

## انتقال گرمای ترکیبی جابجایی آزاد و رسانش در محفظه ای حاوی نانوسیال و سیال خالص جدا شده با یک مانع

**محمد مهدی داودی چمبینی\***      دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران،  
 m.m.davoodi71@gmail.com  
**بهزاد قاسمی**      استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، behzadgh@yahoo.com  
**افراسیاب رئیسی**      دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، afraisi@gmail.com

### چکیده

هدف از مقاله حاضر، بررسی عددی اثر جنس سیال خالص (آب، هوا و اتیلن گلیکول) بر میدان جریان و آهنگ انتقال گرما محفظه ای حاوی نانوسیال و سیال خالص جدا شده با یک مانع است. نانوسیال مورد استفاده آب-اکسید مس است. معادلات حاکم به روش حجم کنترل جبری شده و بر اساس الگوریتم SIMPLE به طور همزمان حل شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد، در کلیه حالت‌ها افزایش عدد گراشف باعث افزایش سرعت جریان و آهنگ انتقال گرما در محفظه می‌شود. در اعداد گراشف  $(10^3, 10^4)$  انتقال گرما حاکم از نوع رسانش می‌باشد و با افزایش عدد گراشف  $(10^5, 10^6)$  مکانیزم غالب انتقال گرما از نوع جابجایی خواهد شد. در محفظه حاوی هوا-نانوسیال، قدرت جریان گردابه‌ها در محفظه حاوی هوا  $(\Psi_{max} = 14/23)$  خیلی بیشتر از محفظه حاوی نانوسیال  $(\Psi_{max} = 8/12)$  است. این در حالی است که در محفظه حاوی اتیلن گلیکول-نانوسیال، قدرت جریان گردابه‌ها در محفظه حاوی نانوسیال  $(\Psi_{max} = 17/56)$  از محفظه حاوی اتیلن گلیکول  $(\Psi_{max} = 9/46)$  بیشتر است. در اعداد گراشف  $(10^3, 10^4)$ ، آهنگ انتقال گرما روی دیواره گرم در حالی که سیال خالص، هوا  $(95/77\%)$  باشد، بیشتر از اتیلن گلیکول  $(70/34\%)$  و اتیلن گلیکول بیشتر از آب  $(50/14\%)$  است. در اعداد گراشف  $(10^5, 10^6)$ ، آهنگ انتقال گرما روی دیواره گرم در حالی که سیال خالص، اتیلن گلیکول  $(67/33\%)$  باشد، بیشتر از هوا  $(56/41\%)$  و هوا بیشتر از آب  $(50/93\%)$  است. این در حالی است که در همه اعداد گراشف، آهنگ انتقال گرما روی دیواره سرد در حالی که سیال خالص، آب  $(49/86\%)$  باشد، بیشتر از اتیلن گلیکول  $(16/73\%)$  و اتیلن گلیکول بیشتر از هوا  $(4/23\%)$  است.

**واژه های کلیدی:** جابجایی آزاد، رسانش، محفظه مربعی، نانوسیال، سیال خالص، مانع.

### Conjugate conduction and natural convection heat transfer in a cavity filled with nanofluid and purefluid which separated with an obstacle

**M. Davoodi**  
**B. Ghasemi**  
**A. Raisi**

Department of Mechanical Engineering, University of shahrekord, shahrekord, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, University of shahrekord, shahrekord, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, University of shahrekord, shahrekord, Iran

#### Abstract

The purpose of present paper is numerical study of the effect of pure fluid (water, air and ethilen glicon) on flow field and heat transfer rate of a cavity containing nano fluid and pure fluid which separated with an obstacle. we used water-copper oxide as nano fluid. governing equations are derived based on volume control method and solved base on SIMPLE method together. results show that, increasing Grashof number will cause rise of flow speed and heat transfer rate in cavity. in  $(10^3, 10^4)$  Grashof numbers, conduction is the dominated heat transfer and with increasement of Grashof number  $(10^5, 10^6)$ , mechanism changes from conduction to convection. in cavity containing air-nano fluid, the strength of vorticities in cavity containing air  $(\Psi_{max} = 14.23)$  is greater than the nano fluid one  $(\Psi_{max} = 8.12)$ . while in the cavity containing nano fluid-ethilen glicon  $(\Psi_{max} = 17.56)$ , vorticity strength is greater in cavity containing nano fluid  $(\Psi_{max} = 9.46)$ . in low Grashof numbers, heat transfer rate on hot wall, while the pure fluid is air  $(95.77\%)$ , is greater than ethilen glicon  $(70.34\%)$  and ethilen glicon is greater than water  $(50.14\%)$ . in high Grashof numbers heat transfer rate on hot wall, while the pure fluid is ethilen glicon  $(67.33\%)$ , is greater than air  $(56.41\%)$  and air is greater than water  $(50.93\%)$ . while in all Grashof numbers heat transfer rate on cold wall, while the pure fluid is water  $(49.86\%)$ , is greater than ethilen glicon  $(16.73\%)$  and ethilen glicon is greater than air  $(4.23\%)$ .

