

مدلی برای بررسی انتقال حرارت در یک محفظه با استفاده از نانو آئروسول

نوید قاجاری^{۱*}، داود طغرای^۲، احمدرضا عظیمیان^۳* نویسنده مسئول: navid.ghajari@iaukhsh.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

نانوذره، آئروسول، انتقال حرارت
جابجایی، نانو سیال

در این پژوهش به بررسی رفتار نانوذرات با استفاده از یک مدل عددی پرداخته شده است. برای این مطالعه از مدل فازهای مجزا برای بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد و ترکیبی در یک محفظه مستطیلی شکل با ابعاد 4×1 سانتیمتر مربع با استفاده از نانو آئروسول هنگامی که نانوذرات مس در هوا در جریان است، استفاده شده است و با تغییر در اختلاف دما در دیواره گرم و سرد، تاثیر آن را بر میزان انتقال حرارت بررسی شده است. شبیه سازی فوق شامل شبیه سازی جریان دو بعدی و آرام است و حالت شار ثابت بر روی ۲ وجه جانبی در جابجایی آزاد و دمای ثابت بر روی وجه بالایی (صفحه سرد) با دمای ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شد و دما در وجه پایینی (صفحه گرم) در سه حالت ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کلوین مقایسه شد. توزیع دما، بردار سرعت، شار حرارت سطح و عدد ناسلت در طول مسیر بررسی شده است.

تاریخ ارسال: ۹۴/۱۱/۰۷

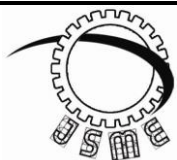
تاریخ بازنگری: ۹۴/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۰۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی خمینی شهر، اصفهان، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی خمینی شهر، اصفهان، ایران.

۳- استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی خمینی شهر، اصفهان، ایران.



Journal of
Solid Mechanics
in Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



A model for enhanced heat transfer in an enclosure using Nano-aerosols

Navid Ghajari^{1,*}, Davoud Toghraii², Ahmad Reza Azimian³

* Corresponding Author: navid.ghajari@iaukhsh.ac.ir

Abstract:

In this study, the behavior of nanoparticles using a numerical model is discussed. For this study a model for the expansion in free convection heat transfer and mix in a rectangular container with dimensions of 1×4 cm using Nano-aerosols in the air is going when copper nanoparticles, use and by changing the temperature difference between hot and cold wall, we will examine its impact on the rate of heat transfer. The simulation involves two-dimensional flow simulation and relaxed state of constant flux in free convection on the two lateral sides and on the top face of constant temperature (cold plate) at 300 K was considered And at low temperature (heat plate) in three modes 350, 400 and 450 K were compared. Temperature distribution, velocity, surface heat flux and Nusselt number during the course of our review.

Key words:

Nano-particle,
Aerosol,
Convective heat transfer,
Nano-fluid.

1- MSc, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran.

3- Professor, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran.

۱- مقدمه

حمل و نقل آئروسول شیمیایی در فرآیند های شیمیایی را میتوان نام برد. آئروسول، ذرات جامد و مایع در فاز گازی هستند که ابعاد آنها تا ۱۰۰ میکرومتر می رسد و از نانوذرات برای بهبود خواص سیالات استفاده می شود زیرا با کوچک شدن ابعاد ذرات تعداد ذرات موجود در واحد حجم افزایش می یابد. همچنین ترکیب نانوذرات با سیال پایه، بواسطه حرکت براونی نانوذرات، موجب افزایش ضریب هدایت گرمایی و ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال می شود. نانوذرات موجود در هوا (آئروسول ها) بدلیل ایجاد شار حرارتی بحرانی بالا به عنوان خنک کننده در راکتورهای هسته ای میتواند استفاده شود و همچنین از آئروسول ها برای بهبود نرخ انتقال حرارت در کندانسور و مبدل های حرارتی میتوان استفاده کرد [۲]. اولین کار منتشر شده به طور خاص استفاده از نانوذرات به صورت معلق برای افزایش انتقال حرارت در آن ذکر شده است، توسط ماسودا و همکاران [۳] بوده است، در این پژوهش از ذرات اکسید سیلیسیوم، اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم با اندازه ذرات ۱۲ تا ۲۷ نانومتر استفاده شده است و مشاهده شد که افزایش نانوذرات باعث افزایش هدایت حرارتی و لزجت شده است. چون مراحل اولیه تولید فاز گاز آئروسول تا حد زیادی وابسته به ویژگی های نانوذرات است، پس ویژگی های نانوذرات مثل قطر و جنس و غیره دارای اهمیت است. شیلد و همکاران [۴] به شبیه سازی برای تولید نانوذرات در یک راکتور جریان مخلوط آئروسول به کمک دینامیک ذرات و مکانیک سیالات پرداختند که این شبیه سازی اولین شبیه سازی فرآیند های شکل گیری ذرات تحت شرایط پیچیده به عنوان راکتور های آئروسول می باشد. آنها شبیه سازی شکل گیری پودر اکسید تیتانیوم را با استفاده از اکسیداسیون تراکلریدتیتانیوم در یک راکتور آئروسول، نتیجه گرفتند. اکبر و همکاران [۵] با شبیه سازی عددی به بررسی مکانیزم های نانوذرات موجود در آئروسول پرداختند و دریافتند که نانوذرات تمایل قوی برای پیروی از جریان هوا را دارند و همچنین زمانی که حرکت براونی و حرکت ترموفورسیسی در نظر گرفته شود، در طول شبیه سازی نانوذرات حرکت

مطالعه بر روی جریان جابجایی طبیعی، جابجایی اجباری و جابجایی توام طبیعی و اجباری در کانال ها بدلیل کاربرد های فراوان آن بطور وسیع گسترش یافته است. از جمله این کاربردها استفاده در صنایع انرژی خورشیدی و انرژی هسته ای می باشد و از نمونه دیگر جریان جابجایی توام در کانال که کاربرد وسیع تری دارد می توان به جریان بین دو صفحه موازی همراه با قطعات گرمازا اشاره کرد که چند دهه ای است نظر اندیشمندان را به خود معطوف کرده است. از جمله این کاربردها می توان به مبدل حرارتی فشرده، خنک کن های میانی، دودکش ها، خنک کن قطعات الکترونیک و سیستم های الکترونیکی مدرن اشاره کرد. یکی از اهداف محققان و مهندسان در صنعت افزایش بازدهی و کوچک کردن سامانه های مورد استفاده در صنعت است. فناوری جدید نانو تکنولوژی این امکان را فراهم آورده است تا بتوان ذراتی به اندازه بسیار کوچک نانومتری تولید و فراوری کرد. در سالهای اخیر مطالعاتی در زمینه افزایش انتقال جرم در حضور نانوذرات انجام شده است، اما تعداد آنها در مقایسه با تحقیقات صورت گرفته در انتقال حرارت و هدایت گرمایی بسیار کمتر است. به علت محدودیت های موجود در تغییرات هندسه و شرایط مرزی، بهترین گزینه برای محققان جهت افزایش انتقال حرارت، افزایش قابلیت هدایت حرارتی سیال می باشد. ایده قرار گرفتن ذرات ریز داخل سیال برای افزایش قابلیت هدایت حرارتی توسط ماکسول مطرح شد و واژه نانوسیال برای اولین بار توسط چوی به مخلوط سیال پر از ذره (ذرات با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر) بکار برده شده است [۱]. در سالهای اخیر تحقیقات در زمینه نانوذرات در سیال پایه گسترش یافته است و بسیاری از تحقیقات به منظور بهبود انتقال حرارت مبتنی بر نانوذرات در سیال پایه است. پراکندگی ذرات معلق جامد یا مایع به صورت معلق در جریان هوا در زمینه های صنعتی از اهمیت زیادی برخوردار است. بطور مثال بررسی رسوب ذرات و قطرات در توربین گاز و بخار در مهندسی نیروگاه و پراکندگی آلاینده های جوی و انتقال حرارت تجهیزات و

