

شبیه سازی CFD انتقال حرارت نانوسیال TiO₂/Water با کسر حجمی های مختلف در میکروکانال با سطح مقطع Hexagonal

سجاد رسام^۱، حامد صداقت زادگان اصفهانی^۱

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی
تکنیک تهران)

چکیده

اهمیت و نقش انتقال حرارت در علوم مهندسی در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. تلاش های زیادی برای ساخت دستگاه ها یا انجام روش هایی صورت گرفته که صرفه جویی در مصرف سوخت، انرژی و مواد اولیه از مهم ترین اهداف آنها به شمار می رود. افزایش انتقال حرارت همیشه یکی از مسائل مهم و مورد بحث در صنعت بوده است. این افزایش انتقال حرارت در اکثر کاربردهای سرمایشی و گرمایشی، مخصوصا در ابعاد کوچک، اخیرا پر اهمیت است. روش های زیادی در مورد افزایش انتقال حرارت در این کاربردهای سرمایشی و گرمایشی وجود دارد. برای افزایش انتقال حرارت می توان از تغییرات هندسه جریان، شرایط مرزی و افزایش هدایت حرارتی سیال استفاده کرد. به خاطر محدودیت های هندسه جریان و شرایط مرزی، بهترین گزینه برای محققان افزایش هدایت حرارتی سیال می باشد به همین علت این روش به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته شده است. نانو سیالات با مخلوط کردن یک سیال پایه و نانو ذرات فلزی و یا غیر فلزی تعریف می شوند. رسانش گرمایی نانو ذرات معمولا از سیال پایه که در آن قرار می گیرند بیشتر است و اندازه های ذرات معلق در آن معمولا کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند. در این مقاله سعی شده است تا با بیان مفهوم فرآیندهای بهبود انتقال حرارتی به عنوان یک استراتژی برای شبیه سازی دقیق تر مسائل پیچیده از لحاظ مقیاس های مختلف مکانی و زمانی، برخی از روش های توانمند در شبیه سازی فرآیندها، همراه با

تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی CFD مورد مطالعه قرار گیرد. در این راستا از نانوذره ی TiO_2 با کسر حجمی ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ با سیال پایه ی آب جهت بهبود انتقال حرارت در میکروکانال شش ضلعی منتظم با مدل اغتشاش K-E بررسی شده و در نهایت براساس داده های حاصل از شبیه سازی فرمولی تجربی در هر حالت برای عدد ناسلت ارائه شده است.

کلمات کلیدی: بهبود انتقال حرارت، میکروکانال، نانوسیال، شبیه سازی CFD

مقدمه

اهمیت و نقش انتقال حرارت در علوم مهندسی در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. تلاش های زیادی برای ساخت دستگاه ها یا انجام روش هایی صورت گرفته که صرفه جویی در مصرف سوخت، انرژی و مواد اولیه از مهم ترین اهداف آنها به شمار می رود. نانو سیالات برای اولین بار توسط چوی با مخلوط کردن یک سیال پایه و نانو ذرات فلزی و یا غیر فلزی طراحی شد. نانو ذرات رسانش گرمایی شان معمولا از سیال پایه که در آن قرار می گیرند بیشتر است و اندازه های ذرات معلق در آن معمولا کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند. ایستمان و همکاران آزمایش هایی را برای ارزیابی عملکرد نانو سیال در جریان مغشوش انجام داده اند که ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای نانوسیال آب-اکسید مس با کسر حجمی ۰,۹ درصد نسبت به آب خالص ۱۵ درصد افزایش داشته است [۱، ۲].

راندمان تجهیزات انتقال حرارت به تغییرات فلاکس حرارتی ایجاد شده در آنها بستگی دارد. سیالات حامل انرژی همچون آب، مایعات معدنی- روغن ها و اتیلن گلیکول نقش حیاتی در بسیاری از فرآیند های صنعتی همچون تولید نیرو، فرآیند های شیمیایی، فرآیند های گرمایشی و سرمایشی و دیگر کاربردها در مقیاس میکرومتری است. خواص پایین انتقال حرارت این سیالات اولین مانع تاثیر گذار در بهبود راندمان مبدل های حرارتی به شمار می رود به همین دلیل تمرکز روی بهبود این خواص ضروری به نظر می رسيد. در این حین با توجه به اینکه مبدل حرارتی به عنوان یکی از اساسی ترین وسایلی هستند که جریان ی از انرژی حرارتی را

