

شبیه‌سازی جریان تک فازی و دوفازی نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم در مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای جریان مخالف و بررسی عملکرد انتقال گرما و افت فشار در آن

رستم اکبری کنگرلویی*

مریی، گروه مکانیک، دانشکده تبریز، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تبریز، ایران
دانشجوی دکتری مکانیک تبدیل انرژی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ایران

مجید عباسعلیزاده رنجبری

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

سید مهدی پسته‌ای

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

مهدی اسمعیلی سنگری

دانشجوی دکتری مکانیک تبدیل انرژی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در این مطالعه، شبیه‌سازی نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم در یک مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای جریان مخالف با شار گرمایی ثابت توسط نرم‌افزار fluent انجام شده است. هدف این مطالعه مقایسه شبیه‌سازی تک فازی و دوفازی مدل مخلوط با نتایج تجربی برای به دست آوردن بهترین مدل شبیه‌سازی است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که مقدار عدد ناسلت و ضریب جابجایی به ازای کسر حجمی ۰/۲٪ در عدد رینولدز بالاتر از ۸۰۰۰، مدل تک فازی نسبت به مدل دوفازی مخلوط به نتایج تجربی نزدیک‌تر است ولی در رینولدزهای پایین‌تر از ۸۰۰۰ مدل دوفازی مخلوط مطابقت بهتری با نتایج تجربی دارند. مقایسه مقدار افت فشارها نشان می‌دهد هرچقدر سرعت نانوسیال افزایش یابد اختلاف بین شبیه‌سازی و نتایج تجربی بیشتر می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد بیشترین مقدار افزایش عدد ناسلت و ضریب جابجایی در اعداد رینولدز بالاتر است و نشان‌دهنده این است که در رینولدزهای بالا افزایش کسر حجمی تأثیر بیشتری دارد که یکی از دلایل آن می‌تواند همگن‌تر بودن نانوسیال در رینولدزهای بالاتر به دلیل اغتشاش بیشتر باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت که نتایج شبیه‌سازی مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال، مبادله‌کن گرمایی، انتقال گرما، اکسید تیتانیوم.

simulation of Single-phase and two-phase flow of water-titanium oxide nanofluids in a double-tube counter flow heat exchanger and Investigation of heat transfer and pressure drop

R. Akbari Kangarloui

Department of Mechanical Engineering, faculty of Tabriz, Technical and vocational University (TVU), Tabriz, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of urmia, Urmia, iran

M. Abbasalizadeh Ranjbari

Department of Mechanical Engineering, University of urmia, urmia, Iran

S. M. Pestei

Department of Mechanical Engineering, University of urmia, Urmia, Iran

M. Esmaeilei Sangari

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

In this study, the simulation of water-titanium oxide nanofluid has been done in a double-tube counter flow heat exchanger with constant heat flux by Fluent software. The main purpose of this study is to compare single-phase and two-phase mixed model with experimental results to obtain the best simulation model. The results show that The Nusselt number and Heat transfer coefficient for a 0.2% volume fraction for Reynolds number more than 8000, the single-phase model is closer to the experimental results than the two-phase model, but for Reynolds lower than 8,000, two-phase mixed models are in good agreement with experimental results. The comparison of the dropping pressure shows that the faster the speed of Nanofluid is increased, the greater is the difference between the simulation and the experimental results. The results show that the highest increase in Nusselt number and Heat transfer coefficient is seen in higher Reynolds numbers, which indicates that in the high Reynolds numbers, the increase in volume fraction is more effective; one of the reasons is that homogeneity of Nanofluid in higher Reynolds is due to more turbulence. In general, it can be said that the results of the simulation are in good agreement with experimental results.

Keywords: Nanofluid, Heat Exchanger, Heat Transfer, Titanium Oxide.

بستگی به ویژگی‌های فیزیکی از قبیل رسانایی گرمایی، لزجت، چگالی و ظرفیت گرمایی دارد. به همین دلیل انواع مختلفی از ذرات جامد شامل ذرات فلزی و اکسید فلزات برای تشکیل سوسپانسیون به سیالات افزوده می‌شوند تا عملکرد گرمایی آن‌ها را بهبود بخشد [۱]. در ضمن به دلیل رسانایی گرمایی بالای فلزات، پیشرفت‌های اخیر در معلق

۱- مقدمه

افزایش انتقال گرما و نیز سیالات انتقال دهنده گرما موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه‌های اخیر بوده است. سیالات شرایط انتقال گرما را برای تبادل انرژی در یک سیستم مهیا می‌کنند و اثرات آن‌ها

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ro.akbari@urmia.ac.ir

اکسید تیتانیوم در سیال آب بر میزان انتقال گرمای جابجایی و افت فشار بررسی شده و از نتایج حاصل، روش مناسب جهت شبیه‌سازی نانوسیال‌ها پیشنهاد می‌شود. در این مطالعه برای حل عددی جریان نانوسیال از نرم‌افزار Ansys fluent استفاده شده است. در جریان دوفازی از مدل مخلوط فازها استفاده شده که در این حالت مخلوط فازها به‌عنوان یک محیط پیوسته در هم نفوذکننده در نظر گرفته شده و از سرعت‌های نسبی جهت تشریح فازهای پراکنده استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- بیان مسئله و هندسه مبادله‌کن گرمایی