بیشتری خواهند داشت. هالکمن و همکاران^۱ [۶] به بررسی ضرایب انتقال حرارت موثر و نرخ انتقال جرم در ترکیب مختلف بخار با ۱/۵ درصد وزن روغن های فرار در جریان هوا پرداختند و از این آئروسول برای بهبود تقطیر بخار و بهبود میزان انتقال حرارت ذرات معلق در شرایط پایدار کندانسور لوله و پوسته ای و کندانسور تماس مستقیم استفاده و نتایج را ثبت کردند. اکسید آلومینیوم، مس و اکسید مس سه نانوذراتی هستند که معمولاً پژوهش های تجربی بر روی خواص آنها صورت پذیرفته است. لی و همکاران [۷] اولین بار اندازه گیری هدایت حرارتی نانو ذره در سیال پایه را انجام دادند و از نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس استفاده کردند و دریافتند که علاوه بر نوع، اندازه نانوذره بر افزایش هدایت حرارتی تاثیر خواهد داشت. زینلی و همکاران [۸] به بررسی انتقال حرارت جابجایی از سه نانوذره آلومینیوم اکسید و اکسید مس و مس در سیال پایه آب در مجرای با مقطع مربعی با جریان آرام و با شرایط مرزی دما ثابت به صورت حل عددی پرداختند. آنها نشان دادند که در هر سه نانوذره عدد ناسلت با افزایش غلظت و کاهش قطر نانوذرات، افزایش می یابد. سانترا و همکاران [۹] انتقال حرارت جابجایی آرام نانو سیال حاوی نانوذرات مس در بین دو صفحه موازی را با استفاده از روشهای عددی به صورت دو بعدی بررسی کردند و افزایش ضریب انتقال حرارت سیال پایه با افزودن نانو ذرات و افزایش کسر حجمی آنها را گزارش کردند.

یکی از چالش هایی که در صنایع دیده میشود، خنک کنندگی قطعات الکتریکی و مکانیکی است یکی از روش های خنک کاری قطعات استفاده از لوله های حرارتی در سیستم می باشد که بهره وری از این لوله ها به هندسه لوله و

مایعی که در آن جریان دارد بستگی دارد. شکلا و همکاران [۱۰] تاثیر اضافه کردن نانو ذره مس در آب را در یک لوله حرارتی استوانه ای شکل بررسی کردند و ضریب انتقال حرارت لوله حرارتی را با زمانی که لوله حرارتی با آب پر شده باشد، مقایسه و بهبود ضریب انتقال حرارتی را زمانی که از تعلیق نانوذرات استفاده شده است، نتیجه گرفتند. نقش حرکت براونی در افزایش انتقال حرارت نانوذرات در سیال پایه از جنبه هایی است که می تواند قابل بررسی و تحقیق باشد. به طور مثال تاثیر حرکت براونی در خوشه ای شدن بسیار با اهمیت بوده و این حرکت های تصادفی در اثر برخورد نانوذرات و افزایش احتمال تشکیل خوشه باعث افزایش انتقال حرارت می شود. بونگیورنو^۲ [۱۱] حرکت براونی و حرکت تصادفی ذرات را با یکدیگر در یک سیال پایه بررسی کرد و متوجه شد که اساس حرکت همه ذرات، انرژی داخلی آنهاست و دریافت که نانوذرات مدام با یکدیگر و با ذرات سیال برخورد می کنند که برخورد نانوذرات با ذرات سیال پایه را حرکت ترموفورسیسی می نامند که توسط گرادیان دما در سیال پایه ایجاد می شود یعنی ذرات از سطحی که دمای بالاتر دارد به سطحی که دمای پایین تر دارد حرکت می کند و حرکت براونی موجب افزایش انتقال حرارت می شود. هاگان و ابونادا [۱۲] انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه مستطیلی شکل نیمه گرم را با استفاده از انواع مختلف نانو ذره مورد مطالعه قرار دادند. برای این پژوهش از انواع مختلف نانو ذره با کسر حجمی $0.2 \leq \phi$ استفاده کردند. آنها دریافتند

² Buongiorno

¹ Hackleman et al.

بررسی انتقال حرارت در محفظه با استفاده از نانو آئروسول صورت نگرفته است. دلیل فقدان این پژوهش ها، جدید بودن مبحث نانو سیالات و مبهم بودن مکانیزم های حاکم بر آن است. لذا در این پژوهش، بهبود انتقال حرارت در محفظه با استفاده از نانو آئروسول بررسی شده که برای بررسی از نانو ذره مس در سیال پایه هوا استفاده شده است. در مطالعات انجام شده تاثیر نسبت ابعاد مختلف بر انتقال حرارت بررسی شده و در این پژوهش اختلاف دمای دو سطح بالا و پایین محفظه را تغییر داده و نتایج، ارائه و بررسی شده اند.

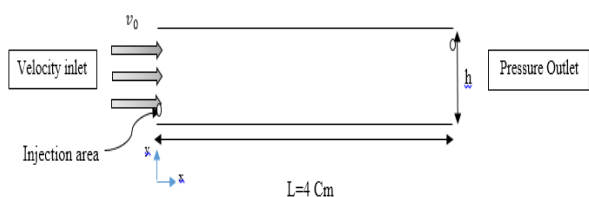
۲- هندسه مساله و معادلات حاکم

۲-۱- نمای هندسه عبور هوا از کانال در انتقال حرارت جابجایی آزاد

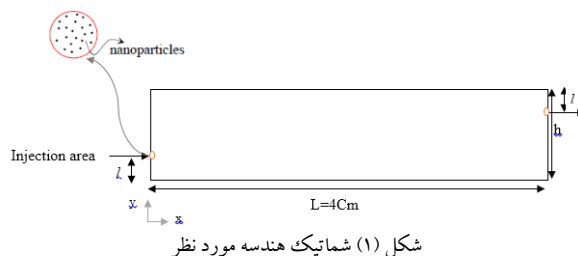
تجزیه و تحلیل انجام شده بر روی یک محفظه دو بعدی مستطیل شکل است. انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه ای با ابعاد 4×1 سانتیمتر مربع که از دو طرف چپ و راست عایق و از بالا و پایین در شرایط مرزی دمایی متفاوت وجود دارد و تحت اثر پاشش نانو ذرات مس که بطور یکنواخت و کروی شکل فرض شده، شبیه سازی شده است. سیال هوا به صورت یک گاز ایده ال و جریان به صورت دو بعدی، آرام، دائم در نظر گرفته شده است. طول محفظه $L = 4 \text{ cm}$ و عرض آن $h = 1 \text{ cm}$ و جنس دیواره ها آلومینیوم در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۱) مشخص است شکاف هایی به فاصله $l = 0.25 \text{ cm}$ از دیواره ها بر روی دیواره های جانبی تعبیه شده است که نانو ذرات مس از طریق این شکاف در قسمت پایین دیواره جانبی سمت چپ بصورت توزیع خطی به داخل محفظه تزریق شده و در قسمت بالای دیواره جانبی سمت راست خارج می شوند.

که حضور نانو ذرات روی محل تشکیل بخار و درجه حرارت تاثیر می گذارد و موجب افزایش عدد ناسلت و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می شود. پالارس و گرانو [۱۳] شبیه سازی عددی تاثیر پراکندگی ذرات در بهبود انتقال حرارت جابجایی طبیعی در جریان مغشوش در بین دو دیوار عمودی با دمای مختلف را بررسی کردند و آنها دریافتند که در جریان مغشوش سرعت رسوب گذاری بر روی دیوار افزایش می یابد. دریافتند که اگر شتاب گرانش در نظر گرفته شود، حرکت نزولی به ذرات تحمیل شده و باعث کاهش رسوب گذاری در کنار دیوار می شود.

