



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



QOM UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Numerical Simulation of Turbulent CuO-Water Nanofluid Flow in a Tube Using the Discrete Phase Model and Evaluation of Turbulence Models Performance

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

S. Eslami¹

M. Mohseni²

¹ Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran, sajjad.eslami@yahoo.com

² Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran, m.mohseni@qut.ac.ir

* Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Khodakaram Boulevard, Qom, Iran. Postal Code: 71551313.

Phone: +98 25 3616 9824

m.mohseni@qut.ac.ir

Article History

Received: December 6, 2024

Accepted: January 19, 2025

ePublished: January 30, 2025

ABSTRACT

Nanofluids significantly improve the efficiency of heat transfer-based systems such as cooling systems and heat exchangers due to their unique properties such as increased thermal conductivity and improved fluid properties. Turbulent flow also has significant effects on heat transfer and friction due to its characteristics. In this study, the turbulent flow of water-copper oxide nanofluid in a horizontal tube under constant heat flux was numerically simulated. To model the turbulent flow, several two-equation turbulence models and a Reynolds stress model available in Fluent software were used to investigate their performance. The two-phase flow of nanofluids was also solved using a discrete phase model. Comparison with experimental data for Nusselt number and friction coefficient shows that the RSM model has the best performance with a maximum error of about 10 percent and the standard $k-\epsilon$ model has the highest deviation with an error of about 32 percent.

Keywords: Nanofluid; Turbulence Model; Discrete Phase Model; Numerical Simulation.

نانوسیال، مدل توربولانس، مدل فاز گسسته، شبیه‌سازی عددی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

* نویسنده مسئول: m.mohseni@qut.ac.ir

۱ مقدمه

نانوسیالات به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود در بهبود خواص ترموفیزیکی سیال، نقش بسیار مهمی در کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های صنعتی و مهندسی ایفا می‌کنند. بهبود عملکرد حرارتی نانو سیالات موجب می‌شود که در بسیاری از سیستم‌ها، نیاز به استفاده از تجهیزات بزرگ‌تر و پیچیده‌تر برای انتقال حرارت کاهش یابد. برای مثال، در مبدل‌های حرارتی یا سیستم‌های سرمایش، نانو سیالات می‌توانند به انتقال حرارت بیشتر در فضای کوچک‌تر کمک کنند که این امر به کاهش حجم سیستم‌ها و مصرف انرژی کمک می‌کند. به عبارت دیگر، با استفاده از نانو سیالات، سیستم‌ها می‌توانند کارایی بالاتری را در اندازه‌های کوچک‌تر و با مصرف انرژی کمتر ارائه دهند. به عنوان مثال می‌توان به استفاده از نانو سیال در افزایش انتقال حرارت در لوله‌های مارپیچ، استفاده در کلکتورهای خورشیدی به عنوان سیال عامل و استفاده در لوله‌های حرارتی جهت بالابردن بازده اشاره کرد [۱-۳].

از طرف دیگر، یکی از چالش‌های اساسی در جریان سیالات، رفتار جریان آشفته است. جریان آشفته به دلیل ویژگی‌های آن تأثیرات زیادی بر روی انتقال حرارت و اصطکاک در سیستم‌های جریان سیال دارد. ترکیب نانو سیالات با جریان آشفته می‌تواند تغییرات قابل توجهی در کارایی سیستم‌ها به وجود آورد. بنابراین، بررسی و مدل‌سازی رفتار نانو سیالات در جریان آشفته از اهمیت بالایی برخوردار است. این پژوهش می‌تواند به بهینه‌سازی فناوری‌های انتقال حرارت، کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد سیستم‌های

شبیه سازی جریان آشفته نانو سیال آب- اکسید مس داخل یک لوله با مدل فاز گسسته و ارزیابی عملکرد مدل‌های توربولانس

سجاد اسلامی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران
مهدی محسنی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

چکیده

نانوسیالات به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، مانند افزایش هدایت حرارتی و بهبود خواص سیالاتی، به طور چشم‌گیری کارایی سیستم‌های مبتنی بر انتقال حرارت مانند سیستم‌های خنک‌کننده و مبدل‌های حرارتی را بهبود می‌بخشند. همچنین، جریان آشفته به دلیل ویژگی‌های آن، تأثیرات قابل توجهی بر انتقال حرارت و اصطکاک دارد. در این پژوهش، جریان آشفته نانو سیال آب-اکسید مس در یک لوله افقی تحت شار حرارتی ثابت به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. برای مدل‌سازی جریان آشفته، چندین مدل توربولانس دو معادله‌ای و یک مدل تنش رینولدز موجود در نرم افزار فلوئنت با هدف بررسی عملکرد آنها مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین جریان دو فاز نانو سیال با استفاده از مدل فاز گسسته حل شده است. مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک نشان می‌دهد مدل RSM با حداکثر خطای حدود ۱۰ درصد دارای بهترین عملکرد و مدل استاندارد $k-\epsilon$ با خطای حدود ۳۲ درصد، دارای بیشترین انحراف می‌باشد.

