

اثر مدل توربولانس بر شبیه سازی عددی جریان آشفته نانوسیال در یک لوله افقی

سجاد اسلامی^۱ و مهدی محسنی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴	با توجه به کاربرد روز افزون استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل خنک کننده و همچنین گسترش مدل سازی های عددی به منظور کاهش زمان و هزینه طراحی، در این پژوهش، جریان مغشوش نانوسیال آب-اکسید سیلیسیم و آب-اکسید مس برای دو شرایط مختلف در یک لوله افقی تحت شار حرارتی ثابت به صورت عددی شبیه سازی شده است. برای مدل سازی جریان آشفته، چندین مدل توربولانس دو معادله ای و یک مدل تنش رینولدز موجود در نرم افزار فلونت با هدف بررسی عملکرد آنها مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین تخمین خواص ترموفیزیکی نانوسیال با استفاده از رویکرد تک فاز انجام گرفته است. برای آگاهی از مقادیر خطای حاصل از شش مدل توربولانس مورد استفاده، نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده اند تا بتوان در نهایت مدل توربولانسی که تطابق بهتری با داده های آزمایشگاهی در طیف وسیع تری از شرایط جریان دارد را مشخص کرد. به همین منظور بیش از ۵۰۰ اجرا در اعداد رینولدز مختلف، کسر حجمی های مختلف برای محاسبه دو عدد بدون بعد ناسلت و ضریب اصطکاک انجام شده است.
واژگان کلیدی: نانوسیال، جریان مغشوش، مدل توربولانس، انتقال حرارت جابجایی، شبیه سازی عددی.	

۱- مقدمه

باتوجه به مساله بحران انرژی و مشکلات زیست محیطی، در سال های گذشته تحقیقات گسترده ای در زمینه انتقال حرارت در تجهیزات صنعتی، ابزارهای مهندسی و سیستم های سرمایش و گرمایش توسط محققین انجام گرفته است. در این میان استفاده از نانوسیالات در افزایش انتقال حرارت، بدون افزایش ابعاد و صرف هزینه های زیاد جهت بالابردن بازده تجهیزات سرمایش و گرمایش یکی از راه کارهای مؤثر بوده است که نتایج پژوهش های بسیاری را به خود اختصاص داده است. به عنوان مثال می توان به استفاده از نانوسیال در افزایش انتقال حرارت در لوله های مارپیچ، استفاده در کلکتورهای خورشیدی به عنوان سیال عامل و استفاده در لوله های حرارتی جهت بالابردن بازده اشاره کرد

[۱-۳]. بر اساس نتایج پژوهش نقیب زاده و همکاران [۱] که جریان آرام نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را داخل یک کوئل مارپیچ بررسی کردند، برای یک سیال مشخص، عملکرد حرارتی لوله مسطح شده نسبت به لوله دایروی بیشتر می گردد. همچنین استفاده از نانوسیال نیز باعث افزایش راندمان حرارتی کوئل می شود. مایگا و همکاران [۴] انتقال حرارت جابجایی در جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در لوله ای تحت شار حرارتی ثابت، به صورت عددی بررسی کردند. در این پژوهش از مدل k-ε استاندارد به عنوان مدل آشفتگی و از مدل تک فاز برای تخمین خواص ترموفیزیکی نانوسیال استفاده شده است. نتایج این شبیه سازی بیانگر بهبود ضریب انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز است. عدد

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.mohseni@qut.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی قم
۲. استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی قم

یک لوله افقی را با روش عددی شبیه‌سازی کردند. بر اساس نتایج آنها افزودن نانوذرات Al_2O_3 باعث می‌شود ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی سیال غیرنیوتنی افزایش یابد. همچنین میزان این افزایش با زیاد شدن غلظت نانوذرات و عدد رینولدز افزایش پیدا می‌کند. کورسیونه و همکاران [۱۱] نیز با حل جریان آشفته در یک لوله افقی با استفاده از معادلات و روابط تک فاز، افزایش چشمگیر نسبت ویسکوزیته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، در صورت کاهش قطر نانوذرات را گزارش کردند. داورنژاد و همکاران [۱۲] جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با نانوذراتی به قطر ۲۰ و ۵۰ نانومتر در یک لوله افقی با شار حرارتی ثابت را شبیه‌سازی کردند. بر اساس نتایج آنها نانوسیال حاوی نانوذرات ۲۰ نانومتری دارای ضریب انتقال حرارت بالاتری نسبت به نانوسیال حاوی نانوذرات ۵۰ نانومتری می‌باشد. سها و پائول [۱۳] شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید تیتانیوم را با بکارگیری مدل دوفازی مخلوط و مدل توربولانس k-ε استاندارد مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد عدد ناسلت به نوع و اندازه قطر نانوذرات بسیار حساس است به طوری که نرخ انتقال حرارت با کاهش قطر نانوذرات افزایش می‌یابد. این موضوع در پژوهش عددی جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم توسط آقایی و همکاران [۱۴] نیز گزارش شده است. بر اساس کار آنها افزایش قطر نانوذرات اکسید آلومینیوم، کاهش چشمگیر عدد ناسلت را در پی خواهد داشت. آنها دلیل این رفتار را حرکت تصادفی (حرکت براونی) نانوذرات درون نانوسیال دانسته‌اند. زیرا افزایش قطر نانوذرات موجب تضعیف حرکت براونی ذرات خواهد شد. حاتمی و اخوتی [۱۵] نیز جریان آشفته نانوسیال با سیال پایه آب و اتیلن گلیکول و نانوذرات اکسید آلومینیوم تا کسر حجمی ۲ درصد را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. آنها در کار خود از تحلیل تک فاز برای تخمین خواص ترموفیزیکی نانوسیال و از مدل k-ε استاندارد به عنوان مدل آشفتگی استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک و افت فشار با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. البته این افزایش در مقایسه با سیال پایه چندان قابل توجه نیست. حجازیان و همکاران [۱۶] انتقال حرارت جابجایی اجباری در جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک لوله افقی را به

ناسلت نیز تابعی از عدد رینولدز و کسر حجمی ذرات است و با افزایش این دو پارامتر افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. خنایر و وفایی [۵] در مقاله خود بیان کردند که هدایت حرارتی موثر نانوسیالات با افزایش دما و کسر حجمی نانوذرات افزایش و با افزایش قطر ذرات کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج پژوهش آنها می‌توان به افزایش ویسکوزیته موثر نانوسیالات در اثر افزایش کسر حجمی ذرات و کاهش آن با افزایش دما اشاره کرد. جلال و همکاران [۶] نیز در آزمایش‌های خود افزایش کسر جرمی ذرات اکسید تیتانیوم در آب را موجب افزایش چگالی این نانوسیال بیان کردند. در حالی که افزایش دما، کاهش چگالی را در پی داشته است. همت اسفه و همکاران [۷] به روش آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال عامل دار شده نانولوله چند جداره کربنی-آب با عامل کربوکسیل در کسرهای حجمی پایین را مورد بررسی قرار دادند. محدوده عدد رینولدز به نحوی بود که جریان در رژیم آشفته قرار می‌گرفت. نتایج آنها نشان می‌دهد با افزایش کسر حجمی از ۰/۰۵٪ تا ۱٪ به طور متوسط ۷۸٪ افزایش در ضریب انتقال حرارت، ۳۶/۵٪ افزایش در عدد ناسلت متوسط و ۲۷/۳٪ افزایش در افت فشار اتفاق می‌افتد. نتایج آنها همچنین بیانگر این است که ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال وابستگی شدیدی به دما و کسر حجمی نانوسیال دارند. ضیایی راد و بیگی [۸] به بررسی انتقال حرارت و افت فشار در جریان نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در لوله‌ای با دندان‌های داخلی به صورت عددی پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه، توسعه یافتگی حرارتی سریعتر اتفاق می‌افتد و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد به طوری که افزایش ۵ درصدی کسر حجمی نانوذرات، افزایش ۲۸ درصدی عدد ناسلت موضعی و افزایش ۱۱ درصدی عدد ناسلت متوسط را به همراه دارد. این موضوع همچنین باعث می‌شود ضریب اصطکاک روی دیوار لوله حدود ۱/۵ برابر شود. کیهانی و همکاران [۹] نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم تا کسر حجمی ۲ درصد را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک این نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات تا مقدار ۲ درصد، نسبت به آب خالص در رینولدزهای یکسان تغییرات چندانی نداشته است. شریفی اصلی و همکاران [۱۰] انتقال حرارت جابجایی در جریان مغشوش نانوسیال غیرنیوتنی در

