مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۵، ص‌ص ۱۱۱-۱۲۰

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

اثر میدان مغناطیسی بر جابجایی طبیعی یک نانوسیال در یک محفظه مربعی با غشاء جداکننده در وسط آن

مهدی داودیان[۱]، افراسیاب رئیسی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

* شهرکرد، صندق پستی ۱۱۵، raisi@eng.sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۲ خرداد ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۹ تیر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۲ تیر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

جابجایی آزاد

نانوسیال

محفظه

میدان مغناطیسی

چکیده

در این مقاله جابجایی طبیعی نانوسیال آب-آلومینا در یک محفظه مربعی، که در معرض یک میدان مغناطیسی قرار دارد به صورت عددی بررسی شده است. دیوارهای عمودی محفظه در دماهای ثابت T_c و T_h و دیوارهای افقی عایق هستند. در وسط محفظه، صفحه‌ای عمودی، با ضخامت ناچیز و ارتفاع متغیر قرار دارد. معادلات حاکم به روش تفاضل محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده و به کمک الگوریتم سیمپل به صورت هم‌زمان حل شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل از حل عددی، تأثیر پارامترهایی مانند ارتفاع بی‌بعد صفحه میانی، عدد ریلی، نسبت حجمی نانوذرات و عدد هارتمنبر روی میدان جریان و انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش ارتفاع صفحه میانی و همچنین افزایش عدد هارتمن موجب کاهش انتقال حرارت می‌شوند، در حالی که افزایش عدد ریلی موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود. افزایش نسبت حجمی نانوذرات بسته به این که عدد ریلی چقدر باشد ممکن است عملکرد حرارتی را تقویت یا تضعیف نماید.

The Effect of magnetic field on the natural Convection of a nanofluid in a Square enclosure with a membrane separator in the middle

Mehdi Davoodian, Afrasiab Raisi

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
* P.O.B. 115 Shahrekord, Iran, raisi@eng.sku.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 June 2013
Accepted 30 June 2013
Available Online 23 June 2014

Keywords:
Free Convection
Nanofluids
Enclosure
Magnetic Field

ABSTRACT

In this paper, the natural convection of water-Al2O3nanofluid in a square enclosure exposed to a magnetic field is numerically investigated. The enclosure is bounded by two isothermal vertical walls at different temperatures of Th and Tc. The two horizontals walls of the enclosure are thermally insulated. A vertical plate (membrane separator) with a negligible thickness and a variable height is located in the middle of the chamber. Discretization of the governing equations is achieved through a finite method and is solved using the SIMPLE algorithm. Based on the results of the numerical solution, the effects of the relevant parameters such as the dimensionless height of the membrane separator, Rayleigh number, the solid volume fraction and the Hartmann number on the flow field and the heat transfer rate are investigated. The results show that the heat transfer rate decreases with an increase of the dimensionless height of the membrane separator and an increase of the Hartmann number. The heat transfer rate, however, increases as the Rayleigh number increases. Depending on the Rayleigh number, the thermal performance of the enclosure is either improved or deteriorated as the solid volume fraction is increased.

۱- مقدمه

جابجایی طبیعی در محفظه‌های مربعی کاربردهای مهندسی متعددی دارد. از جمله در سیستم‌های خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، تهویه ساختمان‌ها، کلکتورهای ذخیره کننده انرژی خورشیدی، سیستم‌های راکتورهای هسته‌ای، صنایع ذخیره‌سازی غذایی و سیستم‌های ژئوفیزیکی، مسأله کلاسیک جابجایی طبیعی در محفظه‌های مربعی شکل مصداق پیدا می‌کند. جابجایی طبیعی در محفظه‌ها را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم بندی نمود:

۱- محفظه‌هایی که از وجه جانبی گرم می‌شوند.

۲- محفظه‌هایی که از وجه زیرین گرم می‌شوند.

تفاوت اصلی بین این دو گروه، در این است که، محفظه‌هایی که از وجه جانبی گرم می‌شوند، به محض این که اختلاف دمای بسیار کوچکی در محفظه اعمال شود، پدیده جابجایی رخ می‌دهد. در حالی که، در محفظه‌هایی که از وجه زیرین گرم می‌شوند، قبل از این که اولین علائم حرکت سیال مشاهده شود، بایستی اختلاف دمای اعمال شده به مقدار بحرانی خود برسد. از جمله کاربردهای ذکر شده گروه اول، عایق‌کاری دیوارهای دوجداره و سیستم‌های سرمایش ماشین آلات الکتریکی دوار صنعتی می‌باشد. به عنوان

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Davoodian, A. Raisi, The Effect of magnetic field on the natural Convection of a nanofluid in a Square enclosure with a membrane separator in the middle, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 111-120, 2014 (In Persian)

مثالی کاربردی از گروه دوم، می‌توان به عملکرد ایزوله‌های حرارتی و انتقال حرارت در فضای اتاقک زیر شیروانی یک سقف، اشاره کرد.

میدان مغناطیسی تأثیر بسزایی روی میدان جریان و به تبع آن روی میزان انتقال حرارت دارد، زیرا وجود میدان مغناطیسی سبب به وجود آمدن نیروی لورنتز در میدان جریان می‌شود و این نیرو در حالت کلی سبب کاهش جریان جابجایی و میزان انتقال حرارت می‌شود.

استفاده از نانوسیالات به علت این که باعث بهبود خواص حرارتی می‌شوند و مقدار انتقال حرارت جابجایی طبیعی را در محفظه‌ها افزایش می‌دهند، درسال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بیشترین تحقیقات روی هدایت حرارتی نانوسیالات، در زمینه سیالات حاوی نانوذرات اکسید فلزی انجام شده‌است.

سایتو و هیروس [۱] و دوهل دیویس [۲] جابجایی آزاد در یک محفظه مربعی با دیوارهای افقی عایق و دیوارهای عمودی در دو دمای ثابت را به روش عددی حل نمودند. در این مقالات بااستفاده از روش‌های برون‌یابی جواب‌های دقیقی ارائه شده است که امروزه جهت کنترل جواب‌های کدهای کامپیوتری در مسائل جابجایی آزاد استفاده می‌شوند. دنگ و همکارانش [۳] جابجایی آزاد سیال آرام در محفظه مستطیلی با منابع حرارتی مجزا بر روی دیوار را، مورد مطالعه قرار داده‌اند. ایشان نشان دادند که بطور کلی نقش منابع حرارتی دما ثابت از منابع شار حرارتی ثابت، بیشتر است.

در سال‌های اخیر استفاده از نانوسیالات برای افزایش نرخ انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه‌ها، به طور جدی مورد توجه قرار گرفته است و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. نتایج این تحقیقات به طور کلی نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال در محفظه‌ها در اعداد ریلی کوچک (که مکانیزم انتقال حرارت هدایتی حاکم است) و در اعداد ریلی بزرگ (که مکانیزم انتقال حرارت جابجایی حاکم است) سبب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود [۴-۶].

اوزتوپ و آبونادا [۷] انتقال حرارت و میدان جریان را با در نظر گرفتن نقش نیروهای شناوری در محفظه بسته‌ای که به صورت منطقه‌ای گرم می‌شد و از نانوسیال پر بود مطالعه کردند. آنها در مطالعاتشان از نانوذرات مختلف استفاده کردند و دریافتند که استفاده از نانوسیال باعث بهبود انتقال‌حرارت می‌شود و این افزایش در نسبت ابعاد کم برجسته‌تر است.

پیشکار و قاسمی [۸] اثر نانوذرات بر انتقال حرارت جابجایی توام در کانال افقی دارای منبع گرم را به روش عددی بررسی کردند. آنها طی این تحقیق نشان دادند که استفاده از نانوسیال باعث پخش بهتر حرارت و افزایش دمای میانگین منبع می‌شود و افزایش درصد حجمی نانوذرات موجب افزایش انتقال حرارت می‌گردد و این افزایش در رینولدزهای بالا بیشتر است.

کریمی و قاسمی [۹] انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال آب-آلومینا را در محفظه L شکل مورب به روش عددی بررسی کردند و دریافتند که افزایش ۵٪ حجمی نانوذرات به آب می‌تواند تا ۲۰٪ موجب افزایش انتقال حرارت شود.

از طرفی با توجه به این‌که بااستفاده از میدان مغناطیسی، جابجایی‌های هیدرودینامیکی اجتناب‌ناپذیر را می‌توان کنترل و میرا کرد و همچنین در بسیاری از مسائل مهندسی به دلیل وجود میدان‌های الکتریکی، میدان مغناطیسی در جریان سیال القا می‌شود، در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در خصوص تأثیر میدان مغناطیسی بر میدان جریان و نرخ انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه‌ها صورت گرفته است که نتایج کلی آنها کاهش جابجایی جریان و نرخ انتقال حرارت در اثر اعمال میدان مغناطیسی می‌باشد [۱۰-۱۴].

