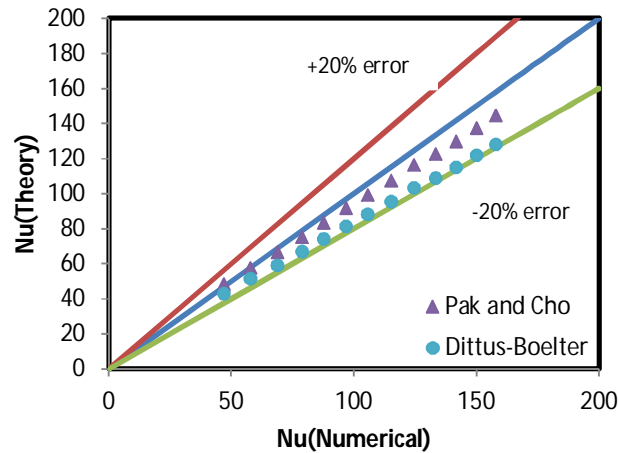
مقدار عدد ناسلت محاسبه شده در جریان آشفته با نتایج رابطه‌ی تئوری پک و چو¹⁴ [25] و هم‌چنین با نتایج رابطه‌ی دیتوس بولتر¹⁵ [26] مقایسه شدند. بررسی‌ها نشان داد که مطابق شکل 4 نتایج عددی توافق بسیار خوبی با روابط تئوری دارند به‌طوری‌که حداقل و حداکثر میزان خطای سوسپانسیون حاوی نانوذرات استوانه‌ای در مقایسه با رابطه‌ی پک و چو به ترتیب 0/2% و 9% و در مقایسه با رابطه‌ی دیتوس بولتر به ترتیب 7% و 23% می‌باشد.

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0.021 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.5} & (20) \\ \text{Re} &= 10^4 - 10^5 \\ 6.54 &\leq \text{Pr} \leq 12.33 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} & (21) \\ \text{Re} &\geq 10^4 \\ 0.6 &\leq \text{Pr} \leq 160 \end{aligned}$$

¹⁴ Pak and Cho

¹⁵ Dittus-Boelter

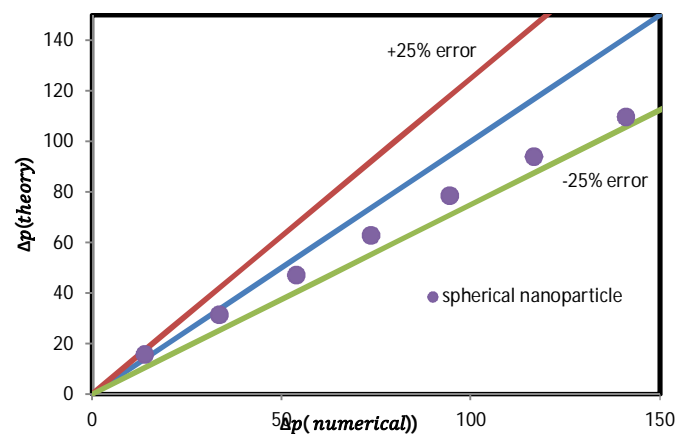


شکل 4. مقایسه نتایج حل عددی با روابط تئوری در جریان آشفته

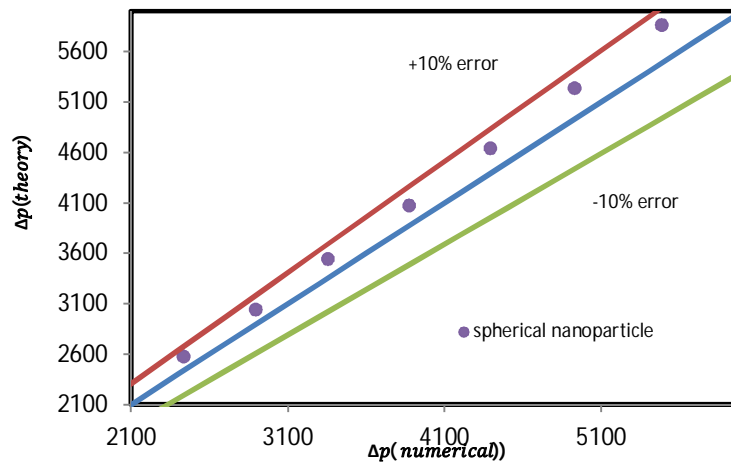
میزان افت فشار ناشی از حرکت نانوسیالات نیز با رابطه‌ی 21 مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها در توافق خوبی با این رابطه است. به طوریکه درصد خطا برای نانوذرات کروی در دو جریان آرام و آشفته مطابق اشکال 5 و 6 است.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \quad (22)$$

