

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست
دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶
مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران
و هم‌اندیشان انرژی‌کیما
www.Energyconf.ir



مدلسازی دوفازی انتقال حرارت در نانوسیال آب - مس

سیدحسن کمالی^۱

آذربایجان غربی، کیلومتر ۱۵ جاده مهاباد - ارومیه، پتروشیمی مهاباد
h.of.kamali@gmail.com

چکیده

سیستم‌های انتقال حرارت یکی از مهمترین دغدغه‌های صنایع پیشرفته و تولیدی و هر جایی است که به نوعی با انتقال حرارت رو به رو می‌باشند. از طرفی دیگر در دهه‌های اخیر با افزایش رقابت جهانی در صنایع مختلف و نقش انرژی در هزینه‌های تولید، استفاده از سیستم‌های انتقال حرارت پیشرفته به منظور صرفه‌جویی اقتصادی و بهینه‌سازی این سیستم‌ها، امری اجتناب‌ناپذیر شده است. در مسئله بازده حرارتی تجهیزات انتقال حرارت همچون مبدل‌ها، هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال حامل انرژی نقشی اساسی بر عهده دارد. یکی از راه‌های افزایش بازده این تجهیزات، افزایش ضریب انتقال حرارت سیال حامل انرژی با بکارگیری نانوسیالات می‌باشد. از این رو در چند دهه اخیر مسأله انتقال حرارت در نانوسیالات بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه انتقال حرارت در نانوسیال آب - مس درون یک لوله با استفاده از روش‌های مدلسازی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای انجام مدلسازی از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۲ استفاده شده است. با توجه به دقت بیشتر روش دوفازی، از این روش برای انجام مدلسازی استفاده شده است. به منظور بررسی تاثیر غلظت نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت، نانوسیالاتی با غلظت‌های مختلفی از نانوذرات - ۰.۳، ۱ و ۲ درصد - مورد بررسی قرار گرفته است. تطابق نتایج تجربی با نتایج مدلسازی گویای دقت بالای مدلسازی می‌باشد. نتایج گویای افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به آب خالص می‌باشد. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت، با افزایش غلظت نانوذرات و عدد رینولدز بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال، نانوذره، انتقال حرارت، مدلسازی، دینامیک سیالات محاسبات

۱- فوق لیسانس مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- CFD



۱- مقدمه

نانوسیال را می‌توان به عنوان یک نانو کامپوزیت که ماتریس آن سیال پایه - همچون آب و اتیلن گلیکول - است و یا یک سوسپانسیون کلوییدی شامل نانوذرات - همچون نانوذرات مس، اکسید مس و آلومینا - تعریف کرد. با پخش شدن نانو ذرات در سیال پایه ضریب انتقال حرارت نانو سیال ایجاد شده، نسبت به سیال پایه افزایش پیدا می‌کند، چرا که هدایت حرارتی جامدات به مقدار قابل توجهی از هدایت حرارتی سیالات بالاتر می‌باشد [۱].

جدول ۱ - ضریب هدایت حرارتی برخی از سیالات و جامدات [۱]

هدایت حرارتی (W/m.K)	جنس	
۴۰۱	مس	جامدات فلزی
۲۳۷	آلومینیم	
۱۴۸	سیلیکون	جامدات غیرفلزی
۴۰	آلومینا (Al_2O_3)	
۷۲,۳	سدیم (۶۴۴ K)	سیالات فلزی
۰,۶۱۳	آب	
۰,۲۵۳	اتیلن گلیکول (EG)	سیالات غیرفلزی
۰,۱۴۵	روغن موتور (EO)	

نانوسیالات را می‌توان به عنوان نسل بعدی سیالات انتقال حرارت در نظر گرفت، چرا که توانایی‌های زیادی برای افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به سیالات خالص ایجاد می‌کنند. این در حالی است که همزمان مشکلات مربوط افت فشار و گرفتگی مجاری جریان را نیز کاهش و برطرف می‌کنند. مساحت بیشتر نانوذرات نسبت به ذرات عادی، نه تنها انتقال حرارت را افزایش می‌دهد، بلکه باعث افزایش پایداری سوسپانسیون‌ها نیز می‌شود. بکارگیری موفق نانو سیالات گرایش کنونی نسبت به کوچک سازی را با قادر ساختن ما به طراحی سیستم‌های انتقال حرارت کوچکتر حمایت می‌کند. نانو سیالات با افزایش کارایی تجهیزات انتقال حرارت همچون مبدل‌ها ما را قادر به طراحی سیستم‌هایی کوچکتر، با کارایی یکسان می‌کنند [۲].