حرارت و افت فشار افزایش می‌یابد. هو و همکاران [۲۲] به بررسی عددی و آزمایشگاهی جریان آرام نانوسیال آب اکسید آلومینیم در یک لوله افقی پرداختند. آنها تأثیر تغییر دمای ورودی را بر افت فشار، عدد ناسلت و تولید آنتروپی مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین خواص ترموفیزیکی سیال را متغیر با دما در نظر گرفتند. این کار باعث بهبود نتایج شد به طوری که عدد ناسلت افزایش و افت فشار کاهش پیدا کرد. ماینا [۲۳] ابتدا به بررسی جریان آشفته نانوسیالات ترکیبی و سپس حل عددی آن با رویکرد تک‌فاز و استفاده از مدل $k-\epsilon$ استاندارد لاندرو اسپالدینگ در یک لوله با شار حرارتی ثابت در دیواره پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که نانوسیال ترکیبی منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی و در نتیجه بهبود انتقال حرارت می‌گردد. شیخ الاسلامی و همکاران [۲۴] جریان آشفته نانوسیال آب اکسید مس داخل یک لوله با نوارهای مارپیچ داخل آن را با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت و مدل توربولانس $k-\epsilon$ RNG مورد بررسی قرار دادند. آنها در حل خود از رویکرد تک‌فاز استفاده کردند و به بررسی اثر نسبت پیچ و ارتفاع آن و عدد رینولدز بر تولید آنتروپی پرداختند. صفری و همکاران [۲۵] به بررسی جریان در حال توسعه نانوسیال آب اکسید نقره در یک لوله مارپیچ و یک لوله خم‌دار تحت شار حرارتی ثابت پرداختند. آنها در حل خود از رویکرد تک‌فاز به همراه یک مدل ۴ معادله‌ای استفاده کردند که اثر لغزش بین سیال پایه و نانوذرات را در نظر بگیرد. این مدل باعث بهبود نتایج آنها در مقایسه با مدل همگن می‌شد. همچنین آنها در حل خود از سه مدل توربولانس SST $k-\omega$, SAS, LES استفاده کردند که تفاوت مشخصی بین نتایج آنها مشاهده نشد. عبدالرازک و همکاران [۲۶] جریان آشفته سه نانوسیال مختلف را به صورت عددی و آزمایشگاهی با رویکرد تک‌فاز مورد بررسی قرار دادند. آنها حل عددی خود را با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت و مدل $k-\epsilon$ استاندارد انجام دادند. بر اساس نتایج آنها، نانو سیال آب اکسید آلومینیم دارای عملکرد بهتر و نانو سیال آب اکسید مس دارای عملکرد بدتری نسبت به بقیه می‌باشد. همچنین عدد پراتل (نسبت ضریب پخش ممنوم به ضریب پخش حرارت) اثر بیشتری نسبت به ضریب هدایت حرارتی سیال بر انتقال حرارت دارد. اسماعیلی و همکاران [۲۷] به بررسی جریان آشفته جابجایی ترکیبی نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در یک

صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه از مدل مخلوط و مدل اولر به عنوان مدل دوفازی استفاده شده است. نتایج این پژوهش، مطابقت خوب هر دو مدل با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد به طوری که حداکثر خطا در پیش‌بینی عدد ناسلت برای مدل مخلوط ۹/۹۱ درصد و برای مدل اولر ۱۱ درصد می‌باشد. بهرویان و همکاران [۱۷] در شبیه‌سازی عددی جریان آشفته نانوسیال آب-مس تا کسر حجمی ۲ درصد، بیان نمودند که مدل اوپلر-اوپلری بجز در کسر حجمی ۰/۵ درصد دارای نتایج غلط می‌باشد. همچنین برای مدل مخلوط حداکثر خطای ۱۵ درصد را گزارش نمودند. در این مقاله استفاده از مدل نیوتنی تک فاز و مدل اوپلری-لاگرانژی برای تحقیقات آینده توصیه شده است. کومار و پورانیک [۱۸] در مقاله خود، جریان آشفته نانوسیالات آب-اکسید آلومینیم، آب-اکسید تیتانیوم و آب-مس را برای کسرهای حجمی کمتر از ۲ درصد بررسی و اعلام کردند که برای کسر حجمی ۰/۵ درصد، مدل لاگرانژی-اوپلری دارای دقت بیشتری نسبت به مدل تک فاز در پیش‌بینی عدد ناسلت می‌باشد در حالی که با افزایش کسر حجمی نانوذرات نتایج به دست آمده از مدل تک فاز به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. شبرگرد و همکاران [۱۹] به بررسی جریان آشفته نانوسیال در مدار خنک‌کاری گازهای خروجی از اگزوز جهت استفاده مجدد در موتور با استفاده از مدل تک-فاز و مدل توربولانس $k-\epsilon$ استاندارد پرداختند. در کار آنها اثر نانوذرات مختلف اکسید مس، آلومینیم، تیتانیوم و سیلیکون در سیال پایه آب بر عملکرد سیستم مذکور بررسی شده است. ژنگ و همکاران [۲۰] انتقال حرارت در جریان آشفته نانوسیال آب اکسید آلومینیم در یک لوله دایروی با نوارهای مارپیچ داخل آن را به صورت تک‌فاز و استفاده از مدل توربولانس SST $k-\omega$ مورد بررسی قرار دادند. هدف آنها آشفته کردن بیشتر جریان و استفاده از نانوسیال به منظور بهبود ضریب انتقال حرارت بود. سادنی و همکاران [۲۱] به بررسی انتقال حرارت و افت فشار جریان آشفته نانوسیال آب اکسید آلومینیم در یک مبدل حرارتی با لوله‌های مارپیچ مستطیلی-دایروی پرداختند. آنها در حل خود از رویکرد تک‌فاز و نرم‌افزار انسیس فلونت و مدل توربولانس Realizable $k-\epsilon$ تحت شار حرارتی ثابت در دیواره لوله استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها با افزایش غلظت نانوسیال و همچنین انحنای لوله‌ها ضریب انتقال

مس در لوله‌ای به قطر ۱۱/۷ میلی‌متر و طول ۰/۷۷ متر که تحت شار حرارتی ثابت ۵۳۴۳۱ وات بر متر مربع قرار دارد با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد وارد و به صورت کاملاً توسعه یافته از آن خارج می‌شود [۲۹]. در هر دو مسأله سیال خارج شده از لوله به مخزنی با فشاری برابر فشار اتمسفر می‌ریزد. هندسه هر دو مسأله در نرم افزار گمبیت به صورت متقارن محوری تولید و از شرط مرزی سرعت ورودی در مرز ورودی، شرط مرزی دیوار برای دیواره لوله، شرط مرزی تقارن محوری در مرکز لوله و از شرط فشار خروجی، در مرز خروجی استفاده شده است. جریان در رژیم آشفته و فرضیه تعادل گرمایی بین سیال پایه و نانوذرات برقرار می‌باشد. روی دیواره لوله شرط عدم لغزش بدون جریان تزریقی یا مکشی منظور شده و تمامی مولفه‌های سرعت روی دیواره صفر می‌باشند.

۲-۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان شامل معادله پایستاری جرم، معادله مومنتم و معادله انرژی می‌شود که برای حالت پایا و تراکم ناپذیر به صورت زیر می‌باشند [30].

$$\text{div}(\rho \bar{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\text{div}(\rho \bar{V} \bar{V}) = -\nabla \bar{P} + \mu \nabla^2 \bar{V} - \text{div}(\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

$$\text{div}(\rho \bar{V} C_p \bar{T}) = \text{div}(k \nabla \bar{T} - \rho C_p \overline{u'_i T}) \quad (3)$$

در معادلات فوق \bar{p} , \bar{T} , \bar{V} بیانگر مقادیر متوسط زمانی سرعت، دما و فشار جریان می‌باشند. عبارت های $\rho \overline{u'_i u'_j}$ و $\rho C_p \overline{u'_i T}$ به ترتیب تانسور تنش رینولدز و شار حرارتی آشفته می‌باشند. تنش‌های رینولدز در واقع تنش نیستند بلکه از ترم‌های جابجایی در سمت چپ معادله ممنتوم و به واسطه مولفه‌های نوسانی سرعت بدست آمده‌اند. این تنش-ها بیانگر این واقعیت هستند که بخش نوسانی جریان در اندرکنش با بخش متوسط جریان می‌باشد و نیرویی برابر $-\partial \overline{u'_i u'_j} / \partial x_j$ به جریان متوسط وارد می‌کند. شار حرارتی آشفته نیز بیانگر مقدار انرژی داخلی‌ای می‌باشد که به سیال توسط آشفتگی جریان و نوسانات دما اضافه می‌گردد.

برای محاسبه عدد ناسلت از رابطه (۴)، ضریب انتقال حرارت از رابطه (۵) و برای محاسبه ضریب اصطکاک از رابطه (۶) استفاده شده است [۳۰].