**Keywords:** nature convection, conductivity, square enclosure, nonofluid, pure fluid, obstacle.

الکترونیکی، مواد ساختمانی از قبیل آجر دیوار، ذخیره سازی برودتی و گردآورهای هوا - خورشیدی باشد. سیستم های خنک کننده، یکی از مهمترین دغدغه های کارخانه ها و صنایعی مانند میکروالکترونیک و هر جایی است که به نوعی با انتقال گرما، روبرو باشد. استفاده از سیالات به منظور انتقال گرما از سال ها پیش مورد توجه بوده است. سیالاتی

#### ۱- مقدمه

انتقال گرما درون محفظه ها دارای کاربردهای بسیاری در رشته های مهندسی و فرآیندهای طبیعی نظیر ساخت برنامه های کاربردی، طراحی کوره، راکتور هسته ای و یا دستگاه های خنک کننده ی

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.m.davoodi71@gmail.com

همچون آب، هوا، روغن های معدنی و اتیلن گلیکول سیالاتی بودند که از گذشته نقش مهمی را در انتقال گرما ایفا می کردند. نمونه ای از این مقالات آورده شده است.

اندرسون و بجان [۱] به مطالعه و بررسی تحلیلی محفظه ای با یک مانع بوسیله ی روش خطی اسین<sup>۱</sup> پرداختند. مطالعه آن ها در ناحیه لایه مرزی بود و اثرات رسانش مانع را قابل اغماض فرض کردند. آنها نتایج تجربی خود را توسط یک محفظه با دو مانع به تایید رساندند و متوجه شدند که انتقال گرما بین دو انتهای محفظه با  $(1 + N)^{0.61}$  متناسب است که در این رابطه N تعداد مانع است.

نیشیمورا و همکاران [۲-۳] مطالعه ای را بر روی انتقال گرما ترکیبی محفظه ای با یک مانع خارج از مرکز انجام دادند و با توجه به خاصیت شناوری و روابطی که در لایه مرزی حاکم است با مقایسه نتایج تجربی و عددی مشاهده کردند که آهنگ انتقال گرما در حضور مانع کاهش می یابد.

دزدوزو و همکاران [۴] نتایج عددی و تجربی انتقال گرما ترکیبی جابجایی آزاد و رسانش را بوسیله ی ورقه های نازک یک مانع مورد بررسی قرار داد. آن ها همچنین جریان سیال درون محفظه ی مکعبی را در دو حالت بدون مانع و با مانع مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که با ورود یک مانع عمودی درون محفظه انتقال گرما جابجایی از  $۶۳/۶\%$  به  $۵۹/۱\%$  در محدوده اعداد رایلی  $۳۶۹۰۰۰ \leq Ra \leq ۳۸۰۰۰$  کاهش می یابد.

نظری و رضانی [۵] انتقال گرما جابه جایی آزاد در یک محفظه مربعی بسته، باوجود یک مانع گرم را مورد مطالعه قرار دادند. بررسی جریان سیال و انتقال گرما برای نسبت های مختلف طول مانع به ابعاد محفظه و همچنین با قرار دادن مانع در موقعیت های مختلف، برای اعداد گراشف از  $۱۰^۳$  تا  $۱۰^۵$  انجام شده است. با افزایش عدد گراشف، انتقال گرما برای هر دو موقعیت افقی و عمودی مانع افزایش می یابد. با کاهش نسبت ابعاد مانع نسبت به محفظه، انتقال گرما کاهش یافته و برای موقعیت های عمودی مانع، انتقال گرما نسبت به موقعیت های افقی مقدار بیشتری دارد.

یک محفظه مربعی شکل که داخل آن یه مانع گرم وجود دارد و دیواره پایینی آن دارای گرمای غیر یکنواخت می باشد توسط منشی و همکاران [۶] مورد تحقیق قرار گرفته است. آن ها اثر عدد رایلی را بر آهنگ انتقال گرما بررسی کرده و از نتایج به دست آمده دریافتند که توزیع دما و الگوی جریان در داخل محفظه به عدد رایلی وابسته است. در همه حالت ها دو گردابه با جهت گردش مخالف یکدیگر تشکیل شده است. با بزرگ شدن عدد رایلی آهنگ انتقال گرما از طریق رسانش کاهش می یابد.

تا اینجا مقالاتی که تنها محفظه حاوی خالص بود را بررسی کردیم. در ادامه به بررسی مقالاتی که حاوی محفظه ای پر شده با نانوسیالات مختلف است، می پردازیم.

خاتمی فر و همکاران [۷] به مطالعه عددی انتقال گرما ترکیبی جابجایی و رسانش در محفظه ای حاوی هوا، که توسط مانعی با ضخامت محدود، به دو قسمت تقسیم شده، پرداختند. آنها اثرات

پارامترهای مختلفی از جمله عدد رایلی ( $۱۰^۹ \leq Ra \leq ۱۰^۵$ )، ضخامت مانع ( $۰/۲ \leq W \leq ۰/۵$ ) و موقعیت مانع ( $۰/۷۵ \leq D \leq ۰/۲۵$ ) را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند:

- ۱) با افزایش عدد رایلی، ناسلت متوسط افزایش می یابد.
- ۲) با افزایش ضخامت مانع، ناسلت متوسط کاهش می یابد.
- ۳) تغییر موقعیت مانع، تاثیر ناچیزی بر مقدار ناسلت متوسط خواهد داشت.

بولاهیا و همکاران [۸] به مطالعه عددی انتقال گرما آزاد نانوسیال (آب-Cu) در محفظه ای مربعی، دارای یک مانع سرد پرداختند. آنها اثرات پارامترهای مختلفی از جمله ارتفاع مانع ( $۰/۵ \leq H \leq ۰/۱۲۵$ )، عدد رایلی ( $۱۰^۶ \leq Ra \leq ۱۰^۳$ ) و کسر حجمی نانو ذرات ( $۰ \leq \phi \leq ۰/۲$ ) را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که آهنگ انتقال گرما در داخل محفظه با افزایش ارتفاع مانع سرد، عدد رایلی و کسر حجمی نانو ذرات افزایش می یابد.