مقالات متعددی منتشر شده‌اند که به بررسی انتقال حرارت نانو سیالات پرداخته‌اند. اساس کار بیشتر مقالات کارهای تجربی می‌باشند [۱۰-۲].

یانگ و همکاران [۷]، به بررسی ضریب انتقال حرارت نانو سیال آب - گرافیت در یک مبدل لوله ای افقی پرداختند. آنها به بررسی تاثیر عدد رینولدز، دما، کسر حجمی نانوذرات و منبع نانوذرات و نوع سیال پایه بر روی ضریب انتقال حرارت پرداختند. نتایج حاکی از افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات می‌باشد. همچنین با افزایش دمای نانو سیال، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



خوان و لی [۸]، یک سیستم برای بررسی انتقال حرارت جابه جایی و خواص جریان نانوسیال آب - مس در محدوده جریان های آشفته و آرام؛ در داخل یک لوله ارائه دادند. جز حجمی نانوذرات در نانوسیال مورد آزمایش آنها حداکثر برابر ۲ درصد بود. نتایج حاکی از افزایش ۶۰ درصدی ضریب انتقال حرارت نانوسیال با جز حجمی ۲ درصد از نانوذرات مس نسبت به سیال پایه می باشد.

مقالات کمتری به بررسی عددی انتقال حرارت نانوسیالات پرداخته اند [۱۱-۱۷]. مدلسازی عددی انتقال حرارت نانوسیالات به دو روش تک فاز و روش دوفاز قابل انجام است. بیشتر مدلسازی های صورت گرفته در این حوزه به روش تک فاز بوده است و روش دوفازی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

در روش تک فازی یا همگن، فرض می شود که فاز سیال و نانوذرات در تعادل گرمایی بوده و سرعت نسبی بین آنها صفر می باشد. بنابراین می توان مخلوط سیال پایه و نانوذرات را تقریباً به عنوان یک سیال در نظر گرفت. در حالی که در مدل دو فازی، نانوذرات و سیال پایه به عنوان دو فاز جداگانه سیال و جامد با مومنتوم های متفاوت در نظر گرفته می شوند.

زینالی و همکاران [۱۴]، یک مدل پراکندگی برای در نظر گرفتن حضور نانوذرات در نانوسیال ارائه دادند. آنها نشان دادند که پخش و حرکت اتفاقی نانوذرات در سیال ساختار میدان جریان را تغییر داده و منجر به افزایش انتقال حرارت می شود.

بهبادمهر و همکاران و میرمعصومی و همکاران [۱۶ و ۱۷]، از مدل دوفازی برای پیش بینی انتقال حرارت جابه جایی اجباری در ناحیه جریان آشفته برای یک نانوسیال در داخل یک لوله تحت شار حرارتی یکنواخت استفاده کردند. آنها از مدل مخلوط بر پایه مدل دوفازی یک سیال در شبیه سازی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کردند.

در این مقاله مدلسازی انتقال حرارت نانوسیال آب - مس در یک لوله تحت شار حرارتی ثابت می باشد. با توجه به دقت بیشتر روش دوفازی نسبت به روش تک فازی، از این روش برای انجام مدلسازی استفاده شده است. به منظور بررسی صحت و دقت مدلسازی، نتایج مدلسازی را با نتایج تجربی گزارش شده توسط خوان و لی [۷] مقایسه کرده ایم. در این مطالعه تاثیر کسرحجمی نانوذرات و عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال در محدوده جریان های آرام و آشفته مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معرفی مدل آزمایشگاهی

نتایج تجربی برای ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب - مس توسط خوان و لی گزارش شده است [۷]. هندسه مورد استفاده، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، شامل یک لوله برنجی با قطر داخلی ۱۰ میلی متر و طول ۸۰۰ میلی متر می باشد که شار حرارتی ثابت ۳٫۵ کیلووات به دیواره آن اعمال شده است. نانوذراتی با قطر متوسط کمتر از ۱۰۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفته اند.