در رابطه فوق ΔP افت فشار، f ضریب اصطکاک، L و D به ترتیب طول و قطر لوله، ρ چگالی و v سرعت سیال می‌باشند [27].



شکل 5. مقایسه نتایج افت فشار حل عددی با حل تئوری در جریان آرام



شکل 6. مقایسه نتایج افت فشار حل عددی با حل تئوری در جریان آشفته

نتایج و بحث

از روش عددی حجم محدود برای بررسی اثرات اندازه و شکل نانوذرها در بهبود عملکرد مبدل حرارتی دولوله‌ای در رژیم جریان آرام و آشفته استفاده شد. پس از حصول داده‌ها از حل عددی، با استفاده از روابط زیر عدد ناسلت محاسبه شد:

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_m)} \quad (23)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (24)$$

که T_m میانگین دمای ورودی و خروجی سیال سرد، T_w دمای دیواره‌ی داخلی، q'' شار حرارتی دیواره درونی مبدل، D قطر لوله داخلی، k هدایت حرارتی نانوسیال است.

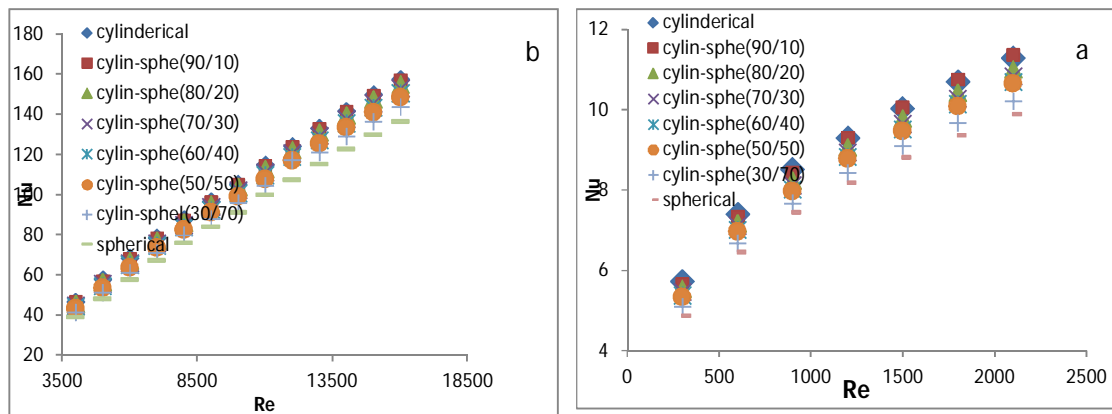
تاثیر شکل نانوذره

نانوذره‌ها می‌توانند شکل‌های مختلفی داشته باشند. شکل نانوذره اثر قابل توجهی روی ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال دارد به طوری که نرخ انتقال حرارت را تحت تاثیر قرار می‌دهد [28].

برای بررسی اثر شکل نانوذرات روی میزان انتقال حرارت انجام شده در مبدل حرارتی سوسپانسیونی از نانوذره‌های استوانه‌ای، کروی و همچنین سوسپانسیونی که ترکیبی از نانوذره‌های کروی و نانوذره‌های استوانه‌ای می‌باشد با درصد‌های 30، 50، 60، 70، 80، 90 از نانوذرات استوانه‌ای در نظر گرفته شد. با توجه به شکل 7 مشاهده می‌شود که با کشیده‌تر شدن شکل نانوذرات میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت نانوسیال، افزایش پیدا می‌کند. زیرا با افزایش نسبت ابعاد نانوذره‌ها، سطح تماس افزایش می‌یابد و در نتیجه سبب افزایش سرعت انتقال حرارت در هنگام برخورد می‌شود. همچنین سهم اتم‌های پیرانرژی موجود در نانوذرات تاثیر بسیار زیادی روی میزان انتقال حرارت انجام شده دارد. مشخص شده است که نانوذرات استوانه‌ای شامل

