مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۳، ص‌ص ۶۹-۷۷

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه عددی روش‌های مؤثر جهت افزایش انتقال حرارت در حالت ترکیبی درون حفره تحت تأثیر میدان مغناطیسی

مسعود خراتی کوپایی[۱*]، ایمان جلوداری[۲]

۱- استاد یار، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

* شیراز، صندوق پستی ۳۱۳- ۷۱۵۵۵ kharati@sutech.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۱ خرداد ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۶ خرداد ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی

میدان مغناطیسی

نانو سیال

حفره

عدد ناسلت

چکیده

در این تحقیق، دو راه‌کار برای افزایش میزان انتقال حرارت درون حفره‌ای که دیواره بالایی آن دارای حرکت است و تحت تأثیر میدان مغناطیسی افقی قرار دارد بررسی شده است. به منظور بهبود مقدار انتقال حرارت، اضافه کردن نانو ذرات اکسید آلومینیوم به عنوان راه‌کار اولیه و تغییر در زاویه شیب میدان مغناطیسی به عنوان راه‌کار دوم در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، دیواره سمت چپ و راست حفره در اختلاف دمای مشخصی قرار دارند و سایر دیواره‌ها عایق در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حل عددی بر اساس یک برنامه کامپیوتری که بر اساس روش حجم محدود نوشته شده است بدست می‌آیند. به منظور اعتبارسنجی برنامه تهیه شده، نتایج حاصل از برنامه مذبور با نتیجه همبستگی موجود برای حفره و همچنین نتایج حاصل از کارهای گذشته مقایسه شده است و دیده می شود که تطابق مناسبی برقرار است. در این مطالعه، محدوده عدد ریچاردسون بین ۰/۰۵ و ۵۰ می باشد. نتایج نشان می‌دهد اضافه کردن نانو ذرات می تواند باعث افزایش و یا کاهش در میزان انتقال حرارت شود در حالی که افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی در اغلب موارد افزایش قابل قبولی در مقدار انتقال حرارت را به همراه دارد.

Numerical study of effective techniques to increase mixed convection heat transfer rate within the enclosure subjected to magnetic field

Masoud Kharati Koopaee*, Iman Jelodari

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz Univ. Tech., Shiraz, Iran.
* P.O.B. 71555-313 Shiraz, Iran, kharati@sutech.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 22 May 2013
Accepted 27 May 2013
Available Online 11 May 2014

Keywords:
Mixed Convection Heat Transfer
Magnetic Field
Nanofluid
Enclosure
Nusselt Number

ABSTRACT

In this research, two effective techniques to increase mixed convection heat transfer rate within an enclosure subjected to a transverse magnetic field are studied. In order to increase the heat transfer rate, the addition of Al_2O_3 nanoparticles is concerned as the first strategy and the change in magnetic field inclination angle is considered as the second. In this study, the left and right sides of the enclosure are kept at constant temperature while the top and bottom walls are adiabatic. In this work, the results are obtained with an in-house finite volume code. To validate the code, the results of the present code are compared to that of aan existing correlation as well as those of previous works and good agreements are observed. In the present work, Richardson number varies from Ri=0.05 to Ri=50. Results show that the addition of solid particles may increase or decrease the heat transfer rate whereas the increase in magnetic field inclination angle mostly leads to increase in the heat transfer rate.

۱- مقدمه

انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی درون حفره با یک ضلع متحرک مورد توجه بسیاری از محققان می‌باشد. این توجه ناشی از اهمیت این هندسه در مباحث فنی و مهندسی و کاربردهایی همانند افزایش میزان انتقال حرارت، خنک-کاری قطعات الکترونیکی، تکنولوژی‌های مربوط به روانکاری، تولید شیشه شناور، انتقال حرارت در حوضچه خورشیدی، راکتورهای هسته‌ای و دینامیک دریاچه‌ها می‌باشد. در این میان، انتقال حرارت ترکیبی درون حفره حاوی سیال هادی جریان الکتریسیته که در معرض میدان مغناطیسی قرار دارد دارای اهمیت بالایی است. این اهمیت به دلیل کاربردهای فراوان آن در صنایعی مانند رشد کریستال درون سیالات، ریخته‌گری، خنک‌کاری راکتورهای هسته‌ای و مخازن نفت می‌باشد.

هیدرودینامیک مغناطیسی شاخه‌ای نسبتاً جدید از دینامیک سیالات است. این شاخه از مبحث سیالات زمانی مطرح می‌شود که سیال هادی الکتریسیته، که دارای حرکت نیز باشد، تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرد. هنگامی که سیال متحرک هادی جریان الکتریسیته تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرد جریانی در آن القا می شود و بنابراین باعث می شود تا

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Kharati Koopaee, I. Jelodari, Numerical study of effective techniques to increase mixed convection heat transfer rate within the enclosure subjected to magnetic field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 69-77, 2014 (In Persian)

نیرویی به آن وارد شود. این نیرو که به نیروی لورنز معروف است از مهم‌ترین پدیده‌هایی است که در این نوع مسائل به وجود می‌آید. این نیرو تأثیری کاهنده بر میدان جریان و به تبع آن بر میزان انتقال حرارت دارد. در برخی موارد از مسائل هیدرودینامیک مغناطیسی که در آنها خنک‌کاری ادوات مورد نظر می‌باشد (همانند واحدهای رانش، مولدهای توان و پرتو افکن‌های الکترون) سیال عامل به طور ناخواسته و به اجبار تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد [۱]. از این رو در این موارد، محققان به دنبال راه-کارهایی برای افزایش میزان انتقال حرارت جهت جبران اثر کاهندگی ناشی از میدان مغناطیسی می‌باشند.

از جمله مهم‌ترین حالت‌های مسائل هیدرودینامیک مغناطیسی، که زمینه تحقیقاتی بسیاری از محققان نیز بوده است، حالتی است که در آن بردار میدان مغناطیسی موازی بردار گرادیان دما باشد. به عنوان مثال، این حالت زمانی که دو دیواره عمودی حفره در دو دمای متفاوتی باشند هنگامی اتفاق می‌افتد که بردار میدان مغناطیسی افقی باشد. در این حالت، با توجه به تأثیر کاهندگی میدان مغناطیسی بر مقدار انتقال حرارت، استفاده از مکانیزم-هایی که بتوان به وسیله آن مقدار انتقال حرارت را در مسائل هیدرودینامیک مغناطیسی افزایش داد از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. اگر چه راه‌کارهای مختلفی در این نوع مسائل می تواند منجر به افزایش میزان انتقال حرارت شود (مانند تغییر شرایط مرزی) ولی برخی از این راه‌کارها ممکن است که همواره قابل پیاده‌سازی نباشند.

یکی از مهم‌ترین راه‌کارهایی که تأثیر مهمی بر میزان انتقال گرما در این نوع مسائل هیدرودینامیک مغناطیسی دارد، افزایش رسانایی حرارتی سیال پایه به کمک اضافه کردن ذرات جامد می‌باشد. برای افزایش رسانایی سیال پایه، برای اولین بار ماکسول [۲] ایده اضافه کردن ذراتی جامد به سیال پایه را مطرح کرد. این ذرات خواص انتقال حرارتی بالاتری را نسبت به سیال پایه دارا بودند. استفاده از این ذرات به علت درشت بودن آنها مشکلاتی از قبیل رسوب دهی، خوردگی اجزا و افت فشار اضافی را به همراه داشت و به همین علت چندان مورد توجه واقع نشد. با پیشرفت تکنولوژی و ظهور فن‌آوری نانو، امکان تولید ذرات در ابعاد نانو نیز فراهم گردید. برای اولین بار چوی و همکاران [۳] ذراتی با اندازه نانو را به سیال پایه اضافه نمودند و سیالی جدید با خواص انتقال حرارت بالاتر نسبت به سیال پایه تولید کردند که آن را نانوسیال نامیدند.