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

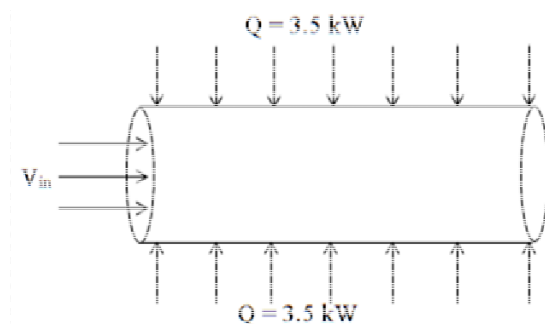
مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



شکل ۱ - هندسه مدل مورد مطالعه



۳- مدل‌سازی با دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی از روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم برای یک هندسه داده شده با شرایط مرزی مشخص استفاده می‌کند. این معادلات شامل معادلات مومنتوم، جرم و انرژی و غیره می‌باشند. در این روش با تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم بر سیالات به معادلات جبری امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود. با تقسیم ناحیه مورد نظر برای تحلیل به المان‌های کوچک‌تر و اعمال شرایط مرزی برای گره‌های مرزی با اعمال تقریب‌هایی یک دستگاه معادلات خطی بدست می‌آید که با حل این دستگاه معادلات جبری، میدان سرعت، فشار و دما در ناحیه مورد نظر بدست می‌آید. با استفاده از نتایج بدست آمده از حل معادلات می‌توان برآیند نیروهای وارد بر سطوح، ضرایب برا و پسا و ضریب انتقال حرارت را محاسبه نمود [۱۸].

با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تعداد دفعات آزمایش و خطا کاهش یافته و نتایجی را می‌توان بدست آورد که با استفاده از اندازه‌گیری و انجام آزمایش به سختی قابل دستیابی هستند. در این مقاله با استفاده از نرم افزار فلوئنت^۱ پروفایل جریان و دمایی نانوسیال در یک لوله را شبیه‌سازی کرده ایم و با استفاده از آن ضریب انتقال حرارت نانوسیال را بدست آورده ایم.

میدان جریان دقیق برای مدل‌های تک فازی و دوفازی برای یک لوله تحت شار حرارتی ثابت با حل معادلات حجم متوسط سیال بدست خواهند آمد.

۳-۱- معادلات حاکم بر مدل تک فاز

- معادله پیوستگی :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0$$

(۱)

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست
 دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 ۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶
 مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران
 و هم‌اندیشان انرژی کیمیا
 www.Energyconf.ir



- معادله مومنتوم :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P + \nabla \tau + B \quad (2)$$

- معادله انرژی :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho U C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

۳-۲- معادلات حاکم بر مدل دو فاز^۱

- معادله پیوستگی :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (\varphi_\alpha \rho_\alpha U_\alpha - \Gamma_\alpha \nabla \varphi_\alpha) \quad (4)$$

- معادله مومنتوم :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) + \{\varphi_\alpha [\rho_\alpha U_\alpha U_\alpha - \mu_{e\alpha} (\nabla U_\alpha + (\nabla U_\alpha)^T)]\} = \varphi_\alpha (B_\alpha - \nabla P) + F_\alpha \quad (5)$$

- معادله انرژی :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_\alpha \rho_\alpha h_\alpha) + \nabla \cdot [\varphi_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha h_\alpha - k_\alpha \nabla T_\alpha)] = \sum_{\beta=1}^N (\Gamma_{\alpha\beta} h_{\beta p} - \Gamma_{\beta\alpha} h_{\alpha p}) + Q_\alpha + S_\alpha \quad (6)$$