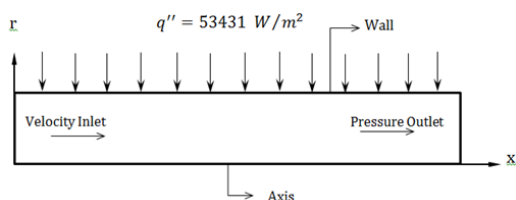
کلید واژه‌ها

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 [۹] 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 [۱۰] 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 [۱۱] شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید تیتانیوم را با به کارگیری مدل دو فازی 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 [۱۲] 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 تضعیف حرکت براونی (حرکت تصادفی) با افزایش قطر نانوذرات دانسته‌اند. حاتمی و اخوتی [۱۳] 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 آشفته 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 [۱۴] انتقال حرارت

صنعتی در محیط‌های عملیاتی مختلف منجر شود. در ادامه برخی تحقیقات انجام شده در این خصوص مورد بررسی قرار گرفته است. مایگا و همکاران [۴] انتقال حرارت جابجایی در جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در لوله‌ای تحت شار حرارتی ثابت، به صورت عددی بررسی کردند. در این پژوهش از مدل k-ε استاندارد به عنوان مدل آشفته و از مدل تک فاز برای تخمین خواص ترموفیزیکی نانوسیال استفاده شده است. نتایج این شبیه‌سازی بیانگر بهبود ضریب انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز است. همت اسفه و همکاران [۵] به روش آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال عامل‌دار شده نانولوله چند جداره کربنی-آب با عامل کربوکسیل در کسرهای حجمی پایین را در رژیم آشفته مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد 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. ضیایی راد و بیگی [۶] به بررسی انتقال حرارت و افت فشار در جریان نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در لوله‌ای با دندانه‌های داخلی به صورت عددی پرداختند. نتایج آنها نشان داد 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 [۷] جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم تا کسر حجمی ۲ درصد را به صورت آزمایشگاهی 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 [۸] انتقال حرارت جابجایی در جریان آشفته نانوسیال غیرنیوتنی در یک لوله افقی را با روش عددی

مدل توربولانس Realizable $k-\epsilon$ تحت شار حرارتی ثابت در دیواره لوله استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها با افزایش غلظت نانوسیال و همچنین اتحنای لوله‌ها ضریب انتقال حرارت و افت فشار افزایش می‌یابد. ماینا [۲۰] ابتدا به بررسی جریان آشفته نانوسیالات ترکیبی و سپس حل عددی آن با رویکرد تک فاز 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 [۲۱] جریان آشفته نانوسیال آب اکسید مس داخل یک لوله با نوارهای مارپیچ داخل آن را با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت و مدل توربولانس RNG $k-\epsilon$ 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 [۲۲] 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 [۲۳] 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 فلوئنت 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. اسماعیلی و همکاران [۲۴] به بررسی جریان آشفته جابجایی ترکیبی نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در یک کانال با مقطع مستطیلی با نرم افزار فلوئنت پرداختند. آنها از مدل مخلوط برای مدل‌سازی جریان نانوسیال و از مدل $k-\epsilon$ استاندارد برای مدل‌سازی جریان آشفته

جابجایی اجباری در جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در یک لوله افقی را به 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 [۱۵] در شبیه‌سازی عددی جریان آشفته نانوسیال آب-مس تا کسر حجمی ۲ درصد، بیان نمودند که مدل اولر-اولری بجز در کسر حجمی ۰/۵ درصد دارای نتایج غلط می‌باشد. همچنین برای مدل مخلوط حداکثر خطای ۱۵ درصد را گزارش نمودند. کومار و پورانیک [۱۶] 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-اولری 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. شبگرد و همکاران [۱۷] به بررسی جریان آشفته نانوسیال در مدار خنک‌کاری گازه‌ای خروجی از آگروز جهت استفاده مجدد در موتور با استفاده از مدل تک‌فاز 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 [۱۸] 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 [۱۹] 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 فلوئنت و