مطرح شدن این ایده جدید، محققان را به استفاده از فن‌آوری نانو جهت افزایش انتقال حرارت در هندسه ها و شرایط مرزی‌های مختلف ترغیب نمود. سانترا و همکاران [۴] انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد درون محفظه‌ای مربع شکل حاوی آب و نانو ذرات مس را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها در حل عددی خود نانو سیال را غیر نیوتنی در نظر گرفتند. آنها دریافتند که افزایش غلظت نانو ذرات در هر عدد رایلی، کاهش مقدار انتقال حرارت را به همراه دارد بطوری که عدد ناسلت برای غلظت ۵ درصد نانو ذرات و در عدد رایلی $Ra=10^{4}$، ۳۲/۸٪ و در عدد رایلی $Ra=10^{7}$، ۳۸/۳٪ کاهش می‌یابد. اوزتاپ و ابونادا [۵] در یک حل عددی، محفظه‌ای دو بعدی که دیواره های بالا و پایین آن عایق در نظر گرفته شده بودند و دیواره سمت راست بعنوان سطح سرد و قسمت وسط دیواره سمت چپ، به عنوان سطح گرم در نظر گرفته شده بود را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که افزایش در طول سطح گرم و عدد رایلی هنگامی که دیگر پارامترهای جریان مقداری ثابت باشند، افزایش در میزان انتقال حرارت را به همراه دارد و افزایش در غلظت نانو ذرات، افزایش در عدد ناسلت را به همراه دارد. ابونادا و اوزتاپ [۶] در یک حل عددی تأثیر زاویه شیب حفره نسبت به افق و غلظت نانو ذرات را بر میزان انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد بررسی کردند. آنها دریافتند که افزایش در غلظت نانو ذرات در اعداد رایلی کم تأثیر بیشتری بر میزان انتقال حرارت دارد. آنها همچنین تغییر در زاویه شیب حفره نسبت به افق را به عنوان یک پارامتر مؤثر جهت کنترل میدان جریان و میزان انتقال حرارت پیشنهاد کردند. حداد و همکاران [۷] تأثیر حرکات براونی و خواص ترموفیزیکی بر انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد نانوسیال درون حفره مربعی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که در نظر گرفتن تأثیر حرکات براونی و خواص ترموفیزیکی نسبت به در نظر نگرفتن اثرات مذکور، میزان انتقال حرارت بالاتری را پیش‌بینی می‌کند و اثرات افزایش غلظت نانو ذرات تنها در غلظت-های کم، افزایش در انتقال حرارت را به همراه دارد. آنها دریافتند که اگر اثرات مذکور لحاظ نشوند، افزایش در غلظت نانوذرات همواره باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. طالبی و همکاران [۸] در یک حل عددی انتقال حرارت ترکیبی درون محفظه‌ای حاوی آب و نانو ذرات مس را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند در اعداد رینولدز و رایلی ثابت، افزایش در غلظت نانو ذرات تأثیر مثبت در مقدار انتقال حرارت را به دنبال دارد و در اعداد رینولدز ثابت و رایلی بالا افزایش در غلظت نانو ذرات باعث افزایش در تابع جریان می‌شود. منصور و همکاران [۹] در یک حل عددی، انتقال حرارت ترکیبی درون هندسه‌ای مربع شکل که در ضلع پایین آن یک منبع حرارت با شار ثابت قرار داشت را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که افزایش در غلظت نانو ذرات باعث افزایش عدد ناسلت و کاهش دمای سطح منبع حرارتی می‌شود. مزروعی سبدانی و همکاران [۱۰] نیز به بررسی انتقال حرارت ترکیبی درون حفره مربعی حاوی نانوسیال آب-اکسید آلومینیم پرداختند. آنها دریافتند در اعداد رینولدز ثابت و رایلی بالا مقدار انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد که این اثر در اعداد رایلی بالا مشهودتر است. محمودی [۱۱] نیز انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی درون حفره حاوی نانوسیال را بررسی کرد به نحوی که دیواره‌های عمودی و بالا سطح سرد و دیواره پایین سطح گرم و متحرک را تشکیل می‌دادند. آنها دریافتند که در اعداد ریچاردسون کم، یک ورتکس ثانویه ساعت گرد درون حفره شکل می‌گیرد و برای اعداد ریچاردسون بین ۰/۱ تا ۱۰، عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد.

از راه‌کارهای دیگری که می توان از آن به عنوان مکانیزم مؤثر بر مقدار انتقال گرما در این نوع مسائل اشاره کرد تغییر در زاویه شیب بردار میدان مغناطیسی است. محققان مختلفی به تحلیل مسائل هیدرودینامیک مغناطیسی در شرائط مختلف پرداخته‌اند. باساک و همکاران [۱۲] تأثیر انتقال حرارت خطی و غیرخطی دیواره پایین حفره را بر الگوی جریان هنگامی که حفره تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گرفته بود را مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیقات آنها، دیواره بالایی عایق و دمای سطوح سرد ثابت فرض شده است. آنها نشان دادند در تمامی اعداد رایلی، زمانی که شار حرارتی وارد بر دیوار پایین غیرخطی باشد، میزان انتقال حرارت در مرکز دیواره پایین نسبت به زمانی که شار یا دما در دیواره خطی باشند، بیشتر است. سیواسانکاران و همکاران [۱۳] انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی درون حفره‌ای مربعی تحت میدان مغناطیسی را مورد مطالعه قرار دادند. شرایط مرزی روی دیواره‌ها به نحوی در نظر گرفته شده بود که دیواره‌های افقی عایق فرض شده بودند و دمای دیواره‌های عمودی به طور سینوسی تغییر می‌کردند. آنها دریافتند که میزان انتقال حرارت و الگوی جریان درون حفره شدیداً تحت تأثیر میدان مغناطیسی و میزان اختلاف فاز دمای سینوسی روی دیواره‌های عمودی می‌باشند. اوزتاپ و همکاران [۱۴] انتقال حرارت ترکیبی درون حفره‌ای مربعی که

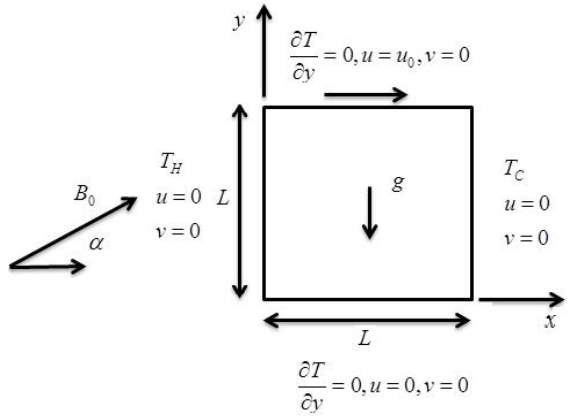
تحت تأثیر میدان مغناطیسی افقی قرار گرفته بود و منبع گرم در گوشه سمت راست و پایین حفره قرار داشت را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند افزایش در عدد هارتمن باعث کاهش میزان انتقال حرارت می‌شود، به نحوی که این اثر در اعداد گراشف بالا چشم‌گیرتر است. رحمان و همکاران [۱۵] انتقال حرارت ترکیبی درون محفظه‌ای مربعی که تحت میدان مغناطیسی قرار داشت و جریان سیال از روی آن عبور می‌کرد را مورد مطالعه قرار دادند. آنها تأثیر قرارگیری دستگاه تولید حرارت روی دیواره های سمت چپ، پایین و راست را بر میدان جریان، دما و میزان انتقال حرارت بررسی کردند. آنها دریافتند که میزان انتقال حرارت با افزایش عدد رایلی افزایش یافته و بیشترین دمای ایجاد شده درون سیال مربوط به عدد رایلی Ra= ۱۰^۶ است.

قاسمی و همکاران [۱۶] انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد درون هندسه‌ای مربعی حاوی نانو سیال آب-اکسید آلومینیم که تحت زاویه شیب صفر میدان مغناطیسی بود را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که افزایش در قدرت میدان مغناطیسی باعث کاهش در میزان انتقال حرارت می‌شود. همچنین زمانی که قدرت میدان مغناطیسی کم باشد، افزایش در غلظت نانو ذرات باعث افزایش میزان مقدار انتقال حرارت می‌شود و افزایش در غلظت نانو ذرات در قدرت‌های بالای میدان مغناطیسی منجر به کاهش در میزان انتقال حرارت می‌شود. نعمتی و همکاران [۱۷] نیز به بررسی تأثیر افزایش غلظت نانو ذرات بر میزان انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد حفره‌ای مربعی تحت تأثیر میدان مغناطیسی با استفاده از روش شبکه بولتزمن پرداختند که نتایجی همانند مرجع [۱۶] بدست آوردند. همچنین محمودی و همکاران [۱۸] و امین‌الساداتی [۱۹] به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد درون حفره مثلثی تحت میدان مغناطیسی پرداختند و تأثیر اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه را مورد مطالعه قرار دادند.