تیماه [۱۵] و سیواسنکاران و هو [۱۶] با توجه به حل عددی صورت گرفته به مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر نرخ انتقال حرارت جایجایی طبیعی درون محفظه پرداختند و نشان دادند که نرخ انتقال حرارت با افزایش شدت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد.

قاسمی و همکارانش [۱۷]به بررسی جابجایی طبیعی، دائمی و آرام جریان در حضور یک میدان مغناطیسی در یک محفظه مربع شکل با دیوارهای گرم و سرد در دوطرف و دو دیوار عایق در بالا و پایین پرداختند. آن‌ها طی این بررسی به طور کلی به این نتیجه رسیدند که با افزایش عدد ریلی به دلیل افزایش قدرت جابجایی، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد و با افزایش عدد هارتمن به دلیل افزایش نیروی لورنتز و کاهش قدرت جابجایی، نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد و افزایش درصد حجمی نانوذرات در اعداد ریلی پائین و بالا باعث بهبود رفتار حرارتی و افزایش نوسلت متوسط می‌شود، لیکن در اعداد ریلی میانی (حدود 10^5) افزایش درصد حجمی نانوذرات باعث کاهش نوسلت متوسط می‌شود.

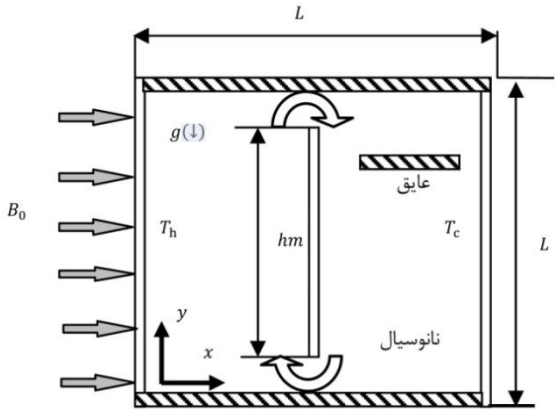
ملک‌پور و قاسمی [۱۸] اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در یک محفظه مثلثی شکل را به روش عددی مطالعه کردند و نشان دادند که افزایش عدد هارتمن باعث کاهش جابجایی نانوسیال و انتقال حرارت می‌شود.

افزایش نرخ انتقال حرارت و چگونگی بهینه کردن آن، جایگاه ویژه‌ای در علم امروز پیدا کرده است. در مطالعات قبلی، بیشتر محفظه‌های مربعی ساده، جهت بررسی اثر میدان مغناطیسی بر قدرت جابجایی مورد بررسی قرار گرفته است. در بسیاری از محفظه‌هایی که قطعات و مدارها مجتمع الکترونیکی در آنها قرار می‌گیرند و به صورت جابجایی آزاد خنک‌کاری می‌شوند از صفحه-های نگه‌دارنده که قطعات الکترونیکی بر روی آنها نصیب می‌شود استفاده می‌شود و این صفحه بر روی جریان جابجایی آزاد که در محفظه ایجاد می‌شود اثر می‌گذارد. هندسه مورد استفاده در این مقاله یک مدل ساده شده از چنین محفظه‌هایی است. بنابراین مسأله حاضر مشخصه‌های انتقال حرارت و پارامترهای موثر بر آن و خواص جریان، برای جریان جابجایی آزاد در یک محفظه‌ی مربعی پر شده از نانوسیال آب- آلومینا با وجود صفحه‌ای جداکننده در وسط آن را مورد بررسی قرار داده است. مطالعه عددی پارامترهای موثر بر جریان نانوسیال و انتقال حرارت درون محفظه با در نظر گرفتن شرایط حاکم بر مسأله، با نوشتن برنامه کامپیوتری مناسب، هدف اصلی این تحقیق است.

۲- بیان مسأله

هندسه مورد نظر در این تحقیق، مطابق شکل ۱، یک محفظه مربعی شکل، دو بعدی است که یک صفحه عمودی جداکننده در وسط آن قرار دارد. ارتفاع صفحه میانی متغیر است و فاصله آن از دیوارهای افقی محفظه به یک اندازه است. دیوار سمت چپ محفظه، دیوار گرم به دمای T_h و دیوار سمت راست آن، دیوار سرد به دمای T_c است و دیوارهای افقی آن به خوبی عایق شده‌اند. محفظه از نانوسیال آب- آلومینا با چگالی ρ_{nf} و لزجت μ_{nf} پر شده است و در معرض یک میدان مغناطیسی به شدت B_0 قرار گرفته است. شتاب گرانش g در جهت منفی y عمل می‌کند.

بر اثر اختلاف دمای دیوارهای سمت راست و چپ، در محفظه جریان جابجایی طبیعی برقرار می‌شود. روی تمام دیوارها و صفحه میانی شرط عدم لغزش برقرار است و از آنجایی که فرض شده است که صفحه میانی نازک و بدون جرم است، دمای نانوسیال در دو طرف آن با هم برابر است. هدف از این تحقیق بررسی انتقال حرارت ناشی از جریان طبیعی نانوسیال درون محفظه می‌باشد و اثر پارامترهایی هم‌چون ارتفاع بی‌بعد صفحه میانی، اعداد ریلی و هارتمن و نسبت حجمی نانوذرات بر میدان جریان و انتقال حرارت بررسی شده است.



شکل ۱ هندسه مسأله

۳- معادله‌های اساسی حاکم برجریان نانوسیال

در این تحقیق جریان آرام ودائمی فرض شده است و اتلاف حرارتی لزجت وجود ندارد و تولید انرژی صفر در نظر گرفته شده است. همچنین نانوسیال به عنوان یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و ذرات جامد فرض شده است. معادلات بی‌بعد حاکم برای جریان آرام دوبعدی درون محفظه، با فرض سیال نیوتنی غیر قابل تراکم و بااستفاده از تقریب بوزینسک، عبارتند از:

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \qquad (۱)$$

مومنتم در راستای X

$$U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial X}+\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f}\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right) \qquad (۲)$$

مومنتم در راستای Y

$$U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right)+\frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f}Ra Pr\theta-Ha^2 Pr V \qquad (۳)$$

انرژی

$$U\frac{\partial \theta}{\partial X}+V\frac{\partial \theta}{\partial Y}=\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f}\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}\right) \qquad (۴)$$

متغیرهای بی‌بعد استفاده شده در معادله‌های (۱-۴) عبارتند از:

$$X=\frac{x}{L}, Y=\frac{y}{L}, U=\frac{uL}{\alpha_f}, V=\frac{vL}{\alpha_f}, Hm=\frac{hm}{L}$$
$$P=\frac{\bar{p}L^2}{\rho_{nf}\alpha_f^2}, \theta=\frac{T-T_c}{T_h-T_c} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، L طول و ارتفاع محفظه، α ضریب پخش حرارتی، β ضریب انبساط حجمی، μ ویسکوزیته دینامیکی و ρ چگالی می‌باشد که زیرنویس f برای سیال خالص و nf برای نانوسیال بکار برده شده‌است. تعریف اعداد بدون بعد ریلی(Ra)، پرانتل (Pr) و هارتمن (Ha) نیز در رابطه (۶) آمده‌است.

$$Ra=\frac{g\beta_f L^3(T_h-T_c)}{\vartheta_f\alpha_f}, Pr=\frac{\vartheta_f}{\alpha_f}$$
$$Ha=B_0 L\sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\vartheta_f\rho_{nf}}} \qquad (۶)$$

۴- شرایط مرزی

در حالت کلی شرایط مرزی برای حل معادلات به این صورت بیان می‌شود. شرایط مرزی سرعت، شامل شرط عدم لغزش برای کلیه دیوارها و شرایط مرزی حرارتی شامل، دیوار گرم سمت چپ با دمای ثابت T_h و دیوار سردسمت راست با دمای ثابت T_c و نیز بر روی دیوارهای عایق شرط $(\partial T/\partial y)=0$ برقرار می‌باشد، این شرایط مزری برای معادلات بی‌بعد به صورت رابطه (۷) بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned}&X=0 \rightarrow U=V=0, \theta=1\\&X=1 \rightarrow U=V=0, \theta=0\\&Y=0 \rightarrow U=V=0, \partial\theta/\partial Y=0\\&X=0.5, 0\le Y\le Hm \rightarrow U=V=0\end{aligned} \qquad (۷)$$

صفحه میانی دارای ضخامت بسیار ناچیزی است و در مقابل جریان حرارت مقاومتی ایجاد نمی‌کند و دمای نانوسیال در دو طرف آن یکسان در نظر گرفته می‌شود. بنابراین تأثیر آن برمیدان دما ناشی از تأثیرش بر میدان جریان است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار سیال در هر مرحله، عدد نوسلت، معیار مناسبی می‌باشد. عدد نوسلت موضعی دیوار گرم طبق رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$Nu_Y=\frac{hL}{k_f} \qquad (۸)$$