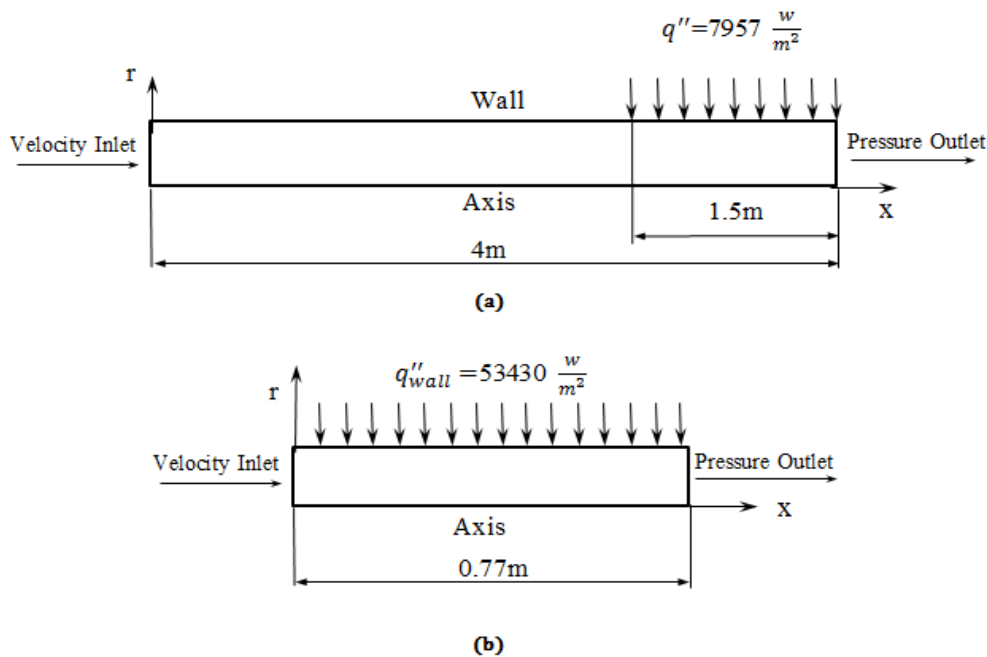
کانال با مقطع مستطیلی با نرم افزار فلونتت پرداختند. آنها از مدل مخلوط برای مدل‌سازی جریان نانوسیال و از مدل k-ε استاندارد برای مدل‌سازی جریان آشفته استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها با افزایش نسبت منظری کانال، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. همچنین افزایش قطر متوسط نانوذرات در حالی که عدد رینولدز و عدد ریچاردسون ثابت است، منجر به کاهش عدد ناسلت می‌شود اما اثر قابل توجهی بر ضریب اصطکاک پوسته‌ای ندارد. با توجه به اهمیت استفاده از نانوسیالات، تاکنون مقالات زیادی به این موضوع اختصاص یافته است که عمدتاً بر روی تأثیر کسر حجمی، قطر ذرات، نوع نانوذرات و رویکرد تک فاز یا دو فاز بودن آن متمرکز بوده است. یکی از مسائل مهم در حوزه شبیه‌سازی عددی جریان آشفته نانوسیالات، مربوط به مدل کردن آشفتگی جریان می‌باشد که می‌تواند خطای قابل توجهی را به دنبال داشته باشد. هدف اصلی از انجام این پژوهش، استفاده از ۶ مدل توربولانس مختلف (که عموماً در شبیه‌سازی‌های CFD مورد استفاده قرار می‌گیرند) برای شبیه‌سازی جریان آشفته نانوسیال بوده است تا عملکرد این مدل‌ها در این خصوص مورد بررسی قرار گیرد چرا که هرکدام از این مدل‌ها برای جریان‌های خاصی توسعه یافته‌اند و برای استفاده در شرایط دیگر لازم است مجدد توانایی آنها مورد بررسی قرار گیرد.

۲-۲- مدل سازی ریاضی

در این قسمت، بخش‌های مختلف مربوط به حل مسأله شامل هندسه و شرایط مرزی، معادلات حاکم، انتخاب مدل توربولانس، خواص ترموفیزیکی نانوسیال، روش حل عددی، استقلال از مش و اعتبارسنجی حل عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- هندسه و شرایط مرزی

در این مطالعه، به منظور بررسی بهتر و دقیق‌تر عملکرد مدل‌های آشفتگی، نتایج شبیه‌سازی با دو نوع داده‌های آزمایشگاهی مجزا مقایسه شده است. در مسأله اول مطابق شکل ۱- الف، لوله‌ای افقی با قطر ۱۶ میلی‌متر و طول ۴ متر که ۱/۵ متر انتهایی لوله تحت شار حرارتی ثابت ۹۷۵۷ وات بر متر مربع می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. نانوسیال آب-اکسید سیلیسیم با دمای ۲۷ درجه سانتیگراد وارد لوله و به صورت توسعه یافته از آن خارج می‌گردد [۲۸]. در مسأله دوم نیز (شکل ۱- ب) نانوسیال آب اکسید



شکل ۱- طرح شماتیکی از هندسه مساله و شرایط مرزی (a) مسأله اول [۲۸]، (b) مسأله دوم [۲۹]

های $k-\epsilon$, Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$ می-باشند که در این پژوهش تابع دیواره بهبود یافته برای آنها بکار گرفته شده است. مدل‌های SST $k-\omega$, Standard $k-\omega$ و مدل تنش رینولدز (RSM) که مدل‌های رینولدز پایین محسوب می‌گردند، به جای استفاده از توابع دیواره، از توابع استهلاک استفاده می‌کنند. این مدل‌ها همگی برای یک سیال تک فاز مانند آب یا هوا ارائه شده‌اند.

۲-۴- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

در مطالعه حاضر، خواص ترموفیزیکی نانوسیال با استفاده از روابط تک‌فاز و در دمای میانگین ورودی و خروجی نانوسیال تعیین شده‌اند. لازم به ذکر است مدل تک‌فاز بر اساس فرض تعادل حرارتی بین فاز مایع و نانوذرات و همچنین سرعت نسبی صفر بین آنها عمل می‌کند. به عبارت دیگر، فرض بر این است که نانوذرات با سرعتی برابر با سرعت سیال پایه حرکت می‌کنند. چگالی نانوسیال با استفاده از رابطه ارائه توسط پاک و چو [۳۲]، ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال با استفاده از رابطه سوان و روتزل [۳۳]، ویسکوزیته نانوسیال از رابطه مایگا و همکاران [۴] و ضریب هدایت حرارتی نیز با استفاده از رابطه یو و چوی [۳۴] محاسبه گردیده است. علت استفاده از این روابط دقت قابل قبول آنها در پژوهش‌های مختلف بوده است.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4)$$

$$h = \frac{q''}{(T_{wall} - T_{bulk})} \quad (5)$$

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{\rho \bar{V}^2}{2}\right)} \quad (6)$$

همچنین به منظور مقایسه نتایج عددی علاوه بر داده‌های آزمایشگاهی از روابط ارائه شده توسط پتوخف [۳۱] برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به صورت زیر استفاده شده است.

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1.07 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (7)$$

$$f = (0.790 \ln(Re) - 1.64)^{-2} \quad (8)$$

۲-۳- انتخاب مدل توربولانس

برای بسته شدن و یا به عبارت دیگر، حل معادلات (۲) و (۳) نیاز به استفاده از مدل‌های آشفتگی می‌باشد. در این مطالعه، از دو نوع مدل‌های توربولانس رینولدز پایین و رینولدز بالا برای مدل کردن آشفتگی جریان استفاده شده است. مدل‌های رینولدز بالا که برای محاسبه کمیت‌ها در نزدیکی دیوار از توابع دیواره بهره می‌برند شامل مدل-

برقراری ارتباط بین میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. دقت حل نیز تا ارضای شرط همگرایی 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

۲-۶- بررسی استقلال از شبکه

برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج عددی به ابعاد شبکه، شبیه‌سازی مسأله برای آب خالص در محدوده کمترین و بیشترین عدد رینولدز با استفاده از مدل توربولانس Realizable k-ε برای چهار شبکه مختلف انجام گرفته است. لازم به ذکر است به این دلیل آب خالص به عنوان سیال در نظر گرفته شده است که با توجه به انتخاب رویکرد تک‌فاز برای حل مسأله، نانوسیال نیز عملاً یک سیال مشابه آب اما با ویژگی‌های ترموفیزیکی متفاوت می‌باشد. این موضوع در اعتبارسنجی صورت گرفته در بخش بعد نیز لحاظ شده است تا مشخص شود که حل عددی بدرستی انجام گرفته است. بررسی‌های بعد از حل مسأله برای نانوسیال و انتخاب مدل توربولانس نیز استقلال از مش بدست آمده را تأیید می‌کند. در مسأله اول می‌توان تولید شبکه را به دو قسمت مجزا تقسیم‌بندی کرد. ناحیه ورودی که در آن شبکه از دیواره به سمت لوله با ضریب $1/0.4$ و در امتداد افقی لوله، با ضریب $1/0.2$ منبسط گردیده است و ناحیه کاملاً توسعه یافته که از شبکه با ضریب انبساط $1/0.4$ از دیواره به سمت مرکز لوله و در امتداد افقی بدون اعمال ضریب انبساط تشکیل شده است. تولید شبکه در مسأله دوم نیز همانند مسأله اول انجام گرفته است با این تفاوت که در ناحیه ورودی با ضریب $1/0.45$ از دیواره به سمت مرکز لوله و ضریب $1/0.1$ در جهت افقی و در ناحیه کاملاً توسعه یافته با ضریب $1/0.45$ از دیواره به سمت مرکز لوله و در جهت افقی بدون انبساط انجام گرفته است. جدول ۲ استقلال از شبکه برای مسأله اول و جدول ۳ نتایج مربوطه را برای مسأله دوم در محدوده کمترین و بیشترین عدد رینولدز برای آب خالص نشان می‌دهد. در شکل (۲) نیز نمودار استقلال از مش در عدد رینولدز 5000 برای ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک در مسأله اول و در شکل (۳) نمودار فوق در عدد رینولدز 4000 برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در مسأله دوم نشان داده شده است. با توجه به نمودارها و جداول مذکور، از شبکه 120×2000 در مسأله اول و از شبکه 100×320 در مسأله دوم استفاده شده است.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \quad (9)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_{np} \quad (10)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (123\phi^2 + 7.3\phi + 1) \quad (11)$$

$$k_{nf} = k_{bf} \left[\frac{(k_{np} + 2k_{bf}) + 2\phi(k_{np} - k_{bf})(1 + \beta)^3}{(k_{np} + 2k_{bf}) - \phi(k_{np} - k_{bf})(1 + \beta)^3} \right] \quad (12)$$