بین دو یا چند سیال در دماهای مختلف برقرار کنند و وظیفه تبادل حرارت را به عهده دارند در صنایع تولید برق، صنایع فرآیندی، صنایع شیمیایی و غذایی، تجهیزات الکترونیکی، صنایع تولیدی، تهویه مطبوع، سرمایش و کاربرد های فضایی استفاده می شوند [۳]. در این میان با بهره گیری از علم نانوتکنولوژی که مربوط به استفاده از نانوذرات با خواص حرارتی بسیار بالا در سیالات پایه دارای خواص حرارتی پایین تر، که محصول آن نیز سوسپانسیون با خواص حرارتی بالاتر از سیال اولیه است می توان به راهی مناسب جهت غلبه بر مشکل راندمان پایین تجهیزات انتقال حرارت ناشی از خواص حرارتی پایین سیالات پایه خالص حامل انرژی دست یافت [۴]. تحقیقات تئوری و تجربی بسیاری در این زمینه نیز صورت گرفته است که با بهره برداری از هدایت بسیار بالای ذرات جامد حدوداً ده برابر بیشتر از سیالات رایج در انتقال حرارت نانو سیال ها بسیار بهتر از سیال پایه می باشد به علاوه اینکه افت فشار نیز در نانو سیالات وجود ندارد یا بسیار ناچیز است. مهم ترین دلایل بهبود انتقال حرارت در نانو سیالات، نانوذرات معلق هدایت حرارتی سیال را افزایش می دهند حرکت های بسیار زیاد نانوذرات باعث افزایش آشفتنی سیال و در نتیجه افزایش تبادل حرارتی می شود [۵، ۶].

استفاده از فناوری نانو در مبدل های حرارتی

امروزه فناوری افزایش انتقال حرارت گسترش یافته است و انتقال انرژی گرمایی در بسیاری از واحدهای صنعتی و شیمیایی از مهم ترین بخش های عملیات شیمیایی محسوب می شود. کاربرد وسیع انتقال حرارت در صنایع گوناگون سبب گردیده است که افزایش راندمان دستگاه های حرارتی در اولویت طراحان واحد های صنعتی قرار گیرد. کاربرد اصول انتقال حرارت در طراحی تجهیزات برای مقاصد خاص مهندسی اهمیت بسیار زیادی دارد و هدف از به کار گیری آن، تلاش برای رسیدن به هدف توسعه ی تولید برای سود دهی اقتصادی است که نهایتاً مسائل اقتصادی نقش اصلی را در طراحی و انتخاب تجهیزات دارند. مبدل های حرارتی وسایلی هستند که امکان انتقال انرژی گرمایی بین دو یا چند سیال در دماهای مختلف را فراهم میکنند [۷]

افزایش انتقال حرارت همیشه یکی از مسائل مهم و مورد بحث در صنعت بوده است. این افزایش انتقال حرارت در اکثر کاربردهای سرمایشی و گرمایشی، مخصوصاً در ابعاد کوچک، اخیراً بر

اهمیت است. روش های زیادی در مورد افزایش انتقال حرارت در این کاربردهای سرمایه‌ی و گرمایشی وجود دارد. برای افزایش انتقال حرارت می توان از تغییرات هندسه جریان، شرایط مرزی و افزایش هدایت حرارتی سیال استفاده کرد. به خاطر محدودیت های هندسه جریان و شرایط مرزی، بهترین گزینه برای محققان افزایش هدایت حرارتی سیال می باشد به همین علت این روش به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته شده است [۸]. سیالات معمولی که در انتقال حرارت مورد استفاده قرار می گیرند از قبیل آب، اتیلن گلیکول و روغن موتور دارای هدایت حرارتی پایین می باشند. در مقابل فلزات و اکسید آن ها دارای هدایت حرارتی بیشتری نسبت به این سیالات می باشند. بنابراین یک راه برای افزایش هدایت حرارتی سیالات مورد استفاده در انتقال حرارت، اضافه کردن ذرات فلزی و اکسید آن ها در این سیالات می باشد. ایده ی قرار دادن ذرات کوچک درون سیال برای افزایش هدایت حرارتی برای اولین بار توسط ماکسول ارائه شده است. مدل هدایت حرارتی سیال که به وسیله ماکسول ارائه شده است برای سیالاتی که محتوی ذراتی با اندازه میکرومتر و بزرگتر می باشند موثر است [۷، ۱].

محققان تاثیرات دما، اندازه نانوذرات و نسبت حجمی نانوذرات را روی هدایت حرارتی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بررسی کردند. آنها نتایج به دست آمده را با حل عددی مقایسه کرده و ارتباط معنی داری را نیز بین هدایت حرارتی نانو سیال و دما، اندازه نانو ذرات و نسبت حجمی نانوذرات ارائه دادند. مسودا و همکاران و نیز خوان و لی نشان دادند که با افزودن ۱-۵ درصد حجمی نانوذرات معلق هدایت حرارتی تا بیش از ۲۰٪ افزایش میابد. ایسمن و همکاران در آزمایشگاه ملی آرگون با یک سری آزمایشات ساده نشان دادند که میتوان با به کار بردن ۵ درصد حجمی نانو ذره در سیال پایه آب به افزایش ۶۰ درصدی در هدایت حرارتی رسید. کیهانی و همکاران به بررسی انتقال حرارت جابه جایی و افت فشار نانوسیال آب-آلومینا و تیتانیوم -آب در محدوده ی گسترده ای از غلظت ۰٫۱ تا ۲ درصد در سیال پایه آب درون لوله مستقیم با شار حرارتی ثابت پرداختند. نتایج وی نشان دهنده افزایش ۲۶ درصدی برای آب -آلومینا و افزایش ۸ درصدی برای تیتانیوم-آب با غلظت ۲ درصد است. کیم و همکاران انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال آلومینا و کربنی در رژیم های جریان آشفته و آرام درون یک لوله تحت شار حرارتی ثابت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نیز افزایش قابل ملاحظه ای انتقال حرارت جابه جایی نسبت به سیال پایه را نشان می دهد. آنها همچنین نشان دادند که افزایش انتقال حرارت جا به جایی نانوسیال بسیار بیشتر از درصد افزایش هدایت حرارتی این سیالات است [۴].