در رابطه (۸)، ضریب انتقال حرارت جابجایی برابر است با:

$$h=\frac{q_w}{T_h-T_c} \qquad (۹)$$

و شار حرارتی روی دیوار گرم نیز از رابطه (۱۰) بدست می‌آید.

$$q_w=-k_{nf}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} \qquad (۱۰)$$

پس از ساده‌سازی و استفاده از پارامترهای بی‌بعد، رابطه (۱۱) برای نوسلت موضعی حاصل می‌شود.

$$Nu_Y=-\frac{k_{nf}}{k_f}\left(\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)_{X=0} \qquad (۱۱)$$

نوسلت متوسط نیز از انتگرال‌گیری معادله (۱۱)، بر روی دیوار گرم محفظه به صورت رابطه (۱۲) بدست می‌آید.

$$Nu_m=\frac{1}{L}\int_0^L Nu_Y(Y)dy=-\left(\frac{k_{nf}}{k_f}\right)\int_0^1\left(\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)_{X=0}dY \qquad (۱۲)$$

۵- روابط مربوط به خواص نانوسیال

همان‌طور که از معادلات حاکم بر مسأله دیده می‌شود، برای حل معادله‌ها نیاز به خواص ترموفیزیکی نانوسیال است. چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت حرارتی وضریب پخش حرارتی نانوسیال به کمک خواص سیال و نانوذرات از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شوند [۱۹].

$$\begin{aligned}&\rho_{nf}=(1-\varphi)\rho_f+\varphi\rho_p\\&(\rho C_P)_{nf}=(1-\varphi)(\rho C_P)_f+\varphi(\rho C_P)_p\\&\alpha_{nf}=k_{nf}/(\rho C_P)_{nf}\\&(\rho\beta)_{nf}=(1-\varphi)(\rho\beta)_f+\varphi(\rho\beta)_P\\&\sigma_{nf}=(1-\varphi)\sigma_f+\varphi\sigma_P\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

درخصوص ویسکوزیته نانوسیال روابط مختلفی درمراجع ارائه شده‌است که رابطه برینکمن [۱۹] بیشتر از سایر روابط مورد توجه محققان است.

$$\mu_{nf}=\mu_f(1-\varphi)^{-2.5} \qquad (۱۴)$$

برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نیز روابط متعددی ارائه شده‌است، که در اینجا از مدل ماکسول [۲۰] استفاده شده است.

$$k_{nf}=k_f\left[\frac{(k_P+2k_f)-2\varphi(k_f-k_P)}{(k_P+2k_f)+\varphi(k_f-k_P)}\right] \qquad (۱۵)$$

خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات مورد استفاده در این مسأله در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی آب -آلومینا [۱۷]

خواص فیزیکی	آب	نانوذرات آلومینیوم
c_p (J/kg.K)	۴۱۷۹	۷۶۵
ρ (kg/m^3)	۹۹۷/۱	۳۹۷۰
k (W/m.k)	۰/۶۱۳	۴۰
β (1/K)	۲/۷۶۱×۱۰$^{-۵}$	۰/۸۵×۱۰$^{-۵}$
α (m^2/s)	۱/۴۷۱×۱۰$^{-۷}$	۱/۳۲×۱۰$^{-۵}$

۶- روش عددی

معادله‌های (۱) تا (۴) همراه با شرایط مرزی گفته شده به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده‌اند. میدان حل با روش شبکه جابجا شده، شبکه‌بندی شده‌است. در روش شبکه جابجا شده، علاوه برراحتی محاسبه دبی‌ها روی وجوه حجم‌کنترل، به علت معلوم بودن سرعت روی سطوح، مقادیر فشار در نقاط اصلی شبکه مشخص می‌شود. برای حل همزمان معادله‌های جبری-شده، از الگوریتم سیمپل، که جزئیات کامل آن در مرجع [۲۱] آمده است، استفاده شده است. همگرایی وقتی حاصل می‌شود که مجهول محاسبه شده در دو تکرار متوالی به عدد ثابتی رسیده باشد. در حل معادلات حاکم ضرائب معادله از مقادیر محاسبه شده در تکرار قبل بدست می‌آیند. همچنین از معیار همگرایی به صورت رابطه (۱۶)، استفاده شده است:

$$\Phi = \sum_J \sum_I \left| \frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\varphi^{n+1}} \right|_{I,J} \leq 10^{-8} \qquad (۱۶)$$

دررابطه (۱۶)، n برابر تعداد سلول‌ها می‌باشد و φ متغیر عمومی (U, V, θ) را نشان می‌دهد.

۷- نتایج

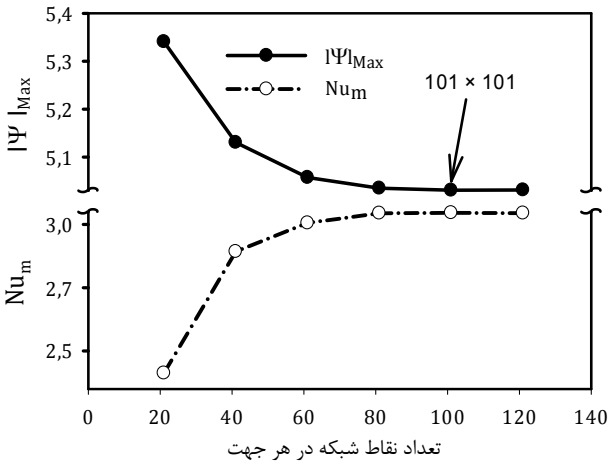
برای حل عددی معادله‌ها و اجرای الگوریتم مورد نظر یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شده است. برای انتخاب شبکه حل مناسب، ابتدا بررسی روی تعداد نقاط شبکه انجام گرفت. برای این منظور، اثر تعداد نقاط بر نوسلت متوسط دیوار گرم و مقدار ماکزیمم تابع جریان بررسی شد. این بررسی به ازای $\varphi = 0.03$، $\mathrm{Ha} = 30$، Pr=6.2، $\mathrm{Ra} = 10^5$ و ارتفاع بی‌بعد صفحه میانی $\mathrm{Hm} = 0.50$ صورت گرفته و نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲، دیده می‌شود که برای شبکه‌های ریزتر از ۱۰۱ × ۱۰۱ نتایج تغییرات قابل ملاحظه‌ای نمی‌کنند و بدین ترتیب شبکه‌بندی یکنواخت ۱۰۱ × ۱۰۱ برای اجرای برنامه انتخاب شده است.

برای بررسی صحت عملکرد کد نوشته شده، نتایج حاصل از آن با نتایج کارهای مشابه انجام شده توسط دیگران مقایسه شده است. ابتدا برای یک محفظه مربعی شکل پرشده از هوا با $\mathrm{Pr} = 0.71$ و دیوارهای افقی عایق و دیوارهای عمودی در دو دمای مختلف T_c و T_h مطابق مراجع [۲، ۲۲-۲۴] بررسی انجام شد. نوسلت متوسط روی صفحه گرم بدست آمد و در جدول ۲ با نتایج ارائه شده در مراجع مذکور مقایسه شده‌است. از مقایسه داده‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از اجرای کد کامپیوتری بادقت خوبی قابل قبول می‌باشند.

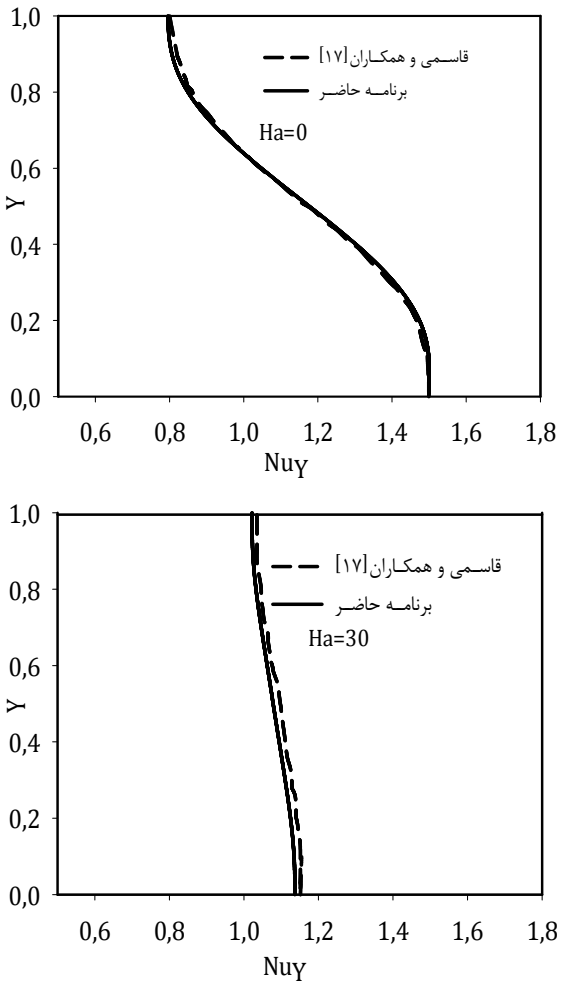
در ادامه نیز، برای بررسی بهتر صحت کد نوشته شده برای نانوسیال، مطابق مرجع [۱۷] محفظه‌ای مربعی با دیوارهای افقی عایق و دیوارهای عمودی در دودمای مختلف T_c (دمای دیوار سرد) و T_h (دمای دیوار گرم) که درون محفظه، نانو سیال آب– آلومینا قرار دارد، در حضور میدان مغناطیسی در نظر گرفته شد و نوسلت موضعی روی دیوار گرم بدست آمده از برنامه حاضر به ازای $\varphi = 0.03$ ، $\mathrm{Ra} = 10^3$ و دو مقدار مختلف عدد هارتمن $\mathrm{Ha} = 0\,,30$ با نتایج موجود در مرجع [۱۷] در شکل ۳ مقایسه شده است که نشان از صحت کد کامپیوتری حاضر دارد.

