

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

نويد قاجاري (\*\*\*، داود طغرايي ، احمدرضا عظيميان

\* نويسنده مسئول: navid.ghajari@iaukhsh.ac.ir

#### چکیدہ

## واژههای کلیدی

نانوذرہ، آئروسل، انتقال حرارت جابجايي، نانو سيال

44/11/.1	ناريخ ارسال:
94/11/19	ناريخ بازنگري:
90/+4/+4	ناريخ پذيرش:

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 ۱×۴ سانتیمتر مربع با استفاده از نانوآئروسل 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 خطر گرفته شد و دما در وجه پایینی (صفحه بالایی(صفحه سرد) با دمای ۲۰۰۰ کلوین در نظر گرفته شد و دما در وجه پایینی (صفحه گرم) در سه حالت ۲۵۰۰ به ۲۰۰ و ۲۵۰ کلوین مقایسه شد. توزیع دما، بردار سرعت، شار حرارت سطح و عدد ناسلت در طول مسیر بررسی شده است.

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.



## Solid Mechanics in Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering





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

Navid Ghajari<sup>1,\*</sup>, Davoud Toghraii<sup>2</sup>, Ahmad Reza Azimian<sup>3</sup>

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

#### Abstract:

#### Key words:

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  $1 \times 4$  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.

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

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

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

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

#### ۱- مقدمه

مطالعه برروى جريان جابجايي طبيعي، جابجايي اجباري 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 میباشد 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 كن هاى مياني، دودكش ها، خنك كن قطعات الكترونيك 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 نانوتکنولوژی 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 مقايسه با تحقيقات صورت گرفته درانتقال حرارت و هدايت گرمایی بسیار کمتر است. به علت محدودیت های موجود در تغییرات هندسه و شرایط مرزی، بهترین گزینه برای محققان جهت افزايش انتقال حرارت، افزايش قابليت 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) بكار برده شده است [۱]. در سالهاي اخير تحقيقات در زمینه نانوذرات در سیال پایه گسترش یافته است و بسیاری از تحقیقات به منظور بهبود انتقال حرارت مبتنی برنانوذرات 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

حمل و نقل آئروسل شیمیایی در فرآیند های شیمیایی را میتوان نام برد. آئروسل، 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 (آئروسل ها) بدلیل ایجاد شار حرارتی بحرانی بالا به عنوان خنک کننده در راکتورهای هسته ای میتواند استفاده شود و و همچنین از آئروسل ها برای بهبود نرخ انتقال حرارت در کندانسور و مبدلهای 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 آئروسل 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 آئروسل 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 آئروسل می باشد. آنها شبیه سازی شکل گیری پودر اکسید تیتانیوم را با استفاده از اکسیداسیون تتراکلریدتیتانیوم در یک راکتور آئروسل، نتیجه گرفتند. اکبر و همکاران [۵] با شبیه سازی عددی به بررسی مکانیزم های نانوذرات موجود در آئروسل پرداختند و دریافتند که نانوذرات تمایل قوی برای پیروی از جریان هوا را دارند و همچنین زمانی که حرکت براونی وحرکت ترموفورسیسی در نظر گرفته شود، در طول شبیه سازی نانوذرات حرکت

مايعي که در آن جريان دارد بستگي 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 حرارتي را با زماني كه لوله حرارتي با آب ير 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 [11] حرکت براونی و حرکت تصادفی ذرات را با یکدیگر در یک سیال پايه بررسي كرد و متوجه شد كه اساس حركت همه ذرات، انرژی داخلی آنهاست و دریافت که نانوذرات مدام با ایکدیگر 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. هاکان 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 ۲/۰۱ استفاده کردند. آنها دریافتند

بیشتری خواهند داشت. هالکمن و همکاران [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 آئروسل 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 معمولا پژوهش های تجربی بر روی خواص آنها صورت پذیرفته است. لی وهمکاران [۷] اولین بار اندازه گیری هدایت حرارتی نانو ذره در سیال پایه را انجام دادند و از نانوذرات اکسید آلومينيوم و اکسيد مس استفاده کردند و دريافتند 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 مجرایی با مقطع مربعی با جریان آرام و با شرایط مرزی دما ثابت به صورت حل عددی یر داختند. آنها نشان دادند که در هر سه نانو ذره عدد ناسلت با افزایش غلظت و کاهش قطر نانوذرات، افزایش مي يابد. سانترا و همكاران [٩] انتقال حرارت جابجايي آرام نانو سیال حاوی نانوذرات مس در بین دو صفحه موازی را با استفاده از روشهای عددی به صورت دو بعدی بررسی كردند 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

<sup>2</sup> Buongiorno

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Hackleman et al.