در این مطالعه یک مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای جریان مخالف که نانوسیال سرد از داخل لوله و جریان آب گرم در قسمت حلقوی جریان دارد، مورد بررسی قرار گرفته است. لوله داخلی از لوله‌ی مسی مسطح با قطر بیرونی ۹/۵۳ میلی‌متر و قطر داخلی ۸/۱۳ میلی‌متر ساخته شده است، درحالی‌که جنس لوله خارجی PVC بوده و دارای قطر بیرونی ۳۳/۸ میلی‌متر و قطر داخلی ۲۷/۸ میلی‌متر است. نانوسیال با دمای ۲۵ درجه سلسیوس با رینولدزهای متفاوت و نیز کسر حجمی‌های مختلف در نظر گرفته شده و آب گرم با دبی ۳ لیتر بر دقیقه و با دمای ۳۵ درجه سلسیوس در قسمت حلقوی جریان دارد. نانو ذرات اکسید تیتانیوم به قطر ۲۱ نانومتر انتخاب شده و خواص فیزیکی نانو ذرات اکسید تیتانیوم [۱۹] و آب به‌صورت جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی نانو ذره اکسید تیتانیوم [۱۹] و آب

لزجت	رسانایی گرمایی	ظرفیت گرمایی	چگالی	آب
۰/۰۰۱۰۰۳	۰/۶	۴۱۸۲	۹۹۸/۲	
	۸/۴	۷۱۰	۳۹۰۰	اکسید تیتانیوم

۲-۲- معادلات حاکم

در کار حاضر از مدل تک‌فازی و مدل چند فازی مخلوط برای حل جریان نانوسیال استفاده شده است. در حالت تک فازی معادلات حاکم همانند جریان سیالات متداول است. برای جریان پایا که خواص فیزیکی سیال تابع دما است، معادله بقای جرم، بقا مومنتم و انرژی برای جریان سیالات آشفته به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۰]:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

معادله بقای مومنتم:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (2)$$

معادله بقای انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j c_p T - k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

ساختن ذرات فوق‌العاده ریز جامد در سیالات به‌عنوان راهبردی جدید در عملیات انتقال گرما مطرح شده است [۲]. نانو ذرات از جنس فلز و یا اکسید فلزات و اغلب کروی شکل و یا استوانه‌ای هستند که عملکرد گرمایی سیالات پایه را افزایش می‌دهند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهند که استفاده از نانو سیالات سبب افزایش رسانایی گرمایی و ضریب انتقال گرمای جابجایی نسبت به سیالات پایه می‌شود [۳ و ۴]. لی و همکاران [۵] با استفاده از نانوسیال‌های سرامیکی اکسید شامل نانو ذرات CuO با قطر متوسط ۳۵ نانومتر در اتیلن گلیکول افزایش رسانایی گرمایی نانوسیال را حدود ۲۰ درصد در غلظت حجمی ۴ درصد گزارش کرده‌اند، درحالی‌که با استفاده از ذرات بزرگ‌تر با قطر متوسط ۴۰ نانومتر افزایش رسانایی گرمایی نانوسیال تا ۱۰ درصد گزارش کرده‌اند. توسط آقایی و همکاران [۶] با استفاده از نانوسیال آب-Al₂O₃ با ذرات با قطر ۲۰ نانومتر در کسر حجمی ۰/۱ تا ۰/۳ درصد افزایش رسانایی گرمایی با ۱۲٪ گزارش شده است. ریا و همکاران [۷] انتقال گرمای جابجایی لایه‌ای و افت فشار برای نانوسیال‌های آلومینا-آب و زیرکونیا-آب در یک حلقه جریان با یک لوله گرم عمودی بررسی کرده‌اند. در این گزارش برای نانوسیال آلومینا با کسر حجمی ۶٪، ضریب انتقال گرما در منطقه ورودی و در منطقه کاملاً توسعه‌یافته به ترتیب ۱۷٪ و ۲۷٪ افزایش یافته است. ون و همکاران [۸] به‌طور تجربی نشان دادند که استفاده از نانوسیال آب-Al₂O₃ باعث افزایش انتقال گرما در رژیم جریان لایه‌ای می‌شود. چندراسکار و همکاران [۹] جزئیات مکانیزم انتقال گرما را در نانوسیال‌ها بررسی کردند. آن‌ها مکانیسم‌های مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند که به افزایش خواص انتقال گرما نانوسیال‌ها کمک می‌کند. یکی از فاکتورهای مهم مؤثر بر رسانایی گرمایی نانوسیال حرکت براونی (حرکت تصادفی ذرات معلق در یک مایع ناشی از برخورد آن‌ها با اتم‌ها یا مولکول‌های سریع آن) است. هریس و همکاران [۱۰] با بررسی جریان لایه‌ای نانوسیال آب-Al₂O₃ داخل یک لوله دایره‌ای با دمای دیواره ثابت دریافتند که افزایش ضریب انتقال گرما نسبت به پیش‌بینی همبستگی انتقال گرما تک فاز بسیار بالاتر بود. آنوپ و همکاران [۱۱] اثر اندازه نانو ذرات آلومینیوم را بر روی انتقال گرما بررسی کردند و افزایش انتقال گرما با کاهش اندازه ذرات را مشاهده کردند. ارانی و همکاران [۱۲] اثر قطر بر عدد ناسلت و افت فشار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بیشترین افزایش ضریب انتقال گرما برای ذرات با قطر کوچک‌تر به دست می‌آید. برزگریان و همکاران [۱۴] در مبادله‌کن صفحه‌ای حداکثر افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی در کسر حجمی ۱۵٪ از نانو ذرات TiO₂ را در حدود ۲۳٫۷٪ به دست آوردند. شیروان و همکاران [۱۳] دریافتند که به ازای کسر حجمی ۳٪ Al₂O₃ با افزایش عدد رینولدز از ۵۰ به ۱۵۰ در لوله بیرونی مبادله‌کن دو لوله‌ای مقدار عدد ناسلت حدود ۵۷٫۷٪ افزایش می‌یابد. بعلاوه، برخی از محققان دیگر افزایش انتقال گرما در اثر افزوده شدن نانو ذرات در سیال پایه را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۸-۱۵].