فرضیات و مدلسازی

۱-۲ فرضیات مسئله

- ۱- از انتقال حرارت تشعشی صرف نظر شده است .
- ۲- حالت پایا در نظر گرفته شده است .
- ۳- مشخصات فیزیکی سیال ثابت در نظر گرفته شده است .
- ۴- جریان تراکم ناپذیر و سیال نیوتونی است و انتقال حرارت ویسکوز در نظر گرفته شده است .
- ۵- فقط انتقال حرارت اجباری در نظر گرفته شده است .
- ۶- نانو ذرات اندازه و شکل یکسان دارند .
- ۷- جریان آب و نانوسیال به صورت دو فازی در نظر گرفته شده است .
- ۸- هندسه شکل به صورت سه بعدی وارد نرم افزار فلوئنت شده است .

۲-۲ مدل سازی جریان و انتقال حرارت نانو سیال

در این پژوهش جریان مدل $k-E$ استاندارد و معادلات این پژوهش ساده ترین مدلی های اغتشاشی بوده که نسبتا کامل هستند که مدلی دو معادله ای هستند چون حل دو معادله انتقال به صورت جداگانه باعث می شود که سرعت اغتشاش و طول مشخصه به صورت مجزا تعیین شوند. مدل $k-E$ استاندارد در این گروه از مدل های اغتشاشی قرار دارد و جزء یکی از قدرتمند ترین مدل های مغشوش برای مسائل مهندسی محسوب می شود. مدل $k-E$ استاندارد مدل نیمه تجربی است و معادلات آن بر اساس مشاهدات تجربی و ملاحظات پدیده شناسی به وجود آمده اند در حل عددی از مدل $k-E$ استاندارد در این پروژه استفاده شده است زیرا هم حجم CPU مورد نیاز آن در دسترس و مناسب است و هم دقت و سرعت انجام محاسبات آن قابل قبول است [۳]. لذا در ادامه این تحقیق و معادلات و توضیحات مربوط به این مدل

آورده خواهد شد معادلات با فرضیات گفته شده و انتخاب مدل اغتشاشی مناسب به صورت معادلات ۱ تا ۶ خواهد بود [۲، ۹]:

(۱)

$$(\nabla \cdot \vec{v}) = 0$$

(۲)

$$k = \overline{u_1 u_1} / 2$$

(۳)

$$\varepsilon = \vartheta \overline{\frac{\partial u_1}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_1} \right)}$$

(۴)

$$\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_t} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu_i / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} - \rho \varepsilon$$

(۵)

$$\rho U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{vs} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu_t / \sigma_s) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\} - C_{vs} \rho \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{\vartheta} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum h_i \vec{J}_i + (\bar{\tau} \cdot \vec{\vartheta})) + S_h$$

محاسبه چگالی، ضریب انبساط حرارتی و گرمای ویژه نانو سیال ها آسان بوده و می توان آن را بر اساس قوانین اساسی مخلوط ها به دست آورد که مطابقت خوبی با داده های تجربی دارد و میتوان از رابطه زیر برای محاسبه گرمای ویژه نانوسیال نیز آسان است. و از رابطه زیر به دست می آید [۲]:

(۷)

$$\rho_{nf} = (1 - x) \rho_f + x \rho_p$$

(۸)

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - x) (\rho C_p)_f + x (\rho C_p)_p$$

گرانروی اندازه‌ی مقاومت یک سیال در برابر تغییر شکل ناشی از تنش های طولی یا تنش های برشی می باشد. به علت ساختار سوسپانسیونی نانو سیالات گرانروی اهمیت ویژه ای در

طراحی سیستم های نانوسیالی بازی میکند به طوری که اثرات مستقیم آن بر افت فشار در جریان های جابه جایی بسیار مشهود است. بنابراین برای استفاده از نانوسیالات در کاربرد های عملی، مقدار افزایش گرانشی نانوسیالات نسبت به سیال پایه آن باید به طور کامل مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد تعداد از آزمایشگاهی کمی بر روی ویسکوزیته نانو سیال انجام شده است و مدل در دسترس معینی برای پیش بینی ویسکوزیته نانو سیال وجود ندارد مدل اینستین اغلب برای پیش بینی ویسکوزیته سیال های دو فازی با غلظت کم، معمولا کمتر از ۱٪ مورد استفاده قرار می گیرد. معادله ویسکوزیته نانو سیالات را نیز می توان با استفاده از معادلات موجود برای مخلوط ها به دست آورد که به صورت معادله زیر است این معادله توسط رینکمن ارائه شده است [۳].