هدف از این تحقیق مقایسه و بررسی تأثیر دو راه‌کار جهت افزایش انتقال حرارت ترکیبی در مسائل هیدرودینامیک مغناطیسی، که در آن حفره به طور ناخواسته تحت تأثیر میدان مغناطیسی افقی است، می‌باشد. این دو راه‌کار عبارتند از افزایش در غلظت نانو ذرات و دیگری افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی. طی این پژوهش بررسی می‌شود که آیا استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیم به جای آب خالص به عنوان سیال عامل، می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مناسب جهت افزایش میزان انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرد و یا تغییر در زاویه شیب میدان مغناطیسی می‌تواند به عنوان راه‌کار مناسب‌تری ایفای نقش نماید.

۲- فرمول‌بندی مسأله

شکل ۱ تصویر مربوط به حفره مربعی شکل حاوی نانو سیال همراه با شرایط مرزی آن را نشان می‌دهد. همان طور که ذکر شد سیال عامل، نانوسیال آب-اکسید آلومینیم می‌باشد. مبدا سیستم مختصات در گوشه سمت چپ و پایین حفره قرار دارد به گونه‌ای که دیواره سمت چپ منطبق بر محور y و دیواره پایین منطبق بر محور x می‌باشد. B_0 قدرت و α زاویه شیب میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. اضلاع عمودی این حفره دارای دمای ثابتی می‌باشند. دمای ضلع سمت چپ $T_H = ۳۰۵\,\mathrm{K}$ و سمت راست $T_C = ۲۸۵\,\mathrm{K}$ می‌باشد. دو دیواره بالا و پایین عایق در نظر گرفته شده‌اند و دیواره بالا با سرعت u_0 در جهت مثبت محور x حرکت می‌کند و دیگر دیواره‌ها ثابت و بدون حرکت می‌باشند. در این تحقیق نیروی گرانش g نیز در جهت خلاف محور y می‌باشد.



شکل ۱ نمایی از شکل هندسی مسأله همراه با شرایط مرزی آن

جدول ۱ خواص نانو ذرات اکسید آلومینیوم در دمای ۲۹۵ کلوین

ρ (kg/m^3)	c_p (J/kg.K)	k (W/mK)	$\beta\times10^{-5}$ (1/K)
۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	۰/۸۵

در این تحقیق، فرض شده است که نانو ذرات اکسید آلومینیم و آب در تعادل گرمایی هستند و بین آنها گرادیان دما و سرعت وجود ندارد. سیال به صورت تک فاز، نیوتنی و تراکم ناپذیر فرض شده است و جریان پایا، دو بعدی و آرام می‌باشد. در مطالعه حاضر از اثرات تابش نیز صرف‌نظر شده است.

خراتی کوپایی و همکاران [۲۰] نشان دادند زمانی که اختلاف دمای بین سطوح حفره مربع شکل حاوی نانوسیال آب-اکسیدآلومینیم بیش از ۱۰ درجه کلوین باشد می‌بایستی خواص به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شود. به این منظور خواص ترموفیزیکی نانو سیال تابعی از دما در نظر گرفته شده است که خواص سیال پایه (آب) بصورت تابعی از دما از طریق معادلات (۱) تا (۵) محاسبه می‌شوند. این معادلات از طریق برازش منحنی با بهترین تطابق (R^2=۰/۹۹) روی خواص ترموفیزیکی سیال پایه که از مرجع [۲۱] در بازه دمایی ۲۸۰ K تا ۳۱۰K استخراج شده اند حاصل شده است.

$$\rho_{\mathrm{bf}} = -36315.147 + 472.43641\times T - 2.2405204T^2 + 0.0047201387T^3 - 3.7303611\times10^{-6}T^4 \quad (۱)$$

$$k_{\mathrm{bf}} = 109.70283 - 1.4096297T + 0.0068052725T^2 - 1.4559253\times10^{-5}T^3 + 1.1657348\times10^{-8}T^4 \quad (۲)$$

$$\beta_{\mathrm{bf}} = -0.099760036 + 0.0011640638T - 5.1451141\times10^{-6}T^2 + 1.021558\times10^{-8}T^3 - 7.6473356\times10^{-12}T^4 \quad (۳)$$

$$\mu_{\mathrm{bf}} = 0.39953848 - 0.0047118738T + 2.1039678\times10^{-5}T^2 - 4.2056643\times10^{-8}T^3 + 3.1708406\times10^{-11}T^4 \quad (۴)$$

$$Pr_{\mathrm{bf}} = 2352.2965 - 26.701573T + 0.11454266T^2 - 0.00021959364T^3 + 1.585436^{-7}T^4 \quad (۵)$$

از آنجا که تغییرات خواص ترموفیزیکی نانو ذرات اکسید آلومینیم در محدوده دمایی در نظر گرفته شده ناچیز می‌باشد، فرض شده است که خواص این نانو ذرات مستقل از تغییرات دمایی می‌باشد. در جدول ۱ خواص نانو ذرات اکسید آلومینیوم نشان داده شده است. در این مطالعه، قطر نانو ذرات ۳۶ نانومتر در نظر گرفته شده است.

معادلات مورد استفاده برای حل عددی، معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی می‌باشند (معادلات (۶ تا ۹)) که با در نظر گرفتن تأثیر میدان مغناطیسی است. شایان به ذکر است ترم اضافه شده ناشی از میدان

مغناطیسی به معادلات مومنتم مؤلفه‌های نیروی لورنز در راستای x و y می‌باشد که نحوه رسیدن به معادلات مذکور در مرجع [۲۲] به طور کامل توضیح داده شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{۶}$$

$$\rho_{\mathrm{nf}}\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\sigma_{\mathrm{nf}}B_{\circ}^{2}(v\sin\alpha\cos\alpha-u\sin^{2}\alpha) \tag{۷}$$

$$\rho_{\mathrm{nf}}\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\frac{\partial v}{\partial y}\right)+(\rho\beta)_{\mathrm{nf}}g(T-T_{C})+\sigma_{\mathrm{nf}}B_{\circ}^{2}(u\sin\alpha\cos\alpha-v\cos^{2}\alpha) \tag{۸}$$

$$(\rho c_{p})_{\mathrm{nf}}\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{\mathrm{nf}}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{\mathrm{nf}}\frac{\partial T}{\partial y}\right) \tag{۹}$$

برای محاسبه دانسیته و حاصلضرب دانسیته در ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انبساط حرارتی، روش‌های کلاسیک استفاده شده است که معادلات (۱۰) تا (۱۲) را شامل می‌شود [۲۳].

$$\rho_{\mathrm{nf}}=(1-\phi)\rho_{\mathrm{bf}}+\phi\rho_{\mathrm{s}} \tag{۱۰}$$

$$(\rho c_{p})_{\mathrm{nf}}=(1-\phi)(\rho c_{p})_{\mathrm{bf}}+\phi(\rho c_{p})_{\mathrm{s}} \tag{۱۱}$$

$$(\rho\beta)_{\mathrm{nf}}=(1-\phi)(\rho\beta)_{\mathrm{bf}}+\phi(\rho\beta)_{\mathrm{s}} \tag{۱۲}$$

برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی و ضریب لزجت از مدل‌های ارائه شده توسط کورسیونه [۲۴] استفاده شده است. بر طبق این مدل، ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه عبارتست از:

$$\frac{k_{\mathrm{nf}}}{k_{\mathrm{f}}}=1+4.4\mathrm{Re}_{\mathrm{p}}^{0.4}\mathrm{Pr}^{0.66}\left(\frac{T}{T_{\mathrm{fr}}}\right)^{10}\left(\frac{k_{\mathrm{s}}}{k_{\mathrm{bf}}}\right)^{0.03}\phi^{0.66} \tag{۱۳}$$

که در آن T_{fr} دمای نقطه انجماد سیال پایه می‌باشد. در این رابطه، Re_{p} از رابطه (۱۴) بدست می‌آید.

$$\mathrm{Re}_{\mathrm{p}}=\frac{2\rho_{\mathrm{bf}}k_{\mathrm{b}}T}{\pi\mu_{\mathrm{bf}}^{2}d_{\mathrm{p}}} \tag{۱۴}$$

بطوری که k_{b} برابر است با :

$$k_{\mathrm{b}}=1.38\times10^{-23}\ (\mathrm{J/K})$$

طبق مدل ارائه شده توسط کورسیونه، ضریب لزجت نانو سیال به ضریب لزجت سیال پایه از رابطه (۱۵) بدست می‌آید.

$$\frac{\mu_{\mathrm{nf}}}{\mu_{\mathrm{bf}}}=\frac{1}{1-34.87\left(\frac{d_{\mathrm{p}}}{d_{\mathrm{bf}}}\right)^{-0.3}\phi^{1.03}} \tag{۱۵}$$