بر اساس مطالعات انجام‌شده نظر به اینکه جریان نانوسیال اکسید تیتانیوم در سیال آب به‌صورت جریان دوفازی مدل مخلوط شبیه‌سازی نشده است، بنابراین در این پژوهش شبیه‌سازی عددی جریان تک فازی و نیز جریان دوفازی مدل مخلوط با نتایج تجربی ونگویس و همکاران [۱۹] مورد مقایسه قرار گرفته و تأثیر وجود نانو ذرات فلزی از جنس

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} d}{k_{nf}} \quad (14)$$

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} u_{nf} d}{\mu_{nf}} \quad (15)$$

۲-۳- خواص ترموفیزیکی نانوسیالات

با پیشرفت علم، تولید نانو ذرات از مواد گوناگون میسر شده است. یکی از ویژگی‌های مواد در ابعاد نانو، نسبت سطح به حجم بالای آن‌هاست که توانایی‌های خاصی به آن‌ها بخشیده است. دانشمندان و مهندسان سعی بر این دارند تا قوانین حاکم بر خواص ترموفیزیکی این سیالات را کشف کنند، لذا سازوکارهای جدید پیشنهاد کرده و مدل‌های غیرمعمولی را برای توضیح این رفتارها ارائه می‌دهند. رسانایی گرمایی نانوسیالات توجه اصلی را در نانوسیال به خود اختصاص داده است. هرچند برای سیالات ساکن این موضوع اهمیت زیادی دارد ولی ضریب انتقال گرما در سیالات جاری مهم‌ترین موضوع است. دیگر خواص مهم غیر از رسانایی گرمایی که بر ضریب انتقال گرما اثر می‌گذارد، عبارت‌اند از: چگالی، گرمای ویژه و لزجت نانوسیال. با فرض پراکندگی یکنواخت نانوذرات داخل سیال پایه، خواص گرمایی و فیزیکی نانوسیال به‌صورت زیر قابل محاسبه هستند:

چگالی نانوسیالات را معمولاً از رابطه‌ی پک و چو [۲۱] محاسبه می‌کنند.

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (16)$$

ϕ کسر حجمی نانو ذره است. ظرفیت گرمایی، لزجت و رسانایی گرمایی که ممکن است کاملاً با همین ویژگی‌ها در سیال خالص اولیه متفاوت باشد. برای سوسپانسیون‌های مایع بدون ذرات مصنوعی پارامتر ρC_p نانوسیال به این صورت نشان داده می‌شود [۲۲]:

$$\rho C_{p,nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (17)$$

به علت ساختار سوسپانسیونی نانوسیالات گرانشی اهمیت ویژه‌ای در طراحی سیستم‌های نانوسیالی بازی می‌کند به‌طوری‌که اثرات مستقیم آن بر افت فشار در جریان‌های جابجایی بسیار مشهود است؛ بنابراین برای استفاده از نانوسیالات در کاربردهای عملی، مقدار افزایش گرانشی نانوسیالات نسبت به سیال پایه آن باید به‌طور کامل مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. لزجت نانوسیال را می‌توان با رابطه‌های موجود برای ترکیب‌های دوفازی محاسبه نمود. درو و پاسمن [۲۳] فرمول معروف انیشتین را برای برآورد لزجت مؤثر μ_{eff} در نانوسیال شامل سوسپانسیون رقیقی از ذرات ریز سخت کروی با لزجت سیال پایه μ_f معرفی کردند:

$$\mu_{eff} = \mu_f (1 + 2.5\phi) \quad (18)$$

این رابطه به غلظت حجمی کم محدود است که معادله انیشتین را برینکمن [۲۴] برای کسر حجمی‌های بیشتر از ۲٪ گسترش داد:

$$\mu_{eff} = \mu_f \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (19)$$

رسانایی گرمایی مهم‌ترین پارامتر برای شناسایی پتانسیل سوسپانسیون مایع- نانوذرات برای افزایش انتقال گرما است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که رسانایی گرمایی نانوسیالات به نتیجه‌ی رسانایی گرمای سیال پایه و

جائیکه C_p ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت و k انرژی جنبشی جریان آشفته است.