محبی و رشیدی [۹] به مطالعه عددی انتقال گرما جابجایی آزاد در یک محفظه L شکل، حاوی نانوسیال (آب- $Al_2O_3$ ) که دارای یک پارتیشن جامد با ضخامت محدود است، پرداختند. آنها اثرات پارامترهای مختلفی از جمله عدد رایلی ( $۱۰^۶ \leq Ra \leq ۱۰^۳$ )، نسبت ابعاد محفظه ( $۰/۶ \leq AR \leq ۰/۲$ )، موقعیت و ارتفاع مانع گرم، کسر حجمی نانو ذرات ( $۰ \leq \phi \leq ۰/۵$ ) و قطر نانوذرات ( $۲۰ \text{ nm} \leq d_p \leq ۸۰ \text{ nm}$ ) را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند:

- ۱) موقعیت عمودی محفظه نسبت به موقعیت افقی آن، منجر به افزایش بیشتر ناسلت متوسط می شود.
- ۲) با افزایش نسبت ابعاد محفظه (AR)، بخصوص در اعداد رایلی پایین، آهنگ انتقال گرما کاهش می یابد.
- ۳) حداکثر انتقال گرما هنگامی در محفظه رخ می دهد که مانع در سمت چپ دیواره و در پایین محفظه قرار بگیرد.
- ۴) با افزایش نسبت (h/H) در محفظه، عدد ناسلت افزایش می یابد. همچنین اختلاف شیب نمودار عدد ناسلت در اعداد رایلی بالا افزایش می یابد.

جدیدا محفظه هایی مطرح می شود که خود به دو یا چند قسمت تقسیم شده و لزوما در تمام ناحیه ها یک نوع سیال یا نانوسیال حضور ندارد. در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است.

سلیمفن دیجیل و ازتپ [۱۰] به مطالعه عددی انتقال گرما ترکیبی جابجایی آزاد و رسانش در یک محفظه مورب، قسمت بندی شده و پر شده از نانوسیالات مختلف (آب - CuO و آب -  $Al_2O_3$ ) در طرف های مختلف مانع بوسیله روش المان محدود پرداختند و اثرات عدد گراشف، زاویه شیب محفظه، نسبت انتقال گرما از مانع به مایع، موقعیت مانع و کسر حجمی نانوذرات جامد در جریان و ویژگی های مایع داخل را در محفظه مورد بررسی قرار دادند. آن ها مشاهده کردند انتقال گرما متوسط با عدد گراشف و کسر حجمی ذرات جامد افزایش می یابد. همچنین با افزودن نانوذراتی با رسانایی گرمایی کم در محفظه سمت راست تاثیر بیشتری جهت افزایش انتقال گرما نسبت به افزودن نانوذراتی با رسانایی گرمایی بالا مشاهده کردند. بنابراین آهنگ انتقال گرما متوسط به میزان ۱۰، ۱۱ و ۱۴ درصد در هر دو محفظه با کسر

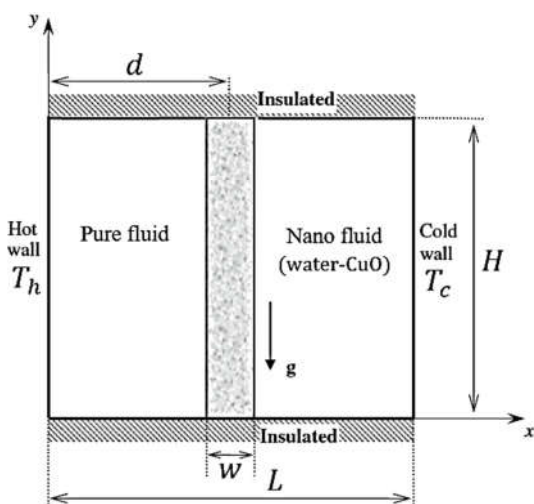
<sup>۱</sup> Oseen

تماس مستقیم باشند.

در تحقیق های پیشین به طور مثال آنچه سلیمفن دیجیتال و ازتپ، خاتمی فر و همکاران انجام داده اند، هر دو طرف دیواره نانو سیال یا سیال خالص بوده، در حالی که در تحقیق پیش رو در یک طرف دیواره نانو سیال و در طرف دیگر سیال خالص داریم. همچنین موارد مورد بررسی همچون تغییر ضخامت دیواره و اثر جنس سیال ها که در این تحقیق مد نظر است در آنچه سلیمفن دیجیتال و ازتپ انجام داده اند مورد توجه نبوده است. همچنین تأثیر جنس مانع در مطالعات بولایا و همکاران و نظری و رضانی مورد بحث قرار نگرفته که به عنوانی پارامتری تأثیر گذار در آهنگ انتقال گرما باید مورد بررسی قرار گیرد. یکی از موارد مهمی که در این مقاله بررسی شده است، اثر جنس سیال خالص بر تغییرات ناسلت موضعی و متوسط روی دیواره های گرم و سرد محفظه و تغییرات آن بر پروفیل دما در محورهای مرکزی محفظه بوده که در تمامی مطالعات قبلی ذکر شده این مورد در نظر گرفته نشده است.