جدول ۲ بررسی صحت برنامه حاضر برای محفظه مربعی با سیال هوا

عدد ریلی	$\mathrm{Nu_m}$ کارحاضر	$\mathrm{Nu_m}$ مرجع[۲۲]	$\mathrm{Nu_m}$ مرجع[۲۳]	$\mathrm{Nu_m}$ مرجع[۲۴]	$\mathrm{Nu_m}$ مرجع[۲]
10^3	۱/۱۱۵	۱/۱۱۸	۱/۱۱۴	۱/۱۰۸	۱/۱۱۸
10^4	۲/۲۲۵	۲/۲۴۵	۲/۲۴۵	۲/۲۰۱	۲/۲۴۳
10^5	۴/۵۲۳	۴/۵۲۲	۴/۵۱۰	۴/۴۳۰	۴/۵۱۹
10^6	۸/۸۱۳	۸/۸۲۹	۸/۸۰۶	۸/۷۵۴	۸/۷۱۹



شکل ۲تاثیر تعداد نقاط شبکه برنوسلت متوسط دیوار گرم واندازه‌ی تابع جریان ماکزیمم



شکل ۳ نوسلت دیوار گرم برای عددریلی $\mathrm{Ra} = 10^3$

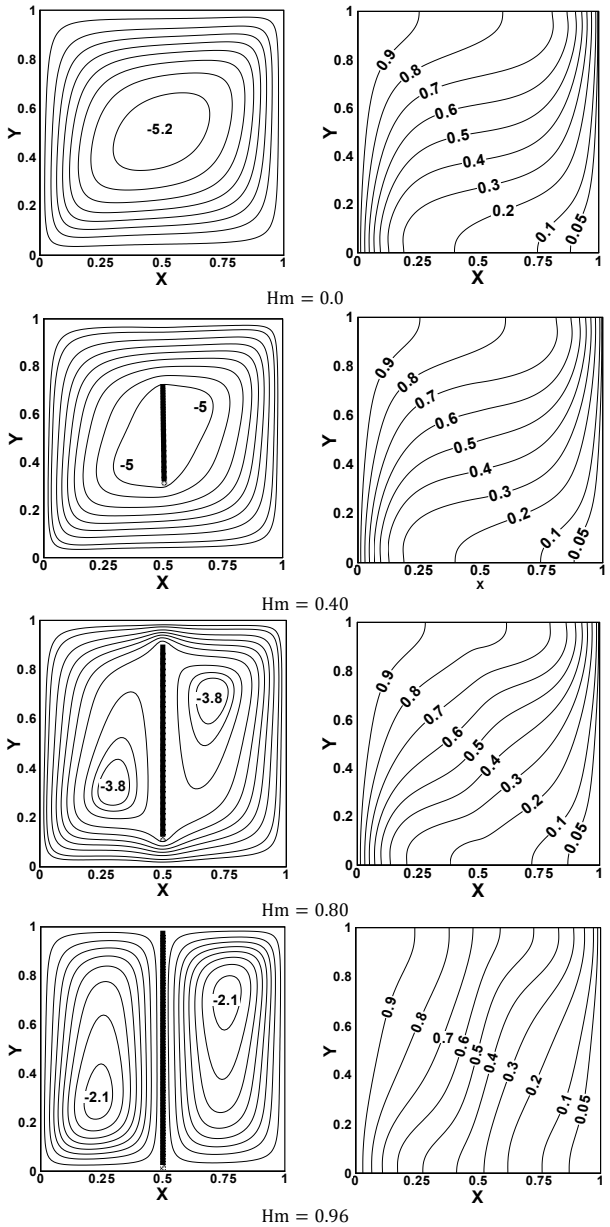
۷-۱- بررسی اثر تغییر ارتفاع صفحه میانی (Hm)

در این بخش اثر تغییر ارتفاع صفحه میانی به ازای مقدارهای ثابت برای اعداد ریلی، هارتمن و درصدحجمی نانوذرات $\mathrm{Ha} = 30,\ \varphi = 0.03\,, \mathrm{Ra} = 10^5$، بر روی میدان جریان و انتقال حرارت بررسی شده است. برای این منظور ارتفاع بدون بعد صفحه میانی در بازه $0 < \mathrm{Hm} < 0.96$ تغییر داده شده است. در شکل ۴، خطوط جریان و خطوط هم‌دما به ازای مقادیر مختلف Hm رسم شده است. در

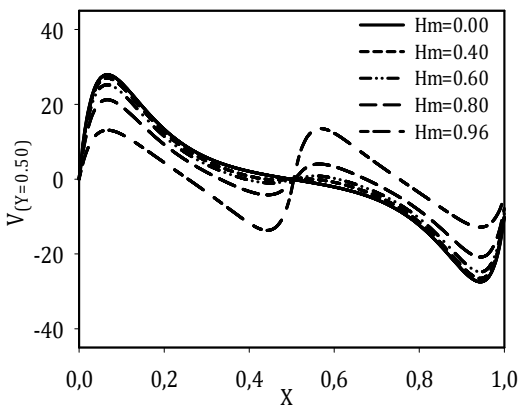
حالتی که صفحه میانی درون محفظه وجود ندارد، یک گردابه ساعتگرد درون محفظه تشکیل شده است، هنگامی که صفحه میانی داخل محفظه قرار می‌گیرد، به دلیل شرط عدم لغزش سرعت روی آن، دو گردابه متقارن مرکزی در اطراف صفحه میانی تشکیل می‌شود و در عین حال یک گردابه ساعت‌گرد که این دو گردابه را در بر دارد کل محفظه را اشغال کرده است.

با افزایش ارتفاع صفحه میانی، اندازه گردابه‌های اطراف آن بزرگ‌تر می‌شوند و گردابه اصلی رو به اضمحلال می‌رود تا این که در $Hm = 0.96$ میدان جریان در داخل محفظه در اطراف صفحه میانی به دو قسمت مجزا تقسیم شده است.

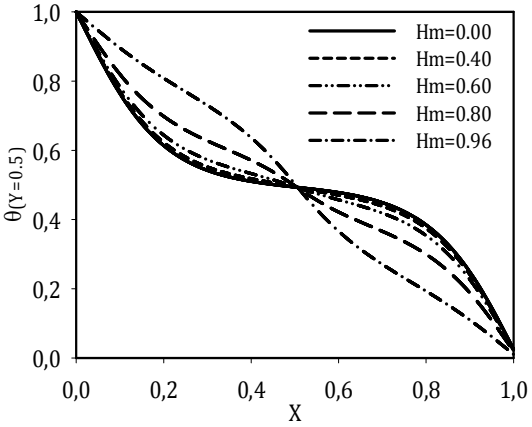
با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که افزایش ارتفاع صفحه میانی جریان جابجایی داخل محفظه را کاهش می دهد و این سبب می‌شود که خطوط هم‌دما از حالت تقریبا افقی برای وقتی که صفحه میانی وجود ندارد به حالت تقریباً عمودی برای هنگامی که $Hm = 0.96$ می‌شود، تبدیل گردند و این حاکی از تغییر مکانیزم انتقال حرارت از جابجایی آزاد به انتقال حرارت هدایتی است.