(۹)

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_f}{(1-x)^{2.5}}$$

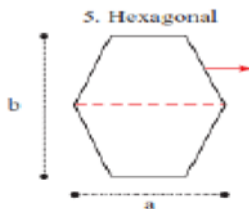
در حال حاضر هیچ مدل تئوری دقیقی برای محاسبه هدایت گرمایی وجود ندارد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از تحقیقات بسیار زیاد مشخص شده است که هدایت گرمایی نانو سیال ها به عوامل زیادی همچون هدایت گرمایی، سیال پایه، هدایت گرمایی ذرات نانو، غلظت نانوسیال و شکل نانو ذرات و دما بستگی دارد. برای مخلوط های مایع-جامد(دوفازی) مطالعات زیادی بر اساس مدل ماکسول انجام شده است. مدل ماکسول برای محاسبه هدایت گرمایی مخلوط جامد-مایع با اندازه ذره بسیار کوچک و برای غلظت های کم مطابقت خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد. این معادله به صورت زیر می باشد [۲]:

(۱۰)

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)x}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)x} k_f$$

۳-۲- مش بندی

همان طور که در صورت سوال عنوان شده است شکل مورد بررسی در این قسمت شش ضلعی منتظم می باشد اطلاعات داده شده در صورت زیر به شکل ۱ زیر است [۱۰]:



شکل ۱: شماتیک سطح مقطع میکروکانال

در شکل ۱، $a = 1 \times 10^{-3}$ متر و $b = 1.3334 \times 10^{-3}$ متر می باشد [۹] بعد از مش زنی خطوط حجم کلی را مش می زنیم. مش مورد استفاده برای این حجم دارای ۱۰۰۰۰ المان از نوع Hex می باشد.

۴-۲- شبیه سازی جریان دو فازی در فلوئنت

برای به دست آوردن سرعت با استفاده از اعداد بدون بعد رینولدز و ویژگی های فیزیکی آب ($\rho_{H_2O} = 998.2 \text{ kg/m}^3$ و $\mu = 0.001003 \text{ Pa.s}$) سرعت های مورد بررسی در این بازه از اعداد رینولدز به صورت جدول ۱ می باشد همچنین برای به دست آوردن ضریب توربولنسی و یا Turbulence intensity از رابطه ۱۱ استفاده می شود که نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.

$$(11)$$

$$Turbulence\ intensity = 0.16 \times Re^{-\frac{1}{8}}$$

نشریه تحقیقات کاربردی در شیمی

سال ۱، شماره ۳ (مسلسل: ۳)، پاییز ۱۳۹۹

<https://science-journals.ir>

جدول ۱: محاسبه ی سرعت ورودی به کانال در اعداد رینولدز مختلف

Re	Velocity(m/s)	Tur-In(%)	Re	Velocity(m/s)	Tur-In(%)
۳۰۰۰	۲,۶۷۰,۹۴	۸۸۱۳۸,۵	۱۰۰۰۰	۸,۹۰۳,۱	۰,۵۹۶۴,۵
۴۰۰۰	۳,۵۶۱۲,۵۶	۶۷۳۶,۵	۱۱۰۰۰	۹,۷۹۳,۴	۹۹۹۷,۴
۵۰۰۰	۴,۴۵۱,۵۱	۵۱۷۵۸۱,۵	۱۲۰۰۰	۱۰,۶۸۳,۷	۹۴۵۶,۴
۶۰۰۰	۵,۳۴۱,۸۸	۳۹۳۲,۵	۱۳۰۰۰	۱۱,۵۷۴	۹۸۶۴,۴
۷۰۰۰	۶,۲۳۲,۲	۲۹,۵	۱۴۰۰۰	۱۲,۴۶۴,۴	۸۵۱,۴
۸۰۰۰	۷,۱۲۲,۵	۲۰۲۷,۵	۱۵۰۰۰	۱۳,۳۵۴,۷	۸۰۹۸,۴
۹۰۰۰	۸,۰۱۲,۸	۱۲۶,۵			

خواص فیزیکی نانوذره TiO_2 در جدول ۲ زیر ارائه شده است [۱۱]:

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی نانوذره TiO_2

چگالی (Kg/m^3)	قطر متوسط (nm)	ظرفیت گرمایی ویژه	رسانندگی گرمایی
۴۱۵۷	۲۰	۷۱۰	۸,۴

از آنجا که ویسکوزیته برای مواد جامد تعریف نشده است اما نانوذرات با سیال در حال حرکت هستند بنابراین برای آن ها نیز ویسکوزیته تعریف شده و از رابطه ۱۲ محاسبه می شود [۳]:

(۱۲)

$$K_{nf} = K_f \times \frac{K_p + \gamma K_f + \gamma \varphi (K_p - K_f)}{K_p + \gamma K_f - \varphi (K_p - K_f)}$$

نتایج

نتایج حاصل از شبیه سازی عبارت اند از دمای میانگین دیواره، دمای بالک، ضریب انتقال حرارت جابه جایی که با محاسبه ی ضریب انتقال حرارت رسانش نانوسیال و طبق روابط حاکم بر انتقال حرارت میتوان عدد بی بعد ناسلت را محاسبه کرد. در جداول ۳-۵ این نتایج ذکر شده است. همچنین ناسلت حاصل از شبیه سازی با ناسلت نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده که میزان خطای کمتر از ۵ درصد صحت شبیه سازی را نتیجه می دهد.