که حضور نانوذرات 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 گرائو [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 کثار دیوار می شود.

هادسون [۱۴] اثر آئروسل در بهبود انتقال حرارت جابجایی طبیعی و ترکیبی در جریان آرام را در یک محفظه با ۶ نسبت ابعاد مختلف مدلسازی کرد و عدد ناسلت و بردار سرعت و شار حرارتی سطح را با استفاده از مدلسازی عددی استخراج کرد. وی مشاهده کرد که استفاده از نانوذرات 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 نانوذرات به تحقیق و پژوهش پرداخته اند. طبق تحقیقات صورت گرفته عوامل گوناگونی همچون اندازه، جنس، شکل و غلظت ذره، دما، نوع سيال پايه، نوع رژيم جريان (آرام يا مغشوش)، تركيبات نگهدارنده نانو سیال و بسیاری از عوامل دیگر در تعیین خواص نانوذرات در سیال پایه و میزان انتقال حرارت آن ها مو ثرند. در طول مطالعات مختلف نشان داده شده است که افزایش کسر حجمی نانوذرات فلزی و اکسید فلزی به سیال پایه منجربه 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

بررسی انتقال حرارت در محفظه با استفاده از نانو آئروسل صورت نگرفته است. دلیل فقدان این پژوهش ها، جدید بودن مبحث نانو سیالات و مبهم بودن مکانیزم های حاکم برآن است. لذا در این پژوهش، بهبود انتقال حرارت در محفظه با استفاده از نانو آئروسل 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 جا بجایی آزاد

تجزیه و تحلیل انجام شده بر روی یک محفظه دو بعدی مستطیل شکل است. انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه ای با ابعاد  $1 \times 4$  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 نانوذرات مس که بطور یکنواخت و کروی شکل فرض شده، شبیه سازی شده است. سیال هوا به صورت یک گاز ایده آل و جریان به صورت دو بعدی، آرام، دائم در نظر گرفته شده است. طول محفظه met = 4 رام، دائم در نظر گرفته شده است. طول محفظه met = 4 گرفته شده است. همانطور که در شکل (۱) مشخص است شکاف هایی به فاصله ۲۵ /۰ = 1 از دیواره ها بر روی دیواره های جانبی تعبیه شده است که نانوذرات مس از طریق این شکاف در قسمت پایین دیواره جانبی سمت چپ مصورت توزیع خطی به داخل محفظه تزریق شده و



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 ۱×۴ سانتیمتر مربع که از بالا و پایین در شرایط مرزی دمایی متفاوت قرار دارد و تحت اثر یاشش 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 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 ۲۵/۰ سانتیمتر از پایین سمت چپ بطرف بالا سمت راست تنظيم 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.



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

۲-۳- معادلات حاکم

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

 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$ 

معادله ممنتوم درجهت x

 $u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \vartheta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + g\beta\sin\theta\,\Delta T \quad (\Upsilon)$   $y \quad \text{ yre arrive a constraint of } Y$ 

$$\begin{aligned} u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \vartheta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + g\beta\cos\theta\,\Delta T \quad (\mbox{$^{(f)}$} \\ \rho\,c_p\left(u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y}\right) &= k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + G \quad (\mbox{$^{(f)}$} \\ (\mbox{$^{(f)}$} \\ \mbox{$^{(f)}$} \\ \mbox{$^{(f)}$$

$$\rho_P V_P \frac{d\overline{U_P}}{dt} = -f(\overline{U_P} - \overline{U_G}) + (\rho_P - \rho_G) V_P \overline{g} + \overline{F_B} + \overline{F_{TP}} \qquad (\Delta)$$

که در رابطه(۵) برای ضریب پسای استوکس – کانینگهام بصورت زیر بیان میشود:

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 ۳۵۰K و دمای صفحه بالایی ۳۰۰K و همچنین تعداد نانوذرات مس ۵۰۱۲۵ می باشد را با نتایج مرجع [۱۴] مقایسه شده است. در فرایند حل از شبکه با تعداد گره ۴۰×۱۳۰ در راستای x,y استفاده شده است. در این حالت سرعت روند همگرایی مساله بالا است و نیز اختلاف بسیارکمی بین نتایج کار حاضر و نتایج مقاله مرجع[۱۴] با ریزتر کردن شبکه بندی حاصل شده است. با دقت در شکل (۳) ، مشاهده می شود 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 محفظه رایلی– بنارد نیز به همین ترتیب تشکیل می شوند ولي در اينجا به دليل وجود پاشش نحوه چيدمان قارچ ها متفاوت است. همانطور که مشاهده می شود 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) درمی یابیم 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 شكل يبدا است دما كاهش مي يابد تا به دماي صفحه بالايي نزديك شود. همانطور كه مشخص است تطابق بسيار خوبي بین نتایج حاصل از شبیه سازی انجام شده در این مقاله و نتايج مرجع [۱۴] مشاهده مي شود.

$$f = \frac{3\pi\mu_G d_P}{C_c} \tag{(?)}$$

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

 $-\nabla q_r = \alpha G - 4\alpha \sigma n^2 T^4 \tag{1Y}$ 

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 نزديكي ديواره ها ريزتر انتخاب شده تا بتوان تغيير 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 مقابسه شده اند.

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

تعداد گرہ	(لا) دما
1×۳۵	۳۳۵/۵۱
14.×4.	۳۳۸/۵۷
140×40	۲ <b>۷</b> ,۴۳۹,۷۱
زاد در محفظه برای سه	جدول(۲) سرعت در حالت جابجایی آ شبکه بندی مختلف
تعداد گرہ	<sup>-۲</sup> ( <sup><i>m/s</i></sup> ) ۲۰ ۲ سرعت
1×۳۵	٣/٣١
13•×4•	۳/۳۵۸



325 Present work Ref  $\cap$ 320 Tempe rature 315 310 305 300 0.02 X 0.01 0.03

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

برای شبکه بندی محفظه برای دو حالت انتقال حرارت

جابجایی (آزاد و ترکیبی) دمای صفحه بالایی ۳۰۰K و

دمای صفحه پایینی۳۵۰K و تعداد نانوذرات مس در هوا

۵۰۱۲۵ در نظر گرفته شده است. برای اینکه اطمینان حاصل

#### ٤- بررسی استقلال نتایج از شبکه



Pen Ref

335

K





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 همین 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 منظری 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 شبک

بندى مختلف

(لا) دما	-
۳۰۷/۷۵	_
٣•٩/٧١	
۳۱۰/۷۸	
	دما (K) ۳۰۷/۷۵ ۳۰۹/۷۱ ۳۱۰/۷۸

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

تعداد گره	( <sup>///</sup> × ۱۰ × سرعت × ۱۰ × سرعت	-
1×۳۵	14/44	
18•×4•	14/01	
140×40	۱۴/۷۵	

همانطور که در جداول بالا مشاهده می شود 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 (۴۰×۱۳۰۰) استفاده شده است. **٥- نتایج و بحث** 

٥-١- انتقال حرارت جابجایی آزاد

درکار حاضر انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه با مقطع مستطیلی با نانو آئروسل 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 بردار های سرعت در شکل (۶) آورده شده است. با دقت در کانتور دما به وضوح دیده می شود که چیدمان دما با افزایش سهم نیروی شناوری از طریق افزایش اختلاف دما بین صفحات گرم و سرد کاملا دستخوش تغییر می شود. به این معنی که بـا افـزایش نیـروی شناوری، نیروی شناوری بر نیروی 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 تشكيل سلول قارچي رايلي - بنارد را ميدهـد. در شكل، 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 می شود 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 تـری از کانال در محدوده دمای۳۷۰Kتا ۳۸۰K قرار می گیرنـد. چنین رویدادی تنها به دلیل تغییر سرعت جریان و در نتیجه تغییر کانتور دما است. شکل (۶) توزیع بردار های سرعت را نشان مي دهد. با مشاهده شکل درمي يابيم که در اثر تشکيل سلول هاي رايلي در اينجا ۴ بلوك سرعت وجود دارد و مقادير بيشينه سرعت ها در هر بلوك با توجه به كانتور دما و

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

Velocity 8:532-002 4:149-002 2:766-002 1.383-002 0:000+000 m *-1]	
4.149e-002 2.768e-002 1.383e-002 m s*-1]	
2.768-002 1.383e-002 0.000e+000 (m \$*-1]	
1.389-002 0.000e+000 [m s^1]	
m s*1]	
A WAANP	