شکل ۱ شماتیک هندسه مساله و شرایط مرزی آن

خواص ترموفیزیکی آب و اکسید مس در جدول ۱ گزارش شده است. متوسط قطر نانوذرات ۳۳ نانومتر می‌باشد.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی نانوذرات اکسید مس و آب خالص [۲۵]

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

۳ مدل‌سازی مسأله

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

۳-۱ معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان مورد بررسی برای حالت پایا و تراکم ناپذیر برای فاز پیوسته (فاز مایع) به صورت زیر می‌باشند [۲۶].

معادله پایستاری جرم

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

معادله مومنتم

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

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 آشفته‌گی جریان می‌باشد که می‌تواند خطای قابل توجهی را به دنبال داشته باشد. این در حالی است که اکثر کارهای قبلی، عمدتاً از یک مدل توربولانس در کار خود استفاده کرده‌اند. لذا 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 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 تعریف مسأله

هندسه مورد استفاده در این پژوهش یک لوله افقی با قطر ۱/۸ میلی‌متر و طول ۷۷۰ میلی‌متر است که در شکل ۱ نشان داده شده است. سطح خارجی لوله تحت شار حرارتی ثابت 53431 W/m² قرار گرفته است. جریان نانوسیال آب-اکسید مس با سرعت ثابت وارد و در انتهای لوله به صورت توسعه یافته خارج می‌شود. هندسه مسأله در نرم افزار گمبیت تولید و از شرط مرزی سرعت در مرز ورودی، شرط عدم لغزش برای دیواره لوله، شرط محور تقارن در مرکز لوله و شرط فشار در مرز خروجی استفاده شده است. دمای ورودی نانوسیال ۲۰ درجه سانتیگراد و رژیم جریان آشفته است.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (10)$$

$$h = \frac{q}{(T_w - T_b)} \quad (11)$$

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{\rho \bar{V}^2}{2}\right)} \quad (12)$$

۳-۲ 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 سه خانواده از مدل‌های توربولانس یعنی $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ و RSM استفاده شده است. این مدل‌ها شامل Standard $k-\epsilon$ ، RNG $k-\epsilon$ ، Realizable $k-\epsilon$ ، Standard $k-\omega$ ، SST $k-\omega$ و مدل تنش رینولدز (RSM) می‌باشند. این مدل‌ها همگی برای یک سیال تک فاز مانند آب یا هوا ارائه شده‌اند. جزئیات بیشتر در خصوص این مدل‌ها در مرجع [۲۶] گزارش شده است.

۳-۳ روش حل جریان دوفازی

در این پژوهش از مدل فاز گسسته به عنوان مدل دوفازی بهره گرفته شده است. در این مدل، حضور و پخش ذرات در سیال پایه به صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شود. از این رو معادلات اصلی برای فاز پیوسته نوشته می‌شود و اثرات حضور و پخش نانوذرات در سیال پایه به صورت ترم چشمه در معادلات ممنتوم و انرژی در نظر گرفته می‌شود. این روش از تئوری اوپلری-لاگرائژی پیروی می‌کند. فاز مایع به عنوان فاز پیوسته عمل می‌کند که مشخصاتش با حل معادلات ناویر استوکس معین می‌گردد در حالی که مشخصات فاز گسسته با بررسی تعداد زیادی از ذرات در میدان جریان و در نظر گرفتن قانون دوم نیوتن برای هر ذره معلوم می‌شود. فاز گسسته می‌تواند با فاز مایع تبادل مومنوم، جرم و انرژی داشته باشد [۲۸].

معادله انرژی

$$\text{div}(\rho \bar{V} C_p \bar{T}) = \text{div}(k \nabla \bar{T} - \rho C_p \bar{u}'_t) + \bar{\omega}_{pe} \quad (3)$$

در معادله (۲) ترم چشمه، بیان کننده مومنوم انتقال یافته بین فاز سیال و فاز ذرات است و با محاسبه تغییر مومنوم ذرات در گذر از حجم کنترل تعیین می‌شود. در معادله (۳) نیز ترم چشمه بیانگر اثر تبادل انرژی گرمایی ذره و سیال می‌باشد. این ترم‌ها به صورت روابط زیر بیان می‌شوند.