۱-۳- مقدار یک درصد وزنی TiO_2

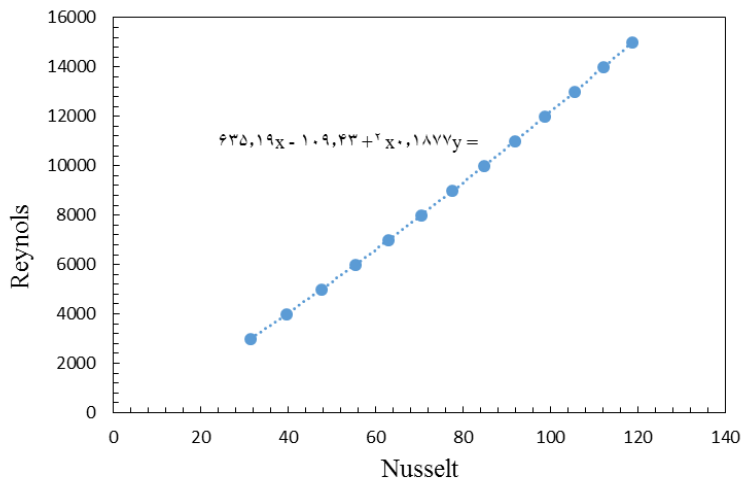
نشریه تحقیقات کاربردی در شیمی

سال ۱، شماره ۳ (مسلسل: ۳)، پاییز ۱۳۹۹

<https://science-journals.ir>

جدول ۳: نتایج حاصل از شبیه سازی نانو سیال ۱٪ وزنی و بررسی خطا

Re	Tw	Tb	H	Nu _{simulation}	Nu _{exp}	% error
۳۰۰۰	۳۰۰/۳۷۵۱	۳۰۰/۰۸۲۶	۱۷۰۹۴/۰۲	۳۱/۳۸۴۹۲	۳۱/۱۴۹۳۸	۰/۰۷۵۶۲
۴۰۰۰	۳۰۰/۲۹۳	۳۰۰/۰۶۱۹	۲۱۶۳۵/۶۶	۳۹/۷۲۳۴۴	۳۹/۲۱۰۳۲	۰/۰۱۳۰۸۷
۵۰۰۰	۳۰۰/۲۴۲۱	۳۰۰/۰۴۹۵	۲۵۹۶۰/۵۴	۴۷/۶۶۴۰۱	۴۶/۸۷۳۶	۰/۰۱۶۸۶۲
۶۰۰۰	۳۰۰/۲۰۶۸	۳۰۰/۰۴۱۳	۳۰۲۱۱/۴۸	۵۵/۴۶۸۸۱	۵۴/۲۳۴۲۱	۰/۰۲۲۷۶۴
۷۰۰۰	۳۰۰/۱۸۱۱	۳۰۰/۰۳۵۴	۳۴۳۱۷/۰۹	۶۳/۰۰۶۷۸	۶۱/۳۵۲۲۹	۰/۰۲۶۹۶۷
۸۰۰۰	۳۰۰/۱۶۱۴	۳۰۰/۰۳۱	۳۸۳۴۳/۵۶	۷۰/۳۹۹۴۵	۶۸/۲۶۹۱۲	۰/۰۳۱۲۰۵
۹۰۰۰	۳۰۰/۱۴۵۸	۳۰۰/۰۲۷۵	۴۲۲۶۵/۴۲	۷۷/۶۰۰۰۷	۷۵/۰۱۴۷	۰/۰۳۴۴۶۵
۱۰۰۰۰	۳۰۰/۱۳۳۱	۳۰۰/۰۲۴۸	۴۶۱۶۸/۰۵	۸۴/۷۶۵۳۵	۸۱/۶۱۱۶۸	۰/۰۳۸۶۴۲
۱۱۰۰۰	۳۰۰/۱۲۲۵	۳۰۰/۰۲۲۵	۵۰۰۰۰	۹۱/۸۰۰۸۸	۸۸/۰۷۷۸۱	۰/۰۴۲۲۷
۱۲۰۰۰	۳۰۰/۱۱۲۶	۳۰۰/۰۲۰۷	۵۳۸۲۱/۳۱	۹۸/۸۱۶۸۸	۹۴/۴۲۷۲۵	۰/۰۴۶۴۸۷
۱۳۰۰۰	۳۰۰/۱۰۶۱	۳۰۰/۰۱۹۱	۵۷۴۷۱/۲۶	۱۰۵/۵۱۸۳	۱۰۰/۶۷۱۶	۰/۰۴۸۱۴۳
۱۴۰۰۰	۳۰۰/۰۹۹۶	۳۰۰/۰۱۷۷	۶۱۰۵۰/۰۶	۱۱۲/۰۸۹	۱۰۶/۸۲۰۵	۰/۰۴۹۳۲۱
۱۵۰۰۰	۳۰۰/۰۹۳۸	۳۰۰/۰۱۶۵	۶۴۶۸۳/۰۵	۱۱۸/۷۵۹۲	۱۱۲/۸۸۲۲	۰/۰۵۲۰۶۴