که در آن d_{bf} عبارتست از:

$$d_{\mathrm{bf}}=0.1\left(\frac{6M}{N\pi\rho_{\mathrm{bf}_0}}\right)^{1/3} \tag{۱۶}$$

برای محاسبه ضریب هدایت الکتریکی نانوسیال نیز از رابطه ارائه شده توسط گنگولی و همکاران [۲۵] استفاده شده است که از رابطه (۱۷) بدست می‌آید:

$$\frac{\sigma_{\mathrm{nf}}-\sigma_{\mathrm{bf}}}{\sigma_{\mathrm{bf}}}=3679.049\phi+1.085799T-43.6384 \tag{۱۷}$$

معادلات (۱۸) تا (۲۱) فرم بی بعد معادلات حاکم در دمای مرجع دلخواه (۲۹۵K) می‌باشند:

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \tag{۱۸}$$

$$U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial X}+\frac{\rho_{\mathrm{bf}_0}}{\mu_{\mathrm{bf}_0}\rho_{\mathrm{nf}}\mathrm{Re}}\times\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\frac{\partial U}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\frac{\partial U}{\partial Y}\right)\right]+\frac{\mathrm{Ha}^{2}}{\mathrm{Re}}\times\frac{\sigma_{\mathrm{nf}}}{\sigma_{\mathrm{nf}_0}}\times\frac{\rho_{\mathrm{nf}_0}}{\rho_{\mathrm{nf}}}\times(V\sin\alpha\cos\alpha-U\sin^{2}\alpha) \tag{۱۹}$$

$$U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{\rho_{\mathrm{bf}_0}}{\mu_{\mathrm{bf}_0}\rho_{\mathrm{nf}}\mathrm{Re}}\times\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\frac{\partial V}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\frac{\partial V}{\partial Y}\right)\right]+\frac{(\rho\beta)_{\mathrm{nf}}}{\rho_{\mathrm{nf}}\beta_{\mathrm{bf}_0}}\mathrm{Ri}\theta+\frac{\mathrm{Ha}^{2}}{\mathrm{Re}}\times\frac{\sigma_{\mathrm{nf}}}{\sigma_{\mathrm{nf}_0}}\times\frac{\rho_{\mathrm{nf}_0}}{\rho_{\mathrm{nf}}}\times(U\sin\alpha\cos\alpha-V\cos^{2}\alpha) \tag{۲۰}$$

$$U\frac{\partial\theta}{\partial X}+V\frac{\partial\theta}{\partial Y}=\frac{(k/\rho c_{p})_{nf}}{(k/\rho c_{p})_{\mathrm{bf}_0}}\frac{1}{k_{nf}\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}}\times\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(k_{\mathrm{nf}}\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(k_{\mathrm{nf}}\frac{\partial\theta}{\partial Y}\right)\right] \tag{۲۱}$$

به طوری که $\mathrm{Y,U,V,P,\theta,Gr,Pr,Ha,Ri}$ و X برابرند با:

$$\mathrm{U}=\frac{u}{u_0},\quad \mathrm{V}=\frac{v}{u_0},\quad \mathrm{P}=\frac{p}{\rho_{\mathrm{nf}}u_0^{2}},\quad \mathrm{Re}=\frac{u_0L}{\nu_{\mathrm{bf}_0}}$$

$$\theta=\frac{T-T_C}{T_H-T_C},\ \mathrm{X}=\frac{x}{L},\ \mathrm{Y}=\frac{y}{L},\ \mathrm{Pr}=\frac{\nu_{\mathrm{f}_0}}{\alpha_{\mathrm{bf}_0}},\ \mathrm{Ha}=B_0L\sqrt{\frac{\sigma_{\mathrm{nf}_0}}{\rho_{\mathrm{nf}_0}\upsilon_{\mathrm{f}_0}}}$$

$$\mathrm{Gr}=\frac{g\beta_{\mathrm{bf}_0}(T_H-T_C)L^{3}}{\nu_{\mathrm{bf}_0}^{2}},\quad \mathrm{Ri}=\frac{\mathrm{Gr}}{\mathrm{Re}^{2}}$$

عدد بدون بعد رایلی که برای اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری مورد استفاده قرار می‌گیرد برابر است با:

$$\mathrm{Ra}=\frac{g\beta_{\mathrm{bf}_0}(T_H-T_C)L^{3}}{\nu_{\mathrm{bf}_0}\alpha_{\mathrm{bf}_0}}$$

شرایط مرزی حاکم بر مسأله با توجه به معادلات بی بعد شده از طریق روابط (۲۲) تا (۲۵) بدست می‌آید.

$$\mathrm{U=V=0},\ \theta=1 \qquad \text{دیوار سمت چپ} \tag{۲۲}$$

$$\mathrm{U=V=0},\ \theta=0 \qquad \text{دیوار سمت راست} \tag{۲۳}$$

$$\mathrm{U=V=0},\ \frac{\partial\theta}{\partial \mathrm{Y}}=0 \qquad \text{دیوار پایین} \tag{۲۴}$$

$$\mathrm{U=1,\ V=0},\ \frac{\partial\theta}{\partial \mathrm{Y}}=0 \qquad \text{دیوار بالا} \tag{۲۵}$$

عدد ناسلت موضعی روی دیواره گرم از رابطه (۲۶) و عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم از طریق معادله (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{Nu(Y)}=-\frac{k_{\mathrm{nf}}}{k_{\mathrm{f}}}\left(\frac{\partial\theta}{\partial \mathrm{X}}\right)_{\mathrm{X=0}} \tag{۲۶}$$

$$\mathrm{Nu_m}=\int_0^1\mathrm{Nu(Y)}d\mathrm{Y} \tag{۲۷}$$

۳- روش عددی

معادلات بی بعد با توجه به شرایط مرزی مربوط به آن با استفاده از روش حجم محدود و با استفاده از الگوریتم سیمپل با توجه به برنامه کامپیوتری تهیه شده به صورت عددی حل شده‌اند. عبارت جابجایی از روش تقریب بالادست، گسسته‌سازی شده است. شرط همگرایی، مجموع باقی‌مانده تمامی

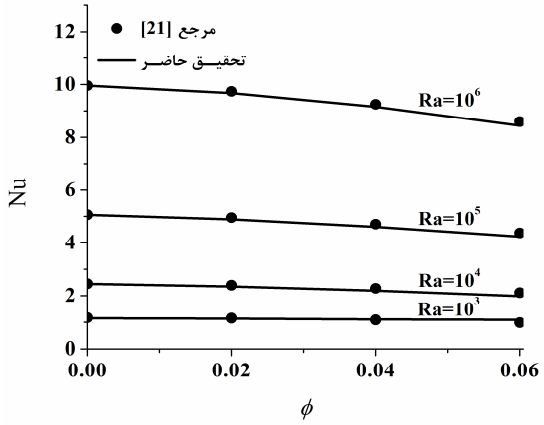
نقاط شبکه مربوط به معادله پیوستگی کمتر از 10^{-6} لحاظ شده است.

۴- انتخاب شبکه مناسب

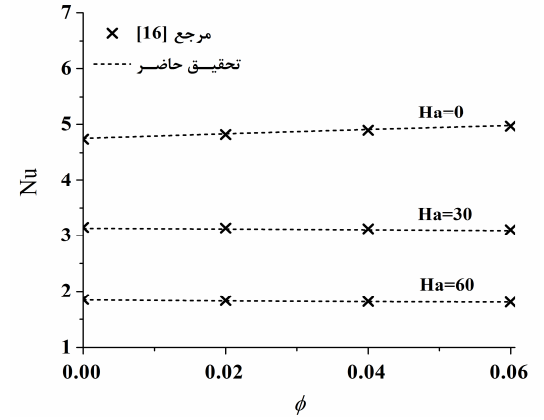
شبکه‌های محاسباتی در نظر گرفته شده، دکارتی یکنواخت می‌باشند. برای بررسی عدم وابستگی حل به شبکه، مقدار عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم و سرعت افقی در فاصله $Y = ۰/۵$ محاسبه شده در هر شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور سه شبکه ۱۵۰×۱۵۰، ۲۰۰×۲۰۰ و ۲۵۰×۲۵۰ انتخاب شده است که درصد خطای بین نتایج بین دو شبکه ۲۰۰×۲۰۰ و ۲۵۰×۲۵۰ کمتر از یک درصد بوده است به همین دلیل شبکه ۲۰۰×۲۰۰ جهت حل معادلات انتخاب می‌شود.