اتم‌های پرانرژی بیش‌تری نسبت به نانوذرات کروی هستند. زیرا نانوذرات استوانه‌ای، مساحت سطح ویژه بزرگ‌تری نسبت به نانوذرات کروی دارند و انرژی پتانسیل اتم‌های روی سطح، بالاتر از اتم‌های داخلی است. در نتیجه سبب می‌شود تا شدت تبادل حرارتی در نانوسیالات با ذرات استوانه‌ای نسبت به نانوذرات کروی بیش‌تر شود [12]. مطالعات نشان داده است که نانوذرات استوانه‌ای به‌دلیل حرکت چرخشی ناشی از دینامیک مولکولی، حرکات انتقالی ریز بیش‌تری دارند بنابراین در مقایسه با نانوذرات کروی، سبب افزایش بیشتر هدایت حرارتی می‌شوند [29].

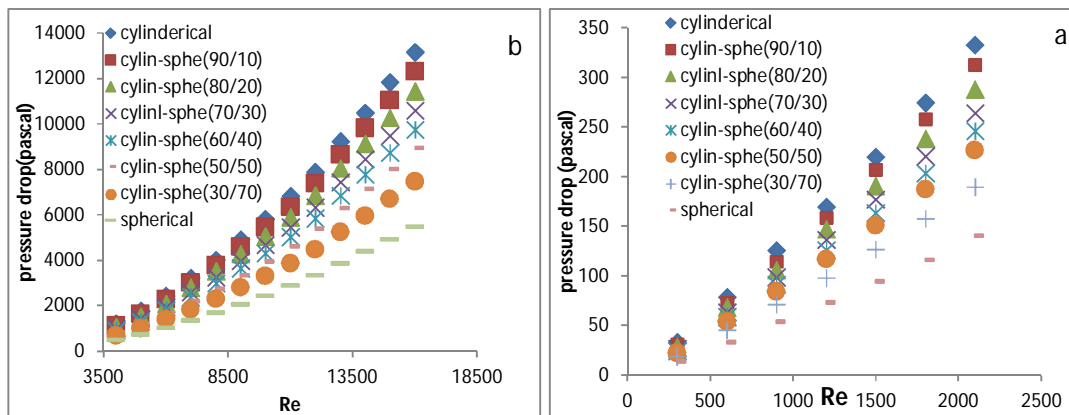
با توجه به شکل 7، مشاهده می‌شود که میزان انتقال حرارت نانوسیالات حاوی نانوذره‌های استوانه‌ای در دو جریان آرام و آشفته به‌ترتیب 14/43 و 15/37 درصد بیش‌تر از نانوسیالات حاوی نانوذرات کروی است و در سوسپانسیون‌های ترکیبی با افزایش درصد نانوذرات استوانه‌ای در سوسپانسیون، میزان انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند. مطابق مدل هامیلتون کروسر، سوسپانسیون ذرات با ضریب شکل بالا (کشیده و باریک) هدایت حرارتی بالاتری دارند. با افزایش درصد نانوذرات استوانه‌ای موجود در نانوسیال، هدایت حرارتی نانوسیال افزایش پیدا می‌کند. از طرفی در کسرجمعی‌های مشابه، هم‌زمان با کاهش کرویت ذره (افزایش ضریب شکل) مساحت سطح کلی اینترفیس جامد-مایع نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین همه‌ی این شرایط باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود.



شکل 7. تاثیر شکل نانوذره‌های معلق در نانوسیال روی عدد ناسلت مبدل حرارتی در: (a) جریان آرام (b) جریان آشفته