در معادله انرژی، Q بیانگر انتقال حرارت بین فازی است. برای حل معادلات، خواص نانوسیالات ثابت در نظر گرفته می‌شود. با حل معادلات، توزیع دمای متوسط سیال و توزیع دمای دیواره در هر مکان مشخص شده و ضریب انتقال حرارت محلی با استفاده از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$h(x) = \frac{q}{T_w(x) - T_m(x)} \quad (7)$$

۴- نتایج مدلسازی

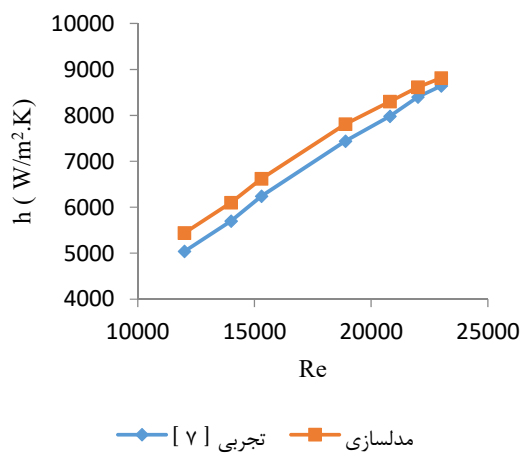
برای بررسی صحت و دقت مدل مورد استفاده ابتدا شبیه سازی را برای آب خالص انجام داده ایم. نتایج مدلسازی برای آب خالص را در شکل ۲ گزارش نموده ایم.

۲- α و β بیانگر هریک از فازها هستند.

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست
 دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 ۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶
 مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران
 و هم‌اندیشان انرژی کیمیا
 www.Energyconf.ir

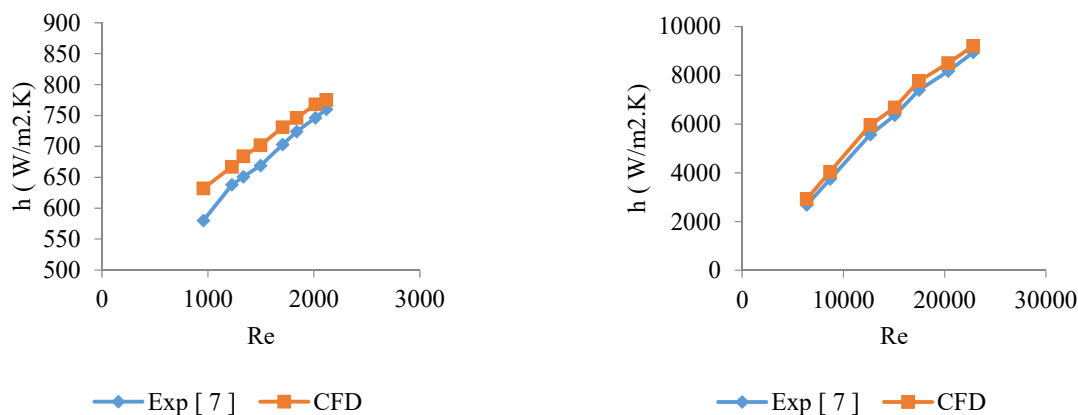


شکل ۲ - ضریب انتقال حرارت آب در اعداد رینولدز مختلف

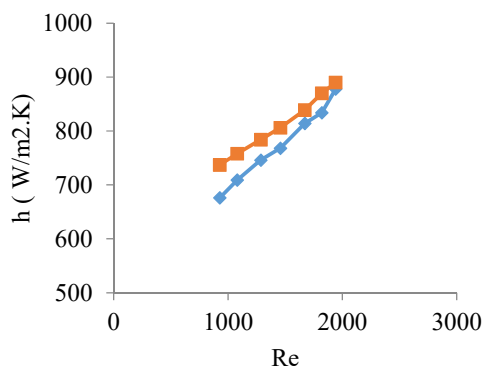


همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج تجربی تطابق خوبی دارند. حال با مدل‌سازی جریان نانوسیال آب - مس در درصد‌های حجمی مختلف از نانوذرات در محدوده جریان‌های آرام و آشفته، به بررسی و مقایسه این نتایج با داده‌های تجربی می‌پردازیم. شکل‌های ۳ تا ۵ نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام شده را برای نانو سیال با غلظت‌های ۰,۳، ۱ و ۲ درصد از نانو ذرات را در محدوده جریان‌های آرام و آشفته نشان می‌دهند.