شکل ۲: نمودار Reynolds-Nusselt در نانوسیال ۱٪ وزنی

۲-۳- مقدار سه درصد وزنی TiO_2

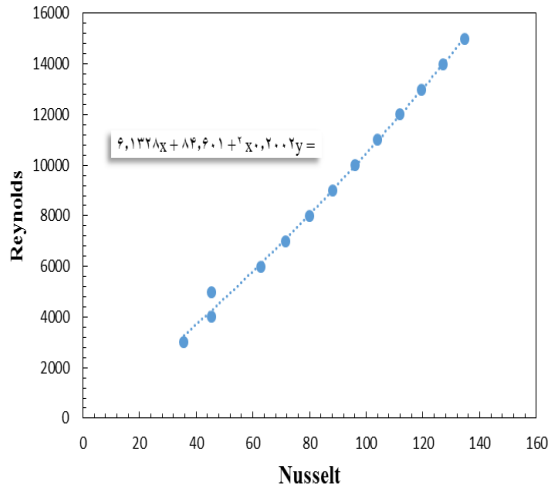
نشریه تحقیقات کاربردی در شیمی

سال ۱، شماره ۳ (مسلسل: ۳)، پاییز ۱۳۹۹

<https://science-journals.ir>

جدول ۴: نتایج حاصل از شبیه سازی نانوسیال ۳٪ وزنی و بررسی خطا

Re	Tw	Tb	H	Nu _{simulation}	Nu _{exp}	% error
۳۰۰۰	۳۰۰/۳۲۶۷	۳۰۰/۰۸۱۶	۲۰۳۹۹/۸۴	۳۵/۶۹۶۶۳	۳۱/۶۴۱۹۱	۰/۱۲۸۱۴۴
۴۰۰۰	۳۰۰/۲۵۵۳	۳۰۰/۰۶۲۳	۲۵۹۰۶/۷۴	۴۵/۳۳۲۸۷	۳۹/۸۳۰۳۱	۰/۱۳۸۱۵
۵۰۰۰	۳۰۰/۲۴۲۱	۳۰۰/۰۴۹۵	۲۵۹۶۰/۵۴	۴۵/۴۲۷۰۲	۴۷/۶۱۴۷۷	-۰/۰۴۵۹۵
۶۰۰۰	۳۰۰/۱۸۰۲	۳۰۰/۰۴۱۲	۳۵۹۵۸/۲۹	۶۲/۹۲۱۵۷	۵۵/۰۹۱۷۶	۰/۱۴۲۱۲۳
۷۰۰۰	۳۰۰/۱۵۷۷	۳۰۰/۰۳۵۶	۴۰۹۵۰/۰۴	۷۱/۶۵۶۳۸	۶۲/۳۲۲۳۹	۰/۱۴۹۷۶۹
۸۰۰۰	۳۰۰/۱۴۰۶	۳۰۰/۰۳۱۱	۴۵۶۶۲/۱	۷۹/۹۰۱۷۷	۶۹/۳۴۸۵۹	۰/۱۵۲۱۷۶
۹۰۰۰	۳۰۰/۱۱۲۷	۳۰۰/۰۲۷۷	۵۰۳۵۲/۴۷	۸۸/۱۰۹۲۱	۷۶/۲۰۰۸۳	۰/۱۵۶۲۷۶
۱۰۰۰۰	۳۰۰/۱۱۵۹	۳۰۰/۰۲۴۹	۵۴۹۴۵/۰۵	۹۶/۱۴۵۵۴	۸۲/۹۰۲۱۳	۰/۱۵۹۷۴۸
۱۱۰۰۰	۳۰۰/۱۰۶۸	۳۰۰/۰۲۲۶	۵۹۳۸۲/۴۲	۱۰۲/۹۱۰۳	۸۹/۴۷۰۴۹	۰/۱۶۱۳۹۱
۱۲۰۰۰	۳۰۰/۰۹۹	۳۰۰/۰۲۰۸	۶۳۹۳۸/۶۲	۱۱۱/۸۸۲۹	۹۵/۹۲۰۳۳	۰/۱۶۶۴۱۵
۱۳۰۰۰	۳۰۰/۰۹۳۴	۳۰۰/۰۱۹۲	۶۸۳۰۶/۰۱	۱۱۹/۵۲۵۲	۱۰۲/۲۶۳۴	۰/۱۶۸۷۹۷
۱۴۰۰۰	۳۰۰/۰۸۶۶	۳۰۰/۰۱۷۸	۷۲۶۷۴/۴۲	۱۲۷/۱۶۹۲	۱۰۸/۵۰۹۶	۰/۱۷۱۹۶۳
۱۵۰۰۰	۳۰۰/۰۸۱۶	۳۰۰/۰۱۶۶	۷۶۹۲۳/۰۸	۱۳۴/۶۰۳۸	۱۱۴/۶۶۷۱	۰/۱۷۳۸۶۶