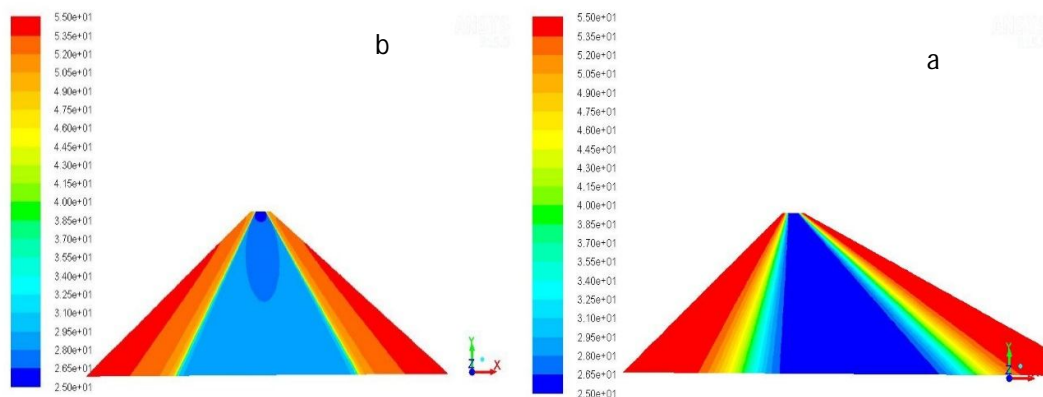
سوسپانسیون حاوی درصد بیش‌تری از نانوذرات استوانه‌ای، افت فشار بیش‌تری را در مبدل ایجاد می‌کند زیرا نسبت ابعاد نانوساختارها روی نیروهای تعادلی در نانوسیالات تاثیر گذاشته و بنابراین ویسکوزیته نانوسیالات را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هم‌چنین نانوذرات استوانه‌ای در مقایسه با نانوذرات کروی به سختی می‌چرخند که باعث افزایش مقاومت جریان و در نتیجه سبب افزایش ویسکوزیته می‌شوند و در نهایت افت فشار بیش‌تری را ایجاد می‌کند. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که سوسپانسیون حاوی نانوذرات استوانه‌ای افت فشار بیش‌تری را در داخل مبدل حرارتی ایجاد می‌کند. با توجه به شکل 8، افت فشار سوسپانسیون حاوی نانوذرات استوانه‌ای در جریان آرام 57% و در جریان آشفته 58% بیشتر از افت فشار سوسپانسیون حاوی

نانوذرات کروی است. همچنین با افزایش عدد رینولدز، به سبب افزایش ویسکوزیته و سرعت نانوسیال، افت فشار افزایش پیدا می‌کند.



شکل 8. تاثیر شکل نانوذره‌های معلق در نانوسیال روی افت فشار نانوسیال در مبدل حرارتی در (a) جریان آرام (b) جریان آشفته

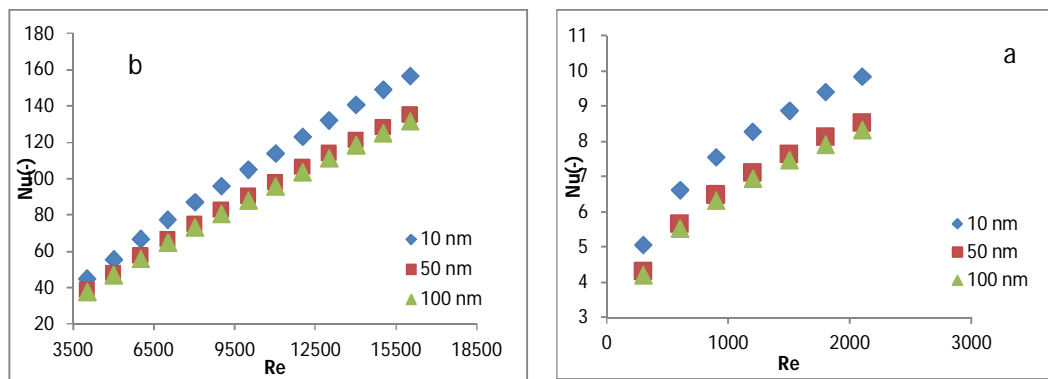
شکل 9 کانتورهای دمای نانوسیال حاوی نانوذرات استوانه‌ای را در دو جریان آرام ($Re=2100$) و آشفته ($Re=10000$) نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، نانوسیال از طریق دیوار لوله گرم می‌شود و این گرما به لایه‌های بعدی انتقال پیدا می‌کند. دمای نانوسیال در کنار دیوار ماکزیمم مقدار را دارد و با دور شدن از دیوار، دمای نانوسیال کاهش پیدا کرده و در مرکز لوله به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد.