۵- بررسی عملکرد برنامه کامپیوتری

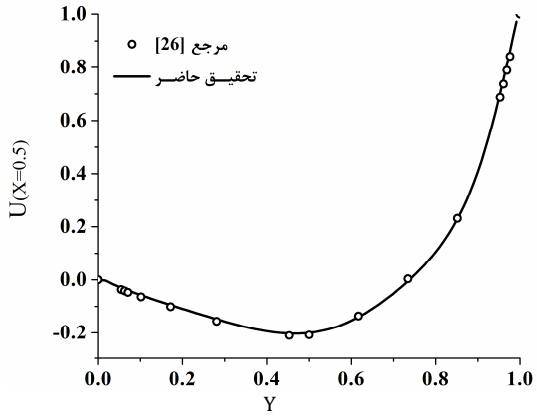
برای اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری، با توجه به فرض تک فاز بودن نانو سیال، متوسط عدد ناسلت محاسبه شده روی دیواره گرم و سرد در اعداد رایلی و کسر حجمی‌های متفاوت با نتیجه حاصل شده از همبستگی ذکر شده در مرجع [۲۱] در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود نتایج تطابق خوبی با یکدیگر دارند. همچنین برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل عددی معادلات شامل میدان مغناطیسی، اعداد ناسلت متوسط روی سطح گرم محاسبه شده در مرجع [۱۶] و حاصل از برنامه کامپیوتری در شکل ۳ مقایسه شده‌اند و در این حالت نیز دیده می‌شود مطابقت خوبی بین نتایج وجود دارد. از طرف دیگر برای اعتبارسنجی کد محاسباتی در حالت جابه‌جایی ترکیبی، سرعت در مرکز حفره با نتایج مرجع [۲۶] نیز مقایسه شده است (شکل ۴) که در این حالت نیز نتایج مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.



شکل ۲ مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با مرجع [۲۱]



شکل ۳ مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با مرجع [۱۶] در عدد رایلی 10^5



شکل ۴ مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی با مرجع [۲۶] برای Re = ۱۰۰

۶- نتایج

در این قسمت به بررسی تأثیر پارامترهایی همانند اعداد ریچاردسون، گراشهف، رینولدز و غلظت نانوذرات بر میزان انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی پرداخته می‌شود. برای مطالعه میزان انتقال گرما، متوسط عدد ناسلت روی دیواره گرم محاسبه شده است. به منظور بررسی گستره بیشتری از اعداد مذکور، دو روش اتخاذ شده است. در ابتدا نقش پارامترهای مورد نظر بر مقدار عدد ناسلت روی دیواره گرم زمانی که عدد گراشهف ثابت و برابر با 10^3 بوده و عدد ریچاردسون با عدد رینولدز تغییر می‌نماید، بررسی شده است. سپس همین مطالعه برای حالتی که عدد رینولدز ثابت و برابر ۱۰۰ بوده و عدد ریچاردسون با عدد گراشهف تغییر می‌کند انجام شده است.

۶-۱- تأثیر اعداد هارتمن و رینولدز

در شکل‌های ۵ تا ۷ تغییرات عدد ناسلت روی سطح گرم با زاویه شیب میدان مغناطیسی در غلظت‌های صفر و ۰/۰۴ نانو ذرات بر حسب قدرت‌های متفاوت میدان مغناطیسی در حالتی که عدد گراشهف ثابت و برابر با 10^3 است رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالتی که زاویه شیب میدان مغناطیسی صفر است و در تمام اعداد هارتمن، افزایش در غلظت نانو ذرات در اعداد ریچاردسون پایین باعث افزایش در انتقال حرارت می‌شود در حالی که در اعداد ریچاردسون بالا، افزایش در غلظت نانو ذرات تأثیر محسوسی بر میزان انتقال گرما ندارد. به عنوان مثال در عدد ریچاردسون ۰/۰۵ و عدد هارتمن ۳۰ و در زاویه شیب صفر میدان مغناطیسی، افزایش غلظت نانو ذرات از مقدار صفر به ۴ درصد حجمی، افزایش ۳ درصدی در مقدار عدد ناسلت را به همراه دارد. بطور کلی می‌توان گفت که اضافه کردن ذرات جامد به سیال پایه باعث ایجاد دو تغییر اساسی در سیال عامل می‌شود. اول این که ضریب انتقال حرارت هدایت نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد و دوم این که باعث ایجاد اثر کاهندگی بر میدان سرعت می‌شود. در انتقال حرارت ترکیبی و در اعداد ریچاردسون پایین، به دلیل انرژی جنبشی نسبتاً بالای القا شده به میدان جریان به خاطر حرکت یکی از سطوح حفره، می‌توان اثر افزایش در ضریب انتقال حرارت هدایت را غالب بر اثر کاهندگی دانست و لذا می‌توان انتظار داشت که در این حالت اضافه کردن نانو ذرات می‌تواند نقش مفیدی در افزایش انتقال حرارت داشته باشد.

در این شکل‌ها همچنین دیده می‌شود که در هر غلظت نانو ذرات (صفر و ۰/۰۴)، با افزایش زاویه شیب میدان مغناطیسی به سمت ۹۰ درجه، مقدار عدد ناسلت در اعداد ریچاردسون پایین افزایش می‌یابد و در اعداد ریچاردسون بالا، این افزایش حائز اهمیت نیست. به عنوان نمونه در عدد ریچارسون ۰/۰۵

و غلظت صفر، قرار گرفتن میدان مغناطیسی در زاویه شیب ۹۰ درجه نسبت به قرار گرفتن میدان مغناطیسی در زاویه شیب صفر، افزایش ۱۱ درصدی در مقدار عدد ناسلت را به همراه دارد. دلیل این مسأله را می‌توان با توجه به مفهوم عدد ریچاردسون به این صورت توجیه کرد که در اعداد ریچاردسون پایین، با توجه به بالا بودن انرژی جنبشی سیال، تأثیر نیروی لورنز بیشتر بوده و لذا اثرگذاری آن بر میدان جریان و در نتیجه بر انتقال حرارت بیشتر است.

از آنجا که در اعداد ریچاردسون پایین افزایش در غلظت نانو ذرات و زاویه شیب میدان مغناطیسی به سمت ۹۰ درجه باعث بهبود در میزان انتقال حرارت می‌شود لذا تأثیر هر دو عامل به طور همزمان نیز باعث بهبودی بیشتری در میزان انتقال حرارت می‌شود. به طوری که در عدد ریچاردسون ۰/۰۵ و در زاویه شیب ۹۰ درجه و غلظت ۰/۰۴ نانو ذرات، مقدار عدد ناسلت ۱۵ درصد بیشتر از زمانی می‌باشد که حفره حاوی سیال خالص (غلظت صفر نانو ذرات) و تحت زاویه شیب صفر میدان مغناطیسی قرار گرفته باشد. همان طور که در شکل ۵ دیده می‌شود این روند برای اعداد هارتمن بالا نیز صادق است.

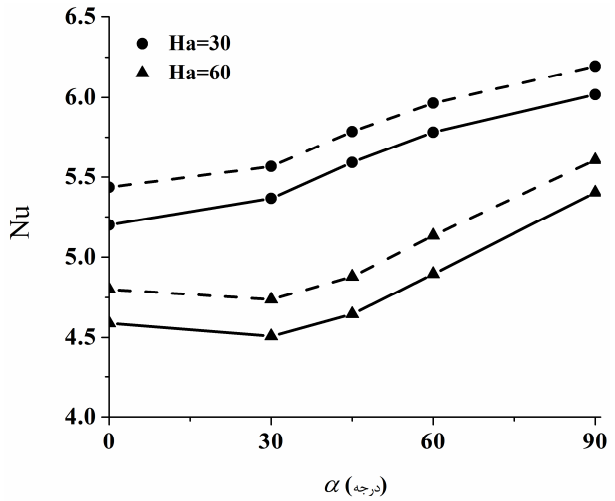
همان طور که در شکل‌های ۵ الی ۷ دیده می‌شود با افزایش عدد ریچاردسون در هر عدد هارتمن و غلظت نانو ذرات، مقدار انتقال حرارت کاهش می‌یابد. زیرا در این حالت افزایش در عدد ریچاردسون به معنای کاهش در عدد رینولدز می‌باشد و بنابراین از میزان تأثیرگذاری حرکت دیواره بالا و سرعت سیال کاسته می شود.

همچنین در این شکل‌ها دیده می‌شود که در هر عدد ریچاردسون و غلظت نانو ذرات، افزایش در عدد هارتمن، با توجه به تأثیر کاهندگی نیروی لورنز بر میدان جریان، باعث کاهش در مقدار عدد ناسلت و در نتیجه کاهش انتقال گرما می‌شود.