هادسون [۱۴] اثر آئروسول در بهبود انتقال حرارت جابجایی طبیعی و ترکیبی در جریان آرام را در یک محفظه با ۶ نسبت ابعاد مختلف مدل سازی کرد و عدد ناسلت و بردار سرعت و شار حرارتی سطح را با استفاده از مدل سازی عددی استخراج کرد. وی مشاهده کرد که استفاده از نانو ذرات به صورت معلق در هوا باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه موجب افزایش عدد ناسلت شده است. محققین زیادی در مورد خواص نانو ذرات به تحقیق و پژوهش پرداخته اند. طبق تحقیقات صورت گرفته عوامل گوناگونی همچون اندازه، جنس، شکل و غلظت ذره، دما، نوع سیال پایه، نوع رژیم جریان (آرام یا مغشوش)، ترکیبات نگهدارنده نانو سیال و بسیاری از عوامل دیگر در تعیین خواص نانو ذرات در سیال پایه و میزان انتقال حرارت آن ها موثرند. در طول مطالعات مختلف نشان داده شده است که افزایش کسر حجمی نانو ذرات فلزی و اکسید فلزی به سیال پایه منجر به افزایش ضریب هدایت گرمایی، افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی، افزایش عدد ناسلت و در نتیجه افزایش انتقال حرارت شده است که این افزایش منجر به جذب حرارت بیشتر و انتقال سریعتر حرارت می شود. همانطور که اشاره شد تا کنون کار عمده ای در خصوص



شکل (۲) شماتیک عبور هوا از کانال در انتقال حرارت جا بجایی ترکیبی



شکل (۱) شماتیک هندسه مورد نظر

۲-۲- نمای هندسه عبور هوا از کانال در انتقال حرارت جا بجایی ترکیبی

در این حالت به بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در یک کانال مستطیلی پرداخته شده است. انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در کانال با ابعاد ۴×۱ سانتیمتر مربع که از بالا و پایین در شرایط مرزی دمایی متفاوت قرار دارد و تحت اثر پاشش نانوذرات مس که بطور یکنواخت و کروی شکل فرض شده، شبیه سازی شده است. سیال هوا به صورت یک گاز ایده ال و جریان به صورت دو بعدی، آرام، دائم در نظر گرفته شده است. سیال هوا که از سمت چپ با سرعت ثابت ۰/۱۲۵۲۵ متر بر ثانیه به داخل کانال وارد می شود که دلیل انتخاب این سرعت، جلوگیری از تشکیل جریان برگشتی بوده است. همچنین عدد رینولدز ورودی ۸۵ در نظر گرفته شد تا از آرام بودن رژیم جریان اطمینان حاصل شود. طول محفظه ۴ سانتیمتر و عرض آن ۱ سانتیمتر و جنس دیواره ها آلومینیوم در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۲) مشخص است ناحیه تزریق بصورت خطی با فاصله ۰/۲۵ سانتیمتر از پایین سمت چپ بطرف بالا سمت راست تنظیم شده است به منظور فعال بودن انتقال حرارت جابجایی آزاد و جابجایی اجباری به طور همزمان دمای صفحات بالایی و پایینی کانال با یکدیگر متفاوت بوده تا نیروی شناوری نیز علاوه بر نیروهای اینرسی و نیروهای چسبندگی در مکانیزم انتقال حرارت در کانال فعال باشد.

۲-۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم مربوط به شبیه سازی عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد و ترکیبی در یک محفظه شامل معادلات پیوستگی، ممتوم و بقای انرژی از روابط موجود در مقاله مرجع [۱۴] به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله ممتوم در جهت x

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g\beta \sin \theta \Delta T \quad (2)$$

معادله ممتوم در جهت y

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta \cos \theta \Delta T \quad (3)$$

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + G \quad (4)$$

برای این مسأله فرض را بر دو فاز بودن آئروسول که از دو فاز جامد و سیال تشکیل شده است قرار می دهیم و سیال را هوا و ذرات را به شکل کروی در نظر می گیریم و ذرات دارای دو نوع برخورد با یکدیگر هستند: حرکت براونی \vec{F}_B که برخورد ذرات معلق با یکدیگر است و حرکت ترمو فورسیسی \vec{F}_{TP} که حرکت ذرات معلق با ذرات سیال پایه است. شکل برداری معادله حرکت ذرات که از تعادل بین نیروی اینرسی ذرات و نیروهای وارد بر آنها بدست می آید را به صورت زیر می توان بیان کرد [۱۵]:

$$\rho_p V_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = -f(\vec{U}_p - \vec{U}_G) + (\rho_p - \rho_G) V_p \vec{g} + \vec{F}_B + \vec{F}_{TP} \quad (5)$$

که در رابطه (۵) برای ضریب پسای استوکس - کانیگهام بصورت زیر بیان می شود:

$$f = \frac{3\pi\mu_G d_p}{C_c} \quad (6)$$

که در رابطه (۶) برای ضریب اصلاح کانینگهام داریم:

$$C_c = 1 + Kn(1.257 + 0.4 e^{-1.1/Kn}) \quad (7)$$

اثر حرکت براونی در شکل برداری معادله حرکت

ذرات گنجانده شده است و بصورت زیر بیان می‌شود:

$$F_{B,i} = G_i \left(\frac{6\pi\mu d_p k_B T_G}{C_c \Delta t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

که در رابطه (۸)، ثابت بولتزمن عدد ثابت زیر می‌باشد:

$$k_B = 1/38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \quad (9)$$

نیروی ترموفورسیسی ذرات که به صورت تجربی

بدست آمده و به صورت زیر است [۱۶]:

$$F_{TP,i} = -f \frac{C_T \vartheta}{T} \nabla T_i \quad (10)$$

که در رابطه (۱۰) C_T ضریب ترموفورسیس بصورت

زیر تعریف می‌شود:

$$C_T = \frac{2.34 \left(\frac{k}{k_p} + 2.18 Kn \right) C_c}{(1 + 3.42 Kn)(1 + 2 \frac{k}{k_p} + 4.36 Kn)} \quad (11)$$

مدل تشعشعی p-1 دارای دقتی مناسب با کمترین هزینه

محاسباتی می‌باشد و همچنین در این مدل تبادل تشعشع بین

گاز و ذرات و اثرات ذرات و دوده و قطرات می‌تواند در

نظر گرفته شود. معادلات شار تشعشع مدل p-1 با فرض

تشعشع خاکستری بصورت زیر هستند [۱۷]:

$$q_r = -\frac{\nabla G}{3(\alpha + \sigma_s) - C\sigma_s} \quad (12)$$

پارامتر Γ بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma = \frac{1}{3(\alpha + \sigma_s) - C\sigma_s} \quad (13)$$

پس خواهیم داشت:

$$q_r = -\Gamma \times \nabla G \quad (14)$$

هنگامیکه مدل تشعشع فعال است شار تابش در معادله

انرژی برای G عبارتند از:

$$\nabla \cdot (\Gamma \times \nabla G) - \alpha G + 4\alpha\sigma n^2 T^4 = S_G \quad (15)$$

که در رابطه (۱۵)، ثابت استفن - بولتزمن عدد ثابت زیر

می‌باشد:

$$5/67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot T^4} \quad (16)$$

از ترکیب معادلات (۱۴) و (۱۵) خواهیم داشت:

$$-\nabla q_r = \alpha G - 4\alpha\sigma n^2 T^4 \quad (17)$$

۳- صحت سنجی شبیه سازی عددی

جهت اطمینان از صحت شبیه سازی انجام شده در یک

حالت مشخص نتایج حاصل با نتایج مقاله مرجع [۱۴] مقایسه

شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی برای توزیع دما بر

روی خط مرکزی افقی در طول کانال در حالتیکه دمای

صفحه پایینی 350 K و دمای صفحه بالایی 300 K و همچنین

تعداد نانوذرات مس 50125 می‌باشد را با نتایج مرجع [۱۴]

مقایسه شده است. در فرایند حل از شبکه با تعداد گره

130×40 در راستای x, y استفاده شده است. در این حالت

سرعت روند همگرایی مساله بالا است و نیز اختلاف

بسیار کمی بین نتایج کار حاضر و نتایج مقاله مرجع [۱۴] با

ریزتر کردن شبکه بندی حاصل شده است. با دقت در شکل

(۳)، مشاهده می‌شود که سلول های قارچی شکل که در

اثر انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه ایجاد می

شوند، در اینجا نیز وجود دارند. سلول های قارچی شکل در

محفظة رایلی- بنارد نیز به همین ترتیب تشکیل می شوند

ولی در اینجا به دلیل وجود پاشش نحوه چیدمان قارچ ها

متفاوت است. همانطور که مشاهده می‌شود یک بخش

قارچی شکل در وسط کانال به سمت بالا رشد کرده و در

اطراف آن دو بخش قارچی شکل در حال حرکت به سمت

پایین کانال هستند. با مشاهده شکل (۴) درمی‌یابیم که در

نزدیکی دیواره پایینی به علت گرادیان دمای بیشتر، نرخ

انتقال حرارت بیشتری وجود دارد و دما بالاتر است. با

حرکت در عرض کانال در یک مقطع از آن همانطور که در

شکل پیدا است دما کاهش می‌یابد تا به دمای صفحه بالایی

نزدیک شود. همانطور که مشخص است تطابق بسیار خوبی

بین نتایج حاصل از شبیه سازی انجام شده در این مقاله و

نتایج مرجع [۱۴] مشاهده می‌شود.