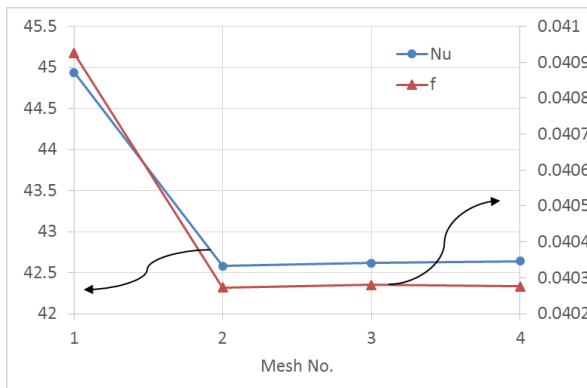
در رابطه (۱۲)، β نسبت ضخامت لایه مشترک سیال پایه و نانوذرات، به شعاع نانوذرات می‌باشد و در محاسبات انجام گرفته 0.1 در نظر گرفته شده است. با توجه به اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال و مقادیر پیش‌بینی شده محاسباتی، یو و چوی [۳۴] با در نظر گرفتن اثر نانولایه‌ای که بین نانوذرات جامد و سیال مایع در سوسپانسیون نانوسیال بوجود می‌آید، مدل ماکسول برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی را اصلاح کردند به طوری که تطابق آن با داده‌های آزمایشگاهی به خصوص برای نانوذرات کوچکتر از 10 نانومتر بسیار بهتر می‌گردد. در حقیقت معادله آنها علاوه بر ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و نانوذرات و نیز کسر حجمی نانوذرات، تأثیر نانولایه ایجاد شده بین سیال پایه و نانوذرات را در برآورد ضریب هدایت حرارتی مد نظر قرار می‌دهد. در جدول ۱ مشخصات ترموفیزیکی نانوذرات و آب خالص آمده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی نانوذرات و آب خالص [۲۹]

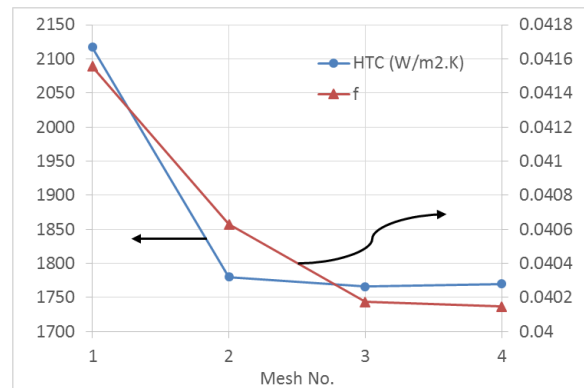
آب خالص	اکسید سیلیسیم	اکسید مس	ماده خواص
۹۹۸	۲۲۲۰	۶۵۰	ρ (kg/m ³)
۴۱۸۲	۷۴۵	۵۴۰	C_p (J/kg.K)
۰/۶۱۳	۱/۴	۱۸	k (W/m.K)
۰/۰۰۱	---	---	μ (kg/m.s)

۲-۵- روش حل عددی

در شبیه‌سازی عددی حاضر، گسسته‌سازی معادلات بقاء که به یکدیگر کوپل می‌باشند به روش حجم محدود و با استفاده از نرم افزار ANSYS Fluent انجام گرفته است. روش حجم محدود، معادلات بقاء را به یک سری معادلات جبری تبدیل می‌کند که می‌توان آنها را به صورت عددی حل نمود. برای انصال ترم‌های جابجایی در معادلات اندازه حرکت و انرژی نیز از طرح آپویند مرتبه دوم و برای



شکل ۳- استقلال از مش برای دو کمیت ضریب اصطکاک و عدد ناسلت در عدد رینولدز ۴۰۰۰ برای مسأله دوم



شکل ۲- استقلال از مش برای دو کمیت ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت در عدد رینولدز ۵۰۰۰ برای مسأله اول

جدول ۲- استقلال از شبکه برای آب خالص در مسأله اول

شماره مش	ابعاد شبکه	Re=۵۰۰۰		Re=۲۷۰۰۰	
		h (w/m ² k)	f	h (w/m ² k)	f
۱	۶۰×۸۰۰	۲۱۱۷/۳۰	۰/۰۴۱۵۵۵۶۴۵	۷۵۱۲/۴۰	۰/۰۲۷۱۰۴۵۴۵
۲	۸۰×۱۲۰۰	۱۷۸۰/۰۹	۰/۰۴۰۶۲۸۴۹	۷۰۲۳/۲۷	۰/۰۲۶۲۶۷۲۹۵
۳	۱۰۰×۱۶۰۰	۱۷۶۶/۱۲	۰/۰۴۰۱۷۳۶۵۴	۶۸۲۰/۷۲	۰/۰۲۵۸۶۷۷۵۴۷
۴	۱۲۰×۲۰۰۰	۱۷۷۰/۵۹	۰/۰۴۰۱۴۶۹۵۵	۶۷۹۱/۳۸	۰/۰۲۵۸۱۹۸۸۶۵

جدول ۳- استقلال از شبکه برای آب خالص در مسأله دوم

شماره مش	ابعاد شبکه	Re=۴۰۰۰		Re=۲۰۰۰۰	
		Nu	f	Nu	f
۱	۴۰×۱۴۰	۴۴/۹۳۶	۰/۰۴۰۹۲۵	۱۶۱/۷۱۸	۰/۰۲۶۷۸
۲	۶۰×۱۸۰	۴۲/۵۸۱	۰/۰۴۰۲۷۳	۱۶۵/۱۴۱۲	۰/۰۲۵۷۶۵
۳	۸۰×۲۵۰	۴۲/۶۱۶	۰/۰۴۰۲۸	۱۵۷/۵۰۶۲	۰/۰۲۵۴۴۳
۴	۱۰۰×۳۲۰	۴۲/۶۳۹	۰/۰۴۰۲۷۶	۱۵۷/۵۹۳۵	۰/۰۲۵۴۶۳

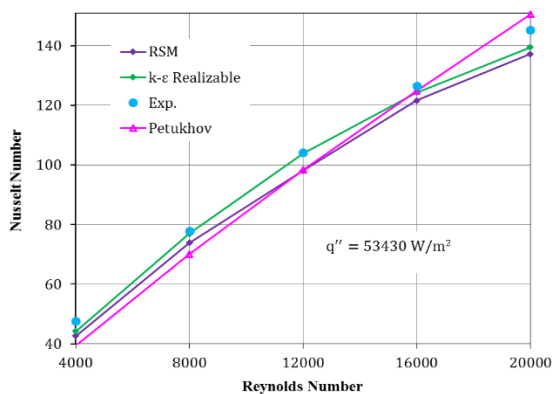
[۲۸]، سهین و همکاران [۲۹] و روابط پتخف [۳۱] در شکل‌های (۴) تا (۷) مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده از حل عددی و داده‌های آزمایشگاهی برقرار است. جدول ۴ بیشترین خطای محاسباتی نسبت به نتایج تجربی و روابط پتخف [۳۱] را نشان می‌دهد.

۲-۷- اعتبارسنجی حل عددی

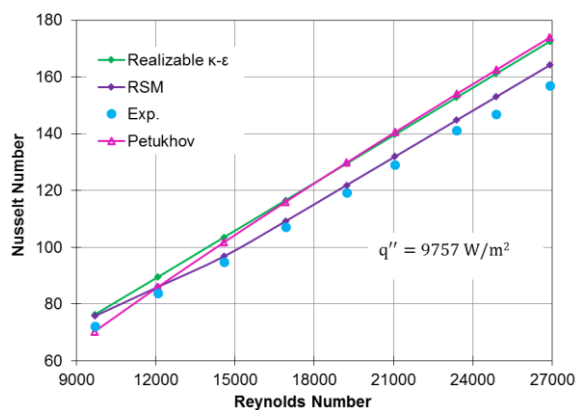
برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل عددی، از دو مدل توربولانس Realizable $k-\epsilon$ و RSM استفاده شده است. مقادیر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک آب خالص در ۹ عدد رینولدز مختلف با نتایج تجربی از می و همکاران

جدول ۴- حداکثر درصد خطای حاصل از دو مدل Realizable κ - ϵ و RSM نسبت به نتایج تجربی [۲۸] و [۲۹] و معادله پتخف [۳۱] برای آب خالص بر اساس شکل‌های ۴ تا ۷.