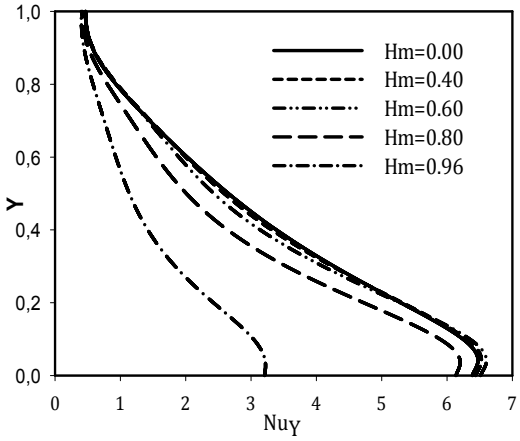
شکل ۴ خطوط هم‌دما (الف) و خطوط جریان (ب) به ازای $Ha = 30, \varphi = 0.03, Ra = 10^5$



شکل ۵ پروفیل سرعت عمودی، در راستای محورافقی و در $Y = 0.5$



شکل ۶ تغییرات دمای بی بعد، در راستای محورافقی و در $Y = 0.5$



شکل ۷ نوسلت موضعی روی دیواری گرم $Ha = 30, \varphi = 0.03, Ra = 10^5$

جدول ۳ تابع جریان ماکزیمم به ازای مقادیر مختلف ارتفاع بدون بعد صفحه میانی

Hm	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۰/۹۶
$\lvert\psi\rvert_{max}$	۵/۵۷	۵/۴۵	۵/۲۰	۴/۷۸	۳/۹۲	۲/۲۴

در جدول ۳ تابع جریان ماکزیمم با افزایش ارتفاع صفحه میانی آورده شده است. باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳، دیده می‌شود که چنانچه $Hm > 0.5$ شود، جابجایی سیال درون محفظه با شدت بیشتری کاهش می‌یابد.

در شکل ۵ پروفیل مولفه عمودی سرعت درون محفظه در $Y = 0.5$ رسم شده است و با توجه به شکل ۵ دیده می‌شود که با افزایش Hm سرعت جریان در حوالی دیوار سمت چپ و راست محفظه کاهش پیدا می‌کند. هنگامی که صفحه میانی در درون محفظه قرار می‌گیرد، یک نقطه عطف در

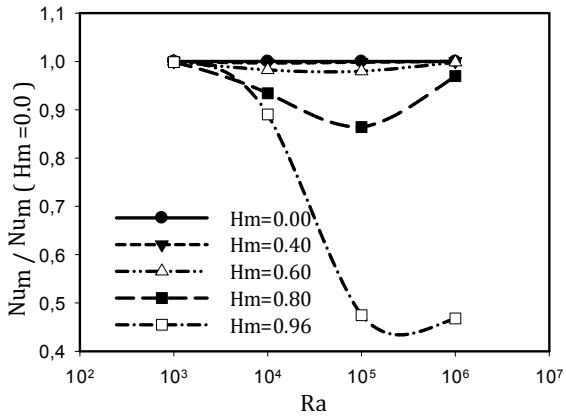
پروفیل سرعت در $X = 0.5$ بوجود می‌آید که نشان از تغییر جهت جریان در دو طرف صفحه میانی دارد. کاهش سرعت جریان سبب کم شدن نرخ انتقال حرارت درون محفظه می‌شود که این موضوع در شکل ۶ که توزیع دما در $Y = 0.5$ را نشان می‌دهد، دیده می‌شود، به طوری که با افزایش Hm گرادیان دما روی دیواره‌های کناری کاهش می‌یابد و در نهایت توزیع دما، به سمت خطی شدن میل می‌کند.

در ادامه، نوسلت روی دیوار گرم نیز جهت بررسی بیشتر در شکل ۷ آورده شده است. در شکل ۷، نوسلت موضعی دیوار گرم برای Hmهای مختلف رسم شده است. با توجه به توضیحات ۴ و ۵ با افزایش Hm، نوسلت موضعی کاهش می‌یابد، البته تا هنگامی که، $Hm \leq 0.50$ است، به دلیل اینکه صفحه میانی در مرکز گردابه اصلی جریان، قرار می‌گیرد، تغییرات Hm تأثیر اساسی روی نوسلت موضعی و نوسلت متوسط، جدول ۴، ندارد. ولی هنگامی که $Hm \geq 0.50$ می‌شود، به دلیل این که الگوی جریان بطور کلی تغییر می‌کند، به تدریج تغییرات نوسلت موضعی و متوسط با افزایش Hm بیشتر می‌شود، به طوری که به‌ازای $Hm = 0.8,0.96$ نوسلت موضعی و متوسط کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند.

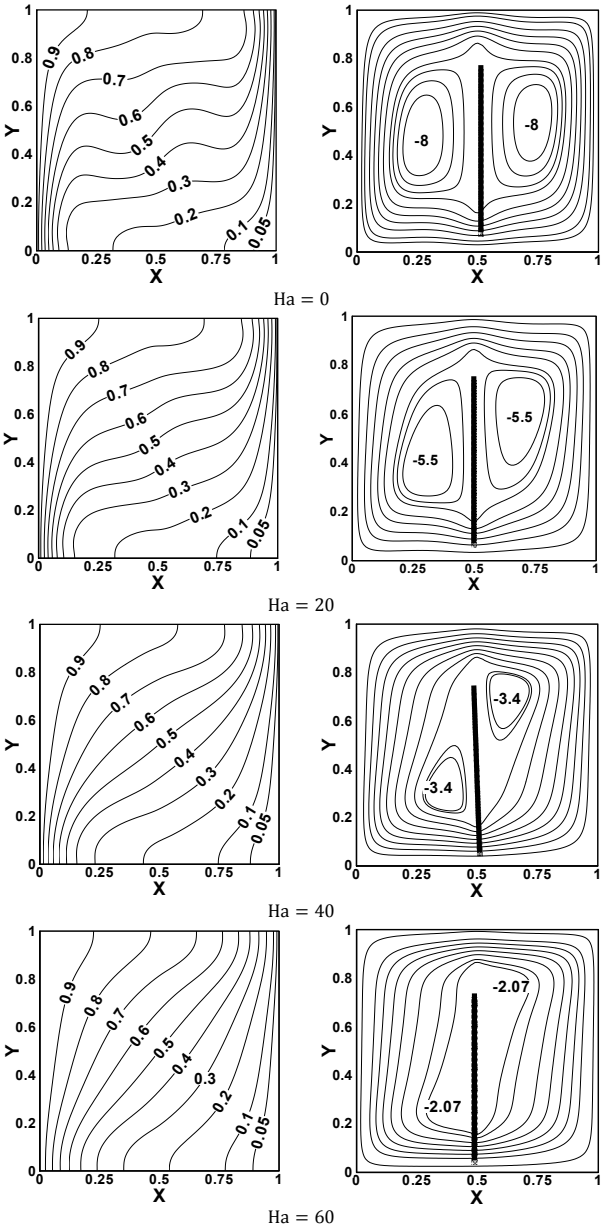
در شکل ۸ تغییرات نسبت نوسلت متوسط به نوسلت متوسط درحالت بدون مانع، $(Nu_m/Nu_{m(Hm=0.0)})$ بر حسب عدد ریلی در $Ha = 30$ نشان داده شده است، همان طور که از شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع صفحه میانی میزان انتقال حرارت دیوار گرم کاهش پیدا می‌کند، زیرا سرعت نانوسیال کم می‌شود. افزایش عدد ریلی با ارتفاع صفحه میانی ثابت و برای ریلی‌های پایین و متوسط، $(10^3 \leq Ra \leq 10^5)$ باعث کاهش میزان انتقال حرارت می‌شود، در حالی که در ریلی 10^6 مشاهده می‌شود که مقدار انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند، زیرا در ریلی‌های پایین وجود صفحه میانی سبب می‌شود که قدرت جابجایی سیال درون محفظه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد و هنگامی که عدد ریلی از یک مقداری (بستگی به مقدار Hm دارد) بیشتر شود دوباره جابجایی تقویت می‌شود و احیاناً گردابه اصلی درون محفظه دوباره قوت می‌گیرد و درنتیجه آن میزان انتقال حرارت مقداری افزایش می‌یابد.