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

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،

بیشتر شده و وسعت نواحی سرد، نسبت به قبل کاهش می یابد و همچنین با توجه به جمله موجود در معادله ممنتوم، 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



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

در شکل های زیر نمودار پروفیل های توزیع سرعت برحسب متر بر ثانیه  $\binom{m}{s}$  و نمودار پروفیل توزیع دما برحسب کلوین(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 ۲۰۰۴ و دمای دیواره پایینی در سه حالت مختلف دما ۲۵۰K و دمای دیواره پایینی در اس عداد نانوذرات ۵۰۱۲۵ انتخاب شده است را مقایسه می کند همانطور که مشاهده می شود با افزایش دمای دیواره پایینی،

محدوده وسط محفظه در ۲*cm* 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 ۲۰۰K و دمای دیواره پایینی در سه حالت مختلف دما ۲۵۰K و ۲۰۰K و ۴۵۰K در حالتیکه تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵ انتخاب شده، نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش دمای دیواره پایینی مقدار بیشینه سرعت در میانه محفظه افزایش یافته



شکل (۹) مقایسه نمودار تغییرات دما نسبت به عرض کانال در x =۲cm با دمای دیواره گرم ۳۵۰K و ۴۰۰K و ۴۵۰K در تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵



شکل (۱۰) مقایسه نمودار تغییرات سرعت نسبت به عرض کانال در ۲*cm* و ۴۰۰K و ۴۰۰K در تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵

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

که در واقع عـدد ناسـلت کـه بايـد در طـول محفظـه رونـد یکسانی را طی کند، دارای بر آمدگی و فرو رفتگی هایی است. اگر به کانتور دما در محفظه توجه شود در می يابيم که سلول های قارچی شکل رایلی بنارد به دلیل وجود بلوک های چرخشی سرعت بوجود آمده اند که وجود همين سلول هاي قارچي شکل، عامل بوجود آمدن برآمدگی ها و فرو رفتگی ها میباشد. 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 كم است و برعكس در مكان مياني محفظه كه سلول قارچي به سمت بالا در حركت است، عدد ناسلت و شار حرارتي هر دو دارای بیشترین مقدار خود از نظر اندازه هستند. همچنین می توان اینگونه بیان کرد که دو جریان سير كولاسيون در طرفين محفظه در نظر گرفته شده است. به دلیل تماس با دیواره های عمودی عایق، سرعت چرخشی کمتری نسبت به جریان سیر کولاسیون در وسط کانال باید داشته باشند و این چنین هم هست. این تاثیر متقابل بین سیر کولاسیونها باعث می شود که جریانی که به سمت بـالا در وسط محفظه در حال حركت است سرعت، زيادتري نسبت به جریانهای روبه پایین داشته باشد و در نتیجه انتقال حرارت در محلي كه جريان به سمت بالا حركت مي كند چه بر روی دیواره پایین و چه برای دیواره بالا، باید بزر گتر از مکانهایی باشد که جریان به سمت پایین در حال حرکت است.



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





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

0-۲- انتقال حرارت جابجایی ترکیبی

در این بخش انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در کانال 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 (۱۳) و بردار های 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 میسازد که این امر منجر به حرکت سیال از سمت پایین کانال به بالا و توزيع غير يكنواخت دما در عرض كانال مي شود تا جاییکه در خروجی تقریبا ناحیه با دمای نزدیک به صفحه بالايي بسياركم عرض مي شود. شكل (۱۴) توزيع بردار هاي سرعت را نشان می دهد. با توجه به شکل مشاهده می شود مقادیر سرعت در نزدیکی دیواره بالایی کم است. در واقع

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 میشود 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 میشود که توزیع دمای سیال نیز مطابق شکل قبلی دستخوش تغییر و غیر یکنواختی شود.