جمله $\rho u_i u_j$ را تنش آشفتگی رینولدز می‌نامند و رابطه بوزینسک بر پایه این اصل بنا نهاده شده است که مؤلفه‌های تنش‌های رینولدز متناسب با گرادیان‌های سرعت متوسط می‌باشد، یعنی:

$$\overline{-\rho u_i u_j} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

شکل تراکم ناپذیر معادله بوزینسک به‌صورت زیر است:

$$-\rho u_i u_j = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

که در این معادله μ_t لزجت آشفتگی و S_{ij} تانسور نرخ کرنش متوسط می‌باشد. لزجت آشفته باید از یک مدل آشفتگی مناسب محاسبه شود. لزجت آشفته به‌صورت زیر است:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

در این پژوهش از مدل آشفتگی $k - \varepsilon RNG$ بصورت زیر استفاده شده است:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (7)$$

ε نرخ اضمحلال آشفتگی است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

جایی که G_k نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی است درحالی‌که $\rho \varepsilon$ نرخ اضمحلال آشفتگی است و G_k به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$G_k = (-\rho u_i u_j) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (9)$$

در حالت چند فازی با مدل مخلوط، فازها به‌عنوان یک محیط پیوسته‌ی در هم نفوذکننده در نظر گرفته شده و معادلات مومنوم، پیوستگی و انرژی برای مخلوط، معادلات کسر حجمی برای فازهای ثانویه حل و از سرعت‌های نسبی جهت تشریح فازهای پراکنده استفاده می‌شود.

در مبادله‌کن‌های گرمایی مقدار گرمای انتقال یافته بین یک دیواره و سیال توسط رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$Q = h A (T_w - T_b) \quad (10)$$

که در این رابطه T_w دمای دیواره و T_b دمای حجمی سیال است. A مساحت انتقال گرما و h ضریب انتقال گرما جابجایی است. از طرفی در یک مبادله‌کن گرمایی مقدار گرمای ازدست‌رفته در سیال گرم برابر مقدار گرمایی است که توسط سیال سرد دریافت می‌شود؛ بنابراین برای موازنه‌ی گرما در مبادله‌کن دو لوله‌ای می‌توان نوشت:

$$Q_h = m_h C_{p,h} (T_w - T_b)_h \quad (11)$$

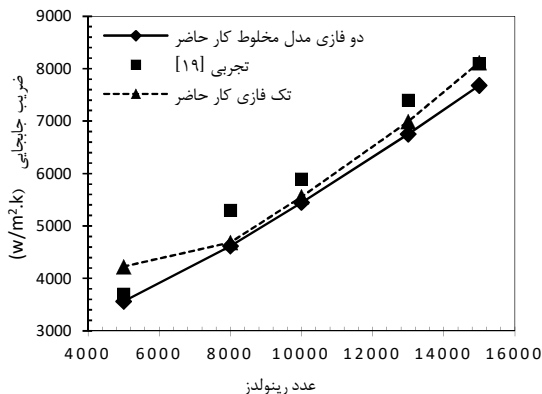
$$Q_{nf} = m_{nf} C_{p,nf} (T_{b,out} - T_{b,in})_{nf} \quad (12)$$

برای نانوسیال مقدار ضریب جابجایی و عدد ناسلت و عدد رینولدز از روابط زیر محاسبه می‌شود:

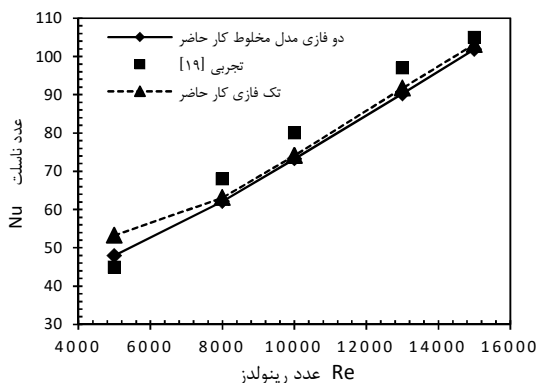
$$h_{nf} = \frac{q}{T_w - T_b} \quad (13)$$

جابجایی حل عددی تک فازی و دوفازی با مدل مخلوط و مقادیر تجربی به ازای کسر حجمی ۰/۲ را نشان می‌دهد همان‌طوری که شکل‌ها نشان می‌دهند مقدار عدد ناسلت و ضریب جابجایی به ازای کسر حجمی ۰/۲ در عدد رینولدز بالاتر از ۸۰۰۰ حل عددی تک فازی نسبت به مدل دوفازی مخلوط به نتایج تجربی نزدیک‌تر است ولی در رینولدز پایین‌تر

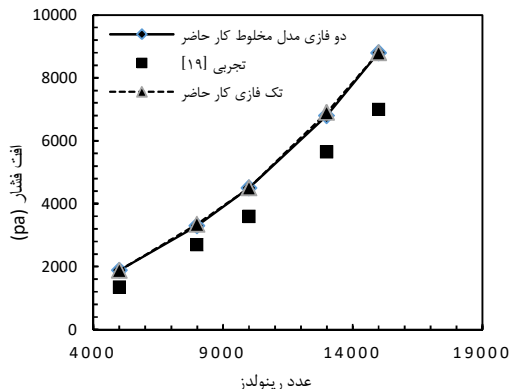
از ۸۰۰۰ مدل دوفازی مخلوط مطابقت بهتری با نتایج تجربی دارد



شکل ۱- مقدار ضریب جابجایی حل عددی تک فازی و دوفازی با مدل مخلوط و مقادیر تجربی [۱۹] به ازای کسر حجمی ۰/۲



شکل ۲- مقدار عدد ناسلت حل عددی تک فازی و دوفازی با مدل مخلوط و مقادیر تجربی [۱۹]



شکل ۳- مقدار افت فشار حل عددی تک فازی و دوفازی با مدل مخلوط و مقادیر تجربی

نانوذرات، کسر حجمی، سطح، شکل نانوذرات معلق در مایع و چگونگی پخش ذرات بستگی دارد.