شکل 9. کانتورهای دمای نانوسیال حاوی نانوذرات استوانه‌ای (a) جریان آرام، (b) جریان آشفته

تأثیر اندازه نانوذره

نانوسیال آب/ Al_2O_3 در دمای 25 درجه سانتی‌گراد و با قطرهای 10-100 نانومتر برای بررسی اثر اندازه ذرات روی تبادل حرارتی مبدل در نظر گرفته شد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته اندازه نانوذره تأثیر زیادی روی میزان حرارت انتقالی دارد به طوری که با کاهش قطر نانوذره، ویسکوزیته و هدایت حرارتی دچار تغییر شده و در نهایت تغییرات میزان حرارت انتقال یافته را موجب می‌شود. شکل 9 تأثیر اندازه نانوذره را روی عدد ناسلت در رژیم جریان آرام و آشفته نشان می‌دهد.



شکل 10. تأثیر اندازه نانوذره‌های معلق در نانوسیال روی عدد ناسلت نانوسیال در مبدل حرارتی در (a) جریان آرام (b) جریان آشفته

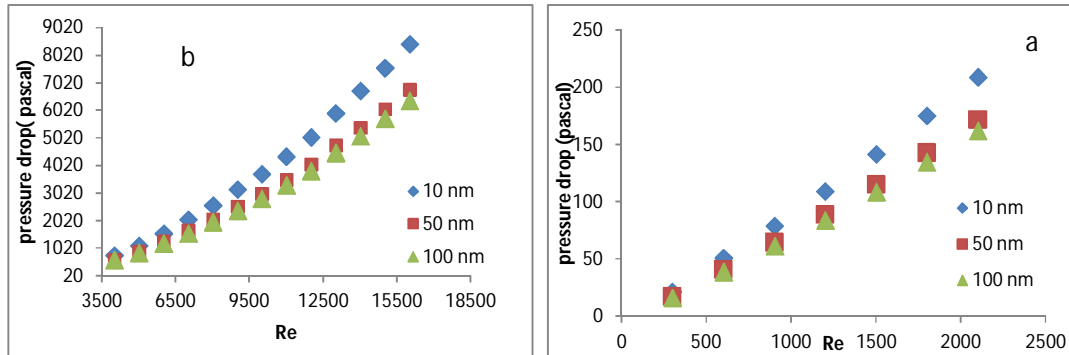
مطابق شکل 10a در جریان آرام، عدد ناسلت سوسپانسیون حاوی نانوذرات 10 نانومتری 16/2 درصد بیشتر از سوسپانسیون حاوی نانوذرات 50 نانومتری است و عدد ناسلت سوسپانسیون حاوی نانوذرات 100 نانومتری 2/42 درصد بیشتر از سوسپانسیون حاوی نانوذرات 100 نانومتری می‌باشد. با کاهش قطر نانوذره، مساحت سطح ویژه افزایش پیدا کرده لذا سطح انتقال حرارت بین نانوذره و سیال پایه افزایش پیدا می‌کند و این شرایط در نهایت باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود.

مطابق شکل 10b در جریان آشفته عدد ناسلت سوسپانسیون حاوی نانوذرات 10 نانومتری 18/89 درصد بیشتر از عدد ناسلت سوسپانسیون حاوی نانوذرات 100 نانومتری می‌باشد. مطابق معادلات استفاده شده برای محاسبه‌ی خواص ترموفیزیکی نانوسیال، با کاهش اندازه‌ی ذره، هدایت حرارتی و ویسکوزیته افزایش پیدا می‌کند. با توجه به اینکه تغییرات دو خاصیت ذکر شده یکی در جهت افزایش انتقال حرارت و دیگری در جهت کاهش انتقال حرارت می‌باشد، مطابق نتایج به دست آمده نقش مثبت افزایش هدایت حرارتی بر نقش منفی افزایش ویسکوزیته غلبه کرده و در نهایت کاهش اندازه‌ی ذره باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود.