$$\bar{\omega}_{p,m} = \sum \bar{u}'_{ip} \bar{u}'_{ip} \quad (4)$$

به طوری که

$$\bar{u}' = \bar{u}'_D + \bar{u}'_L + \bar{u}'_B + \bar{u}'_T + \bar{u}'_{VM} + \bar{u}'_G + \bar{u}'_P \quad (5)$$

$$\bar{\omega}_{p,e} = \sum \dot{\omega}' \quad (6)$$

و

$$\dot{\omega}' = m_p k_{bf} (T_{np} - T_{bf}) \quad (7)$$

در روابط فوق m_p جرم ذره و \bar{F} بیان کننده حاصل جمع تمام نیروها بر واحد جرم نانوذره است که شامل نیروی پسا، نیروی برآ ساقتمن، نیروی براونی، نیروی ترموفورتیک، نیروی جرم مجازی، نیروی گرانش و نیروی گرادیان فشار می‌باشد. \dot{Q} نیز شار حرارتی کل مبادله شده میان ذره و سیال است. برای نانوذرات نیز معادله حرکت ذره بر اساس قانون دوم نیوتن بیان می‌شود. با در نظر گرفتن یک حجم کنترل در اطراف ذره و نوشتن قانون انرژی، نتیجه به صورت رابطه (۸) در می‌آید.

$$m_p C_{p,np} \frac{dT_{np}}{dt} = \dot{Q} \quad (8)$$

در نهایت با جایگذاری \dot{Q} رابطه فوق می‌تواند به صورت رابطه (۹) نوشته شود.

$$m_p C_{p,np} \frac{dT_{np}}{dt} = h A_{np} (T_{bf} - T_{np}) \quad (9)$$

برای محاسبه عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک به ترتیب از روابط (۴) تا (۶) استفاده شده است [۲۷].

جدول ۲ بررسی استقلال از شبکه در مسأله حاضر

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

۳-۴ روش حل عددی

در شبیه‌سازی عددی، گسسته‌سازی معادلات بقاء به روش حجم محدود و با استفاده از نرم افزار ANSYS Fluent انجام گرفته است. برای انفصال ترم‌های جابجایی در معادلات اندازه حرکت و انرژی از طرح بالادست مرتبه دوم و برای برقراری ارتباط میان میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. ضرایب تخفیف مطابق پیش فرض‌های نرم‌افزار فلونت و دقت حل نیز تا ارضای شرط همگرایی به مقدار 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

۳-۶ اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج عددی، مقادیر به دست آمده برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با استفاده از مدل‌های توربولانس $k-\epsilon$ Realizable و RSM با معادله پتخف [۲۹] و نتایج تجربی سهین و همکاران [۲۵] در شکل‌های ۲ و ۳ مقایسه گردیده است. روابط پتخف به صورت زیر می‌باشد.

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1.07 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (13)$$

$$f = [0.79 \ln(Re) - 1.64]^{-2} \quad (14)$$

بررسی شکل ۲ نشان می‌دهد که نتایج حاصل از حل عددی با مدل $k-\epsilon$ Realizable به ترتیب دارای حداکثر خطای ۷- و ۱۱/۹ درصد نسبت به نتایج تجربی [۲۵] و معادله پتخف [۲۹] در محاسبه عدد ناسلت می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از مدل RSM در محاسبه عدد ناسلت به ترتیب بیشترین خطای ۳/۱۰- و ۷/۸- درصد را نشان می‌دهد. برای محاسبه ضریب اصطکاک حداکثر خطای حاصل از مدل $k-\epsilon$ Realizable، ۱/۱۴- و ۳/۸- درصد و حداکثر خطای حاصل از مدل RSM، ۱/۱۱- و ۶/۷ درصد به ترتیب نسبت به نتایج تجربی و معادله پتخف می‌باشد.