شکل های (۱۵) و (۱۶) کانتور دما و بردار سرعت را برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در حالتی که دمای صفحه پایینی ۴۵۰K و دمای صفحه بالایی ۳۰۰K و تعدادنانوذرات مس۵۰۱۲۵ است را نمایش میدهند. تفاوت عمده ای که در این حالت نسبت به حالت قبل وجود دارد افزایش سرعت درون کانال است و در واقع در این حالت نيز با افزايش دما، انتقال حرارت جابجايي طبيعي تقويت 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.عليرغم اينكه سرعت سيال در اين حالت افزايش يافته است اما توزیع سرعت و دما در کانال مانند حالت قبل (دمای صفحه پایین ۴۰۰K)است و ناحیه وسیعی از قسمت بالايي كانال همچنان نزديك به صفحه بالايي قرار دارد كه 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 میباشد 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 ممنتوم

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 ۴۵۰K و تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵



شکل (۱۶) بردار سرعت برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در محفظه با صفحه پایین ۴۵۰K و تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵

شکل (۱۷)، مقایسه نمودار پروفیل توزیع سرعت برحسب متر بر ثانیه (m/s) رادر عرض کانال بر حسب متر (m) برروی یک خط عمودی در وسط کانال برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در سه حالت مختلف دمای سطح پایینی۲۵۰K و ۲۰۰۴ و ۲۵۰K در حالتیکه تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵ 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

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





شکل (۱۸)، مقایسه نمودار پروفیل توزیع دما برحسب کلوین(K) رادر عرض کانال بر حسب متر (m)را برروی خط عمودی در وسط کانال برای انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در سه حالت مختلف دمای سطح پایین۲۵۰K و ۴۰۰K و ۲۵۰K را نمایش میدهدکه در این حالت نیز تعداد نانوذرات ۵۰۱۲۵ در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودار دما مشاهده می شود شیب نمودار بر حسب ۷ با افزایش دمای صفحه پایینی کمی بیشتر شده است و می تواند بدین معنی باشد که با افزایش دما، گرادیان دما اندکی بیشتر شده و



شکل (۱۸) مقایسه نمودار تغییرات دما نسبت به عرض کانال در ۲*cm*= x با دمای دیواره گرم ۳۵۰K و ۴۰۰K و ۴۵۰K 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 ۳۵۰K و دمای صفحه بالایی ۳۰۰K قرار دارد نشان می دهد. تعداد نانو ذرات مس ۵۰۱۲۵ انتخاب شده است. همانطور که در شکل (۱۹) مشاهده می شود با حرکت سیال درون کانال، انتقال حرارت سیال با دیواره ها بیشتر شده و به مرور گرادیان دما نزدیک دیوار که همان عدد ناسلت را تعیین می کند، کاهش می یابد. 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 می توان انتظار داشت تغییر عدد ناسلت با حرکت به سمت انتهای کانال کوچک و شیب آن کم می شود. همانطور که در شکل (۲۰) مشاهده می شود در هنگام ورود سیال به داخل کانال، میزان انتقال حرارت بین سیال و دیواره افزایش می یابد و به مرور با پیشروی سیال میزان انتقال حرارت کاهش می یابد و باعث همدمایی سیال با سطح می شود. این نمودار نشان می دهد که با افزایش فاصله از ورودی کانال، انتقال حرارت و شار حرارتي كاهش يافته است.



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





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

۲- 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 آئروسل (نانوذرات مس در سیال پایه هوا) در یک محفظه بسته انجام گرفته و اثر تغییر

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 میتواند برای یک توزیع غیر یکنواخت و درعین حال پریودیک انتقال حرارت روی سطح بسیار مناسب باشد.

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

۷- فهرست علايم

$$(Jkg^{-1}K^{-1})$$
ظرفیت گرمایی ویژه  $c_p$ 

$$C_c$$
 ضریب اصلاح کانینگهام  
 $C_c$  ضریب پخش حرارتی ( $m^2 s^{-1}$ )  
 $(\mathrm{kgm}^{-1} s^{-1})$  قطر ذرات ( $mm$ )  
 $\mu^d p$   $\mu^d p$   
 $K^{-1}$  ضریب انبساط حرارتی،  $\beta$   
 $\sigma$  f  
 $\phi$  f

$$(N)$$
نيروى براونى  $F_B$ 

$$(Wm^{-1}K^{-1})$$
رسانش هدایتی  $k$ 

(kgm<sup>-1</sup>s<sup>-2</sup>) فشار 
$$p$$

$$(rac{2\lambda}{d_p})$$
 عدد نادسن،  $Kn$ 

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 copperwater 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.

علايم يونانى

### **زير نويس ها** f سيال p ذرات جامد

مراجع:

- 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<sup>-</sup>uhlenweg H, Pratsinis, S.E, Simulation of nanoparticle production in premixed aerosol flow reactors by interfacing 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.