در غیاب داده‌های آزمایشی و نظری مناسب برای رسانایی گرمایی نانوسیالات، برخی فرمول‌های موجود برای پیش‌بینی رسانایی گرمایی سوسپانسیون‌های جامد-مایع با ذرات نسبتاً بزرگ را می‌توان به تقریب طولی برای برآورد نانوسیالات به کار بست.

برای محاسبه‌ی رسانایی گرمای مؤثر ترکیب‌های جامد-مایع، رابطه زیر توسط وسپ [۲۵] ارائه شده است:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f - \phi(k_f - k_p)} \quad (20)$$

برای نانو ذرات غیر کرووی یو و چوی [۲۶] مدل زیر را پیشنهاد کرده‌اند:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f + (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f - \phi(k_f - k_p)} \quad (21)$$

که در آن فاکتور تجربی ضریب شکل (n) از طریق فرمول زیر به دست می‌آید:

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (22)$$

در این معادله، ψ میزان کرویت بوده که به صورت نسبت مساحت کره هم حجم ذره به مساحت هر ذره به دست می‌آید.

مدل یو و چوی را لی و همکاران [۲۷] برای به دست آوردن برآوردی کلی از رسانایی گرمایی نانوسیالات با مقادیر مختلف ψ از ۰/۵ تا ۱ به کار گرفتند و نتایج برای $\psi = 0/7$ به داده‌های آزمایشی آن‌ها نزدیک بود. آن‌ها به این نکته اشاره کردند که رسانایی گرمای پیش‌بینی شده برای ذرات کرووی ($\psi = 1$) با نتایج تحقیقاتشان بر روی نانوسیالات Al_2O_3 نزدیکی خوبی دارد.

۲-۴- استقلال از شبکه

در این مطالعه به منظور شبکه‌بندی میدان حل از نرم‌افزار Ansys work bench و به صورت سه‌بعدی استفاده شده است. به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج، در نزدیکی دیواره‌ها تراکم مش افزایش یافته است. به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی مقدار عدد ناسلت به ازای شبکه‌هایی با تعداد ۳۱۸۴۵۸ و ۴۱۸۵۵۵ و ۶۶۹۵۵۸ سلول با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که مقدار عدد ناسلت دو شبکه‌بندی آخر تقریباً باهم برابر بوده (جدول ۲) بنابراین شبکه با ۴۱۸۵۵۵ به عنوان شبکه حل انتخاب گردید.

جدول ۲- عدد ناسلت به ازای $Re = 10000$ و کسر حجمی ۰/۲ بر حسب

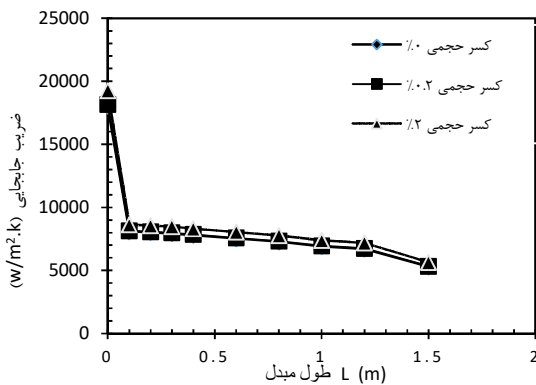
تعداد مش‌های مختلف

تعداد مش	عدد ناسلت
۳۱۸۴۵۸	۷۵/۴۶
۴۱۸۵۵۵	۷۳/۷۴
۶۶۹۵۵۸	۷۳/۲۴

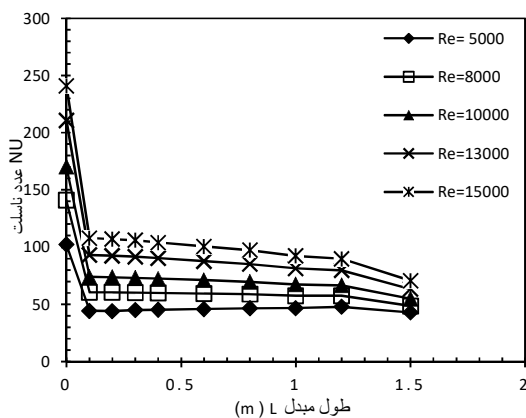
۲-۵- اعتبار سنجی

اعتبار سنجی این مطالعه با استفاده از داده های تجربی ونگویسز و همکاران [۱۹] همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ و ۳ نشان داده شده، انجام شده است. شکل‌های ۱ و ۲ مقایسه مقدار عدد ناسلت و ضریب