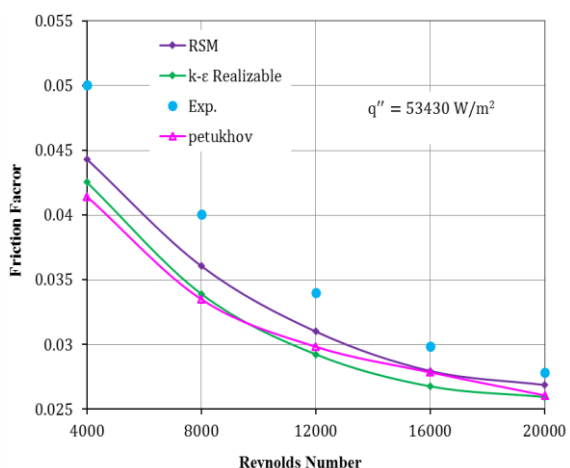
Problem 1	Nusselt Number		Friction Factor	
	Exp [۲۸]	Petukhov [۳۱]	Exp [۲۸]	Petukhov [۳۱]
Realizable κ - ϵ	۹/۷	۸/۴	۶/۶	۶/۴
RSM	۵	۷/۶	۶/۷	۶/۵
Problem 2	Exp [۲۹]	Petukhov [۳۱]	Exp [۲۹]	Petukhov [۳۱]
Realizable κ - ϵ	-۷	۱۱/۹	-۱۴/۱	-۳/۸
RSM	-۱۰/۳	-۸/۷	-۱۱/۲	۷/۶



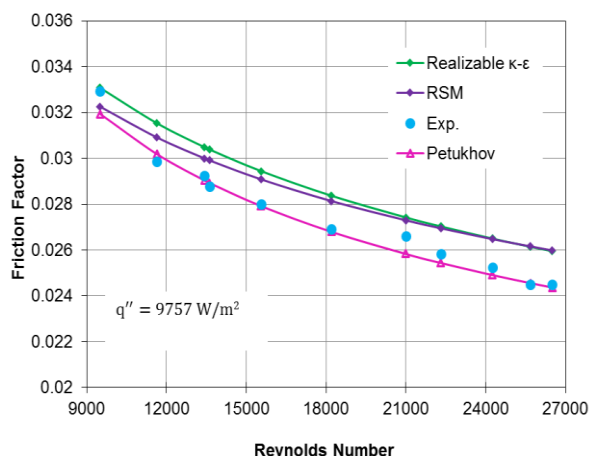
شکل ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی [۲۹] و رابطه پتخف [۳۱] در مسأله دوم برای عدد ناسلت آب خالص.



شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی [۲۸] و معادله پتخف [۳۱] در مسأله اول برای عدد ناسلت آب خالص.

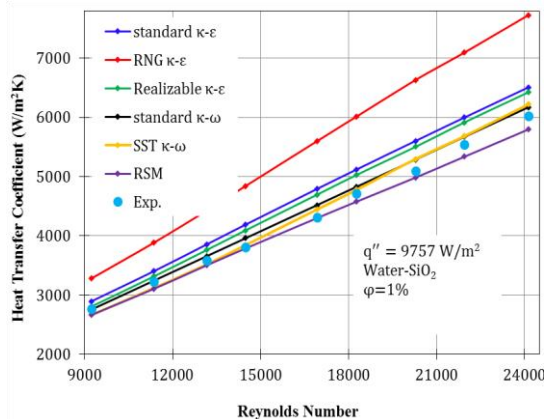


شکل ۷- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی [۲۹] و معادله پتخف [۳۱] در مسأله دوم برای ضریب اصطکاک آب خالص.

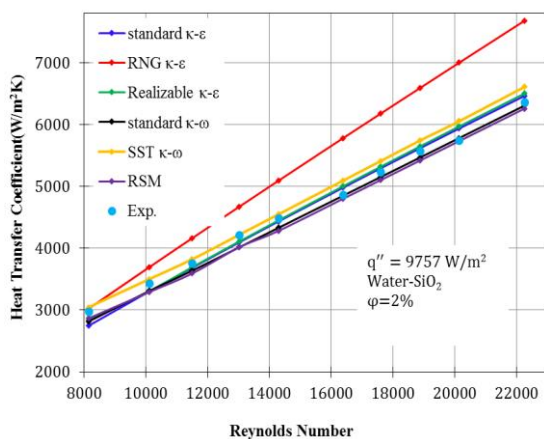


شکل ۵- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی [۲۸] و رابطه پتخف [۳۱] در مسأله اول برای ضریب اصطکاک آب خالص.

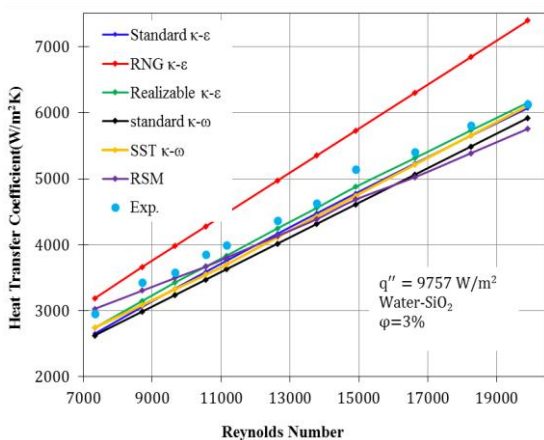
خطای زیاد نسبت به نتایج تجربی، مدل قابل قبولی برای این موضوع محسوب نمی‌گردد.



شکل ۸- مقایسه ضریب انتقال حرارت حاصل از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۸] در کسر حجمی ۱٪ برای مسأله اول.



شکل ۹- مقایسه ضریب انتقال حرارت حاصل از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۸] در کسر حجمی ۲٪ برای مسأله اول.



شکل ۱۰- مقایسه ضریب انتقال حرارت حاصل از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۸] در کسر حجمی ۳٪ برای مسأله اول.

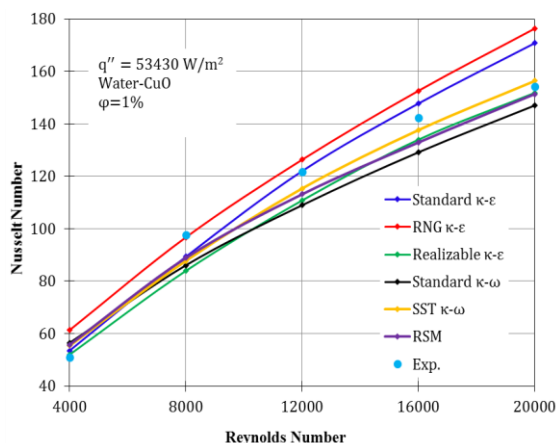
۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حل عددی برای ۳ کمیت ضریب انتقال حرارت، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای دو شرایط ذکر شده در بخش ۲-۱ بر اساس نتایج تجربی از می و همکاران [۲۸] و سهین و همکاران [۲۹] گزارش شده است.

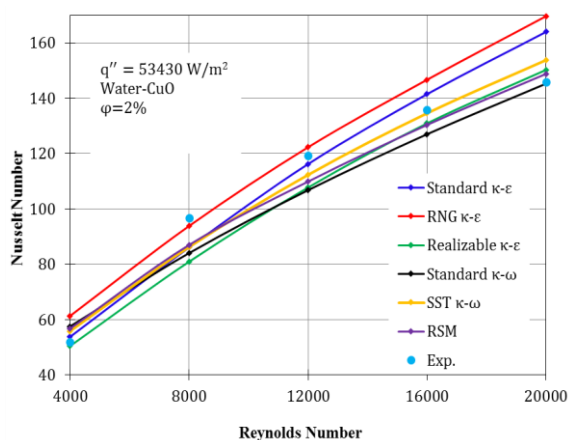
۳-۱ ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت

شکل (۸) نتایج حل عددی حاصل از شش مدل توربولانس مورد استفاده در کسر حجمی ۱٪ برای مسأله اول را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از مدل توربولانس RSM با حداکثر خطای ۳/۷- درصد نسبت به نتایج تجربی بهترین عملکرد را در میان سایر مدل‌ها در پیش بینی ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید سیلیسیم دارد. در همین کسر حجمی مدل RNG k-ε با ثبت خطای ۳۰/۲ درصد پیش بینی نامطلوبی در محاسبه ضریب انتقال حرارت از خود نشان می‌دهد. شکل (۹) مقادیر ضریب انتقال حرارت برای کسر حجمی ۲٪ را نشان می‌دهد. در این کسر حجمی نیز نتایج حاصل از مدل توربولانس RSM در پیش بینی ضریب انتقال حرارت نانوسیال با ثبت حداکثر خطای ۴/۶- درصد نسبت به نتایج تجربی، بهترین عملکرد را دارد در حالی که مدل RNG k-ε با خطای ۲۱/۷ درصد، بیشترین انحراف را نشان می‌دهد.