## ۲- بیان مسئله

در این مقاله مطابق شکل ۱ به بررسی انتقال گرما جابجایی و رسانی در محفظه مربعی  $(H=L)$  حاوی نانوسیال و سیال خالص در دو طرف یک دیواره می پردازیم. جریان های داخل محفظه لایه ای، پایا با خواص ثابت و تراکم ناپذیر فرض خواهد شد. دیواره های چپ و راست در دمای گرم  $T_h$  و سرد  $T_c$  و دیواره های بالایی و پایینی عایق است. بررسی ها برای نانوسیال آب-اکسید مس و سیال های خالص آب، هوا و اتیلن گلیکول انجام خواهد شد.



شکل ۱- طرحواره مسأله

هدف از این بررسی، مطالعه اثر جنس سیال خالص بر میدان جریان و دما و آهنگ انتقال گرما است.

## ۳- معادلات حاکم

مدل های متعددی برای بررسی انتقال گرما جابجایی نانوسیال ارائه شده است که در قالب مدل همگن، مدل ناهمگن و مدل پراکندگی

حجمی بالای نانوذرات افزایش یافته و به تبع آن نسبت رسانایی گرمایی از مانع نیز افزایش می یابد.

گاروسی و طالبی [۱۱] به تجزیه و تحلیل دو بعدی انتقال گرما ترکیبی جابجایی و رسانی در محفظه ای مربعی و پر شده با نانوسیالات مختلف (آب - Cu، آب -  $Al_2O_3$  و آب -  $TiO_2$ ) پرداختند.

آنها اثرات پارامترهای مختلفی از جمله عدد رایلی  $(10^4 \leq Ra \leq 10^6)$ ، قطر نانوذرات  $(25 \text{ nm} \leq d_p \leq 145 \text{ nm})$ ، کسر حجمی نانو ذرات جامد  $(0 \leq \phi \leq 0.05)$ ، نسبت رسانایی گرمایی  $(25 \leq K_r \leq 0.2)$  و نحوه جهت-گیری دیواره های رسانا در داخل محفظه را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند:

- در یک رایلی ثابت، با افزودن چندین مانع رسانا در داخل محفظه، آهنگ انتقال گرما کاهش می یابد.
- در اعداد رایلی بالا، نحوه جهت گیری دیواره های رسانا تأثیر زیادی بر آهنگ انتقال گرما محفظه دارد.

حسینی و همکاران [۱۲] به مطالعه عددی انتقال گرما جابجایی آزاد درون محفظه مثلثی قائم پر شده از نانوسیال آب-مس با یک تیغه گرمزا پرداختند. تأثیر تغییر اندازه و موقعیت منبع گرمایی، تغییر کسر حجمی نانوذرات و اعداد رایلی را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به دامنه تغییرات پارامترهای موثر بر آهنگ انتقال گرما در این مسئله، حالت بهینه که بیشترین آهنگ انتقال گرما را تولید می کند، به صورت زیر ارائه می شود:

- آهنگ انتقال گرما برای رایلی های پایین تقریباً در تیغه عمودی و افقی یکسان است. ولی انتقال گرما برای رایلی های بالا در تیغه عمودی غالباً بیشتر است.
- در رایلی های پایین هر چه تیغه به سمت وتر مثلث نزدیک شود انتقال گرما زیاد می شود، اما در رایلی های بالا آهنگ انتقال گرما رفتار یکنواختی را نشان نمی دهد.
- با افزایش طول تیغه گرمزا در همه رایلی ها، انتقال گرما زیاد می شود.

قناعتیان و همکاران [۱۳] به مطالعه انتقال گرمای جابجایی آزاد در محفظه مربعی شکل مورب حاوی نانوسیال، تحت تأثیر میدان مغناطیسی پرداختند. بدین منظور معادلات حاکم توسط الگوریتم SIMPLE حل شدند و تأثیر زاویه محفظه، اعداد رایلی و هارتمن و درصد حجمی نانوذرات بر روی میدان جریان و آهنگ انتقال گرما به دست آمد:

- افزایش عدد رایلی موجب افزایش سرعت جریان درون محفظه، بواسطه افزایش اختلاف دمای صفحات گرم و سرد می شود. همچنین این افزایش موجب بهبود انتقال گرما از محفظه شده و باعث افزایش ناسلت متوسط می شود.
- به ازای تمامی رایلی ها، حداقل ناسلت متوسط دیواره سرد، در زاویه ۴۵ درجه رخ می دهد.

پارتیشن یا مانع عمودی مورد استفاده در این مقاله جهت کنترل انتقال گرما (کاهش یا افزایش انتقال گرما) در محفظه مورد استفاده قرار می گیرد. کاربرد دقیق مسئله را می توان در سیستم های الکترونیکی بررسی کرد، که امکان استفاده از نانوسیال در تمامی بخش های دستگاه میسر نیست. مثلاً همه قطعات نمی توانند با نانوسیال

جدول ۲- معادلات بدون بعد حاکم بر مسأله (نانوسیال)

معادله	$S_\varphi$	$\Gamma$	$\varphi$
پیوستگی (۱۱)	0	0	1
مومنوم X (۱۲)	$-\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial X}$	$\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f}$	U
مومنوم Y (۱۳)	$-\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Gr_f Pr_f^2 \theta$	$\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f}$	V
انرژی (۱۴)	0	$\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f}$	$\theta$

علاوه بر این متغیرها اعداد بدون بعد گراشف و پرانتل به صورت

زیر تعریف می‌شوند:

$$Gr = \frac{g\beta_f(T_h - T_c)L^3}{\nu_f^2}, Pr_f = \frac{\nu_f}{\alpha_f} \quad (15)$$

با استفاده از پارامترهای بدون بعد فوق معادلات حاکم بدون بعد

بدست آمده که می‌توان آنها را به فرم کلی زیر نوشت:

$$\frac{\partial(U\varphi)}{\partial X} + \frac{\partial(V\varphi)}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial Y} \right) + S_\varphi \quad (16)$$

که پارامترهای  $\varphi$ ،  $\Gamma$  و  $S_\varphi$  برای معادلات پیوستگی، مومنوم X و Y و انرژی برای سیال خالص در جدول ۱ و برای نانوسیال در جدول ۲ آمده است.