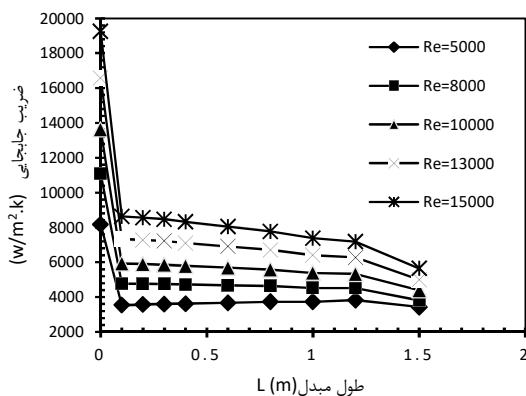
مبادله‌کن دو لوله‌ای در حالت شار ثابت را نشان می‌دهد همان‌طوری که پیش‌بینی می‌شد و از شکل‌ها مشخص است با افزایش عدد رینولدز مقدار عدد ناسلت افزایش یافته است که با افزایش ۳ برابری در عدد رینولدز عدد ناسلت حدود ۲/۳ برابر افزایش یافته است



شکل ۶- ضریب جابجایی به ازای کسر حجمی مختلف با رینولدز ۱۵۰۰۰



شکل ۷- عدد ناسلت به ازای کسر حجمی ۰/۲٪ به ازای رینولدزهای مختلف



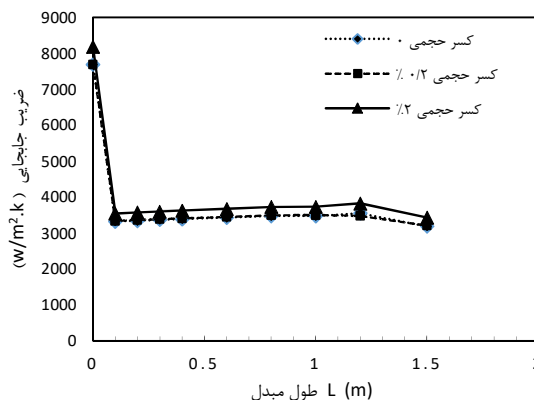
شکل ۸- ضریب جابجایی به ازای کسر حجمی ۰/۲٪ به ازای رینولدزهای مختلف در طول مبادله‌کن

شکل ۹ تغییرات عدد رینولدز و کسر حجمی نانوسیال اکسید تیتانیم و ضریب جابجایی را نشان می‌دهد. همان‌طوری از شکل معلوم است با

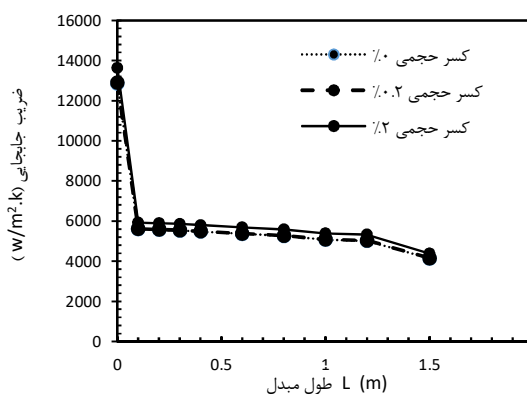
شکل ۳ مقایسه مقدار افت فشار حل عددی تک فازی و دوفازی با مدل مخلوط و مقادیر تجربی را نشان می‌دهد همان‌طوری که از شکل مشخص است در عدد رینولدز پایین‌تر مطابقت بهتری بین شبیه‌سازی و نتایج تجربی وجود دارد ولی هرچه سرعت نانوسیال افزایش می‌یابد مقدار اختلاف بین شبیه‌سازی و نتایج تجربی بیشتر می‌شود.

۳- نتایج

در شکل‌های ۴ تا ۶ اثر کسر حجمی نانو ذرات در ضریب جابجایی به ازای رینولدزهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل‌ها مشخص است به ازای یک رینولدز ثابت در ابتدای شکل به دلیل عدم توسعه یافتگی جریان سیال و اختلاف دمای کم در یک شار گرمایی ثابت مقدار ضریب جابجایی بشدت افت نشان می‌دهد. بعد از ابتدای جریان به دلیل افزایش اختلاف دمای جدار لوله و دمای حجمی نانوسیال مقدار ضریب جابجایی با شیب کمتری کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه کسر حجمی‌ها مشاهده می‌شود با افزایش کسر حجمی مقدار ضریب جابجایی افزایش می‌یابد که به ازای کسر حجمی ۲ درصد نانوسیال آب-اکسید تیتانیم مقدار ضریب جابجایی ۸ درصد افزایش یافته است.



شکل ۴- ضریب جابجایی به ازای کسر حجمی مختلف با رینولدز ۵۰۰۰



شکل ۵- ضریب جابجایی به ازای کسر حجمی مختلف با رینولدز ۱۰۰۰۰

شکل‌های ۷ و ۸ مقایسه مقدار عدد ناسلت و ضریب جابجایی در نانوسیال اکسید تیتانیم ۰/۲٪ به ازای رینولدزهای مختلف در طول یک