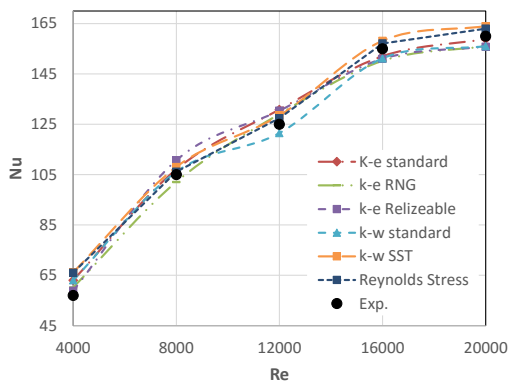
۳-۵ بررسی استقلال از شبکه

در شبیه‌سازی عددی، استقلال از شبکه و عدم وابستگی نتایج به ابعاد شبکه با استفاده از مدل‌های توربولانس $k-\epsilon$ Realizable و RSM در محدوده عدد رینولدز ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ برای آب خالص در ۴ شبکه مختلف انجام گرفته است. شبکه مورد نظر از دو قسمت اصلی تشکیل شده است. قسمت اول ناحیه ورودی لوله است که در آن نقاط شبکه از دیواره به سمت مرکز لوله با ضریب ۱/۰۴۵ و در امتداد محور لوله با ضریب ۱/۰۱ منبسط شده است. قسمت دوم که ناحیه کاملاً توسعه یافته است فقط در جهت شعاعی، شبکه با ضریب انبساط ۱/۰۴۵ از دیواره به سمت مرکز لوله منبسط شده و در امتداد محور لوله (در جهت افقی) بصورت یکنواخت (بدون اعمال ضریب انبساط و یا انقباض) می‌باشد. با مشاهده نتایج به دست آمده برای آب خالص در جدول ۲، شبکه 100×320 به عنوان شبکه بهینه در مطالعه حاضر انتخاب شده است.

مقایسه شده است تا امکان بررسی عملکرد مدل‌های توربولانس برای جریان دوفاز فراهم گردد.

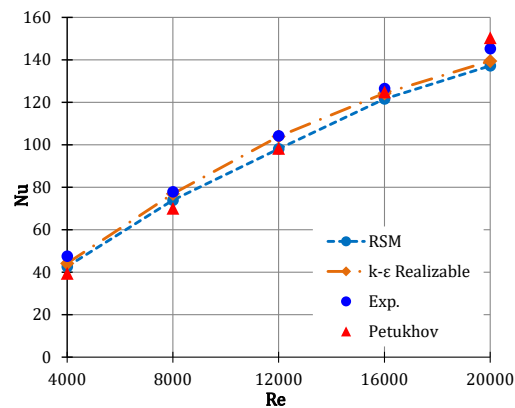
۴-۱ عدد ناسلت

در این بخش اثر حضور نانوذرات اکسید مس در آب خالص با مدل‌های توربولانس مورد نظر در مطالعه حاضر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۴ تطابق نسبتاً خوب مدل RSM در کسر حجمی ۰/۵ درصد، با حداکثر خطای محاسباتی ۱۰/۱ درصد نسبت به نتایج تجربی سهین و همکاران [۲۵] در پیش بینی عدد ناسلت نانوسیال را نمایش می‌دهد. پس از RSM مدل‌های $\kappa\text{-}\varepsilon$ Realizable، $\kappa\text{-}\omega$ Standard، $\kappa\text{-}\omega$ Standard و $\kappa\text{-}\varepsilon$ RNG به ترتیب با بیشترین خطای ۱۱/۱، ۱۲/۷، ۱۲/۸، ۱۴/۷ و ۱۴/۸ درصد قرار دارند.

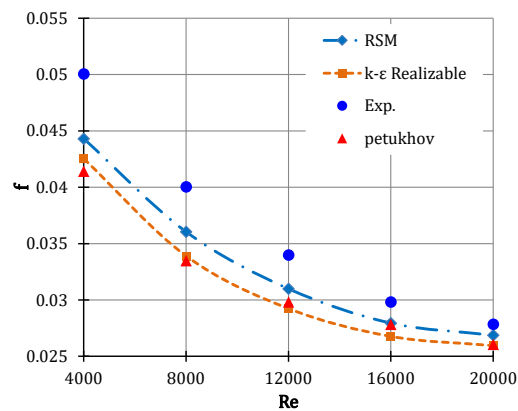


شکل ۴ مقایسه مقادیر عدد ناسلت حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی سهین و همکاران [۲۵] در کسر حجمی ۰/۵ درصد.