شرایط مرزی برای حل معادلات فوق به صورت بدون بعد عبارتند

از:

$$\begin{aligned} Y=0, 0 < X < 1 & \quad U=0, V=0, \frac{\partial\theta}{\partial Y} = 0 \\ Y=1, 0 < X < 1 & \quad U=0, V=0, \frac{\partial\theta}{\partial Y} = 0 \\ X=0, 0 < Y < 1 & \quad U=0, V=0, \theta = 1 \\ X=1, 0 < Y < 1 & \quad U=0, V=0, \theta = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

عدد ناسلت پارامتر بی بعدی است که نشانگر میزان انتقال گرما است. در اینجا ناسلت موضعی و متوسط را روی دیواره‌های گرم ( $h$ ) و سرد ( $c$ ) محفظه تعریف می‌کنیم که این پارامتر در محفظه حاوی سیال خالص و نانوسیال به صورت زیر می‌باشد:

$$Nu_h = - \left( \frac{\partial\theta}{\partial X} \right) \quad (18)$$

$$Nu_c = - \frac{k_{nf}}{k_f} \left( \frac{\partial\theta}{\partial X} \right) \quad (19)$$

ناسلت متوسط در امتداد دیواره گرم و سرد از طریق زیر بدست می‌آید:

$$\overline{Nu} = \int_0^1 Nu(Y) dY \quad (20)$$

دیواره های افقی محفظه آدیاباتیک در نظر گرفته شده اند لذا بایستی شار گرمایی عبوری از محفظه سرد و گرم برابر باشد بنابراین با نوشتن معادله بقاء انرژی در دیواره های گرم و سرد داریم:

$$-k_p \int_0^1 Nu(Y_h) dS = -k_{nf} \int_0^1 Nu(Y_c) dS \quad (21)$$

بنابراین داریم:

$$k_p \overline{Nu}_h = k_{nf} \overline{Nu}_c \quad (22)$$

#### ۴- محاسبه خواص نانوسیال ها

همان‌گونه که از معادلات حاکم بر مساله دیده می‌شود، برای حل معادلات نیاز به خواص ترموفیزیکی نانوسیال است. چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت گرمایی و پخشندگی گرمایی نانوسیال به کمک خواص سیال و نانوذرات از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۴].

قابل تقسیم است. در مدل همگن، که در این پروژه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرض می‌شود که نانوسیال مانند یک سیال معمولی رفتار می‌کند و تمام معادلات معمول حاکم بر جریان سیال شامل بقای جرم، مومنوم و انرژی با در نظر گرفتن خواص معادل برای نانوسیال استفاده می‌شود. در این مسئله انتقال گرما جابجایی آزاد و رسانش در دستگاه دکارتی دو بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. جریان لایه ای و در حالت دائم است. روی دیواره ها هیچ گونه لغزشی وجود ندارد. تولید یا ذخیره انرژی وجود ندارد. تمامی خواص ترموفیزیکی، به جز چگالی که براساس تقریب بوزینسک مدل می‌شود، ثابت در نظر گرفته شده اند. با این فرضیات، اگر سیال خالص، آب، نانوسیال و مانع را به ترتیب با اندیس های  $p$ ،  $f$ ،  $nf$  و  $w$  نمایش دهیم، معادلات حاکم بر مسئله عبارتند از:

معادله پیوستگی:

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

معادله مومنوم در جهت x:

$$\rho_{p,nf} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{p,nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

معادله مومنوم در جهت y:

$$\rho_{p,nf} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{p,nf} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho\beta)_{p,nf} g(T - T_c) \quad (3)$$

معادله انرژی:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{p,nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

مانع:

در مانع سرعت ها برابر صفر است بنابراین معادله انرژی عبارتست

از:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_w \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (5)$$

با بی بعدسازی معادلات، متغیرهای حاکم در قالب بدون بعد ظاهر می‌شوند که تطبیق آنها بر طبیعت جریان آسان‌تر بوده و گستره وسیعی از مواد و حالت‌های مختلف جریان را می‌توان تنها در قالب یک مسأله کلی بررسی کرد و آن‌ها را تطبیق داد.