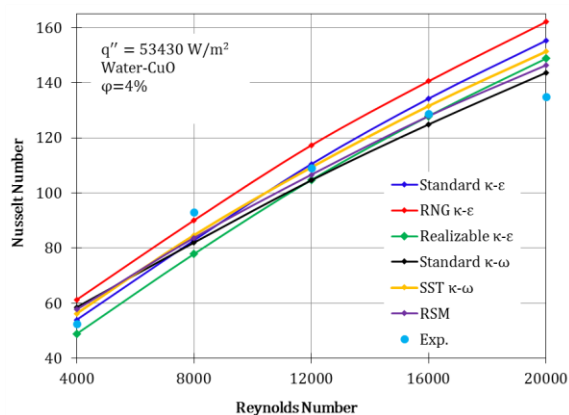
در شکل (۱۰) مقادیر ضریب انتقال حرارت حاصل از مدل‌های Realizable k-ε و RSM به ترتیب با حداکثر خطای ۸/۲- و ۸/۹- درصد، کمترین خطا نسبت به نتایج تجربی در کسر حجمی ۳٪ را دارند. در شکل (۱۱) نتایج برای کسر حجمی ۴٪ رسم شده است. در این حالت نیز نتایج حاصل از مدل RSM با بیشترین خطای ۱/۶- درصد، کمترین انحراف نسبت به نتایج تجربی را از خود نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده، در حالت کلی می‌توان مدل RSM را به عنوان بهترین مدل، در میان مدل‌های بکار گرفته شده در مطالعه حاضر برای محاسبه ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید سیلیسیم دانست، هرچند در کسر حجمی ۳٪ نتایج حاصل از مدل Realizable k-ε اندکی خطای کمتری نسبت به مدل RSM از خود نشان می‌دهد. در مورد مدل RNG k-ε نیز می‌توان بیان نمود که در تمامی کسرهای حجمی به دلیل



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر عدد ناسلت بدست آمده از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۹] در کسر حجمی ۱٪ برای مسأله دوم.



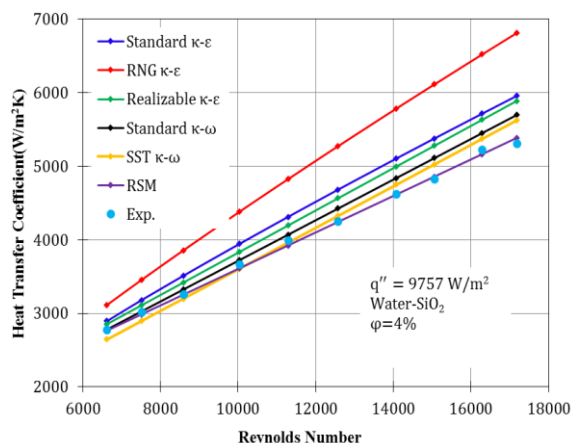
شکل ۱۴- مقایسه مقادیر عدد ناسلت بدست آمده از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۹] در کسر حجمی ۲٪ برای مسأله دوم.



شکل ۱۵- مقایسه مقادیر عدد ناسلت بدست آمده از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۹] در کسر حجمی ۴٪ برای مسأله دوم.

۳-۲- ضریب اصطکاک

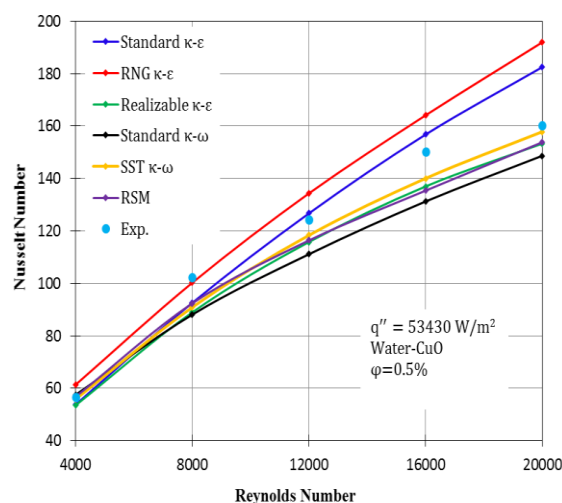
بر اساس شرایط نشان داده شده در بخش ۲-۱ برای مسأله اول، ضریب اصطکاک نانوسیال آب- اکسید سیلیسیم در کسر حجمی ۱٪ که با استفاده از مدل‌های توربولانس مختلف بدست آمده است در شکل (۱۶) با نتایج تجربی



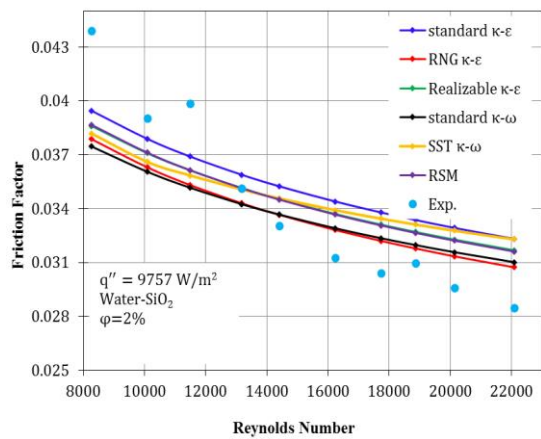
شکل ۱۱- مقایسه ضریب انتقال حرارت حاصل از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۸] در کسر حجمی ۴٪ برای مسأله اول.

در بررسی مسأله دوم، همانطور که در شکل (۱۲) می‌توان مشاهده نمود، نتایج حاصل از مدل RSM با بیشترین خطای ۹/۸ درصد در کسر حجمی ۵/۰٪، بهترین تطابق را با داده‌های آزمایشگاهی [۲۹] عدد ناسلت دارد. شکل (۱۳) نیز مقادیر عدد ناسلت در کسر حجمی ۱٪ را نشان می‌دهد که مجدداً نتایج بدست آمده از مدل RSM با حداکثر خطای ۷/۱- درصد نسبت به نتایج تجربی، بهترین عملکرد را دارد. چنین نتایجی برای کسر حجمی ۲٪ و ۴٪ که در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است نیز به چشم می‌خورد.

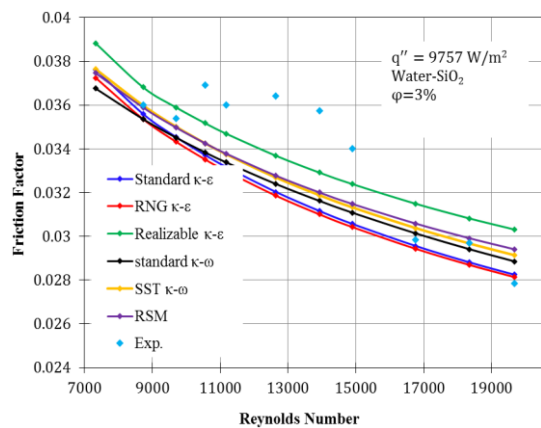
علاوه بر این، از شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) مشاهده می‌گردد که در کسر حجمی‌های مختلف با افزایش عدد رینولدز میزان انحراف مدل RNG k-ε از داده‌های آزمایشگاهی بیشتر می‌شود.



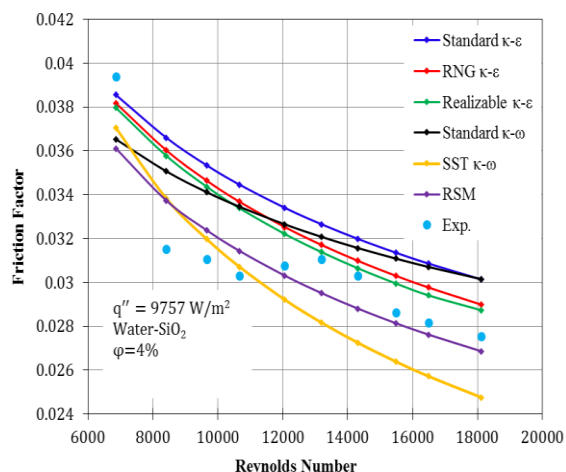
شکل ۱۲- مقایسه مقادیر عدد ناسلت بدست آمده از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۹] در کسر حجمی ۰/۵٪ برای مسأله دوم.



شکل ۱۷- مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک حاصل از مدل‌های توربولانس مختلف با مقادیر تجربی [۲۸] در کسر حجمی ۲٪ برای مسأله اول.