شکل ۵ عدد ناسلت در کسر حجمی ۲ درصد را با مدل‌های توربولانس مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود مجدداً مدل RSM بهترین عملکرد را دارد. بیشترین خطای محاسباتی این مدل ۶/۷ درصد می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از مدل‌های آشفتگی $\kappa\text{-}\omega$ Standard، $\kappa\text{-}\omega$ Realizable، $\kappa\text{-}\varepsilon$ Standard و $\kappa\text{-}\varepsilon$ RNG برای محاسبه عدد ناسلت نانوسیال آب-اکسید مس



شکل ۲ اعتبار سنجی حل عددی برای عدد ناسلت آب خالص با معادله پتخف [۲۹] و نتایج تجربی سهین و همکاران [۲۵]

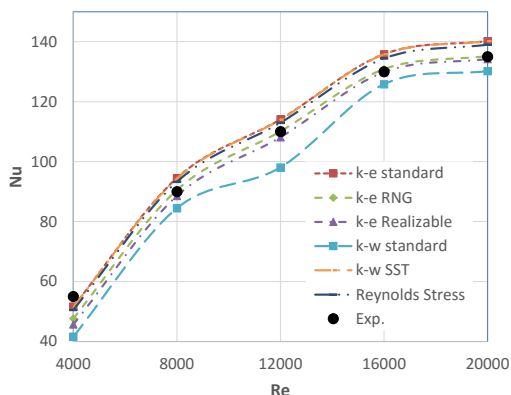


شکل ۳ اعتبار سنجی حل عددی برای ضریب اصطکاک آب خالص با معادله پتخف [۲۹] و نتایج تجربی سهین و همکاران [۲۵]

بر اساس نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که تطابق نسبتاً خوبی میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی و نیمه تجربی در پیش بینی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک آب خالص وجود دارد.

۴ نتایج

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در کسر حجمی‌های ۰/۵، ۲ و ۴ درصد با داده‌های تجربی



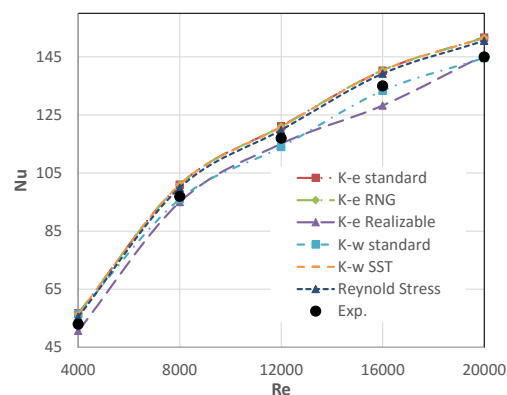
شکل ۶ مقایسه مقادیر عدد ناسلت حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی سهین و همکاران [۲۵] در کسر حجمی ۴ درصد.

۴-۲ ضریب اصطکاک

در بررسی ضریب اصطکاک نانوسیال آب-اکسید مس در کسر حجمی ۰/۵ درصد، با توجه به شکل ۷ می‌توان فهمید که نتایج به دست آمده از مدل RSM با ثبت حداکثر خطای ۱۰/۶ درصد، کمترین مقدار خطا در میان سایر مدل‌ها را نسبت به نتایج تجربی دارد. مدل‌های $\kappa\text{-}\omega$ Standard، $\kappa\text{-}\epsilon$ Realizable، $\kappa\text{-}\epsilon$ Standard، $\kappa\text{-}\epsilon$ RNG و $\kappa\text{-}\epsilon$ Standard به ترتیب حداکثر خطای ۱۳/۶-، ۱۴/۴-، ۱۷/۶، ۱۸/۸- و ۲۰/۱ را نشان می‌دهند.

در کسر حجمی ۲ درصد نیز خطای بدست آمده از مدل RSM با بیشترین انحراف ۹/۴ درصد از نتایج تجربی، بهترین عملکرد را در محاسبه ضریب اصطکاک دارد (شکل ۸). پس از آن، نتایج حاصل از مدل‌های توربولانس $\kappa\text{-}\omega$ Standard، $\kappa\text{-}\epsilon$ RNG، $\kappa\text{-}\epsilon$ Standard و $\kappa\text{-}\epsilon$ Realizable با مقدار ماکزیمم خطاهای ۹/۶-، ۱۰، ۱۱/۱-، ۱۴/۲ و ۱۵- درصد به ترتیب به عنوان دقیق‌ترین مدل‌ها محسوب می‌شوند.

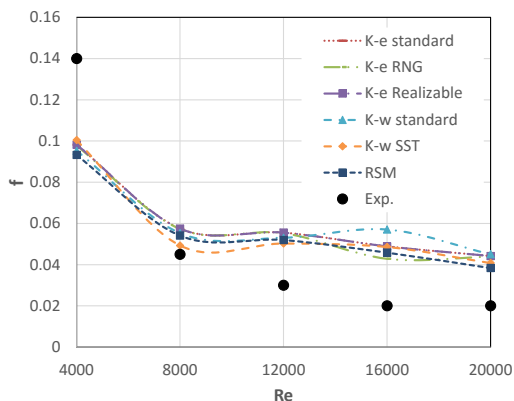
به ترتیب خطاهای محاسباتی ۷/۹، ۸/۹، ۹/۷، ۱۰/۱ و ۱۳ درصد را نشان می‌دهند.