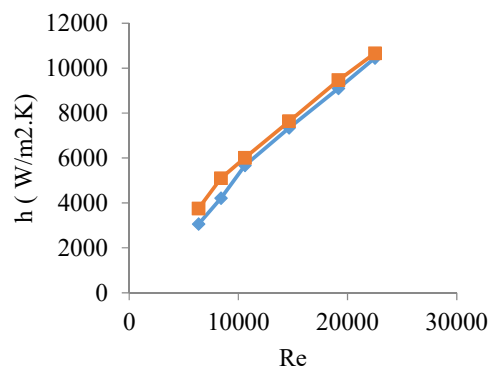
شکل ۳ - ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب - مس با ۰,۳٪ از نانوذرات در رینولدزهای مختلف (جریان‌های آرام و آشفته)



شکل ۴ - ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب - مس با ۱٪ از نانوذرات در رینولدزهای مختلف (جریان‌های آرام و آشفته)

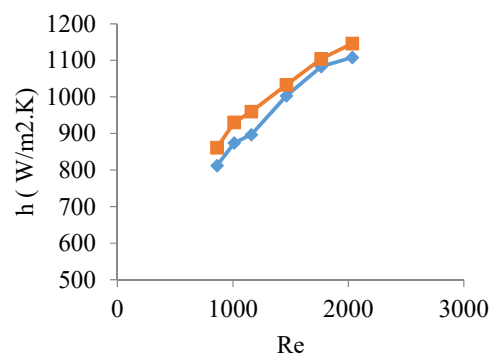


—◆— Exp [7] —■— CFD

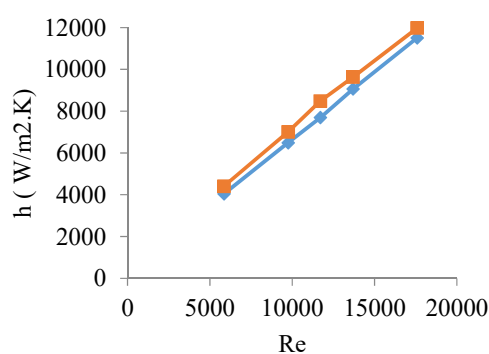


—◆— Exp [7] —■— CFD

شکل ۵- ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب - مس با ۲٪ از نانوذرات در رینولدزهای مختلف (جریان های آرام و آشفته)



—◆— Exp [7] —■— CFD



—◆— Exp [7] —■— CFD

همانطور که در شکل های ۳ تا ۵ مشاهده می شود، نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند. با توجه به نتایج بدست آمده از مدل سازی ها، می توان مشاهده نمود که ضریب انتقال حرارت نانوسیالات با افزایش سرعت جریان و عدد رینولدز افزایش پیدا می کند. همچنین با افزایش غلظت نانوذرات در نانوسیال، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می کند. شکل ۶ ضریب انتقال حرارت نانوسیالات با غلظت های مختلف در عدد رینولدز ۲۵۰۰۰ را نشان می دهد.

شکل ۶ - تغییرات ضریب انتقال حرارت نانوسیال با غلظت

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

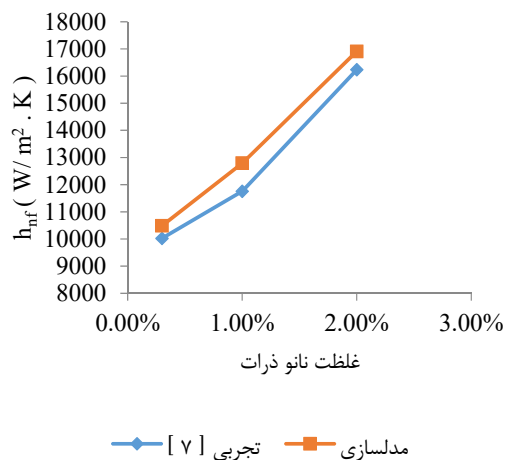
دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