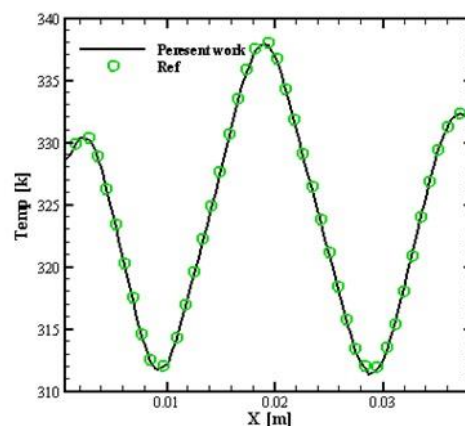
با اصلاح شبکه تغییر نکند. برای شبکه بندی محفظه برای حالت جابجایی آزاد از یک مش بندی غیر یکنواخت مثلثی استفاده شده است. در این حالت نیز به علت اینکه در نزدیکی دیواره ها گرادیان دما بزرگتر است، بطوریکه در نزدیکی دیواره ها ریزتر انتخاب شده تا بتوان تغییر دما را در این نواحی بخوبی دنبال نمود و در بقیه نواحی از شبکه یکنواخت استفاده شده است. بدلیل دقیق تر شدن پاسخ ها و وجود جابجایی آزاد، شبکه نسبت به جابجایی ترکیبی ریز تر انتخاب شده است. شبیه سازی را در حالت جابجایی آزاد در محفظه برای سه شبکه بندی مختلف بررسی کرده و نتایج در جدول (۱) و (۲) برای دما و سرعت در وسط محفظه مقایسه شده اند.

جدول (۱) دما در حالت جابجایی آزاد در کانال برای سه شبکه بندی مختلف

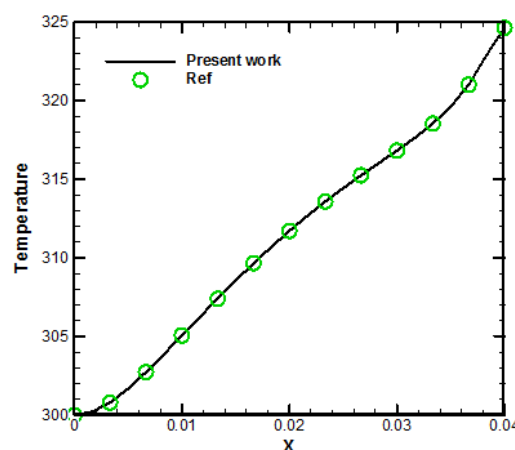
تعداد گره	دما (K)
۱۰۰×۳۵	۳۳۵/۵۱
۱۳۰×۴۰	۳۳۸/۵۷
۱۴۵×۴۰	۳۳۹/۷۱

جدول (۲) سرعت در حالت جابجایی آزاد در محفظه برای سه شبکه بندی مختلف

تعداد گره	سرعت $(\frac{m}{s}) \times 10^{-2}$
۱۰۰×۳۵	۳/۳۱
۱۳۰×۴۰	۳/۳۵۸
۱۴۵×۴۰	۳/۳۶۶



شکل (۳) مقایسه تغییرات دما نسبت به طول کانال در حالت انتقال حرارت جابجایی آزاد برای کار حاضر و مرجع [۱۴]



شکل (۴) مقایسه تغییرات دما نسبت به طول کانال در حالت انتقال حرارت جابجایی ترکیبی برای کار حاضر و مرجع [۱۴]

۴- بررسی استقلال نتایج از شبکه

برای شبکه بندی محفظه برای دو حالت انتقال حرارت جابجایی (آزاد و ترکیبی) دمای صفحه بالایی ۳۰۰K و دمای صفحه پایینی ۳۵۰K و تعداد نانوذرات مس در هوا ۵۰۱۲۵ در نظر گرفته شده است. برای اینکه اطمینان حاصل شود که شبکه بندی انجام شده موجب جواب صحیح خواهد شد، از استقلال شبکه استفاده می شود و برای اعتماد به نتیجه، حل باید مستقل از شبکه باشد به این معنی که حل

همانطور که در جداول بالا مشاهده می‌شود برای شبکه های با ۵۲۰۰ و ۵۸۰۰ تعداد گره نتایج بدست آمده برای دما و سرعت اختلاف بسیار اندکی با یکدیگر دارند. بنابراین برای کاهش زمان انجام شبیه سازی و نیز دقت کافی از شبکه ۵۲۰۰ گره (۱۳۰×۴۰) استفاده شده است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- انتقال حرارت جابجایی آزاد

در کار حاضر انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه با مقطع مستطیلی با نانوآتروسل مس در اختلاف دماهای متفاوت بررسی شده است. در این بخش انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه در حالیکه دمای دیواره گرم ۴۰۰K و دمای دیواره سرد ۳۰۰K و تعداد نانوذرات مس ۵۰۱۲۵ در نظر گرفته شده است، انجام گرفته و کانتور توزیع دما در شکل (۵) و بردارهای سرعت در شکل (۶) آورده شده است. با دقت در کانتور دما به وضوح دیده می‌شود که چیدمان دما با افزایش سهم نیروی شناوری از طریق افزایش اختلاف دما بین صفحات گرم و سرد کاملاً دستخوش تغییر می‌شود. به این معنی که با افزایش نیروی شناوری، نیروی شناوری بر لزجت غلبه کرده و لایه های زیرین سیال که دارای چگالی کمتری هستند بسمت بالا حرکت کرده تا اینکه در نزدیکی صفحه سرد در اثر نیروی گرانش ذرات سردتر بسمت پایین حرکت می‌کنند و تشکیل سلول قارچی رایلی - بنارد را می‌دهد. در شکل، یک سلول قارچی به سمت پایین در مرکز کانال ایجاد شده و دو سلول قارچی به سمت بالا در حال گسترش است. همانطور که دیده می‌شود با افزایش نیروی شناوری و افزایش نرخ انتقال حرارت در آن ناحیه ای که در دمای صفحه سرد قرار دارد، کوچکتر شده و ناحیه ی وسیع تری از کانال در محدوده دمای ۳۷۰K تا ۳۸۰K قرار می‌گیرند. چنین رویدادی تنها به دلیل تغییر سرعت جریان و در نتیجه تغییر کانتور دما است. شکل (۶) توزیع بردارهای سرعت را نشان می‌دهد. با مشاهده شکل درمی‌یابیم که در اثر تشکیل سلول های رایلی در اینجا ۴ بلوک سرعت وجود دارد و مقادیر بیشینه سرعت ها در هر بلوک با توجه به کانتور دما و

برای شبکه بندی برای حالت جابجایی ترکیبی از یک شبکه بندی غیر یکنواخت مربعی استفاده کردیم. در نزدیکی دیواره های گرم و سرد، شبکه را ریزتر کردیم. در نزدیکی دیواره هاگرادیان های دمای بزرگتری داریم و به همین دلیل شبکه را تا حد ممکن ریز انتخاب کرده ایم تا بتوان تغییرات دمایی را در این نواحی بخوبی دنبال کرد. در بقیه نواحی مورد بررسی شبکه یکنواخت بخوبی کارآیی داشته و هزینه محاسباتی را کاهش می‌دهد. در هر دو حالت نسبت منطقی محفظه ۱ به ۴ است. در این حالت نیز نتایج شبیه سازی برای جابجایی ترکیبی در محفظه برای سه شبکه بندی مختلف در جدول (۳) و (۴) برای دما و سرعت در وسط کانال آورده شده است.