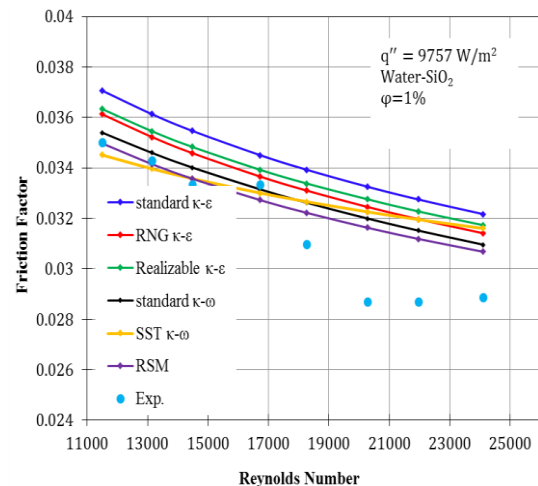


شکل ۱۸- مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک حاصل از مدل‌های توربولانس مختلف با مقادیر تجربی [۲۸] در کسر حجمی ۳٪ برای مسأله اول.

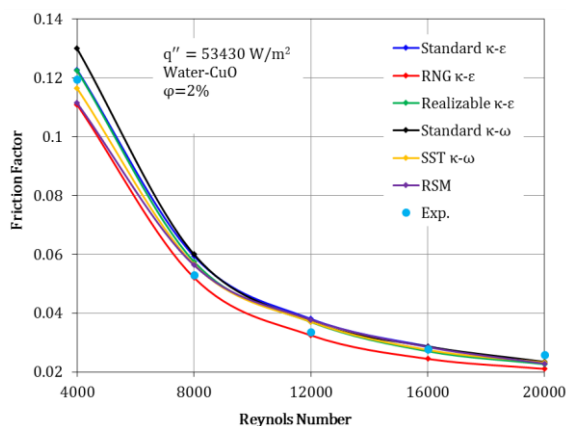


شکل ۱۹- مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک حاصل از مدل‌های توربولانس مختلف با مقادیر تجربی [۲۸] در کسر حجمی ۴٪ برای مسأله اول.

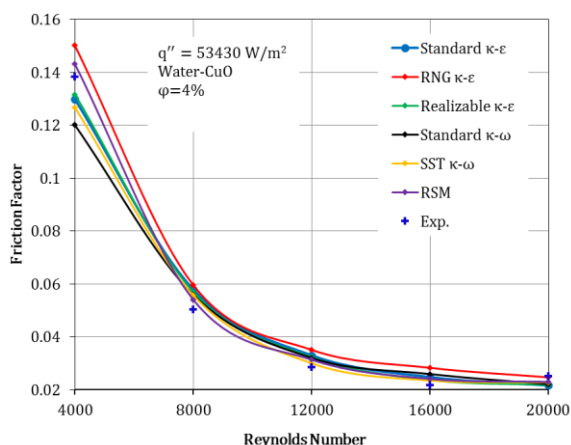
ازمی و همکاران [۲۸] مقایسه شده است. مشاهده می‌شود مدل RSM با حداکثر خطای ۱۲/۱ درصد کمترین خطای محاسباتی را نشان می‌دهد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات اکسید سیلیسیم تا مقدار ۲٪، همانطور که در شکل (۱۷) ملاحظه می‌شود، مجدداً نتایج حاصل از مدل RSM در پیش‌بینی ضریب اصطکاک نانوسیال در مقایسه با سایر مدل‌ها دقت بهتری دارد. حداکثر خطای حاصل از این مدل، ۱۱/۸ درصد در عدد رینولدز ۸۲۶۵ می‌باشد. شکل (۱۸) نیز نمودار ضریب اصطکاک نانوسیال را در کسر حجمی ۳٪ به ازای مدل‌های مختلف نمایش می‌دهد. در این حالت نتایج بدست آمده از مدل Realizable k-ε با حداکثر انحراف ۷/۹ درصد نسبت به نتایج تجربی، کمترین خطا را نشان می‌دهد. نتایج برای کسر حجمی ۴٪ در شکل (۱۹) نشان داده شده است. در این کسر حجمی نیز مانند قبل مدل RSM با بیشترین خطای ۸/۳ درصد، بهترین پیش‌بینی را برای ضریب اصطکاک از خود نشان می‌دهد. در مقایسه‌ای که میان نتایج بدست آمده از مدل‌های توربولانس مورد استفاده در این پژوهش برای محاسبه ضریب اصطکاک انجام گرفته است، با وجود اینکه در کسر حجمی ۳٪ نتایج بدست آمده از مدل توربولانس Realizable k-ε اندکی دقیق‌تر از مدل RSM می‌باشد، به طور کلی می‌توان از مدل RSM به عنوان دقیق‌ترین مدل توربولانس در پیش‌بینی ضریب اصطکاک نانوسیال آب-اکسید سیلیسیم در این شبیه‌سازی عددی نام برد.



شکل ۱۶- مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک حاصل از مدل‌های توربولانس مختلف با مقادیر تجربی [۲۸] در کسر حجمی ۱٪ برای مسأله اول.



شکل ۲۲- مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۹] در کسر حجمی ۲٪ برای مسأله دوم.



شکل ۲۳- مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۹] در کسر حجمی ۴٪ برای مسأله دوم.

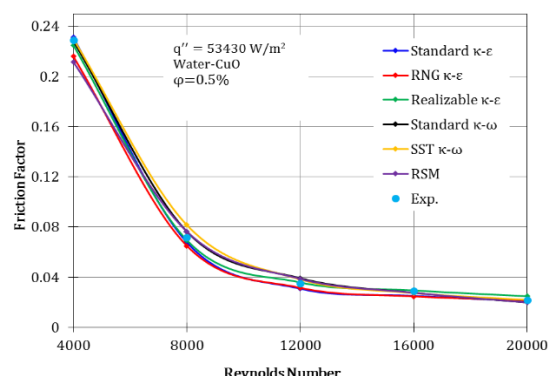
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، جریان آشفته نانوسیال آب- اکسید سیلیسیم و آب- اکسید مس برای شرایط مختلف در دو لوله افقی به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. یکی از اهداف اصلی این مطالعه، بررسی عملکرد ۶ مدل توربولانس رایج و پرکاربرد می‌باشد تا بتوان در نهایت مدل توربولانسی که تطابق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی مربوط به جریان نانوسیال دارد را مشخص کرد. از مهمترین دستاوردهای بدست آمده از مطالعه حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. ۱- در حالت کلی نتایج به دست آمده از مدل توربولانس تنش رینولدز در کسر حجمی‌های مختلف بهترین عملکرد را در میان سایر مدل‌ها برای محاسبه عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نانوسیال از خود نشان می‌دهد. این موضوع احتمالاً مربوط به غیر ایزوتروپیک بودن

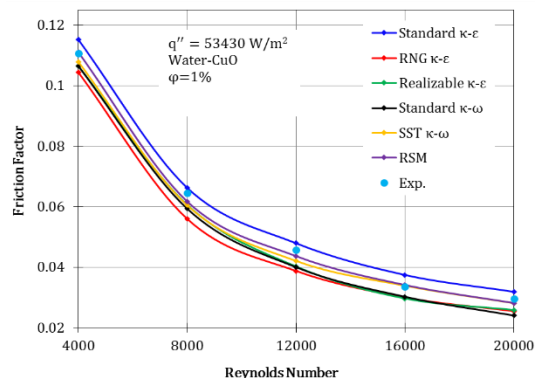
در مسأله دوم نیز به بررسی ضریب اصطکاک نانوسیال آب- اکسید مس بر اساس هندسه و شرایط اشاره شده در بخش ۱-۲ بر اساس نتایج آزمایشگاهی سهین و همکاران [۲۹] پرداخته شده است. نتایج در شکل‌های (۲۰) تا (۲۳) برای کسر حجمی‌های مختلف از ۰/۵ تا ۴ درصد نشان داده شده است. بر همین اساس، کمترین خطای حاصل شده از شبیه‌سازی و مدل مربوطه در جدول ۵ گزارش شده است. جدول ۵- کمترین خطای حاصل از حل عددی در پیش‌بینی ضریب اصطکاک و مدل مربوطه

کسر حجمی (درصد)	۰/۵	۱	۲	۴
مدل	RSM	RSM	SST k-ω	RSM
درصد خطا	۱۰/۷	-۵	۱۰/۶	۱۰/۶

همانطور که از جدول ۵ مشاهده می‌گردد بجز در کسر حجمی ۳ درصد که خطای مدل SST k-ω اندکی کمتر از مدل RSM می‌باشد در بقیه حالت‌ها مدل RSM خطای کمتری را از خود نشان می‌دهد.



شکل ۲۰- مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۹] در کسر حجمی ۰/۵٪ برای مسأله دوم.



شکل ۲۱- مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده از حل عددی با مقادیر تجربی [۲۹] در کسر حجمی ۱٪ برای مسأله دوم.

ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	k	جریان و محاسبه همه تنش‌های آشفته توسط مدل مذکور می‌باشد. با توجه به اینکه شدت آشفتگی در جهت‌های مختلف یکسان نیست، لذا محاسبه ویسکوزیته آشفته با دقت بیشتری توسط این مدل صورت می‌گیرد.
عدد ناسلت	Nu	۲- در صورت نیاز به استفاده از مدل‌های توربولانس دو معادله‌ای جهت صرفه‌جویی در زمان و هزینه محاسباتی، مدل‌های Realizable k-ε و SST κ-ω در میان مدل‌های استفاده شده، بعد از مدل تنش رینولدز دارای دقت قابل قبولی می‌باشند.
فشار (Pa)	p	۳- نتایج به دست آمده از مدل RNG k-ε در محاسبه عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نانوسیال در کسر حجمی‌های مختلف دارای بیشترین خطا نسبت به نتایج تجربی می‌باشد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، میزان انحراف این مدل از داده‌های آزمایشگاهی بیشتر می‌گردد. بنابراین در صورت اتخاذ مدل تک فاز برای حل مسأله، RNG k-ε مدل مناسبی محسوب نمی‌شود.
عدد پراتل	Pr	
شار حرارتی (W/m ²)	q	
عدد رینولدز	Re	
سرعت متوسط زمانی (m/s)	\bar{V}	
دمای دیواره (K)	T _{wall}	
دمای حجمی سیال (K)	T _{bulk}	
مؤلفه نوسانی دما (K)	t	
مؤلفه نوسانی سرعت (m/s)	u'	
	علائم یونانی	
ضخامت نانولایه (nm)	β	
افت فشار (Pa)	Δp	
کسر حجمی نانوذرات (%)	φ	
چگالی (kg/m ³)	ρ	
ویسکوزیته (kg/m.s)	μ	

علائم اختصاری

سیال پایه	bf
نانوسیال	nf

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

C _p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)
D	قطر لوله (m)
f	ضریب اصطکاک
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی (W/m ² .K)
L	طول (m)

۶- مراجع

- [1] S. K. Naghibzadeh, M. R. Hajmohammadi, M. Saffar-Avval, Heat transfer enhancement of a nanofluid in a helical coil with flattened cross-section, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 146, 2019, pp. 36-47.
- [2] K. Rahbar, A. Riasi, H. K. Bolouri, N. Razmjoo, Heat recovery of nano-fluid based concentrating Photovoltaic Thermal (CPV/T) Collector with Organic Rankine Cycle, *Energy Conversion and Management*, Vol. 179, 2019, pp. 373-396.
- [3] V. Corumlu, A. Ozsoy, M. Ozturk, Evaluation of Heat Transfer Mechanisms in Heat Pipe Charged with Nanofluid, *Arabian Journal for Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03742-9>.
- [4] S. Maiga, C. Nguyen, N. Galanis, G. Roy, T. Mare, and M. Coqueux, "Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using Al₂O₃ nanoparticle suspension", *International Journal of Numerical Methods Heat Fluid Flow*, Vol. 16, 2006, pp. 275-292.
- [5] K. Khanafer, and K. Vafai, "A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, 2011, pp. 4410-4428.
- [6] M. Jalal, H. Meisami, and M. Pouyagohar, "Investigation of Titania/Water Nanofluid Viscosity, Density and Pressure Drop in Circular Channel", *World Applied Sciences Journal* Vol. 27, No. 8, 2013, pp. 1037-1041.

- [۷] محمد همت اسفه، مجتبی بیگلری، سیف‌الله سعدالدین و سیدهادی رستمیان، "ارزیابی تجربی خواص ترموفیزیکی، انتقال حرارت جابجایی و افت فشار در نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره عامل دار شده"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۵، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۷۳-۸۴.
- [۸] مسعود ضیائی راد و مریم بیگی هرچگانی، "مطالعه عددی انتقال حرارت و افت فشار در جریان اجباری نانوسیال داخل لوله دنداندار"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۶۵-۷۶.
- [9] M.H. Kayhani, M. Nazari, H. Soltanzadeh, M.M. Heyhat, and F. Kowsary, "Experimental analysis of turbulent convective heat transfer and pressure drop of Al₂O₃/water nanofluid in horizontal tube", *Micro and Nano Letters*, Vol. 7, 2012, pp. 223-227.
- [۱۰] محمد شریفی اصل، داود طغریایی و احمد رضا عظیمیان، "شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان مغشوش غیرنیوتنی نانوسیال در یک لوله افقی مدور"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۰-۱۰.
- [11] M. Corcione, M. Cianfrini, and A. Quintino, "Heat transfer of nanofluids in turbulent pipe flow", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 56, 2012, pp. 58-69.
- [12] Davarnejad et al., CFD simulation of the effect of particle size on the nanofluids convective heat transfer in the developed region in a circular tube", *Springer Plus* 2013 2:192.
- [13] G. Saha, and M.C. Paul, "Heat transfer and entropy generation of turbulent forced convection flow of nanofluids in a heated pipe", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 61, 2014, pp. 26-36.
- [14] A. Aghaei et al., "Numerical investigation of turbulent forced-convective heat transfer of Al₂O₃-water nanofluid with variable properties in tube", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 6, 2015, pp. 577-585.
- [15] F. Hatami, and F. Okhovati, "Analysis of turbulent flow of nanofluids in a pipe", *European Online Journal of Natural and Social Sciences*, Vol. 3, 2014, pp. 72-85.
- [16] M. Hejazian, M. Keshavarz, and A. Beheshti, "Comparative study of Euler and mixture models for turbulent flow of Al₂O₃ nanofluid inside a horizontal tube", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, 2014, pp. 152-158.
- [17] I. Behroyan, P. Ganesana, S. Sivasankaran, and S. Heb, "Turbulent forced convection of Cu/water nanofluid, CFD model comparison", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 67, 2015, pp. 163-172.
- [18] N. Kumar, and B.P. Puranik, "Numerical study of convective heat transfer with nanofluids in turbulent flow using a Lagrangian-Eulerian approach", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 111, 2016, pp. 1674-1681.
- [19] H. Shabgard, S. Kheradmand, H. Farzaneh, and C. Bae, "Numerical simulation of cooling performance of an exhaust gas recirculation (EGR) cooler using nano-fluids", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 110, 2017, pp. 244-252.
- [20] L. Zheng, Y. Xie, and D. Zhang, "Numerical investigation on heat transfer performance and flow characteristics in circular tubes with dimpled twisted tapes using Al₂O₃-water nanofluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 111, 2017, pp. 962-981.
- [21] A. M. Fsadni, J. P.M. Whitty, M. A. Stables, and A. A. Adeniyi, "Numerical study on turbulent heat transfer and pressure drop characteristics of a helically coiled hybrid rectangular-circular tube heat exchanger with Al₂O₃- water nanofluids", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 114, 2017, pp. 466-483.
- [22] C.J. Ho a, C.Y. Chang a, Wei-Mon Yan b, Pouria Amani, "A combined numerical and experimental study on the forced convection of Al₂O₃-water nanofluid in a circular tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, 2018, pp. 66-75.
- [23] A. A. Minea, "Challenges in hybrid nanofluids behavior in turbulent flow: Recent research and numerical comparison", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 71, May 2017, pp. 426-434.
- [24] M. Sheikholeslami, M. Jafaryar, and Z. Li, "Second law analysis for nanofluid turbulent flow inside a circular duct in presence of twisted tape turbulators", *Journal of Molecular Liquids*, doi:10.1016/j.molliq.2018.04.147.
- [25] A. Safari, M. Saffar-Avval, and E. Amani, "Numerical investigation of turbulent forced convection flow of nano fluid in curved and helical pipe using four-equation model", *Powder Technology*, 2018, doi:10.1016/j.powtec.2018.01.025.

- [26] A. H. Abdelrazek, O. A. Alawi, S.N. Kazi, N. Yusoff, Z. Chowdhury, A. A.D. Sarhan, "A new approach to evaluate the impact of thermophysical properties of nanofluids on heat transfer and pressure drop", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 95, 2018, pp. 161–170.
- [27] H. Esmaeili, T. Armaghani, A. Abedini, I. Pop, Turbulent combined forced and natural convection of nanofluid in a 3D rectangular channel using two-phase model approach, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7471-9>
- [28] W.H. Azmi, K.V. Sharma, P.K. Sarma, R. Mamat, Anuar, S., Dharma Rao V. "Experimental determination of turbulent forced convection heat transfer and friction factor with SiO₂ nanofluid", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 51, 2013, pp. 103–111.
- [29] B. Sahin, E. Manay, E. F. Akyurek, "An Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop of CuO-Water Nanofluid", *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2015, Article ID 790839, 10 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/790839>
- [30] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, 4th edition, John Wiley & Sons, 2013.
- [31] B.S. Petukhov, "Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties", In: Hartnett JP, Irvine TF, editors. *Advances in Heat Transfer*, New York: Academic Press (1970) 504–64.
- [32] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, Vol. 11, 1998, pp. 151-170.
- [33] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 43, 2000, pp. 3701-3707.
- [34] Yu, W., Choi, S.U.S., "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, a renovated Maxwell model", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 5, 2003, pp. 167-171