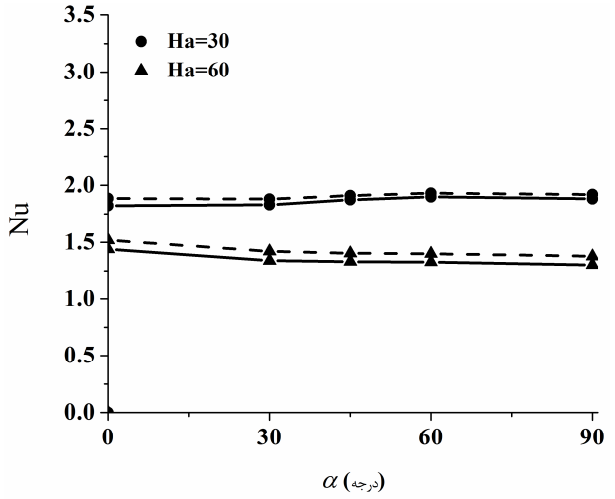
۶-۲- تأثیر اعداد هارتمن و گراشهف

در شکل‌های ۸ تا ۱۰ به بررسی تغییرات عدد ناسلت روی سطح گرم با زاویه شیب میدان مغناطیسی و غلظت نانو ذرات بر حسب قدرت های متفاوت میدان مغناطیسی در حالتی که عدد رینولدز ثابت و برابر با ۱۰۰ است پرداخته می‌شود. همان طور که در شکل ۸ دیده می‌شود هنگامی که عدد ریچاردسون ۰/۰۵ باشد افزایش در غلظت نانو ذرات در دو عدد هارتمن باعث افزایش در انتقال گرما می‌شود. مثلاً در عدد هارتمن ۳۰ و در زاویه شیب صفر میدان مغناطیسی، افزایش غلظت نانو ذرات از صفر تا ۰/۰۴ باعث افزایش حدود ۴ درصدی در مقدار عدد ناسلت می‌شود. از طرف دیگر دیده می‌شود که در سیال خالص نیز افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی به سمت ۹۰ درجه باعث افزایش در مقدار انتقال حرارت نسبت به زاویه شیب صفر می‌شود. در این شکل دیده می‌شود که افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی به سمت ۹۰ درجه نسبت به افزایش در غلظت نانو ذرات، بهبود به مراتب بیشتری بر میزان انتقال حرارت دارد. مثلاً در عدد هارتمن ۳۰، بیشینه افزایش عدد ناسلت به بیش از ۱۵ درصد می‌رسد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که تأثیر همزمان افزایش زاویه شیب میدان مغناطیسی و غلظت نانو ذرات نسبت به غلظت صفر نانو ذرات و زاویه شیب صفر، حداکثر افزایش مقدار عدد ناسلت را به بیش از ۱۹ درصد می‌رساند.

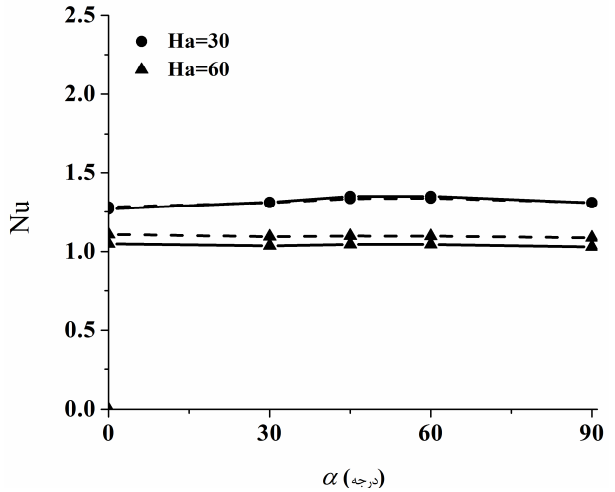
نکته قابل توجه تغییرات میزان انتقال حرارت با افزایش غلظت نانو ذرات در اعداد ریچاردسون ۵ و ۵۰ می‌باشد. در این حالت در تمامی اعداد هارتمن افزایش در غلظت نانو ذرات کاهش در مقدار انتقال حرارت را به همراه دارد.



شکل ۵ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب زاویه شیب میدان مغناطیسی در عدد ریچاردسون Ri= ۰/۰۵ و غلظت صفر (خط پر) و ۰/۰۴ (خط چین) نانو ذرات در عدد گراشهف $۱۰^{۳}$



شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب زاویه میدان شیب مغناطیسی در عدد ریچاردسون Ri= ۵ و غلظت صفر (خط پر) و ۰/۰۴ (خط چین) نانو ذرات در عدد گراشهف $۱۰^{۳}$

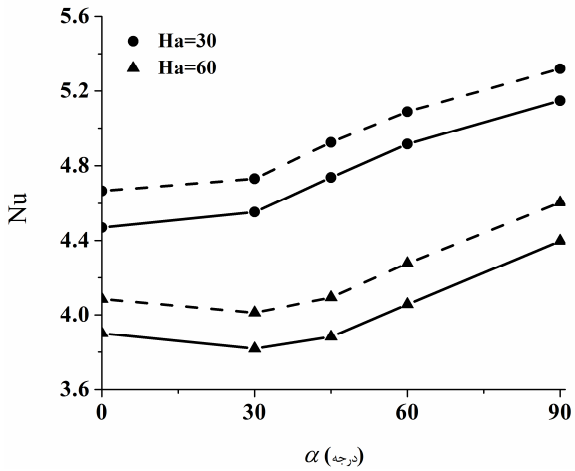


شکل ۷ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب زاویه شیب میدان مغناطیسی در عدد ریچاردسون Ri= ۵۰ و غلظت صفر (خط پر) و ۰/۰۴ (خط چین) نانو ذرات در عدد گراشهف $۱۰^{۳}$

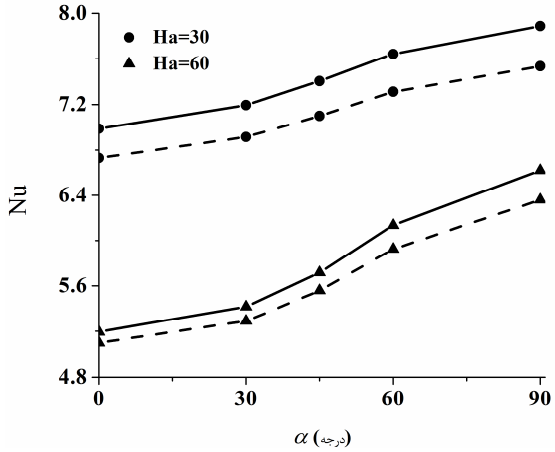
با توجه به ثابت بودن عدد رینولدز، افزایش در عدد ریچاردسون به مفهوم افزایش عدد گراشهف بوده و بنابراین تمایل حفره به انتقال گرما به شکل جابه‌جایی آزاد است تا ترکیبی. لذا افزایش در غلظت نانو ذرات، با توجه به اثر غالب کاهندگی میدان جریان نسبت به اثر افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال عامل، کاهش در مقدار انتقال حرارت را به همراه دارد. همان طور که در این دو شکل دیده می‌شود مقدار انتقال حرارت سیال خالص با افزایش زاویه شیب میدان مغناطیسی، روندی افزایشی را طی می‌کند که تأثیرگذاری زاویه شیب میدان مغناطیسی در اعداد هارتمن بالا که نمایانگر قدرت بالای میدان مغناطیسی می‌باشد، چشم‌گیرتر است.

همچنین در شکل‌های ۸ الی ۱۰ دیده می‌شود که در هر عدد هارتمن و با افزایش عدد ریچاردسون، تأثیر زاویه شیب میدان مغناطیسی در افزایش انتقال گرما نسبت به زاویه شیب صفر کمتر می‌شود. دلیل این مسأله نیز همان طور که ذکر شد کاهش انرژی جنبشی سیال به دلیل افزایش عدد ریچاردسون می‌باشد.

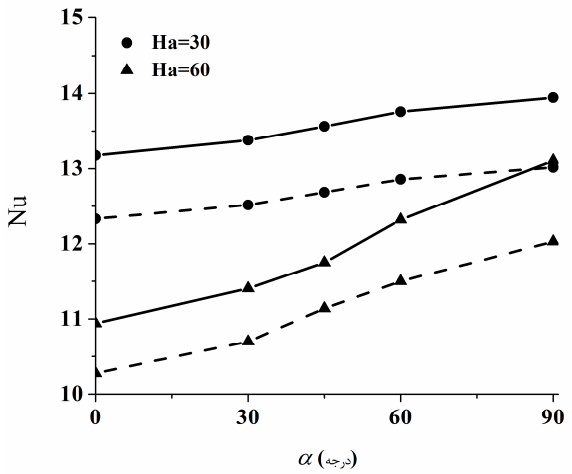
مشابه آنچه که قبلاً ذکر شد در هر عدد ریچاردسون و غلظت نانو ذرات، به دلیل تأثیر کاهندگی نیروی لورنز بر میدان جریان، افزایش در عدد هارتمن کاهش در انتقال حرارت را نیز به همراه دارد.