۷-۲- بررسی اثر میدان مغناطیسی (Ha)

میدان مغناطیسی به دلیل ایجاد نیروی لورنتز، تأثیر بسزایی در میدان جریان و میدان دما دارد. در این قسمت تاثیر میدان مغناطیسی برروی میدان جریان و دما در قالب تغییر عدد هارتمن بین $0 \leq Ha \leq 60$، بررسی شده است. برای این منظور سایر پارامترها ثابت در نظرگرفته شده‌اند، به طوری که این پارامترها به‌صورت $\varphi = 0.03, Ra = 10^5, Hm = 0.7$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۸ نسبت تغییرات نوسلت متوسط به نوسلت متوسط درحالت $Hm = 0.0$ بر حسب عدد ریلی در $Ha = 30$



(الف) (ب)

شکل ۹خطوط هم دما (الف) و خطوط جریان (ب) $Hm = 0.70, \varphi = 0.03, Ra = 10^5$

جدول ۴ نوسلت متوسط روی دیوار گرم به ازای $Ha = 30, \varphi = 0.03, Ra = 10^5$

Hm	۰	۰/۲	۰/۴
Nu_m	۳/۰۵۸۴۳	۳/۰۵۸۴۱	۳/۰۵۳۹۶
Hm	۰/۶	۰/۸	۰/۹۶
Nu_m	۲/۹۹۷۰۱	۲/۶۴۳۳۵	۱/۴۵۱۶۱

جدول۵ تابع جریان ماکزیمم به ازای هارتمن‌های مختلف

Ha	۰	۲۰	۴۰	۶۰
$\lvert\Psi\rvert_{max}$	۵/۵۷	۵/۴۵	۵/۲۰	۴/۷۸

در شکل ۹ خطوط جریان و خطوط هم‌دما در هارتمن‌های مختلف رسم شده‌اند. با توجه به خطوط جریان رسم شده در شکل ۹ و مقادیر $\lvert\Psi\rvert_{max}$ که در جدول ۵ ارائه شده است، مشخص است که با افزایش هارتمن جابجایی جریان نانوسیال در محفظه تقلیل می‌یابد. این موضوع در خطوط جریان با حذف

شدن گردابه‌های متقارن اطراف صفحه میانی و ایجاد یک گردابه ضعیف در کل محفظه نشان داده شده‌است. با کاهش جابجایی جریان، ناشی از افزایش هارتمن، خطوط هم‌دما نیز به سمت عمودی شدن سوق پیدا می‌کنند که حکایت از غالب شدن مکانیزم انتقال حرارت هدایتی دارد.

در شکل ۱۰ پروفیل سرعت عمودی در $Y = 0.5$ به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن رسم شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد وجود میدان مغناطیسی سبب بوجود آمدن نیروی لورنتز می‌شود که اثر آن به صورت جمله $(-Ha^2 PrV)$ در معادله مومنتم در راستای Y ظاهر شده است. به این ترتیب وجود میدان مغناطیسی سبب کاهش سرعت و قدرت جابجایی سیال می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ دیده می‌شود که افزایش عدد هارتمن، بدون توجه به جهت جریان، سرعت جریان را کاهش می‌دهد و قدرت گردابه‌ها را کم می‌کند. از این رو افزایش عدد هارتمن سبب کاهش گرادیان دما در مجاورت دیوارهای سرد و گرم و کاهش نرخ انتقال حرارت می‌شود به طوری که افزایش عدد هارتمن، توزیع دما بین صفحات گرم و سرد را به سمت خطی شدن (انتقال حرارت هدایتی) میل می‌دهد، این موضوع در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۲، نوسلت موضعی دیواره گرم در هارتمن‌های مختلف رسم شده است که با توجه به توضیحات ارائه شده با افزایش هارتمن، نوسلت موضعی کاهش می‌یابد. با توجه به شکل به ازای یک مقدار ثابت عدد هارتمن، نوسلت موضعی با افزایش Y کاهش می‌یابد. کاهش نوسلت موضعی با افزایش Y به این دلیل است که باتوجه به خطوط جریان و خطوط هم‌دما، گردابه ساعتگرد اصلی داخل محفظه به گونه‌ای عمل می‌کند که در گوشه پایینی سمت چپ محفظه، جریان به سمت دیوار گرم و در گوشه بالایی سمت چپ، جریان به سمت داخل محفظه است. به همین ترتیب خطوط هم‌دما در گوشه پایینی متمرکز و در گوشه بالایی از هم فاصله می‌گیرند. جدول ۶ مقادیر نوسلت متوسط را در هارتمن‌های مختلف نشان می‌دهد که مطابق انتظار با افزایش هارتمن، مقدار نوسلت متوسط کاهش می‌یابد.

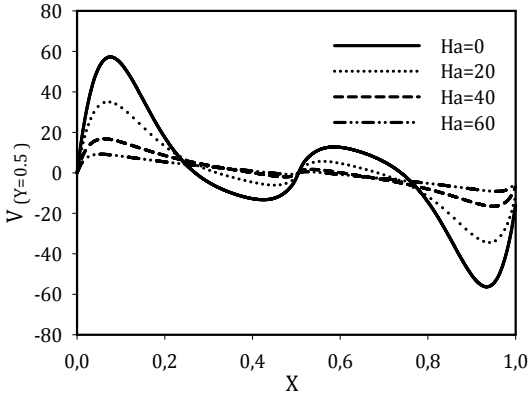
در شکل ۱۳، پارامتر $(Nu_m/Nu_{m(Ha=0.0)})$ برحسب عدد ریلی رسم شده است، با توجه به این شکل دیده می‌شود که با افزایش عدد هارتمن، Nu_m کاهش می‌یابد و از طرفی در یک عدد هارتمن ثابت ابتدا باافزایش عددریلی، نوسلت متوسط کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در واقع هنگامی که میدان مغناطیسی وجود داشته باشد افزایش عدد ریلی از یک طرف باعث افزایش جابجایی می‌شود و از طرف دیگر به دلیل وجود ترم $(-Ha^2 Pr\, V)$ در معادله مومنتم Y، هنگامی که V افزایش یابد تأثیر این جمله منفی بیشتر می‌شود و سبب تضعیف جابجایی می شود، بنابراین در محدوده‌ای که انتقال حرارت هدایتی مکانیزم غالب است، افزایش ریلی باعث کاهش نوسلت متوسط و در محدوده‌ای که جابجایی مکانیزم غالب است، افزایش ریلی باعث افزایش نوسلت متوسط می‌شود. البته با توجه به شکل مشخص است که افزایش Ha سبب افزایش بازه‌ای که انتقال حرارت هدایتی مکانیزم غالب است، می‌شود.

۷-۳- بررسی اثر نسبت حجمی (φ)

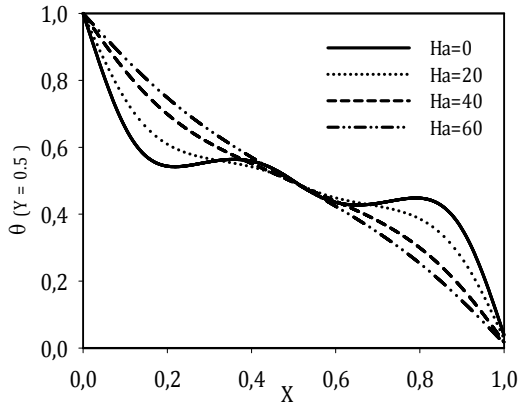
تغییر نسبت حجمی نانوذرات، چون باعث تغییر خواص ترموفیزیکی نانوسیال مطابق با روابط ۱۳ تا ۱۷ می‌شود، موجب تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال درون محفظه می‌شود. در این قسمت اثر تغییرات φ و عدد ریلی به طور همزمان بررسی شده است. در جدول ۷ مقادیر $|\Psi|_{max}$ در φ و ریلی‌های مختلف ارایه شده است. با توجه به نتایج ارایه شده در جدول ۷، دیده می‌شود که در یک نسبت حجمی ثابت نانوذرات، باافزایش ریلی، جریان جابجایی تقویت می‌شود و در $Ra \le 10^5$، دریک ریلی ثابت با افزایش φ به‌دلیل افزایش ویسکوزیته $|\Psi|_{max}$ کم می‌شود. ولی هنگامی که Ra به اندازه کافی بزرگ شود $(Ra = 10^6)$، باافزایش φ، جریان جابجایی تقویت می‌شود. درواقع در ریلی‌های بزرگ که جریان جابجایی در تمام محفظه حاکم است، با توجه به معادله مومنتم در جهت Y نقش جمله $((\rho\beta)_{nf}/\rho_{nf}\beta_f)Ra\,Pr\,\theta$ خیلی حایز اهمیت است و افزایش ویسکوزیته را جبران می‌کند و سبب می‌شود که در ریلی‌های بزرگ، افزایش نسبت حجمی باعث افزایش $|\Psi|_{max}$ شود.