شکل ۳: نمودار Reynolds-Nusselt در نانوسیال ۳٪ وزنی

۳-۳- مقدار پنج درصد وزنی TiO_2

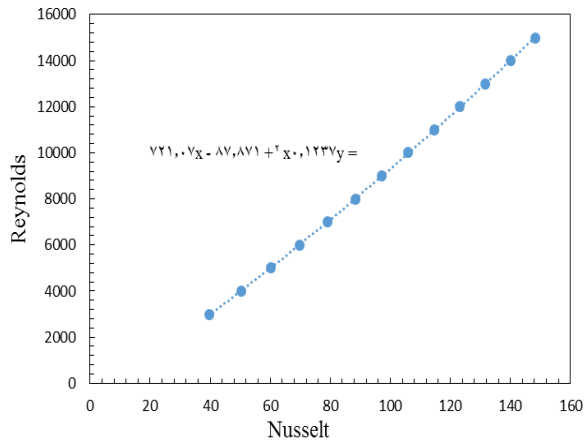
نشریه تحقیقات کاربردی در شیمی

سال ۱، شماره ۳ (مسلسل: ۳)، پاییز ۱۳۹۹

<https://science-journals.ir>

جدول ۵: نتایج حاصل از شبیه سازی نانو سیال ۵٪ وزنی و بررسی خطا

Re	Tw	Tb	h	Nu simulation	Nu exp	% error
۳۰۰	۳۰۰/۲۹۲۳	۳۰۰/۰۸۲۱	۲۳۷۸۶/۸۷	۳۹/۶۹۹۸۳	۳۴/۹۴۸۲	۰/۱۳۵۹۶۲
۴۰۰	۳۰۰/۲۲۸۴	۳۰۰/۰۶۲۶	۳۰۱۵۶/۸۲	۵۰/۳۳۱۱۵	۴۳/۹۹۲۲۱	۰/۱۴۴۰۹۲
۵۰۰	۳۰۰/۱۸۸۵	۳۰۰/۰۵۰۱	۳۶۱۲۷/۱۷	۶۰/۲۹۵۵۶	۵۲/۵۹۰۰۸	۰/۱۴۶۵۲
۶۰۰	۳۰۰/۱۶۱۲	۳۰۰/۰۴۱۷	۴۱۸۴۱	۶۹/۸۳۱۸۴	۶۰/۸۴۸۳۵	۰/۱۴۷۶۳۷
۷۰۰	۳۰۰/۱۴۱۲	۳۰۰/۰۳۵۸	۴۷۴۳۸/۳۳	۷۹/۱۷۳۶۷	۶۸/۸۳۴۵۲	۰/۱۵۰۲۰۳
۸۰۰	۳۰۰/۱۲۵۸	۳۰۰/۰۳۱۳	۵۲۹۱۰/۰۵	۸۸/۳۰۵۸۷	۷۶/۵۹۴۹	۰/۱۵۲۸۹۵
۹۰۰	۳۰۰/۱۱۳۶	۳۰۰/۰۲۷۸	۵۸۲۷۵/۰۶	۹۷/۲۵۹۹۶	۸۴/۱۶۳۱۲	۰/۱۵۵۶۱۳
۱۰۰۰	۳۰۰/۱۰۳۸	۳۰۰/۰۲۵	۶۳۴۵۱/۷۸	۱۰۵/۸۹۹۸	۹۱/۵۶۴۶۵	۰/۱۵۶۵۵۸
۱۱۰۰	۳۰۰/۰۹۵۵	۳۰۰/۰۲۲۸	۶۸۷۷۵/۷۹	۱۱۴/۷۸۵۵	۹۸/۸۱۹۳۵	۰/۱۶۱۵۶۹
۱۲۰۰	۳۰۰/۰۸۸۶	۳۰۰/۰۲۰۹	۷۳۸۵۵/۲۴	۱۲۳/۲۶۳	۱۰۵/۹۴۳۱	۰/۱۶۳۴۸۳
۱۳۰۰	۳۰۰/۰۸۲۷	۳۰۰/۰۱۹۳	۷۸۸۶۴/۳۵	۱۳۱/۶۲۳۱	۱۱۲/۹۴۹	۰/۱۶۵۳۳۲
۱۴۰۰	۳۰۰/۰۷۷۵	۳۰۰/۰۱۷۹	۸۳۸۹۲/۶۲	۱۴۰/۰۱۵۲	۱۱۹/۸۴۷۹	۰/۱۶۸۲۷۴
۱۵۰۰	۳۰۰/۰۷۳	۳۰۰/۰۱۶۷	۸۸۸۰۹/۹۵	۱۴۸/۲۲۲۱	۱۲۶/۶۴۸۷	۰/۱۷۰۳۴