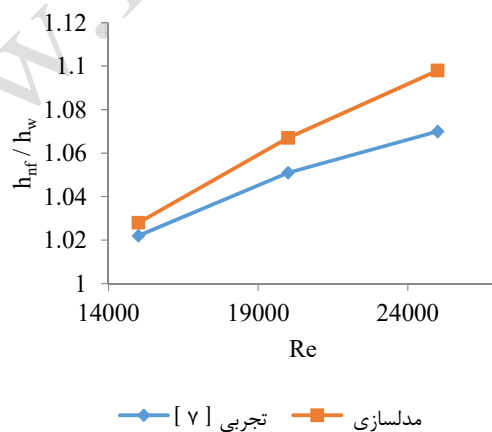
و هم اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir

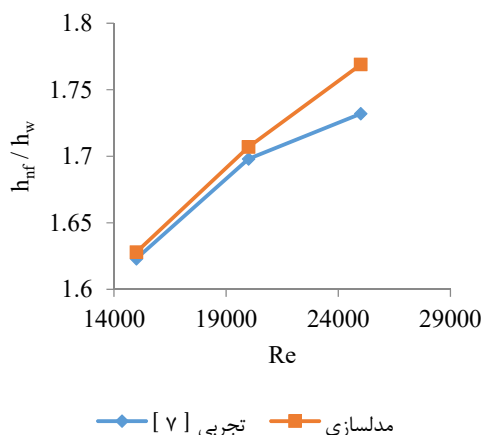


همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است و با بررسی نتایج تجربی و مدلسازی بدست آمده، مشخص است که با افزایش غلظت نانوذرات در نانوسیال، ضریب انتقال حرارت نانوسیال افزایش پیدا می کند. شکل‌های ۷ و ۸ نسبت ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب - مس به ضریب انتقال حرارت آب خالص برای نانوسیالاتی با غلظت های ۰,۳ درصد و ۲ درصد از نانوذرات؛ در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده اند. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش عدد رینولدز میزان افزایش ضریب انتقال حرارت بسیار بیشتر بوده است که بیانگر بازده بهتر نانو سیالات در اعداد رینولدز بالاتر می باشد.

شکل ۷ - نسبت ضریب انتقال حرارت نانوسیال (۰,۳ درصد) به ضریب انتقال حرارت سیال پایه در رینولدز های مختلف



شکل ۸ - نسبت ضریب انتقال حرارت نانوسیال (۲ درصد) به ضریب انتقال حرارت سیال پایه در رینولدز های مختلف



همانطور که در شکل های ۷ و ۸ قابل مشاهده است، برای نانوسیال آب - مس با جز حجمی ۲ درصد از نانوذرات، ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به آب خالص در عدد رینولدز ۲۵۰۰۰ حدود ۷۵ درصد بیشتر از سیال پایه بوده است، در حالی که در رینولدز ۱۵۰۰۰ میزان افزایش ضریب انتقال حرارت تقریباً ۶۰ درصد است.

۵- جمع بندی و پیشنهادات

در این مقاله به بررسی و مدلسازی جریان یک نانوسیال در یک لوله مستقیم و تحت شار حرارتی ثابت پرداختیم. مدلسازی با روش های دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم افزار فلوئنت صورت گرفته است. برای افزایش دقت نتایج بدست آمده از روش دو فازی برای انجام مدلسازی استفاده شد. بررسی نتایج بدست آمده حاکی از افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه می باشد. با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی صورت گرفته و نتایج بدست آمده در سایر مقالات در خصوص سایر نانوسیالات می توان گفت:

۱- ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانوسیالات بسیار بیشتر از آب بوده و با افزایش درصد حجمی نانوذرات میزان افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیالات بیشتر خواهد شد. به نحوی که با افزایش ۲ درصد حجمی از نانوذرات مس به آب؛ ضریب انتقال حرارت نانوسیال حدود ۶۰٪ نسبت به آب خالص بیشتر خواهد بود. اگرچه با افزایش بیشتر نانوذرات به سیال پایه ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال بیشتر خواهد شد ولی با توجه به اینکه میزان افزایش افت فشار نیز بیشتر خواهد شد، مزایای مربوط به افزایش ضریب انتقال حرارت کم اهمیت تر شده و در نتیجه افزایش بیشتر نانوذرات به سیال پایه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود. به نحوی که در بعضی موارد مشاهده شده است با افزایش غلظت نانوذرات، ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال کمتر از ضریب انتقال حرارت جابه جایی آب خالص شده است [۱۳].