شکل ۵ مقایسه مقادیر عدد ناسلت حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی سهین و همکاران [۲۵] در کسر حجمی ۲ درصد.

در کسر حجمی ۴ درصد نیز چنانچه از شکل ۶ مشاهده می‌شود مدل RSM حداکثر انحراف ۷/۹ درصد، نسبت به نتایج تجربی در پیش‌بینی عدد ناسلت را دارد. پس از RSM، مدل‌های $\kappa\text{-}\omega$ SST، $\kappa\text{-}\epsilon$ Standard، $\kappa\text{-}\omega$ Standard، $\kappa\text{-}\epsilon$ RNG و $\kappa\text{-}\epsilon$ Realizable به ترتیب دارای دقت بهتری در محاسبه عدد ناسلت نانوسیال هستند. با نگاهی دقیق به نتایج حاصل شده در تمامی کسرهای حجمی مورد مطالعه، می‌توان مشاهده نمود که نتایج به دست آمده از مدل توربولانس RSM دقیق‌ترین نتایج را میان مدل‌های استفاده شده در این شبیه‌سازی دارد.

مدل RSM نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه در مقایسه با نتایج تجربی می‌باشد.

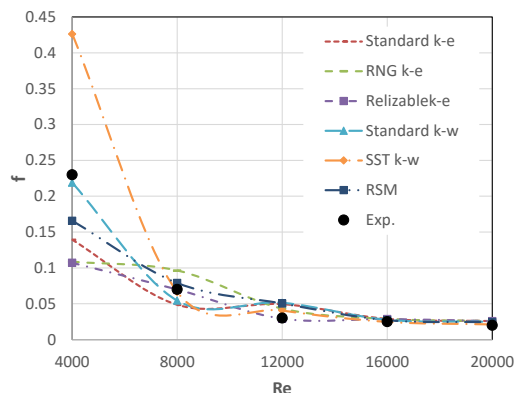


شکل ۹ مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی سهین و همکاران [۲۵] در کسر حجمی ۴ درصد.

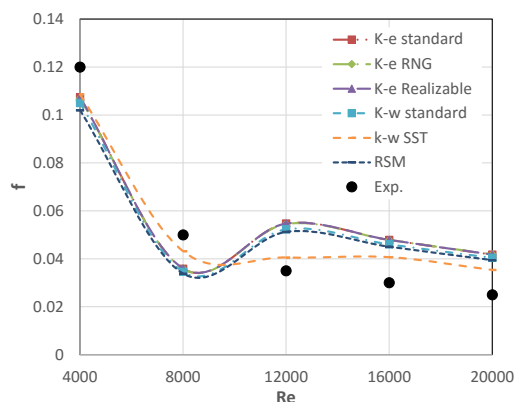
۵ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی نهایی

در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید مس با مدل‌های توربولانس مختلف و مدل فاز گسسته در یک لوله افقی تحت شار حرارتی ثابت انجام شده است. از مهمترین نتایج این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- به طور کلی مدل توربولانس RSM کمترین خطای محاسباتی را در میان مدل‌های توربولانس مورد استفاده در محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک نانوسیال نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد به طوری که بیشترین خطای آن در همه اعداد رینولدز حدود ۱۰ درصد می‌باشد. یکی از دلایل دقیق‌تر بودن نتایج حاصل از مدل RSM، احتمالاً به دقیق‌تر بودن ترم تولید در معادلات انتقال این مدل بر می‌گردد چراکه فرضیات ساده‌کننده کمتری در آنها به کار گرفته شده است. دلیل دیگر می‌تواند به غیر ایزوتروپیک بودن این مدل نسبت به سایر مدل‌ها برگردد.



شکل ۷ مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی سهین و همکاران [۲۵] در کسر حجمی ۵ درصد.



شکل ۸ مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی سهین و همکاران [۲۵] در کسر حجمی ۲ درصد.