شکل ۸ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب زاویه شیب میدان مغناطیسی درعدد ریچاردسون ۰/۰۵ =Ri و غلظت صفر (خط پر) و ۰/۰۴ (خط چین) نانو ذرات در عدد رینولدز ۱۰۰



شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب زاویه شیب میدان مغناطیسی در عدد ریچاردسون ۵ =Ri و غلظت صفر (خط پر) و ۰/۰۴ (خط چین) نانو ذرات در عدد رینولدز ۱۰۰



شکل ۱۰ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب زاویه شیب میدان مغناطیسی درعدد ریچاردسون ۵۰ =Ri و غلظت صفر (خط پر) و ۰/۰۴ (خط چین) نانو ذرات در عدد رینولدز ۱۰۰

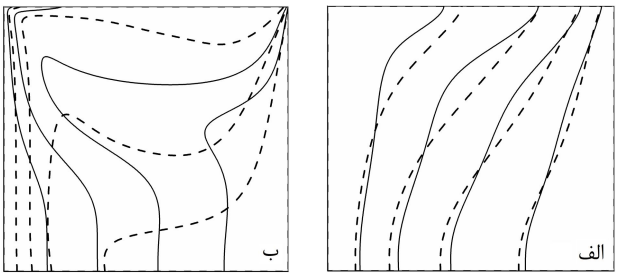
جدول ۲ اعداد ناسلت متوسط روی سطح گرم در عدد ریچاردسون ۰/۰۵، غلظت ۰/۰۶ و زاویه شیب صفر میدان مغناطیسی

Gr= ۱۰^{۳}		Re= ۱۰۰	
Ha= ۳۰	Ha= ۶۰	Ha= ۳۰	Ha= ۶۰
۵/۵۸	۴/۹۴	۴/۷۹	۴/۲۱

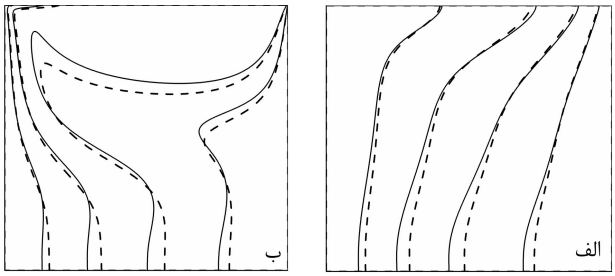
۶-۳- تأثیر افزایش غلظت نانو ذرات

قسمت‌های قبل شامل بررسی میزان افزایش عدد ناسلت متوسط روی سطح گرم در غلظت های صفر و ۰/۰۴ نانو سیال بوده و به مقایسه میزان افزایش عدد ناسلت در دو حالت (افزایش غلظت نانو ذرات از صفر به ۰/۰۴ درصد و افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی) پرداخته شد. همچنین دیده شد که در عدد ریچاردسون ۰/۰۵ و در دو حالت بررسی شده (عدد گراشهف ثابت و برابر ۱۰^{۳} و عدد رینولدز ثابت و برابر ۱۰۰)، نقش افزایش غلظت نانو ذرات به میزان ۴ درصد به منظور افزایش انتقال گرما در مقایسه با افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی کمتر است. حال ممکن است این سوال مطرح شود که آیا افزایش بیشتر در غلظت نانو ذرات می‌تواند نقش مثبت‌تری به منظور افزایش در انتقال گرما نسبت به افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی داشته باشد یا خیر. به منظور بررسی این موضوع، در اعداد گراشهف ۱۰^{۳} و رینولدز ۱۰۰ و در اعداد هارتمن مورد نظر، مقدار متوسط عدد ناسلت روی سطح گرم در زاویه شیب صفر میدان مغناطیسی در غلظت ۰/۰۶ محاسبه شده است. همان طور که در جدول ۲ دیده می شود گرچه غلظت ۰/۰۶ باعث افزایش انتقال گرمای بیشتری نسبت به غلظت ۰/۰۴ می شود اما همچنان نقش افزایش زاویه شیب میدان مغناطیسی جهت افزایش انتقال گرما بیشتر می باشد.

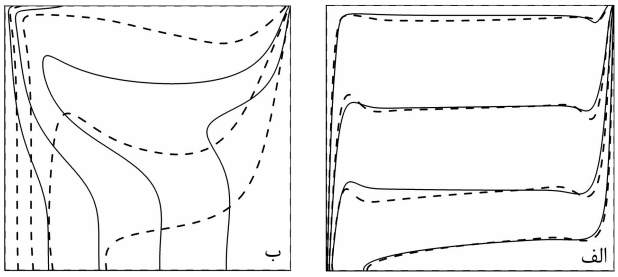
به منظور بررسی تأثیر زاویه شیب میدان مغناطیسی و غلظت نانو ذرات بر میدان دما، در اعداد ریچاردسون ۰/۰۵ و ۵۰ و برای دو غلظت صفر و ۰/۰۴ نانو ذرات، کانتور دما برای زوایای شیب میدان مغناطیسی صفر و ۹۰ درجه برای اعداد گراشهف و رینولدز ثابت در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ رسم شده است. همانطور که در این اشکال دیده می شود، در اعداد گراشهف و رینولدز مورد نظر، همواره تغییر در خطوط دما ثابت به خاطر افزایش زاویه شیب میدان مغناطیسی به مراتب بیشتر از تغییر در این خطوط به خاطر افزایش در غلظت نانو ذرات است.



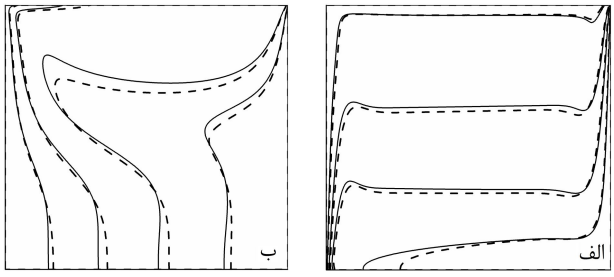
شکل ۱۱ کانتور میدان دما برای اعداد ریچاردسون ۵۰ (شکل ۱۱- الف) و ۰/۰۵ (شکل ۱۱- ب) در غلظت صفر نانو ذرات و عدد گراشهف 10^3، ۰ = α (خط پر)، α = ۹۰ (خط چین)



شکل ۱۲ کانتور میدان دما برای اعداد ریچاردسون ۵۰ (شکل ۱۱- الف) و ۰/۰۵ (شکل ۱۱- ب) در زاویه صفر میدان مغناطیسی و عدد گراشهف 10^3، ۰ = ϕ (خط پر)، ϕ = ۰/۰۴ (خط چین)



شکل ۱۳ کانتور میدان دما برای اعداد ریچاردسون ۵۰ (شکل ۱۱- الف) و ۰/۰۵ (شکل ۱۱- ب) در غلظت صفر نانو ذرات و عدد رینولدز ۱۰۰، ۰ = α (خط پر)، α = ۹۰ (خط چین)



شکل ۱۴ کانتور میدان دما برای اعداد ریچاردسون ۵۰ (شکل ۱۱- الف) و ۰/۰۵ (شکل ۱۱- ب) در زاویه صفر میدان مغناطیسی و عدد رینولدز ۱۰۰، ۰ = ϕ (خط پر)، ϕ = ۰/۰۴ (خط چین)

همچنین در شکل‌های ۱۱ و ۱۳ دیده می شود که در غلظت صفر نانو ذرات و در اعداد گراشهف 10^3 و رینولدز ۱۰۰، با توجه به تأثیر بیشتر افزایش زاویه شیب میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت در عدد ریچاردسون پایین، میزان تغییر در خطوط دما ثابت در عدد ریچاردسون ۰/۰۵ بیشتر از عدد ریچاردسون ۵۰ می باشد. در این دو شکل همچنین دیده می شود که با افزایش زاویه شیب میدان مغناطیسی، تمرکز خطوط دما ثابت به سمت دیواره گرم در عدد ریچاردسون ۰/۰۵ نیز افزایش یافته که خود موید افزایش انتقال گرما در این حالت است.