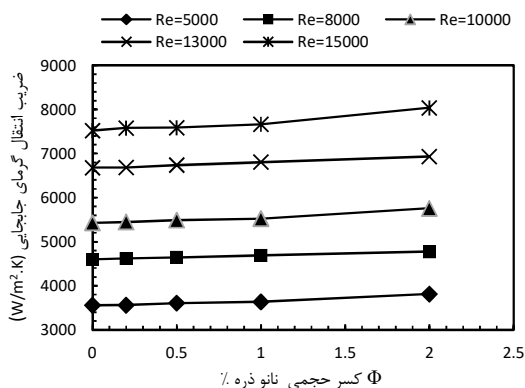
۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم در یک مبادله‌کن دو لوله‌ای جریان مخالف با شار گرمایی ثابت، به صورت جریان تک فازی و نیز جریان دوفازی مدل مخلوط توسط نرم‌افزار fluent شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی دوفازی مدل مخلوط نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم از جمله نوآوری این پژوهش است. شبیه‌سازی تک فازی و دوفازی مدل مخلوط و مقایسه آن با نتایج تجربی برای به دست آوردن بهترین مدل شبیه‌سازی هدف این مطالعه است. با مقایسه کسر حجمی‌ها مشاهده شد با افزایش کسر حجمی مقدار ضریب جابجایی افزایش می‌یابد که به ازای کسر حجمی ۲ درصد نانوسیال اکسید تیتانیوم مقدار ضریب جابجایی ۸ درصد افزایش یافته است و همچنین با افزایش ۳ برابری در عدد رینولدز عدد ناسلت حدود ۲/۳ برابر افزایش یافته است. بیشترین مقدار افزایش ضریب جابجایی در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ است که نشان‌دهنده این است که در رینولدزهای بالا، افزایش کسر حجمی تأثیر بیشتری در افزایش ضریب جابجایی دارد که یکی از دلایل آن می‌تواند همگن‌تر بودن نانوسیال در رینولدزهای بالاتر به دلیل اغتشاش بیشتر باشد. مقدار عدد ناسلت و ضریب جابجایی به ازای کسر حجمی ۰/۲٪ در عدد رینولدز بالاتر از ۸۰۰۰، حل عددی تک فازی نسبت به مدل دوفازی مخلوط به نتایج تجربی نزدیک‌تر است ولی در رینولدز پایین‌تر از ۸۰۰۰ مدل دوفازی مخلوط مطابقت بهتری با نتایج تجربی دارد. مقدار افت فشار در عدد رینولدز پایین‌تر مطابقت بهتری بین شبیه‌سازی و نتایج تجربی وجود دارد ولی هرچه سرعت نانوسیال افزایش می‌یابد مقدار اختلاف بین شبیه‌سازی و نتایج تجربی بیشتر می‌شود. در کل نتایج شبیه‌سازی حاصل از حل عددی تک فازی و دوفازی با مدل مخلوط مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد.

۵- نمادها

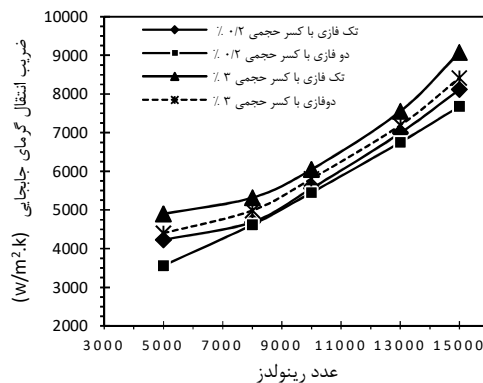
Cp	گرمای ویژه (J/kg K)
d	قطر نانوذره (m)
D	قطر (m)
h	ضریب انتقال گرمای جابجایی
k	رسانایی گرمایی (W/mK)
L	طول (m)
m	دبی جرمی (kg/s)
DP	افت فشار (pa)
Nu	عدد ناسلت
n	فاکتور تجربی ضریب شکل
p	فشار (pa)
q	شار گرمایی (W/m ²)
Q	انتقال گرما (W)
Re	عدد رینولدز
T	دما (C)
u	سرعت (m/s)
V	حجم (m ³)
\bar{V}	بردار سرعت (m/s)
ψ	ضریب کروی بودن
ϕ کجمی	کسر حجمی نانوذره
زیر نویس‌ها	

افزایش کسر حجمی نانوسیال اکسید تیتانیوم در رینولدزهای مختلف مقدار ضریب جابجایی بین ۶ تا ۸ درصد افزایش یافته که بیشترین مقدار افزایش در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ است که نشان‌دهنده این است که در رینولدزهای بالا افزایش کسر حجمی بیشتر تأثیر بیشتری در افزایش ضریب جابجایی دارد که یکی از دلایل آن می‌تواند همگن‌تر بودن نانوسیال در رینولدزهای بالاتر به دلیل اغتشاش بیشتر باشد.



شکل ۹- ضریب جابجایی به ازای کسر حجمی ۰/۲٪ به ازای رینولدزهای مختلف

شکل ۱۰ مقایسه مقدار ضریب جابجایی حل عددی تک فازی و دوفازی مدل مخلوط در کسر حجمی‌های ۰/۲٪ و ۰/۳٪ را نشان می‌دهد. همان‌طوری که از شکل مشخص است مقادیر ضریب انتقال گرما در کسر حجمی بالاتر نانو ذرات روند افزایشی نشان می‌دهد. علاوه بر این شکل نشان‌دهنده اختلاف در ضریب انتقال گرما بین حل تک فازی با حالت دوفازی، مخصوصاً در کسر حجمی بالاتر نانو ذرات، می‌باشد. این اختلاف می‌تواند ناشی از ساده‌سازی‌ها در حل تک فاز در خصوص وجود نانو ذرات باشد، طوری‌که با افزایش میزان این نانو ذرات اختلاف حل تک فاز با دو فاز مشخص‌تر می‌گردد. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده در هر دو مدل می‌توان به اثر وجود اختلاف سرعت بین فازها که در مدل دوفازی مخلوط قابل محاسبه می‌باشد، پی برد که دلیل اصلی اختلاف ضریب انتقال گرمای جابجایی در دو مدل می‌تواند ناشی از آن باشد.