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



۲- با افزایش سرعت جریان و عدد رینولدز ضریب انتقال حرارت جابه جایی آب خالص و ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانوسیالات افزایش یافته و در عدد رینولدز ثابت ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانوسیالات بیشتر از آب خالص می باشد. علاوه بر این، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیالات با افزایش عدد رینولدز بیشتر نیز شده است.

۳- با بررسی افت فشار در نانوسیالات و مقایسه با افت فشار آب خالص مشخص است که میزان افت فشار در نانوسیالات تقریباً مطابق است با میزان افت فشار آب خالص و اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه تقریباً هیچگونه افزایش فشاری را به همراه ندارد. می توان در مطالعات آتی به بررسی بیشتر مساله افت فشار در نانوسیالات پرداخت. و با بررسی مساله افت فشار نقطه بهینه ای برای غلظت و ضریب انتقال حرارت نانوسیالات بدست آورد.

مراجع

1. Sadik Kakac, Anchasa Pramuanjaroenkij, Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, International Journal of Heat and Mass transfer, 2009.
2. Xiang-Qi Wang, Arun S.Mujumdar, A review on nanofluids, Brazilian Journal of Chemical engineering, 2008.
3. Haisheng Chen, Yulong Ding, Heat Transfer and Rheological Behaviour of Nanofluids – A Review, Advances in transport Phenomena, 2009.
4. P.keblinski, S.U.S. Choi, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), International Journal of Heat and Mass transfer, 2002.
5. Weerapun Daungthongsuk, Somachi Wongwises, A critical review of convective heat transfer of nanofluids, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007.
6. Y. Yang, Z.G. Zhang, E.A. Grulke, W.B. Anderson, G. Wu, Heat transfer properties of nanoparticle in fluid dispersions in laminar flow, International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005) 1107–1116.
7. Li Qiang, Xuan Yimin, convective heat transfer and flow characteristics of Cu-Water Nanofluid, Science in China, 2002.
8. S. Zeinali Heris, S. Gh. Etemad, M. Nasr Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluid laminar flow convective heat transfer, in circular tube, International Communication in Heat and Mass Transfer 33 (2006) 529–533.
9. S. Zeinali Heris, M. Nasr Esfahany, S. Gh. Etemad, Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/Water nanofluid in circular tube, International Journal of Heat and Fluid Flow 28 (2007) 203–210.
10. Mauro Lomacolo et al. , Review of heat transfer in nanofluids : conductive, convective and radiative experiments, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014.
11. M.Haghshenas Fard, M.Nasr Esfahany, M.R. Talaie, Numerical study of convective heat transfer of nanofluid in a circular tube two phase model versus single phase model, 2009.
12. Sinan Goktepe, Kunt Atalik, Hakan Erturk, Comparison of single and two phase models for nanofluids convection at entrance of a uniformly heated tube, International Journal of Thermal Sciences, 2014.
13. Yurong He et al. , Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions, Applied Thermal Engineering, 2008.
14. S. Zeinali Heris, M. Nasr Esfahany, S. Gh. Etemad, Numerical investigation of nanofluid convective heat transfer through a circular tube, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications 52 (2007) 1043–1058.
15. M.Saberi, M.Kalbasi, Heat transfer investigations in nanofluid by mathematical modeling methods, MSc. Thesis; Amir Kabir University of Technology, 2011.
16. A. Behzadmehr, M.S. Avval, N. Galanis, 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 28 (2007) 211–219.
17. S. Mirmasoumi, A. Behzadmehr, Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube, International Journal of Heat and Fluid Flow 29 (2008) 557–566.
18. R.Rahimi, M.R.Rahimi, Review of Computational Fluid Dynamics; 9th Congress of Chemical Engineering of Iran, 2004.