در کسر حجمی ۴ درصد نیز که در شکل ۹ نمایش داده شده است مجدد مدل RSM با بیشترین خطای ۱۲/۵- درصد، کمترین خطا را نسبت به سایر مدل‌ها دارد. بیشترین خطای ضریب اصطکاک به دست آمده از مدل Realizable κ - ϵ برابر ۱۴/۲ درصد، مدل Standard κ - ϵ ۱۵/۲ درصد، مدل SST κ - ω ۱۷/۵ درصد، مدل Standard κ - ω ۲۰/۴ درصد و مدل RNG κ - ϵ ۲۳/۸ درصد می‌باشد. بررسی نتایج کلی حاصل شده از حل عددی برای محاسبه ضریب اصطکاک نانوسیال آب-اکسید مس، حاکی از دقت بالاتر

• در صورت الزام به استفاده از مدل‌های دو معادله‌ای، مدل‌های	\dot{T}	مؤلفه نوسانی دما (K)
دارای دقت محاسباتی بیشتری می‌باشند.	\dot{u}	مؤلفه نوسانی سرعت (m/s)
• هرچند عملکرد مدل‌های توربولانس در اعداد رینولدز	علائم یونانی	
مختلف متفاوت است اما در حالت کلی در محاسبه عدد	Δp	افت فشار (Pa)
ناسلت در کمترین عدد رینولدز یعنی ۴۰۰۰، احتمالاً به علت	ϕ	کسر حجمی نانوذرات (%)
قرار داشتن در ناحیه گذار از آرام به آشفته، دارای خطای	ρ	چگالی (kg/m^3)
بیشتری می‌باشند.	μ	ویسکوزیته (kg/m.s)
• به طور کلی، خطای مدل‌های مختلف در محاسبه افت فشار	علائم اختصاری	
یا ضریب اصطکاک بیشتر از عدد ناسلت است. بیشترین خطا	bf	سیال پایه
مربوط به مدل Standard k- ϵ در عدد رینولدز ۴۰۰۰ است	nf	نانوسیال
که حدود ۳۲ درصد می‌باشد.		

۶ فهرست علائم

۷ منابع

- علائم انگلیسی
- | | |
|-------|---|
| C_p | ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K) |
| D | قطر لوله (m) |
| f | ضریب اصطکاک |
| h | ضریب انتقال حرارت جابجایی ($\text{W/m}^2.\text{K}$) |
| L | طول (m) |
| k | ضریب هدایت حرارتی (W/m.K) |
| Nu | عدد ناسلت |
| p | فشار (Pa) |
| Pr | عدد پرانتل |
| q | شار حرارتی (W/m^2) |
| Re | عدد رینولدز |
- سرعت متوسط زمانی (m/s)
- | | |
|-------|--------------------|
| T_w | دمای دیواره (K) |
| T_b | دمای حجمی سیال (K) |
- [۱] 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.
- [2] F. Montazerifar, M. Amidpour, Z. Abedi, Numerical investigation of turbulent nanofluid flow behavior in a multi-stream plate-fin heat exchanger with a novel design of fractal fins, Alexandria Engineering Journal, Volume 72, 2023, Pages 431-449
- [3] Victor O. Adogbeji, Mohsen Sharifpur, Josua P. Meyer, Experimental investigation into heat transfer and flow characteristics of magnetic hybrid nanofluid (Fe3O4/TiO2) in turbulent region, Applied Thermal Engineering, Volume 258, Part A, 2025, 124630,
- [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.
- [۵] محمد همت اسفه، مجتبی بیگلری، سیف الله سعدالدین و سیدهادی رستمیان، "ارزیابی تجربی خواص ترموفیزیکی، انتقال حرارت جابجایی و افت فشار در نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره عامل دار شده"،

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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*, Volume 263, 1 August 2018, Pages 489-500.
- [22] 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*, Volume 328, 1 April 2018, Pages 47-53.
- [23] 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.
- [24] 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*, Volume 135, pages 3247-3257, (2019).
- مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۷۳-۸۴.
- [۶] 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.
- [7] 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.
- [۸] محمد شریفی اصل، داود طغرای و احمد رضا عظیمیان، "شبیه سازی عددی انتقال حرارت جابه جایی در جریان مغشوش غیرنیوتنی نانوسیال در یک لوله افقی مدور"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۰-۱۰.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

- computations of two-phase flows in general coordinates," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 25, no. 5, pp. 813–825, 1999.
- [29] 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.
- [25] 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.
- [26] Ansys (2016) *Ansys Fluent Theory Guide*, Release 17, Ansys Inc.
- [27] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, 4th edition, John Wiley & Sons, 2013.
- [28] Q. Zhou and M. A. Leschziner, "An improved particle-locating algorithm for Eulerian-Lagrangian