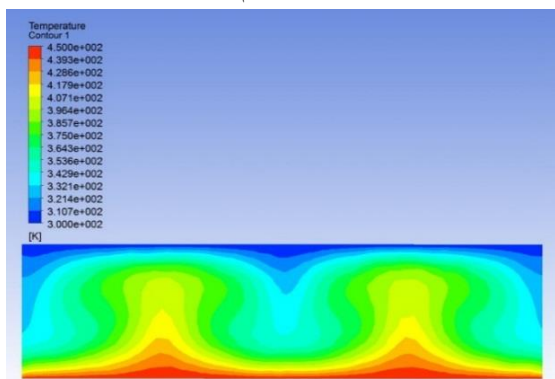
جدول (۳) دما در حالت جابجایی ترکیبی در کانال برای سه شبکه بندی مختلف

تعداد گره	دما (K)
۱۰۰×۳۵	۳۰۷/۷۵
۱۳۰×۴۰	۳۰۹/۷۱
۱۴۵×۴۰	۳۱۰/۷۸

جدول (۴) سرعت در حالت جابجایی ترکیبی در محفظه برای سه شبکه بندی مختلف

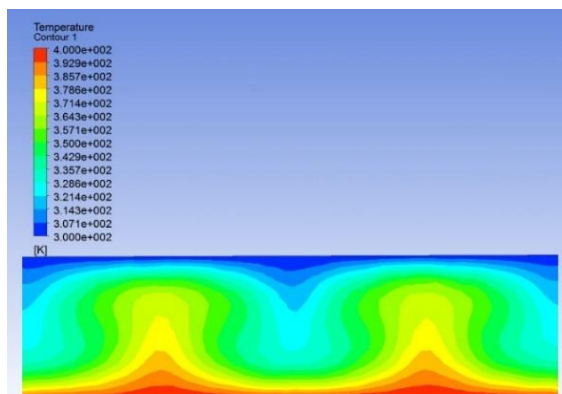
تعداد گره	$10^{-2} \left(\frac{m}{s} \right)$ سرعت
۱۰۰×۳۵	۱۳/۳۲
۱۳۰×۴۰	۱۴/۵۱
۱۴۵×۴۰	۱۴/۷۵

بیشتر شده و وسعت نواحی سرد، نسبت به قبل کاهش می یابد و همچنین با توجه به جمله موجود در معادله ممتوم، با افزایش نیروی شناوری سرعت جریان نیز افزایش می یابد و تعداد سلول های قارچی و بلوک های سرعت افزایش می یابد. در واقع در این حالت بخش وسیعتری از کانال در دمای میانگین صفحات سرد و گرم قرار می گیرد.

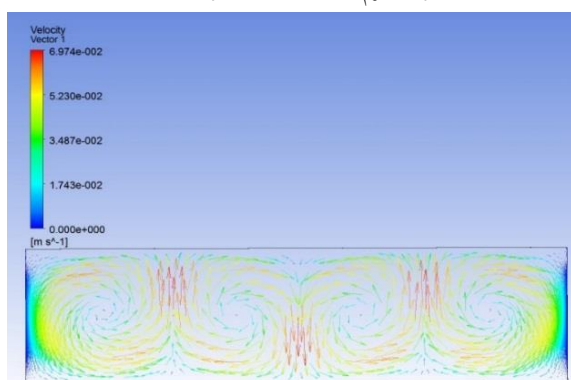


شکل (۷) کانتور دما برای انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه با دمای دیواره گرم ۴۵۰K و تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵

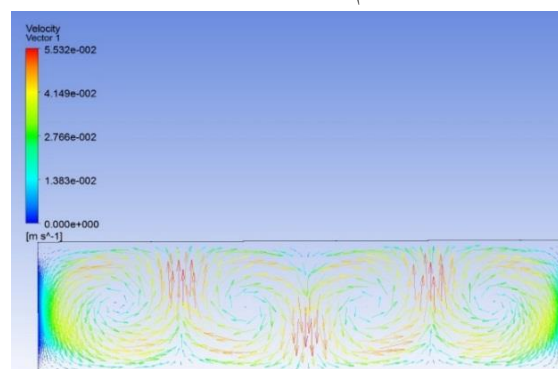
سلول های تشکیل شده در آن به وضوح تغییر کرده و از نزدیک صفحه گرم در بلوک های کناری به بالا منتقل شده و در بلوک های میانی به پایین آورده شده است و همین امر موجب تغییر در توزیع دما می شود. همچنین با افزایش نیروی شناوری سرعت جریان نیز به طور کلی افزایش می یابد.



شکل (۵) کانتور دما برای انتقال حرارت جابجایی آزاد هوا در محفظه با دمای دیواره گرم ۴۰۰K و تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵



شکل (۸) بردار سرعت برای انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه با دمای دیواره گرم ۴۵۰K و تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵

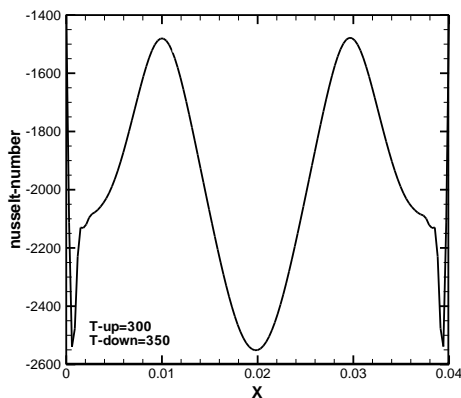


شکل (۶) بردار سرعت برای انتقال حرارت جابجایی آزاد هوا در محفظه با دمای دیواره گرم ۴۰۰K و تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵

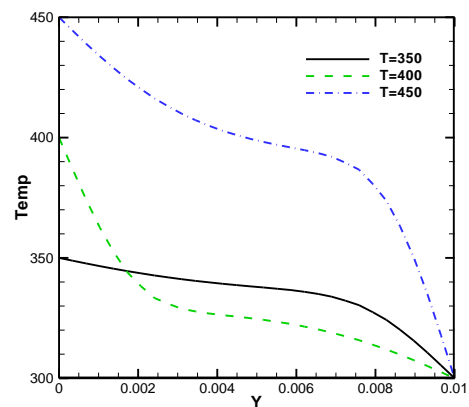
در شکل های زیر نمودار پروفیل های توزیع سرعت برحسب متر بر ثانیه (m/s) و نمودار پروفیل توزیع دما برحسب کلونین (k) و عرض کانال بر حسب متر (m) نشان داده شده است. شکل (۹)، نمودار پروفیل دما در یک خط عمودی در وسط محفظه برای انتقال حرارت جابجایی آزاد در دمای دیواره بالایی ۳۰۰K و دمای دیواره پایینی در سه حالت مختلف دما ۳۵۰K و ۴۰۰K و ۴۵۰K در حالتیکه تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵ انتخاب شده است را مقایسه می کند همانطور که مشاهده می شود با افزایش دمای دیواره پایینی،

شکل های (۷) و (۸)، کانتور دما و بردار سرعت برای انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه در حالتی که دمای دیواره پایینی ۴۵۰K و دمای دیواره بالایی ۳۰۰K و تعداد نانوذرات مس ۵۰۱۲۵ انتخاب شده است را نشان می دهد. در این حالت با حفظ شرایط قبلی اختلاف دمای صقحه گرم و صفحه سرد را افزایش داده شده است. با افزایش بیشتر نیروی شناوری کلیات توزیع دما و سرعت و تشکیل سلول های قارچی مانند حالت قبل است با این تفاوت که در اینجا به دلیل افزایش نیروی شناوری، وسعت نواحی گرمتر،