شکل ۱۰ مقایسه مقدار ضریب جابجایی حل عددی تک فازی و دوفازی مدل مخلوط

[14] Shirvan K. M., Mamourian M., Mirzakanlari S., Ellahi R., Numerical investigation of heat exchanger effectiveness in a double pipe heat exchanger filled with nanofluid: A sensitivity analysis by response surface methodology. *Powder Technology*, Vol. 313, pp. 99–111, 2017.

[15] Ellahi R., Hassan M., Zeeshan A., Shape effects of nanosize particles in Cu-H₂O nanofluid on entropy generation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 81, pp. 449–456, 2015.

[16] Ellahi R., Rahman S. U., Nadeem S., Blood flow of Jeffrey fluid in a Catherized tapered artery with the suspension of nanoparticles, *Phys. Lett. A*, Vol. 378, pp. 2973–2980, 2014.

[17] Diao Y. H., Li C. Z., Zhang J., Zhao Y. H., Kang Y. M., Experimental investigation of MWCNT–water nanofluids flow and convective heat transfer characteristics in multiport minichannels with smooth/micro-fin surface, *Powder Technol*, Vol. 305, pp. 206–216, 2017.

[18] Mohammad S. B., Sita Rama Rajub A.V., Bhagvanth Raoc M., Heat transfer enhancement and pressure drop of Fe₃O₄–water nanofluid in a double tube counter flow heat exchanger with internal longitudinal fins Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 12, pp. 600–607, 2018.

[19] Wongwises S., Duangthongsuk W., Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂–water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2059–2067, 2009.

[20] Eiamsa-ard S., Pethkool S., Thianpong C., Promvong P., Turbulent flow heat transfer and pressure loss in a double pipe heat exchanger with louvered strip inserts, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 120–129, 2008.

[21] Pak B. C., Cho Y. I., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Exp. Heat Transfer*, Vol. 11, 151, 1998.

[22] Xuan, Y. and Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 151–155, 2003.

[23] Drew D. A., Passman S. L., *Theory of Multi Component Fluids*, Springer, Berlin, 1999.

[24] Clement Kleinstreuer, *Microfluidics and Nanofluidics Theory and Selected plications*, 2014.

[25] Kumar, D. H., Patel H. E., Kumar, V. R. R., Sundararajan T., Pradeep T., Das S. K., Model for Heat Conduction in Nanofluids, *Physical Review Letters*, vol. 93, 2004.

[26] Yu W., Choi S. U. S., The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, *J. Nanoparticles Res.*, Vol. 5, 167, 2003.

[27] Xuan, Y., Li Q., Investigation of Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, No. 1, pp. 151-153, 2003.

دمای حجمی	b
سیال پایه	bf
مؤثر	eff
سیال	f
سیال گرم	h
ورودی	in
خروجی	out
نانوذره	p
نانوسیال	nf
دیواره	w

۶- مراجع

[1] Kakaç S., Bergles A. E., Mayinger F., and Yuncu H., *Heat transfer enhancement of heat exchangers*, vol. 355, Springer, 1999.

[2] Choi S. U. S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticle, *ASME FED 231*, 1995.

[3] Das S. K., Putra N., Thiesen P., Roetzel W., Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *J. Heat Transfe* Vol. 125, pp. 567-574, 2003.

[4] AbdolbaqiaNor M. Kh., Che Sidik A., Mamatac A. R., AzmiacMohammad W. H., Yazid M., Najafid G., An experimental determination of thermal conductivity and viscosity of BioGlycol/water based TiO₂ nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer* Vol. 77, pp. 22-32, 2016.

[5] Lee S., Choi S. U. S., S. Li., Eastman J. A., Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *ASME Journal Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280–288, 1999.

[6] Aghayari R., Maddah H., Ashori F., Hakiminejad A., Aghili M., Effect of nanoparticles on heat transfer in mini double-pipe heat exchangers in turbulent. *Heat and Mass Transfer* vol. 51, pp. 301–306, 2015.

[7] Rea U., McKrell T., Hu L., 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, pp. 2042–2048, 2009.

[8] Jaafar Albadr A., Satinder Tayal A., Mushtaq Alasadi B., Heat transfer through heat exchanger using Al₂O₃ nanofluid at different concentrations. *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 1, pp. 38–44, 2013.

[9] Chandrasekar M., Sures S., A Review on the Mechanisms of Heat Transport in Nanofluids, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 30, No. 14, pp. 1136-1150, 2009.

[10] Heris, S. Z., Esfahany M. N., and Etamad S. G., Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, pp. 203–210, 2007.

[11] Anoop K. B., Sundararajan T., Das S. K., Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2189–2195, 2009.

[12] Abbasian A., Arani A., Amani J., Experimental investigation of diameter effect on heat transfer performance and pressure drop of TiO₂–water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 520–533, 2013.

[13] Barzegarian R., Keshavarz Moraveji M., Aloueyan A., Experimental investigation on heat transfer characteristics and pressure drop of BPHE (brazed plate heat exchanger) using TiO₂-water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 74, pp. 11-18, June 2016.