از متغیرهای بی بعد زیر برای بی بعدسازی معادلات اصلی استفاده

می‌شود:

$$U = \frac{uL}{\alpha_f}, V = \frac{vL}{\alpha_f}, X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, P = \frac{pL^2}{\rho_f \alpha_f^2} \quad (6)$$

جدول ۱- معادلات بدون بعد حاکم بر مسأله (سیال خالص)

معادله	$S_\varphi$	$\Gamma$	$\varphi$
پیوستگی (۷)	0	0	1
مومنوم X (۸)	$-\frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{\partial P}{\partial X}$	$\frac{\mu_p}{\rho_p \alpha_f}$	U
مومنوم Y (۹)	$-\frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{(\rho\beta)_p}{\rho_p \beta_f} Gr_f Pr_f^2 \theta$	$\frac{\mu_p}{\rho_p \alpha_f}$	V
انرژی (۱۰)	0	$\frac{\alpha_p}{\alpha_f}$	$\theta$

---	$1/63 \times 10^{-10}$	$1/18 \times 10^{-10}$	$1/0.03 \times 10^{-10}$	$\mu \text{ (kg m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)}$
---	۱۵۱	۰/۷۰۷	۶/۲	$Pr$

### ۵- روش عددی

در این مقاله برای جبری کردن معادلات دیفرانسیل از روش تفاضل محدود مبتنی بر حجم معیار استفاده شده است. در این روش، میدان حل به تعدادی حجم کنترل به گونه‌ای تقسیم می‌شود که هر گره را یک حجم کنترل احاطه کرده و ضمناً حجم‌های کنترل دارای حجم‌های مشترک با یکدیگر نباشند. سپس معادله دیفرانسیل روی هر یک از حجم کنترل‌ها انتگرال گرفته می‌شود. برای انتگرال گیری مشتقات احتیاج به حدس یک پروفیل می‌باشد، این پروفیل‌ها به صورت پله‌ای، خطی قطعه به قطعه و منحنی‌های درجه دو و سه انتخاب می‌شوند که در این مقاله پروفیل خطی قطعه به قطعه انتخاب شده است. در نتیجه، معادله گسسته که مقادیر  $\varphi$  را برای تعدادی از گره‌ها ارائه می‌دهد به دست می‌آید. معادله گسسته بدست آمده، اصل بقا  $\varphi$  را برای حجم کنترل محدودی بیان می‌دارد، درست همانگونه که معادله دیفرانسیل، آن را برای یک حجم کنترل بی نهایت کوچک بیان می‌کند.

به این ترتیب در ابتدا باید شبکه لازم در میدان حل انتخاب شود. عموماً به دو روش می‌توان دامنه حل را شبکه‌بندی کرد و حجم معیارهای لازم را ایجاد نمود. در روش اول، نقاط شبکه را تعیین کرده و وجوه حجم معیار را در وسط فاصله بین هر دو گره متوالی قرار می‌دهند. روش دوم، تقسیم دامنه حل به حجم معیارهای مورد نظر و سپس قرار دادن نقاط شبکه در مرکز حجم معیارهاست. در این مقاله از روش دوم برای شبکه بندی استفاده شده است. در این مقاله از معیار همگرایی زیر استفاده شده است:

$$\frac{\sum_i^M \sum_j^N |\varphi_{i,j}^{k+1} - \varphi_{i,j}^k|}{\sum_i^M \sum_j^N |\varphi_{i,j}^{k+1}|} \leq 10^{-6} \quad (34)$$

که  $M$  و  $N$  تعداد گره‌های شبکه در جهت  $x$  و  $y$  بوده و  $\varphi$  معرف پارامترهای وابسته بی بعدی است که حل می‌شوند و  $k$  تعداد تکرار است.

### ۶- نتایج

#### ۶-۱- بررسی استقلال حل از شبکه

قدم بعدی قبل از شروع حل مسئله حاضر این است که شبکه بندی مناسب را جهت انجام محاسبات کامپیوتری انتخاب کنیم. برای انتخاب تعداد نقاط شبکه مناسب برای محافظه حاوی نانوسیال (آب-اکسید مس) و سیال خالص هوا، جدا شده با یک مانع در اعداد گراف ۱۰<sup>۲</sup> و ۱۰<sup>۶</sup> به ازای مقادیر ثابت  $W = 0.1, D = 0.5, \phi = 0.03, K = 10$  اجراهایی انجام گرفت. به عنوان نمونه در شکل ۲ برای سیال خالص هوا مقدار عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای شبکه‌های ۲۰×۲۰، ۴۰×۴۰، ۶۰×۶۰، ۸۰×۸۰، ۱۰۰×۱۰۰، ۱۲۰×۱۲۰ و ۱۴۰×۱۴۰ دیده می‌شود. براین اساس شبکه ۱۰۰×۱۰۰، با توجه به دقت قابل قبول نتایج از یک سو و افزایش زمان حل برنامه کامپیوتری با افزایش تعداد گره‌های شبکه از سوی دیگر برای حل مسأله انتخاب شده است.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (23)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (24)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (25)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (26)$$

$\phi$  کسر حجمی نانوذرات بوده و زیرنویس‌های  $f, s$  و  $nf$  به ترتیب اشاره به خواص سیال پایه، نانوذرات و نانوسیال دارد. برای رسانایی گرمایی و لزجت نانوسیال از مدل کو-کلینستور استفاده کرده‌ایم که در ادامه به توضیح این مدل می‌پردازیم.

کو و کلینستور [۱۵] در سال ۲۰۰۴ برای رسانایی گرمایی و لزجت نانوسیالات مدلی تئوری ارائه کرده اند که در آن اثر اندازه ذره، کسر حجمی ذره، وابستگی دما و خواص سیال پایه را با در نظر گرفتن حرکت براونی نانوذرات در نظر گرفته شده است.

$$k_{nf} = k_{st} + k_{browian} \quad (27)$$

$$k_{st} = k_f \left[ \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \right] \quad (28)$$

$$k_{browian} = 5 \times 10^4 \phi \beta \rho_f (C_p)_f \sqrt{\frac{K_B T}{2\rho_s d_s}} f(T, \phi) \quad (29)$$