مطابق شکل 11، با کاهش قطر نانوذره میزان افت فشار نانوسیال در داخل مبدل حرارتی دولوله‌ای افزایش پیدا می‌کند. زیرا با کاهش قطر نانوذره احتمال تجمع نانوذرات در داخل نانوسیال افزایش پیدا کرده و متعاقباً باعث افزایش ویسکوزیته نانوسیال می‌شود و در نهایت میزان افت فشار را افزایش می‌دهد. به طوریکه افت



فشار سوسپانسیون حاوی نانوذرات 10 نانومتر 24/34 درصد بیشتر از افت فشار سوسپانسیون حاوی نانوذرات 50 نانومتر است و افت فشار سوسپانسیون حاوی نانوذرات 50 نانومتر 6 درصد بیشتر از افت فشار سوسپانسیون حاوی نانوذرات 100 نانومتر است.



شکل 11. تاثیر اندازه‌ی نانوذره‌های معلق در نانوسیال روی افت فشار نانوسیال در مبدل حرارتی در (a) جریان آرام (b) جریان آشفته

نتیجه‌گیری

در این پژوهش انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار نانوسیال Al_2O_3/H_2O ، در داخل مبدل حرارتی دولوله‌ای با جریان مخالف در حالت سه‌بعدی به صورت عددی، روش حجم محدود مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر شکل ذرات کروی، استوانه‌ای و ترکیب آن‌ها و اندازه نانوذره‌ها در بهبود عملکرد مبدل حرارتی دولوله‌ای تحت هر دو رژیم جریان آرام و آشفته مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که:

- 1- عدد ناسلت نانوسیال در رژیم جریان آشفته بسیار بزرگ‌تر از رژیم جریان آرام است و با افزایش عدد رینولدز میزان انتقال حرارت نانوسیال افزایش پیدا می‌کند.
- 2- نتایج اثرات شکل نانوذره بیانگر این واقعیت است که با کشیده‌تر شدن شکل نانوذرات، حرارت انتقالی و همچنین افت فشار در داخل مبدل افزایش می‌یابد. عدد ناسلت نانوسیال حاوی نانوذرات استوانه‌ای Al_2O_3 در رژیم جریان آشفته 16 درصد بیشتر از نانوذرات کروی است و همچنین افت فشار آن 58 درصد بیشتر از افت فشار سوسپانسیون حاوی نانوذرات کروی است. میزان افت فشار هم‌چنین با افزایش عدد رینولدز افزایش یافت.
- 3- با کاهش قطر نانوذره پارامترهای انتقال حرارت در داخل مبدل حرارتی افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند، اما میزان افت فشار به دلیل افزایش ویسکوزیته افزایش می‌یابد.

فهرست علائم

C	گرمای ویژه ($J.kg^{-1}K^{-1}$)
d_f	قطر مولکولی آب (nm)
D	قطر هیدرولیکی (m)
d_p	قطر نانوذره (nm)
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W.m^{-2}K^{-1}$)
k	هدایت حرارتی ($W.m^{-1}K^{-1}$)
M	وزن مولکولی
n	ضریب شکل
N	عدد آووگادرو
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرانتل
q''	شار حرارتی ($W.m^{-2}$)
Re	عدد رینولدز
R_k	عدد ثابت در معادله‌ی 17
R_w	عدد ثابت در معادله‌ی 19
Y_K	اتلاف k
Y_w	اتلاف w
علائم یونانی	
ρ	چگالی ($kg.m^{-3}$)
ϕ	کسر حجمی
μ	ویسکوزیته ($kg.m^{-1}s^{-1}$)
μ_t	ویسکوزیته‌ی آشفته ($kg.m^{-1}s^{-1}$)
σ_k	عدد پرانتل موثر برای k
σ_w	عدد پرانتل موثر برای w
ω	سرعت اتلاف ویژه
زیرنویس‌ها	
F	اشاره به سیال پایه
Nf	اشاره به نانوسیال
P	اشاره به نانوذره