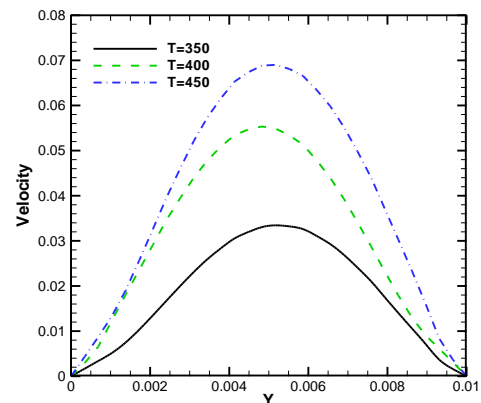
که در واقع عدد ناسلت که باید در طول محفظه روند یکسانی را طی کند، دارای برآمدگی و فرو رفتگی هایی است. اگر به کانتور دما در محفظه توجه شود در می یابیم که سلول های قارچی شکل رایلی بنارد به دلیل وجود بلوک های چرخشی سرعت بوجود آمده اند که وجود همین سلول های قارچی شکل، عامل بوجود آمدن برآمدگی ها و فرو رفتگی ها می باشد. در جاهایی که این قارچ ها در حال سقوط به پایین هستند (در ابتدا و انتهای محفظه) عدد ناسلت و شار حرارتی کمترین مقدار خود را از نظر اندازه دارند و در واقع در این حالت تغییرات گرادیان کم است و برعکس در مکان میانی محفظه که سلول قارچی به سمت بالا در حرکت است، عدد ناسلت و شار حرارتی هر دو دارای بیشترین مقدار خود از نظر اندازه هستند. همچنین می توان اینگونه بیان کرد که دو جریان سیرکولاسیون در طرفین محفظه در نظر گرفته شده است. به دلیل تماس با دیواره های عمودی عایق، سرعت چرخشی کمتری نسبت به جریان سیرکولاسیون در وسط کانال باید داشته باشند و این چنین هم هست. این تاثیر متقابل بین سیرکولاسیونها باعث می شود که جریانی که به سمت بالا در وسط محفظه در حال حرکت است سرعت، زیادتری نسبت به جریانهای روبه پایین داشته باشد و در نتیجه انتقال حرارت در محلی که جریان به سمت بالا حرکت می کند چه بر روی دیواره پایین و چه برای دیواره بالا، باید بزرگتر از مکانهایی باشد که جریان به سمت پایین در حال حرکت است.



محدوده وسط محفظه در $x=2cm$ در دمای بالاتری قرار میگیرد. شکل (۱۰)، مقایسه نمودار پروفیل توزیع سرعت در یک خط عمودی در وسط محفظه را برای انتقال حرارت جابجایی آزاد در دمای دیواره بالایی $350K$ و دمای دیواره پایینی در سه حالت مختلف دما $350K$ و $400K$ و $450K$ در حالتیکه تعداد نانوذرات 50125 انتخاب شده، نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش دمای دیواره پایینی مقدار بیشینه سرعت در میانه محفظه افزایش یافته است.



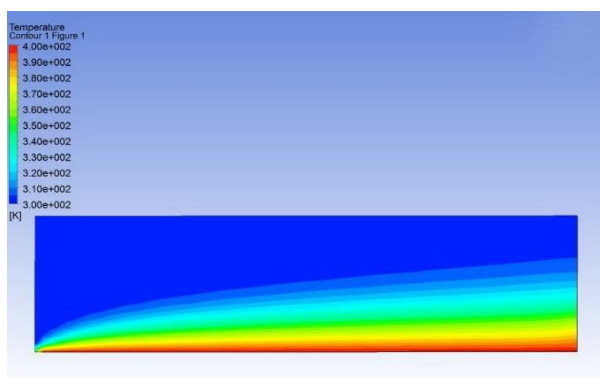
شکل (۹) مقایسه نمودار تغییرات دما نسبت به عرض کانال در $x=2cm$ با دمای دیواره گرم $350K$ و $400K$ و $450K$ در تعداد نانوذرات 50125



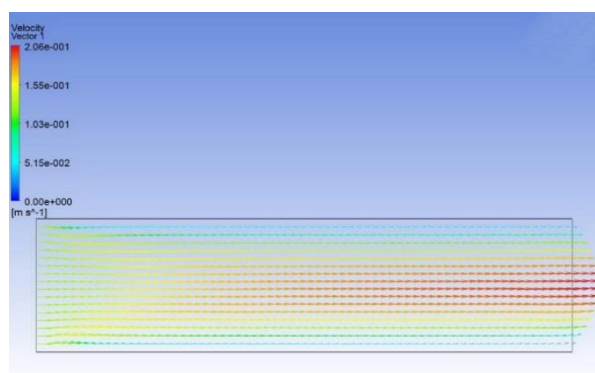
شکل (۱۰) مقایسه نمودار تغییرات سرعت نسبت به عرض کانال در $x=2cm$ با دمای دیواره گرم $350K$ و $400K$ و $450K$ در تعداد نانوذرات 50125

شکل (۱۱) و (۱۲) تغییرات عدد ناسلت و شار حرارتی را روی دیواره سرد محفظه نمایش می دهد. همانطور که مشاهده می شود در هر دو نمودار نوسان هایی دیده می شود

بدلیل پایین بودن دما در این ناحیه سرعت نیز مقدار کمتری دارد که دلیل آن تاثیر پذیری سرعت از روی دما در معادله ممنتوم (معادله حرکت ناویر استوکس) در جابجایی طبیعی است و همین امر موجب می شود تا توزیع دما همانطور که در شکل (۱۳) مشخص است در این ناحیه یکنواخت تر باشد. با پیشروی سیال همانطور که مشاهده میشود سرعت در نواحی میانی و در بخش کوچکی از ناحیه خروجی کانال افزایش یافته و مقادیر سرعت از صفحه بالایی و صفحه پایینی بسمت نواحی میانی در حال افزایش است که همین افزایش سرعت باعث می شود که توزیع دمای سیال نیز مطابق شکل قبلی دستخوش تغییر و غیر یکنواختی شود.

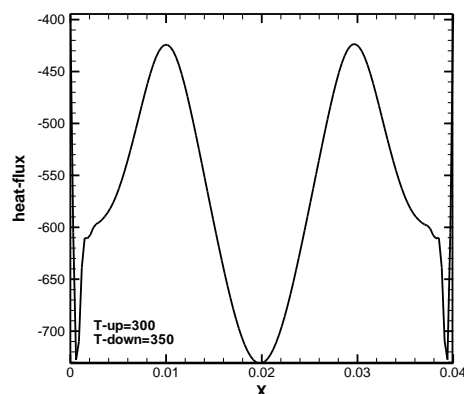


شکل (۱۳) کانتور دما برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در کانال با صفحه پایین 400K و تعداد نانوذرات 50125



شکل (۱۴) بردار سرعت برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در کانال با صفحه پایین 400K و تعداد نانوذرات 50125