لزجت دینامیکی موثر نانوسیال نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{nf} = \mu_{st} + \mu_{browian} \quad (30)$$

$$\mu_{st} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (31)$$

$$\mu_{browian} = \frac{k_{browian}}{k_f} \times \frac{\mu_f}{Pr_f} = 5 \times 10^4 \phi \beta \rho_f \sqrt{\frac{K_B T}{2\rho_s d_s}} f(T, \phi) \quad (32)$$

که مقادیر  $\beta, f(T, \phi)$  و  $K_B$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \beta &= 0.0137(100\phi)^{-0.8229}, \phi < 1\% \\ \beta &= 0.0011(100\phi)^{-0.7272}, \phi > 1\% \\ f(T, \phi) &= (-6.04\phi + 0.4705)T + (1772.3\phi - 134.63) \\ &, 1\% \leq \phi \leq 4\% \& 300K \leq T \leq 325K \\ K_B &= 1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K} \end{aligned} \quad (33)$$

در این رابطه نظری، علاوه بر در نظر گرفتن درصد حجمی و خواص فیزیکی سیال پایه، اثر دما نیز در نظر گرفته شده است. در این مدل  $\beta$  برای نانوسیال آب-اکسید مس داده شده است. همچنین رابطه  $f$  برای محدوده دمایی  $300K \leq T \leq 325K$  و محدوده کسر حجمی ۱٪ تا ۴٪ معتبر می‌باشد. خواصی که در محاسبات ثابت فرض شدند به این صورت ارائه می‌شوند: طول و ارتفاع محافظه  $L = 5\text{cm}$ ، دمای دیوار سرد  $T_c = 27^\circ\text{C}(300\text{K})$ ، قطر نانوذرات و  $d_s = 40\text{nm}$  و خواص ترموفیزیکی آب خالص، هوا، اتیلن گلیکول و نانوذرات اکسید مس (CuO) در جدول ۳ آمده است.

#### جدول ۳- خواص ترموفیزیکی آب خالص، هوا، اتیلن گلیکول و

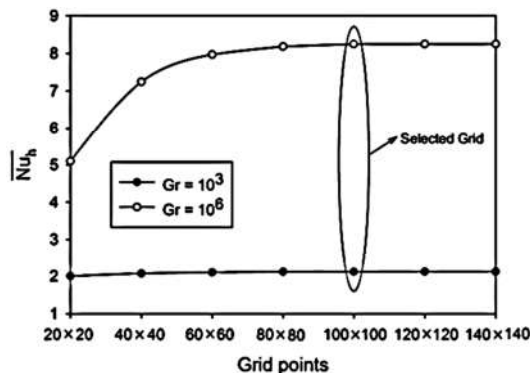
نانوذرات اکسید مس [۱۶-۱۹]

خواص فیزیکی	آب	هوا	اتیلن گلیکول	نانوذرات اکسیدمس
$\rho \text{ (kgm}^{-3}\text{)}$	۹۹۷/۱	۱/۱۶۱۴	۱۱۰۹	۶۳۲۰
$C_p \text{ (Jm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$	۴۱۷۹	۱۰۰۷	۲۴۰۰	۵۲۵/۶
$k \text{ (Wkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$	۰/۶۱۳	۰/۰۲۶۳	۰/۲۶	۷۶/۵
$\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$	۲/۱×۱۰ <sup>-۴</sup>	۳/۳۳×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶/۵×۱۰ <sup>-۴</sup>	۱/۸×۱۰ <sup>-۵</sup>

### ۳-۶- بررسی اثر جنس سیال خالص

پس از اطمینان از عملکرد برنامه و انتخاب شبکه حل مناسب، در ادامه به بررسی نتایج کار حاصل می پردازیم. هدف اصلی در این مقاله بررسی اثر جنس سیال خالص بر آهنگ انتقال گرما از محفظه مربعی که توسط مانعی به مناطق نانوسیال (آب-اکسید مس) و سیال خالص (آب، هوا و اتیلن گلیکول) تقسیم شده است. محاسبات برای  $D = 0.5, W = 0.1, K = 10, \phi = 0.03$  و مقادیر مختلف اعداد گراش انجام شد. شکل ۳ خطوط جریان در اعداد گراش مورد نظر به تفکیک جنس سیال خالص آورده شده است. همانطور که از خطوط جریان مشهود است، در  $Gr = 10^3$  در اطراف مانع، گردابه ها به صورت موازی نسبت به مانع عمودی کشیده شده اند. در  $Gr = 10^3$  چون لزجت و رسانایی گرمایی هوا از آب خیلی کمتر است، حتی با حاکم بودن انتقال گرمای رسانشی در محفظه و ناچیز بودن انتقال گرما جابجایی در کل محفظه، قدرت جریان در اعداد گراش پایین در محفظه سمت راست کمتر از محفظه سمت چپ است، ولی در حالت کلی در هر دو طرف مانع شاهد ایجاد گردابه های بسیار ضعیفی هستیم. این در حالی است که در محفظه حاوی اتیلن گلیکول-نانوسیال، لزجت اتیلن گلیکول بیشتر از نانوسیال بوده، ولی اختلاف زیادی بین رسانایی گرمایی آن با آب خالص شاهد نیستیم. بنابراین، در اعداد گراش پایین، قدرت جریان در محفظه حاوی نانوسیال کمی بیشتر از محفظه حاوی اتیلن گلیکول است. در محفظه حاوی نانوسیال-آب خالص، در محفظه سمت راست، به دلیل وجود نانوذرات، رسانایی گرمایی و لزجت آن کمی از آب خالص بیشتر است لذا قدرت جریان در محفظه حاوی آب خالص از محفظه حاوی نانوسیال بیشتر است. در همه حالات با افزایش عدد گراش، قدر مطلق حداکثر تابع جریان افزایش می یابد. شواهد نشان می دهد که قدرت جریان گردابه در اعداد گراش بالا به دلیل سلطه انتقال گرما جابجایی بر رسانشی در محفظه حاوی سیال خالصی با لزجت پایین تر، بالاتر است. همچنین در دمایی بالا در سمت هوا و غلبه شدید انتقال گرما جابجایی بر رسانشی، مرکز گردابه علاوه بر خارج شدن از حالت بیضوی به سمت بالا و پایین محفظه نقل مکان می کند و در سمت نانوسیال نیز مرکز گردابه به سمت بالای محفظه حرکت کرده است. در محفظه حاوی اتیلن گلیکول-نانوسیال به دلیل بالا بودن لزجت اتیلن گلیکول نسبت به نانوسیال، قدرت جریان گردابه ها در محفظه حاوی نانوسیال از محفظه حاوی اتیلن گلیکول بیشتر است.