منابع

1. Khedkar, R. S., Sonawane, S. S., Wasewar, K. L., Heat transfer study on concentric tube heat exchanger using TiO_2 -water based nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, 2014, pp. 163-169.
2. Zeinali Heris, S., Nasr Esfahany, M., Etemad, S. G., Numerical investigation of nanofluid laminar convective heat transfer through a circular tube, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 52, No. 11, 2007, pp. 1043-1058.
3. Palm, S. J., Roy, G., Nguyen, C. T., Heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radialflow cooling systems considering temperature-dependent properties, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, 2006, pp. 2209-2218.
4. Choi, S. U. S., Eastman, J. A., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*. 1995: San Francisco.
5. Ghadimi, A., Saidur, R., Metselaar, H. S. C., A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, 2011, pp. 4051-4068.
6. Mahian, O., Kianifar, A., Kleinstreuer, C., Al-Nimr, M. d. A., Pop, I., Sahin, A. Z., Wongwises, S., A review of entropy generation in nanofluid flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, 2013, pp. 514-532.
7. Heyhat, M. M., Kowsary, F., Rashidi, A. M., Esfehiani, S. A. V., Amrollahi, A., Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, 2012, pp. 1272-1278.
8. Murshed, S. M. S., Leong, K. C., Yang, C., Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47. No. 5, 2008, pp. 560-568.
9. Bianco, V., Chiacchio, F., Manca, O., Nardini, S., Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, 2009, pp. 3632-3642.
10. Duangthongsuk, W., Wongwises, S., Effect of thermophysical properties models on the predicting of the convective heat transfer coefficient for low concentration nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 10, 2008, pp. 1320-1326.
11. Duangthongsuk, W., Wongwises, S., An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO_2 -water nanofluids flowing under a turbulent flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, 2010, pp. 334-344.
12. Cui, W., Bai, M., Lv, J., Li, G., Li, X., On the influencing factors and strengthening mechanism for thermal conductivity of nanofluids by molecular dynamics simulation, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 50, No.23, 2011, pp. 13568-13575.
13. Sajadi, A. R., Kazemi, M. H., Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO_2 /water nanofluid in circular tube, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 10, 2011, pp. 1474-1478.

14. Akhtari, M., Haghshenasfard, M., Talaie, M. R., Numerical and experimental investigation of heat transfer of α -Al₂O₃/Water nanofluid in double pipe and shell and tube heat exchanger, Numerical Heat Transfer, Vol. 63, No. 12, 2013.
15. Dawood, H. K., Mohammed, H. A., Sidik, N. A. C., Munisamy, K. M., Numerical investigation on heat transfer and friction factor characteristics of laminar and turbulent flow in an elliptic annulus utilizing nanofluid, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 66, 2015, pp. 148-157.
16. Darzi, A. A. R., Farhadi, M., Sedighi, K., Heat transfer and flow characteristics of Al₂O₃-water nanofluid in a double tube heat exchanger, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 47, 2013, pp. 105-112.
17. Khanafer, K., Vafai, K., A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, 2011, pp. 4410-4428.
18. Timofeeva, E., Routbort, R., Singh, D., Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids, Applied physics, Vol. 106. No. 1, 2009.
19. Corcione, M., Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 49, No. 9, 2010, pp. 1536-1546.
20. Masoumi, N., Sohrabi, N., Behzadmehr, A., A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, Applied Physics, Vol. 42, 2009.
21. Chen, W.-L., Guo, Z., Chen, C. o.-K., A numerical study on the flow over a novel tube for heat-transfer enhancement with a linear eddy-viscosity model, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, 2004, pp. 3431-3439.
22. Menter, F.R., Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows, 1993, 93-2006,.
23. Fluent12, Theory guide, 4.5.2-Shear stress transport(SST) k-w model, 4-31, 2009.
24. Incropera, F.P., Witt, D.P.D., Introduction to heat transfer, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2002.
25. Pak, B. C., Cho, Y. I., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Journal of Thermal Energy Generation, Vol. 11 (2), 1998 pp. 151-170.
26. Syam Sundar, L., Singh, M.K., Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 20, 2013, pp. 23-35.
27. Rea, U., McKrell, T., Hu, L.-w., Buongiorno, J., laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, 2009, pp. 2042-2048.
28. Vanaki, S. M., Mohammed, H. A., Abdollahi, A., Wahid, M. A., Effect of nanoparticle shapes on the heat transfer enhancement in a wavy channel with different phase shifts, Journal of Molecular Liquids, Vol. 196, 2014, pp. 32-42.
29. Jeong, J., et al., Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids, International Journal of Refrigeration, Vol. 36, No. 8, 2013, pp. 2233-2241.