شکل (۱۱) نمودار عدد ناسلت برای انتقال حرارت جابجایی آزاد در طول دیواره سرد

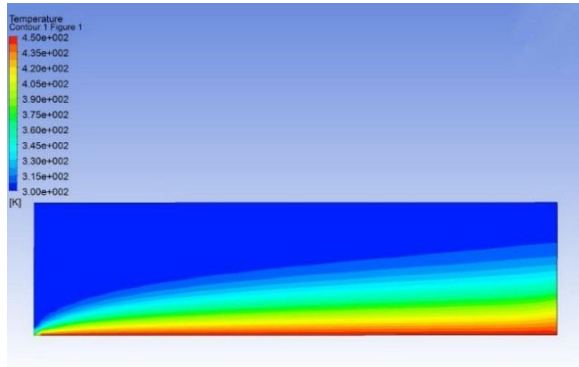


شکل (۱۲) نمودار شار حرارتی برای انتقال حرارت جابجایی آزاد در طول دیواره سرد

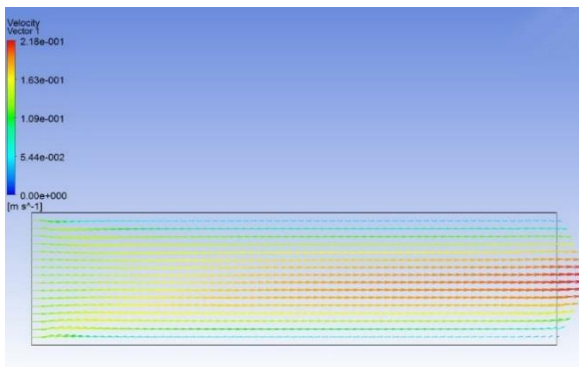
۲-۵- انتقال حرارت جابجایی ترکیبی

در این بخش انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در کانال در حالیکه دمای دیواره گرم 400K و دمای دیواره سرد 300K و تعداد نانوذرات مس 50125 در نظر گرفته شده است، انجام گرفته و کانتور توزیع دما در شکل (۱۳) و بردارهای سرعت در شکل (۱۴) آورده شده است. همانطور که در شکل (۱۳) مشخص است ناحیه وسیعی از قسمت بالایی کانال در دمایی نزدیک به دمای صفحه بالایی قرار دارد و با پیشروی سیال درون کانال عرض این ناحیه کاهش یافته و در خروجی کانال این ناحیه بسیار کوچکتر می شود. در واقع هر چه نانوذرات موجود در هوا بیشتر در عرض کانال پیشروی میکنند، انتقال حرارت جابجایی آزاد نیز فعال تر شده و نیروی شناوری بیشتر اثر خود را نمایان می سازد که این امر منجر به حرکت سیال از سمت پایین کانال به بالا و توزیع غیر یکنواخت دما در عرض کانال می شود تا جاییکه در خروجی تقریباً ناحیه با دمای نزدیک به صفحه بالایی بسیار کم عرض می شود. شکل (۱۴) توزیع بردارهای سرعت را نشان می دهد. با توجه به شکل مشاهده می شود مقادیر سرعت در نزدیکی دیواره بالایی کم است. در واقع

سرعت بیشینه جریان در کانال افزایش می یابد و مقدار آن در نواحی بیشتری در اطراف خط مرکزی کانال به مقدار بیشینه نزدیک می شود.



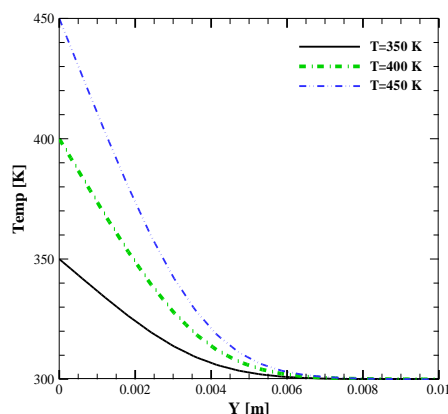
شکل (۱۵) کانتور دما برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در محفظه با صفحه پایین 450K و تعداد نانوذرات 50125



شکل (۱۶) بردار سرعت برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در محفظه با صفحه پایین 450K و تعداد نانوذرات 50125

شکل (۱۷)، مقایسه نمودار پروفیل توزیع سرعت بر حسب متر بر ثانیه (m/s) رادر عرض کانال بر حسب متر (m) بر روی یک خط عمودی در وسط کانال برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در سه حالت مختلف دمای سطح پایینی 350K و 400K و 450K در حالتیکه تعداد نانوذرات 50125 انتخاب شده است را نشان می دهد. همانگونه که در نمودار مشخص است با افزایش دمای سطح پایین به وضوح مقدار بیشینه سرعت در میانه کانال افزایش یافته و بیشتر می شود و علت آن افزایش سرعت ناشی از تقویت جابجایی

شکل های (۱۵) و (۱۶) کانتور دما و بردار سرعت را برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در حالتی که دمای صفحه پایینی 450K و دمای صفحه بالایی 300K و تعداد نانوذرات مس 50125 است را نمایش می دهند. تفاوت عمده ای که در این حالت نسبت به حالت قبل وجود دارد افزایش سرعت درون کانال است و در واقع در این حالت نیز با افزایش دما، انتقال حرارت جابجایی طبیعی تقویت شده و باعث بلند شدن سیال از سطح پایین و حرکت به سمت سطح بالایی می شود در نتیجه مقدار سرعت در مرکز کانال در این حالت افزایش بیشتری را نشان داده است. علیرغم اینکه سرعت سیال در این حالت افزایش یافته است اما توزیع سرعت و دما در کانال مانند حالت قبل (دمای صفحه پایین 400K) است و ناحیه وسیعی از قسمت بالایی کانال همچنان نزدیک به صفحه بالایی قرار دارد که با پیشروی سیال از عرض این ناحیه کاسته و منجر به توزیع غیر یکنواخت دما در عرض کانال می شود. در این حالت در واقع بخشی از توزیع دما به سمت دیواره بالایی کانال در خروجی یکدست تر شده و بنابراین پروفیل های سرعت به سمت خروجی کانال حرکت می کنند. همانطور که اشاره شد در شکل (۱۶) مقادیر سرعت بدلیل افزایش دمای صفحه پایینی افزایش یافته است اما همچنان مقادیر سرعت در نزدیکی دیواره بالایی کم است و علت آن پایین بودن دما در این ناحیه می باشد و با پیشروی نانوذرات موجود در هوا در عرض کانال سرعت در نواحی میانی و در بخش کوچکی از ناحیه خروجی کانال افزایش یافته است. همانطور که اشاره شد با افزایش تغییر دما، سهم نیروهای شناوری بیشتر شده و اثرات آن ها در افزایش نرخ انتقال گرما باعث تغییر پروفیل های دما و سرعت در کانال می شود. علاوه بر آن همانطور که مشاهده می شود با افزایش دما به دلیل کوپل بودن سرعت و دما در معادلات ممتوم

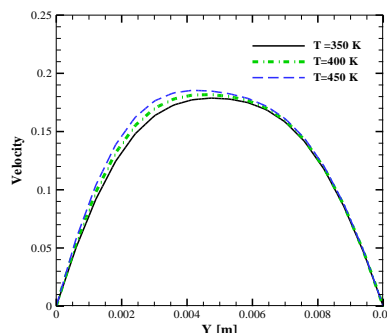


شکل (۱۸) مقایسه نمودار تغییرات دما نسبت به عرض کانال در $2cm = x$ با دمای دیواره گرم $350K$ و $400K$ و $450K$ در تعداد نانوذرات

۵۰۱۲۵

شکل (۱۹) و (۲۰) تغییرات عدد ناسلت و شار حرارتی را در طول کانال بر روی دیواره روی دیواره سرد در حالتی که دمای صفحه پایینی $350K$ و دمای صفحه بالایی $300K$ قرار دارد نشان می‌دهد. تعداد نانوذرات مس 50125 انتخاب شده است. همانطور که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود با حرکت سیال درون کانال، انتقال حرارت سیال با دیواره‌ها بیشتر شده و به مرور گرادیان دما نزدیک دیواره که همان عدد ناسلت را تعیین می‌کند، کاهش می‌یابد. پس برای شیب نمودار ناسلت می‌توان گفت که از ابتدای کانال تا انتهای آن از یک مقدار زیادی در ابتدای کانال به صورت ناگهانی کاهش خواهد داشت و بنابراین می‌توان انتظار داشت تغییر عدد ناسلت با حرکت به سمت انتهای کانال کوچک و شیب آن کم می‌شود. همانطور که در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود در هنگام ورود سیال به داخل کانال، میزان انتقال حرارت بین سیال و دیواره افزایش می‌یابد و به مرور با پیشروی سیال میزان انتقال حرارت کاهش می‌یابد و باعث همدمایی سیال با سطح می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از ورودی کانال، انتقال حرارت و شار حرارتی کاهش یافته است.

طبیعی و وارد شدن جابجایی طبیعی با استفاده از تقریب بوزینسک در معادله ممتوم است که باعث می‌شود سرعت تحت تاثیر دما قرار گرفته و افزایش یابد.