۷- جمع‌بندی

در این تحقیق، تأثیر زاویه شیب میدان مغناطیسی و همچنین غلظت نانو ذرات بر انتقال حرارت ترکیبی درون حفره مورد ارزیابی قرار گرفت و تأثیر پارامترهایی مانند عدد ریچاردسون، رینولدز و گراشهف بر مقدار انتقال حرارت بررسی گردید. نتایج حاصل از حل عددی به شرح زیر می‌باشند:

- در اعداد ریچاردسون ۰/۰۵ و گراشهف 10^3، افزایش در غلظت نانو ذرات باعث افزایش در مقدار انتقال حرارت می‌شود، اگر چه افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی به سمت ۹۰ درجه، تأثیر کاملاً مشهودتری بر مقدار انتقال حرارت دارد.
- افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی و غلظت نانو ذرات در اعداد ریچاردسون ۵ و ۵۰ و گراشهف 10^3 تأثیر ناچیزی بر مقدار انتقال حرارت دارد.
- در اعداد رینولدز ۱۰۰ و ریچاردسون ۰/۰۵ افزایش در غلظت نانو ذرات و زاویه شیب میدان مغناطیسی به سمت ۹۰ درجه، تأثیری مثبت بر انتقال حرارت را به همراه دارد. اگرچه در این حالت تأثیرگذاری افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی بر مقدار انتقال حرارت نسبت به افزایش غلظت نانو ذرات چشم‌گیرتر است.
- در اعداد ریچاردسون ۵ و ۵۰ و رینولدز ۱۰۰، افزایش در غلظت نانو ذرات کاهش در مقدار انتقال حرارت را به همراه دارد، حال آن که افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی باعث افزایش قابل توجهی بر مقدار انتقال حرارت می‌شود و این اثر در اعداد هارتمن بالا مشهودتر است.

به طور کلی می‌توان به این نتیجه رسید که زمانی که سیال خالص تحت تأثیر میدان مغناطیسی افقی باشد جهت افزایش میزان انتقال حرارت، افزایش در زاویه شیب میدان مغناطیسی به سمت قائم نسبت به اضافه کردن نانو ذرات، تأثیر به مراتب مثبت‌تری را به همراه خواهد داشت.

۸- علائم

B_0	قدرت میدان مغناطیسی (Tesla)
c_p	ظرفیت حرارتی ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
d_{bf}	قطر معادل یک مولکول سیال پایه (m)
d_p	قطر نانو ذرات (m)
g	گرانش (ms^{-2})
Gr	عدد گراشهف
Ha	عدد هارتمن
k	ضریب انتقال حرارت هدایت ($Wm^{-1}K^{-1}$)
k_b	ثابت بولتزمن (JK^{-1})
L	طول مرجع حفره (m)
N	عدد آووگادرو (mol^{-1})
Nu	عدد ناسلت
Nu_m	عدد ناسلت متوسط
p	فشار سیال (Pa)
P	فشار بدون بعد
Pr	عدد پرانتل
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رینولدز
Re_p	عدد رینولدز ذرات نانو

Ri	عدد ریچاردسون
T_H	دمای دیوار گرم (K)
T_c	دمای دیوار سرد (K)
T	دما (K)
u,v	مولفه های سرعت در جهت x,y (ms^{-1})
U,V	مولفه های سرعت بدون بعد
x,y	مختصات دکارتی (m)
X,Y	مختصات بدون بعد

علایم یونانی

α	زاویه شیب میدان مغناطیسی
β	ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})
ϕ	غلظت نانوذرات
μ	لزجت دینامیکی (Nsm^{-2})
ρ	چگالی، (kgm^{-3})
ν	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
σ	ضریب هدایت الکتریکی (μscm^{-1})
θ	دمای بدون بعد

زیرنویس‌ها

bf	سیال پایه
fr	دمای انجماد
s	نانوذرات جامد
nf	نانوسیال
$_0$	دمای مرجع ۲۹۵ K

۹- مراجع

[1] A. Ranjbar, Basics and Applications of Fluid Dynamics, Nooshirvani University of Technology Press, 2009. (In Persian).

[2] J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, second ed., Clarendon Press, Oxford, UK, 1881.

[3] S.U.S. Choi, J.A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *in ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, San Francisco, Calif, USA, 1995.

[4] A.K. Santra, S. Sen, N. Chakraborty, Study of heat transfer augmentation in a differentially heated square cavity using copper-water Nano fluid, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, pp. 1113-1122, 2008.

[5] H. F. Oztop, E. Abu-Nada, Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with Nano fluids, *International Journal of Heat and Fluid flow*, Vol.29, pp. 1326-1336, 2008.

[6] E. Abu-Nada, H.F. Oztop, Effect of inclination angle on natural convection in enclosures filled with Cu-water nanofluid, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, pp. 669-678, 2009.

[7] Z. Haddad, E. Abu-Nada, H.F. Oztop, A. Mataoui, Natural convection in Nano fluids: Are the thermophoresis and Brownian motion effects significant in Nano fluid heat transfer enhancement?, *International Journal of thermal Sciences*, Vol.57, pp. 152-162, 2012.

[8] F. Talebi, A.H. Mahmoudi, M. Shahi, Numerical study of mixed convection flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid, *International communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 79-90, 2010.

[9] M.A. Mansour, R.A. Mohamed, M.M. Abd-Elaziz, S.A. Ahmed, Numerical simulation of mixed convection flows in a squre lid-driven cavity partitally heated from below using nanofluid, *International communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1504-1512, 2010.

[10] S. Mazrouei Sebdani, M. Mahmoodi, S.M. Hashemi, Effect of nanofluid variable properties on mixed convection in square cavity, *International Journal of Thermal Sciences*, pp.1-15, 2011.

[11] M. Mahmoodi, Mixed convection inside nanofluid filled rectangular enclosures with moving bottom wall, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 15, pp. 889-903, 2011.

[12] T. Basak , S. Roy, AR. Balakrishnan, Effects of thermal boundary conditions on natural convection flows within a square cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 4525-4535, 2006.

[13] S. Sivasankaran, A. Malleswaran, J. Lee, P. Sundar, Hydro-magnetic combined convection in a lid-driven cavity with sinusoidal boundary conditions on both sidewalls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 512-525, 2011.

[14] H.F. Oztop, Kh. Al-Salem, I. Pop, MHD mixed convection in a lid-driven cavity with corner heater, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 3494-3504, 2011.

[15] M.M. Rahman, H.F. Oztop, N.A. Rahim, R. Saidur, K. Al-Salem, N. Amin, M.A.H. Mamun, A. Ahsan, Computional analysis of mixed convection in a channel with a cavity heated from different sides, *International communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 78-84, 2012.

[16] B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, A. Raisi, Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure, *International Journal of Thermal sciences*, Vol. 50, pp. 1748–1756, 2011.

[17] H. Nemati, M. Farhadi, K. Sedighi, H.R. Ashorynejad, E. Fattahi, magnetic field effects on nautral convection flow of nanofluid in a rectangular cavity using lattice Boltzmann model, *Scientia Iranica*; Vol. 19, pp. 303-310, 2012.

[18] A.H. Mahmoudi, I. Pop, M. Shahi, Effect of magnetic field on nautral convection in triangular enclosure filled with nanofluid, *International Journal of Thermal sciences*, Vol. 59, pp. 126–140, 2012.

[19] S.M. Aminossadati, Hydro magnetic natural cooling of a triangular heat source in a triangular cavity with water-CuO nano fluid, *International communication in heat and mass transfer*, Vol. 43, pp.22-29, 2013.

[20] M. Kharati Koopaee, A. Omidvar, I. Jelodari, Evaluation of tempture-independedent thermophysical properties assumption of water based alumina nanofluid in natural convection within the enclosures, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 8, pp. 68-78, 2013. (In Persian)

[21] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, Fundamental Heat and Masss Transfer, six edition. John Wily & sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.

[22] M. Sathiyamoorthy, A. Chamkha, Effect of magnetic field on natural convection flow in a liquid gallium filled square cavity for linearly heated side wall(s), *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 1856-1865, 2010.

[23] Kh. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Bouyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3639-3653, 2003.

[24] M. Corcione, Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of Nano fluids, *Energy convers. Manage*, Vol.52, pp. 789-793, 2011.

[25] S. Ganguly, S. Sikdar, S. Basu, Experiment investigation of the effective conductivity of aluminum oxide nanofluids, *Powder Thecnology*, Vol. 196, pp. 326–330, 2009.

[26] U. Ghia, K.N. Ghia, C.T. SHIN, High-Re Solutions for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multi grid Method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 48, pp. 387–411, 1982.