جدول ۶ نوسلت متوسط دیوار گرم، به‌ازای هارتمن‌های مختلف

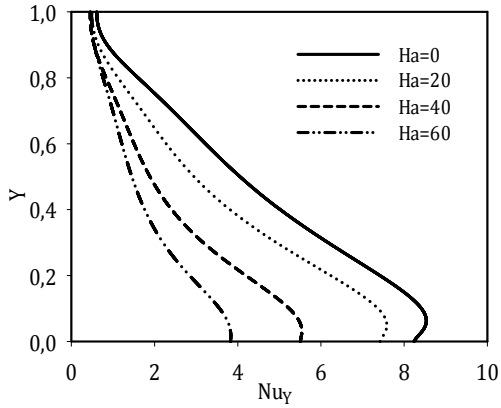
Ha	۰	۲۰	۴۰	۶۰
Nu_m	۴/۴۰۷۵۹	۳/۵۳۹۸۸	۲/۴۲۱۷۶	۱/۷۶۶۸۷



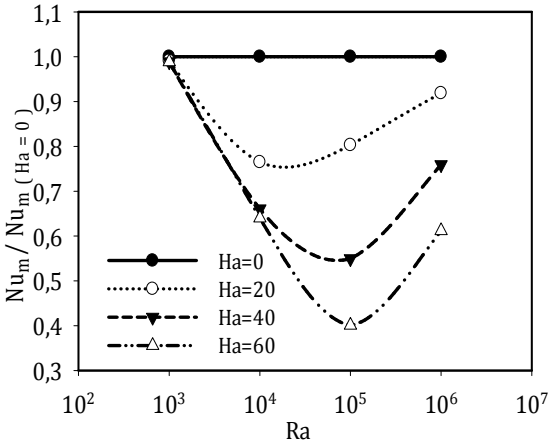
شکل ۱۰ پروفیل سرعت عمودی در مقطع $Y = 0.5$ به ازای $Hm = 0.70, \varphi = 0.03, Ra = 10^5$



شکل ۱۱ تغییرات دما در مقطع $Y = 0.5$ به ازای $Hm = 0.70, \varphi = 0.03, Ra = 10^5$



شکل ۱۲ نوسلت موضعی روی دیوار گرم در $Hm = 0.70, \varphi = 0.03, Ra = 10^5$



شکل ۱۳ نسبت تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد رایلی در اعداد هارتمن مختلف

جدول ۷ مقدار $|\Psi|_{max}$

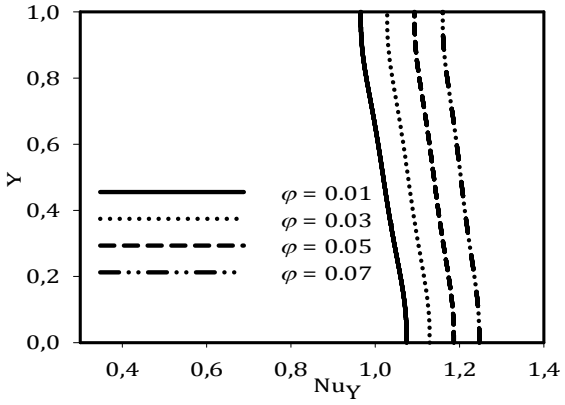
	φ =۰/۰۱	φ =۰/۰۳	φ =۰/۰۵	φ =۰/۰۷
Ra =$۱۰^{۳}$	۰/۰۸۳	۰/۰۷۷	۰/۰۷۲	۰/۰۶۷
Ra =$۱۰^{۴}$	۰/۸۱۲	۰/۷۶۲	۰/۷۱۴	۰/۶۷۰
Ra =$۱۰^{۵}$	۴/۵۶۷	۴/۵۰۱	۴/۴۲۵	۴/۳۴۵
Ra =$۱۰^{۶}$	۱۲/۶۳۹	۱۲/۸۱۰	۱۲/۹۷۱	۱۳/۱۱۹

در شکل ۱۴ تغییرات نوسلت موضعی دیواره، در نسبت حجمی‌های مختلف رسم شده است. به ازای $Ra = 10^3, 10^4$، شکل ۱۴- الف) و ۱۴- ب که هدایت، مکانیزم غالب انتقال حرارت است، با افزایش φ، نوسلت موضعی و به تبع آن نوسلت متوسط که در جدول ۸ ارائه شده است، افزایش می‌یابد. در شکل ۱۴- ج به ازای $Ra = 10^5$، هدایت، مکانیزم غالب نیست و از طرفی $|\Psi|_{max}$ نیز کاهش پیدا کرده است، بنابراین با افزایش φ نوسلت موضعی عموماً کاهش یافته و نوسلت متوسط نیز کاهش یافته است، در شکل ۱۴- د و برای $Ra = 10^6$، جابجایی مکانیزم غالب است و با افزایش φ جابجایی نیز تقویت شده است، بنابراین، نوسلت موضعی و متوسط نیز با افزایش φ افزایش یافته است. این رفتار به نحوه مناسب تری در شکل ۱۵ که تغییرات $(Nu_m/(Nu_{m(\varphi=0.01)})$ را بر حسب عدد ریلی نشان می‌دهد، دیده می‌شود.

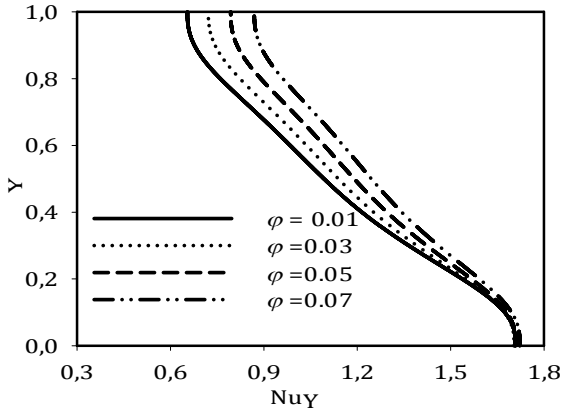
۸- نتیجه‌گیری

در این بررسی، به جریان جابجایی آزاد درون یک محفظه با یک مانع در وسط محفظه به روش عددی پرداخته شده است. معادلات مومنتم و انرژی حاکم به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شدند و توسط الگوریتم سیمپل به‌طور هم‌زمان حل شدند. اثر تغییر ارتفاع صفحه میانی (H_m) و افزایش ضریب حجمی، (φ) مورد بررسی قرار گرفت و به طور کلی نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد.

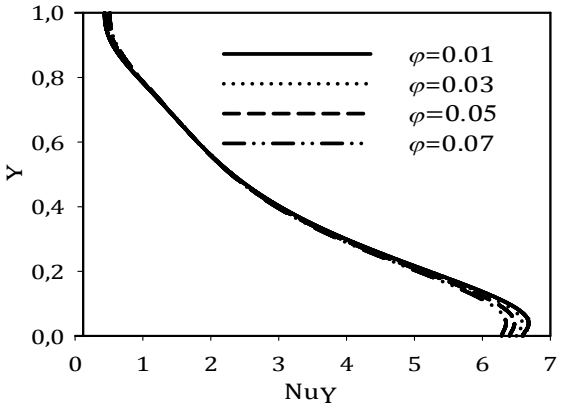
باافزایش ارتفاع صفحه میانی، سرعت درون محفظه کاهش پیدا می‌کند، کاهش میزان سرعت درون محفظه باعث کاهش جریان نانوسیال درون محفظه می‌شود، با توجه به این که میزان جابجایی و سرعت نانوسیال بر میزان انتقال حرارت اثر مستقیم دارد در نتیجه میزان نوسلت متوسط دیوار گرم کاهش می‌یابد، میزان کاهش انتقال حرارت باافزایش ارتفاع صفحه میانی بیشتر می‌شود به طوری که وقتی ارتفاع صفحه از ۰/۵ بیشتر می‌شود، روند انتقال حرارت و نوسلت بشدت کاهش می‌یابد.



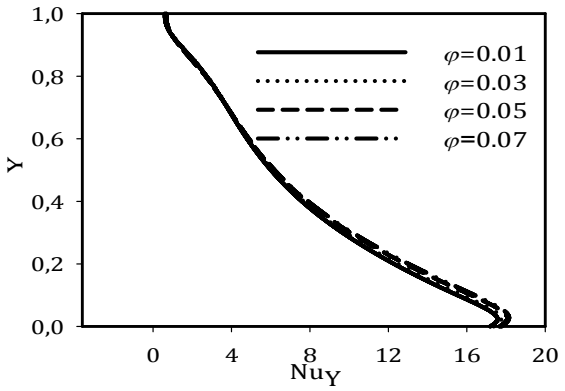
(الف) $Ra = 10^3$



(ب) $Ra = 10^4$

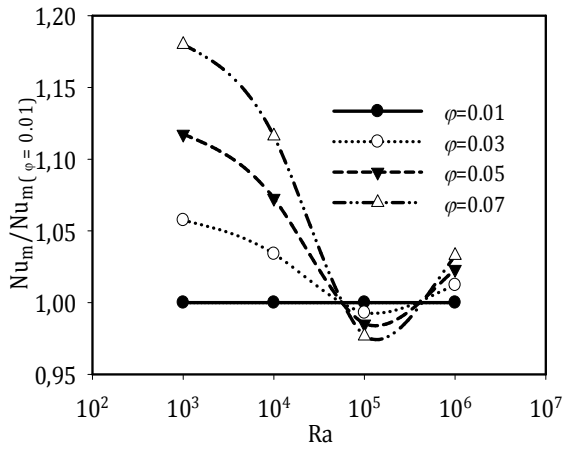


(ج) $Ra = 10^5$



(د) $Ra = 10^6$

شکل ۱۴ نوسلت دیواره گرم به ازای درصد حجمی‌های (φ) مختلف و برای ریلی‌های گوناگون



شکل ۱۵ نسبت تغییرات نوسلت متوسط بر حسب عدد رایلی در نسبت حجمی‌های مختلف در Ha = 30

جدول ۸ مقدار نوسلت متوسط دیوار گرم

	φ =۰/۰۱	φ =۰/۰۳	φ =۰/۰۵	φ =۰/۰۷
Ra =۱۰^{۳}	۱/۰۲۰	۱/۰۷۸	۱/۱۳۹	۱/۲۰۳
Ra =۱۰^{۴}	۱/۱۴۱	۱/۱۸۰	۱/۲۲۴	۱/۲۷۳
Ra =۱۰^{۵}	۲/۹۴۶	۲/۹۲۵	۲/۹۰۲	۲/۸۷۷
Ra =۱۰^{۶}	۷/۳۶۹	۷/۴۶۰	۷/۵۴۰	۷/۶۱۱

با افزایش میدان مغناطیسی که ناشی از افزایش عدد هارتمن است، می‌توان سرعت جریان و نیز میزان انتقال حرارت را کنترل کرد، زیرا با افزایش عدد هارتمن سرعت جریان کاهش پیدا می‌کند و به تبع آن می‌توان میزان انتقال حرارت را کنترل کرد. باافزایش هارتمن نوسلت دیوار گرم کاهش پیدا می‌کند.