شکل (۱۷) مقایسه نمودار تغییرات سرعت نسبت به عرض کانال در $2cm = x$ با دمای دیواره گرم $350K$ و $400K$ و $450K$ در تعداد نانوذرات 50125

شکل (۱۸)، مقایسه نمودار پروفیل توزیع دما برحسب کلونین (K) رادر عرض کانال بر حسب متر (m) را بر روی خط عمودی در وسط کانال برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در سه حالت مختلف دمای سطح پایین $350K$ و $400K$ و $450K$ را نمایش می‌دهد که در این حالت نیز تعداد نانوذرات 50125 در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودار دما مشاهده می‌شود شیب نمودار بر حسب y با افزایش دمای صفحه پایینی کمی بیشتر شده است و می‌تواند بدین معنی باشد که با افزایش دما، گرادیان دما اندکی بیشتر شده و بنابراین میزان انتقال حرارت کمی افزایش داده شده است.

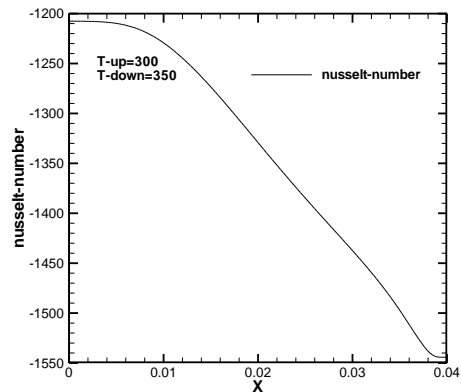
در اختلاف دما در دیواره گرم و سرد مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. جمع بندی نتایج حاصل بصورت زیر می باشد:

۱- وجود نانوذرات مس در محفظه باعث می شود تا بلوک های چرخشی سرعت با افزایش نسبت منظری محفظه افزایش یابد و همچنین بلوک ها باعث حرکت نوسانی سلول های قارچی شکل در کانتور دما می شود.

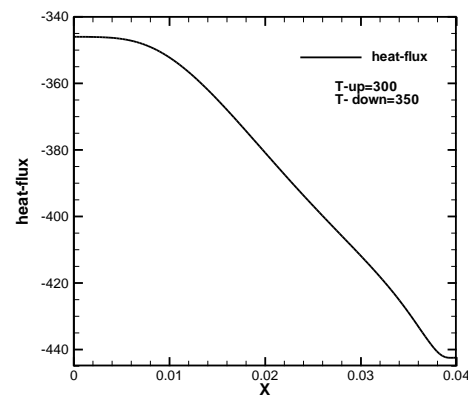
۲- حرکت نوسانی سلول های قارچی شکل در کانتور دما، باعث می شود عدد ناسلت دارای حرکت نوسانی و مقادیر بیشینه و کمینه باشد که این امر می تواند برای یک توزیع غیر یکنواخت و درعین حال پریرودیک انتقال حرارت روی سطح بسیار مناسب باشد.

۳- در مورد انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نشان می دهند که وجود نانوذرات مس باعث تغییر قابل توجه کانتور سرعت در کانال می شود و همچنین کانتور دما بعلا اینکه معادلات دما و سرعت با یکدیگر کوپل هستند، در کانال نیز دستخوش تغییر شده و توزیع دما را در کانال در ناحیه ای تقریباً وسیع و غیر یکنواخت، یکدست می کند.

۷- فهرست علائم



شکل (۱۹) نمودار عدد ناسلت برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در طول دیواره سرد



شکل (۲۰) نمودار شار حرارتی برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در طول دیواره سرد

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

محققین زیادی در مورد خواص نانوذرات به تحقیق و پژوهش پرداخته اند. طبق تحقیقات صورت گرفته عوامل گوناگونی همچون اندازه، جنس، شکل و غلظت ذره، دما، نوع سیال پایه، نوع رژیم جریان (آرام یا مغشوش)، ترکیبات نگهدارنده نانو سیال و بسیاری از عوامل دیگر در تعیین خواص نانوذرات در سیال پایه و میزان انتقال حرارت آن ها موثرند. در پژوهش حاضر مدلسازی انتقال حرارت جابجایی آزاد و ترکیبی با استفاده از نانو آئروسول (نانوذرات مس در سیال پایه هوا) در یک محفظه بسته انجام گرفته و اثر تغییر

ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	c_p	علایم یونانی
ضریب اصلاح کانینگهام	C_c	
ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})	α	زیر نویس ها
قطر ذرات (nm) فشار دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μd_p	
ضریب انبساط حرارتی، K^{-1}	β	
ضریب درگ استوکس - کانینگهام چگالی (kgm^{-3})	ρf	
نیروی براونی (N)	F_B	f سیال
		p ذرات جامد

مراجع:

- F_{TP} نیروی ترموفورسیسی (N)
- G منبع حرارت حجم ثابت، W/m^3
- g شتاب گرانشی، m/s^2
- k رسانش هدایتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
- p فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
- Kn عدد نادسن، $(\frac{2\lambda}{d_p})$
- section duct in laminar flow, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 6, 2012, pp. 1-14.
- [9] Santra A.K, Sen S. and Chakraborty N, Study of heat transfer due to laminar flow of copper-water nanofluid through two isothermally heated parallel plates, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, 2009, pp. 391-400.
- [10] Shukla K.N., Solomon A.B., Pillai B.C., Ruba Singh B.J., Kumar S.S., Thermal performance of heat pipe with suspended nano-particles, *Heat Mass Transfer*, Vol. 46, 2012, pp. 1913-1920.
- [11] Buongiorno J., Convective transport in nano fluids, *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, Vol. 128, 2006, pp. 240-250.
- [12] Hakan F.O., Abu-Nada E., Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*. Vol. 29, 2008, pp. 1326.1336.
- [13] Pallares J.N., Grau F.X., Particle dispersion in a turbulent natural convection channel flow, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 43, 2012, pp. 45-56.
- [1] Murshed S.M.S., Leong K.C., and Yang C., Thermophysical and electrokinetic properties of Nanofluids – A critical review, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, 2008, pp. 2109-2125.
- [2] Kreidenweis S.M, Asa Awuku A, Aerosol Hygroscopicity: Particle Water Content and Its Role in Atmospheric Processes, *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, Vol. 5, 2014, pp. 331-361.
- [3] Masuda H., Ebata A., Teramae K., Hishinuma N., Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (Dispersion of g-Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ ultra-fine particles), *Netsu Bussei*, 7, 1993, pp. 227.233.
- [4] Schild A, Gutsch A, M'uhlenweg H, Pratsinis, S.E, Simulation of nanoparticle production in premixed aerosol flow reactors by interfacial fluid mechanics and particle dynamics, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 10, 1991, pp. 305-315.
- [5] Akbar M.K, Rahman M, Ghiaasiaan S.M, Particle transport in a small square enclosure in laminar natural convection, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 40, 2009, pp.747-761.
- [6] Pommerenck J, Alanazi Y, Gzik T, Vachkov R, Hackleman D.E, Recovery of a multicomponent, single phase aerosol with a difference in vapor pressures entrained in a large air flow, *Journal. Chem. Thermodynamics*, Vol. 46, 2012, pp. 109-115.
- [7] Lee S., Choi S.U.S., Li S., Eastman J.A., Measuring thermal conductivity of fluids containing oxid nanoparticles, *Journal of heat transfer*, Vol. 121, 1999, pp. 280.289.
- [8] Zeinali Heris S., Kazemi-Beydokhti A., Noie S.H., Rezvan S., Numerical study on convective heat transfer of Al₂O₃/water, CuO/water, Cu/water nanofluids through square crass-

- [14] Hudson A., Computational Analysis to Enhance Laminar Flow Convective Heat Transfer Rate in an Enclosure Using Aerosol Nanofluids, *Electronic Theses & Dissertations*, Vol. 12, 2013, pp. 10-48.
- [15] Ounis H., Ahmadi G., McLaughlin J.B., Dispersion and Deposition of Brownian Particles from Point Sources in a Simulated Turbulent Channel Flow, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 147, 1991, pp. 233-250.
- [16] Talbot L., Cheng R.K., Schefer R.W., Willis D.R., Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 101, 1980, pp. 737-758.
- [17] Cheng P, Two-Dimensional Radiating Gas Flow by a Moment Method, *AIAA Journal*, Vol. 2, 1964, pp. 1662-1664.