شکل ۴: نمودار Reynolds-Nusselt در نانوسیال ۵٪ وزنی

نتیجه گیری

با توجه به اهمیت مبدل های حرارتی لوله ای در صنایع با فشار نسبتا بالا متاسفانه به دلیل پایین بودن نرخ انتقال حرارت در مبدل های لوله ای استفاده از این مبدل ها را علی رغم ساختمان ساده و هم چنین تعمیر و نگهداری راحت تر و قابلیت تعویض و افزایش و یا کاهش ظرفیت با محدودیت مواجه نموده است لذا در این پروژه تا راهکاری جهت افزایش انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال مذکور برای این نوع مبدل حرارتی بررسی گردد به همین منظور نتایج بر حسب به دست آوردن عدد ناسلت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که اضافه کردن نانو سیال به میزان و از هر نوعی سبب بهبود انتقال حرارت در مقایسه با آب

خالص شده است اما با افزایش میزان نانو ذره در سیال پایه نیز این انتقال حرارت به التبه افزایش می یابد. در کل قطر متوسط ذره و ضریب انتقال حرارت هدایتی آن تاثیر گذاری

چشم گیری در انتقال حرارت دارد یعنی هرچه قطر متوسط نانو ذره بیشتر و ضریب هدایتی آن بیشتر باشد در نتیجه انتقال حرارت نیز بیشتر خواهد شد.

منابع و مآخذ

- [۱] Ciloglu, D. and A. Bolukbasi, *The quenching behavior of aqueous nanofluids around rods with high temperature*. Nuclear Engineering and Design, ۲۰۱۱. ۲۴۱(۷): p. ۲۵۱۹-۲۵۲۷
- [۲] Sasmito, A.P., J.C. Kurnia, and A.S. Mujumdar, Numerical evaluation of laminar heat transfer enhancement in nanofluid flow in coiled square tubes. Nanoscale research letters, ۲۰۱۱. ۶(۱): p. ۱-۱۴
- [۳] Ding, M., C. Liu, and Z. Rao, *Experimental investigation on heat transfer characteristic of TiO_2-H_2O nanofluid in microchannel for thermal energy storage*. Applied Thermal Engineering, ۲۰۱۹. ۱۶۰: p. ۱۱۴۰۲۴.
- [۴] Eiamsa-Ard, S., K. Kiatkittipong, and W. Jedsadaratanachai, *Heat transfer enhancement of TiO_2 /water nanofluid in a heat exchanger tube equipped with overlapped dual twisted-tapes*. Engineering Science and Technology, an International Journal, ۲۰۱۵. ۱۸(۳): p. ۳۳۶-۳۵۰.
- [۵] Ardekani, A.M., V. Kalantar, and M. Heyhat, *Experimental study on heat transfer enhancement of nanofluid flow through helical tubes*. Advanced Powder Technology, ۲۰۱۹. ۳۰(۹): p. ۱۸۱۵-۱۸۲۲.
- [۶] Ajeel, R.K., W.-I. Salim, and K. Hasnan, *Design*

characteristics of symmetrical semicircle-corrugated channel on heat transfer enhancement with nanofluid. International Journal of Mechanical Sciences, ۲۰۱۹. ۱۵۱: p. ۲۳۶-۲۵۰.

- [۷] Xuan, Y. and Q. Li, *Heat transfer enhancement of nanofluids.* International Journal of heat and fluid flow, ۲۰۰۰. ۲۱(۱): p. ۵۸-۶۴.
- [۸] Xia, G., et al., *The characteristics of convective heat transfer in microchannel heat sinks using Al_2O_3 and TiO_2 nanofluids.* International Communications in Heat and Mass Transfer, ۲۰۱۶. ۷۶: p. ۲۵۶-۲۶۴.
- [۹] YILMAZ, U.B. and O. TURGUT, *A Comparison of Circular Duct and Real Hexagonal Duct Results Using Hydraulic Diameter.* Politeknik Dergisi: p. ۱-۱.
- [۱۰] Emami, S., et al., *Evaluation of Nusselt number and pressure drop in hexagonal and rectangular micro-channels in the presence of nano-fluids.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, ۲۰۲۰. ۲۳۴(۶): p. ۶۶۵-۶۷۲.
- [۱۱] Martínez, V.A., et al., *Numerical study of TiO_2 -based nanofluids flow in microchannel heat sinks: Effect of the Reynolds number and the microchannel height.* Applied Thermal Engineering, ۲۰۱۹. ۱۶۱: p. ۱۱۴۱۳۰.