افزودن نانو ذرات به آب و افزایش نسبت حجمی نانو ذرات، در ریلی‌های متفاوت رفتار یکسانی را نشان نمی‌دهد، در ریلی‌های پایین مکانیزم غالب انتقال حرارت، انتقال حرارت هدایت می‌باشد، که در آن با افزایش نسبت حجمی و در نتیجه افزایش میزان ضریب هدایت حرارتی، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در ریلی‌های بزرگ که انتقال حرارت جابجایی بر انتقال حرارت هدایتی غالب است، باافزایش میزان نسبت حجمی نانوذرات، به علت افزایش لزجت و کاهش سرعت نانوسیال و ضعیف شدن جریان، میزان انتقال حرارت جابجایی کاهش می‌یابد، در حالی که هدایت همچنان افزایش پیدا کرده‌است و در کل میزان انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند.

۹- فهرست علایم

$B0$	شدت میدان مغناطیسی
Cp	ظرفیت گرمایی ویژه $(\mathrm{Jkg^{-1}K^{-1}})$
Ha	عدد بدون بعد هارتمن $\mathrm{Ha} = B_0 L\left(\sigma_{nf}/\nu_f \rho_{nf}\right)^{1/2}$
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی $(\mathrm{Wm^{-2}K^{-1}})$
k	ضریب هدایت حرارتی $(\mathrm{Wm^{-1}K^{-1}})$
L	طول و ارتفاع‌محفظه (m)
Nu	عدد نوسلت $\mathrm{Nu} = hL/k$
P	فشار (Pa)
Pr	عدد پرانتل $\mathrm{Pr} = \nu_f \,/\, \alpha_f$
Ra	عدد ریلی $\mathrm{Ra} = g\beta_f L^3 \left(T_h - T_c\right)/\nu_f \alpha$
hm	ارتفاع صفحه میانی (m)
Hm	ارتفاع بی بعد صفحه میانی $\mathrm{Hm} = \frac{hm}{L}$
T	دما (K)
u	سرعت در جهت x $(\mathrm{ms^{-1}})$
U	سرعت بدون بعد در جهت x $\left(\mathrm{U} = uL/\alpha_f\right)$
v	سرعت در جهت y $(\mathrm{ms^{-1}})$
V	سرعت بدون بعد در جهت y $\left(\mathrm{V} = vL/\alpha_f\right)$
x	مختصه افقی (m)
X	مختصه افقی بدون بعد $(\mathrm{X} = x/L)$
y	مختصه عمودی (m)
Y	مختصه عمودی بدون بعد $(\mathrm{Y} = y/L)$
g	شتاب جاذب $(\mathrm{ms^{-2}})$

علایم یونانی:

φ	درصد حجمی نانوذرات جامد
β	ضریب انبساط گرمایی $(\mathrm{K^{-1}})$
θ	دمای بدون بعد $\theta = (T - Tc)/(Th - Tc)$
μ	لزجت سینماتیک (Pa s)
ρ	چگالی $(\mathrm{kgm^{-3}})$
σ	ضریب هدایت الکتریکی $(\mu\mathrm{s\,cm^{-1}})$
ϑ	لزجت دینامیکی $(\mathrm{m^2s^{-1}})$

زیرنویس‌ها:

h	گرم
P	نانوذرات
c	سرد
f	سیال
m	متوسط
nf	نانوسیال

۱۰- مراجع

[1] T. Saitoh, K. Hirose, High-Accuracy Benchmark Solutions to Natural Convection in a Square Cavity, *Comput. Mech.,* Vol. 4, No. 6, pp. 417-427, 1989.

[2] D. V. DavisG, Natural Convection of Air in a Square Cavity: a Benchmark Solution, *International Journal Numer. Meth. Fluids*, Vol. 3, No. 3, 1983, pp. 249-264, 1983.

[3] Q. H. Deng, G. F. Tang, Y. Li, A Combined Temperature Scale for Analyzing Natural Convection in Rectangular Enclosures With Discrete Wall Heat Sources, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3437-3446, 2002.

[4] K. S. Hwang, Journal H. Lee, S. P. Jang, Buoyancy-Driven Heat Transfer of Water-Based Al2O3 Nanofluids in a Rectangular Cavity, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 4003-4010, 2007.

[5] C. J. Ho, W. K. Liu, Y. S. Chang, C. C. Lin, Natural Convection Heat Transfer of Alumina-Water Nanofluid in Vertical Square Enclosures: An Experimental Study, *International Journal Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 1345-1353, 2010.

[6] E. Ogut, Natural Convection of Water-Based Nanofluids in an Inclined Enclosure With a Heat source, *International Journal Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 2063-2073, 2009.

[7] H. F. Oztop, E. Abu-Nada, Numerical Study of Natural Convection in Partially Heated Rectangular Enclosures Filled With Nanofluids, *International Journal Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 1326–1336, 2008.

[8] E. Pishkar, B. Ghasemi, Effect of Mixed Cinvection Heat Trasnsfer in a horizontal Channel With Heat Source, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 95-108, 2012. (In Persian)

[9] S. Karimi, B. Ghasemi, Free Coinvective Heat Transfer of Water-Al2O3 Nanofluid Inside a Tilted L-Shaped Enclosure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 133-144, 2013. (In Persian)

[10] Sarris I.E., Kakarantzas S. C., Grecos A. P., Vlachos N. S., MHD Natural Convection in a Laterally and Volumetrically Heated Square Cavity, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 3443-3453, 2005.

[11] K. Kahveci, S. Oztuna, MHD Natural Convection Flow and Heat Transfer in a Laterally Heated Partitioned Enclosure, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 28, pp. 744-752, 2009.

[12] H. F. Oztop, M. Oztop, Y. Varol, Numerical Simulation of Magnetohydrodynamic Buoyancy-induced Flow in a Non-Isothermally Heated Square Enclosure, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 14, pp. 770-778,2009.

[13] M. Pirmohammadi, M. Ghassemi, Effect of Magnetic Field on Convection Heat Transfer Inside a Tilted Square Enclosure, *International Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 776-780, 2009.

[14] 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 J. Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 1856-1865, 2010.

[15] M. A. Teamah, Numerical Simulation of Double Diffusive Natural Convection in Rectangular Enclosure in the Presences of Magnetic Field and Heat Source, *International J. Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 3, pp. 237-248, 2008.

[16] S. Sivasankaran, C. J. Ho, Effect of Temperature Dependent Properties on MHD Convection of Water Near its Density Maximum in a Square Cavity, *International Journal Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 9, pp. 1184-1194, 2008.

[17] B. Ghasemi, S. M. Aminossadati, A. Raisi ,Magnetic Field Effect on Natural Convection in a Nanofluid-Filled Square Enclosure, *International Journal Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 9, pp. 1748–1756, 2011.

[18] A. Malekpoor, B. Ghasemi, Effect of magnetic field on free convection heat transfer of nanofluid in a triangular enclosure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 10-21, 2013. (In Persian)

[19] H. C. Brinkman, The Viscisity of Concentrated Suspension and Solution, *International Journal Chem. Phys*, Vol. 20, No. 4, 1952, pp. 571-581.

[20] J. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Second Ed, Oxford University Press, Cambridge, UK, 1904, pp. 92-98.

[21] S. V. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, pp. 113-137, Washington D. C., Hemisphere Publication Corporation, 1980.

[22] K.Khanafer, L. Vafi, M. Lightstone, Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3639-3953, 2003.

[23] G. Barakos, E. Mitoulis, Natural Convection Flow in a Square Cavity Revisited: Laminar and Turbulent Models With Wall Functions, *International Journal Numer. Methods in Fluids*, Vol. 18, pp. 695-719, 1994 .

[24] N. C. Markatos, K. A. Pericleous, Laminar and Turbulent Natural Convection in an Enclosed Cavity, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 772-775, 1984.