در شکل ۴ خطوط همدم در اعداد گراش مورد نظر به تفکیک جنس سیال خالص آورده شده است. در محفظه حاوی هوا-نانوسیال در  $Gr = 10^3$  تراکم خطوط همدم در ناحیه نانوسیال به دلیل حمل و نقل ضعیف گرما یا بالا بودن رسانایی گرمایی نانوسیال نسبت به سیال خالص بالاخص هوا در این محفظه بسیار کم است. همچنین به دلیل رسانایی کم هوا و حضور مانع دارای رسانایی گرمایی و بالا بودن رسانایی آب نسبت به هوا، مانع مانند یک پرده جهت حمل و انتقال گرما عمل می کند. در محفظه حاوی اتیلن گلیکول-نانوسیال به دلیل بالاتر بودن رسانایی گرمایی نانوسیال نسبت به اتیلن گلیکول، خطوط همدم در محفظه حاوی اتیلن گلیکول متراکم تر از محفظه حاوی نانوسیال است. با افزایش عدد گراش ( $Gr = 10^6$ ) در همه حالات



شکل ۲- تاثیر تعداد نقاط شبکه بر ناسلت متوسط برای محفظه حاوی نانوسیال- هوا ( $D = 0.5, \phi = 0.03, W = 0.1, K = 10$ )

### ۳-۶- بررسی اعتبار کد کامپیوتری

در حالت اول محفظه ای با جابجایی آزاد که از هوا پر شده است و دیواره های جانبی آن دارای اختلاف دما و هر دو دیوار افقی آن عایق است، در نظر گرفته می شود. در جدول ۴ نتایج حاصل از کد حاضر با نتایج دیویس [۲۰]، باراکس و میتسولیس [۲۱]، پریکلیوس و مارکاتس [۲۲] ارائه و مقایسه شده است.

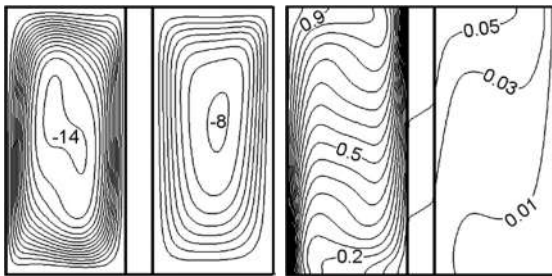
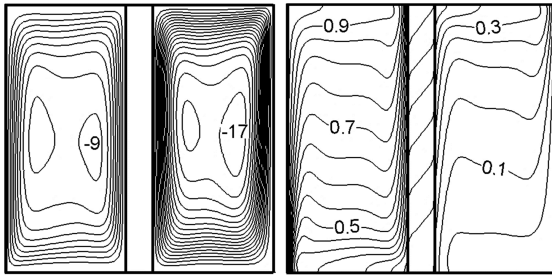
جدول ۴- اعتبار سنجی برنامه حاضر با جابجایی آزاد در محفظه ای پر از هوا

Ra	Nu <sub>m</sub>				درصد خطا با دیویس
	دیویس	باراکس و میتسولیس	پریکلیوس و مارکاتس	کار حاضر	
۱۰ <sup>۳</sup>	۱/۱۱۸	۱/۱۱۴	۱/۱۰۸	۱/۱۱۷	-۰/۰۹
۱۰ <sup>۴</sup>	۲/۲۴۳	۲/۲۴۵	۲/۲۰۱	۲/۲۴۸	۰/۲۲
۱۰ <sup>۵</sup>	۴/۵۱۹	۴/۵۱۰	۴/۴۳۰	۴/۴۵۶	-۱/۳۹
۱۰ <sup>۶</sup>	۸/۷۹۹	۸/۸۰۶	۸/۷۵۴	۸/۹۷۸	۲/۰۳

در مرحله دوم مقادیر ناسلت متوسط دیواره گرم محفظه ای شیبدار و قسمت بندی شده با نانوسیالات مختلف (سمت راست و چپ پارتیشن، نانوذرات آب-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و آب-CuO با کسر حجمی نانوذرات  $\phi_1$  و  $\phi_2$ ) مورد مقایسه قرار گرفت. در جدول ۵ نتایج حاصل از کد حاضر با نتایج سلیمف دیجیل و ازتپ [۱۰] مقایسه شده است. اختلاف ناچیز نتایج در دو جدول ۴ و ۵ بیانگر عملکرد مناسب برنامه کامپیوتری حاضر است.

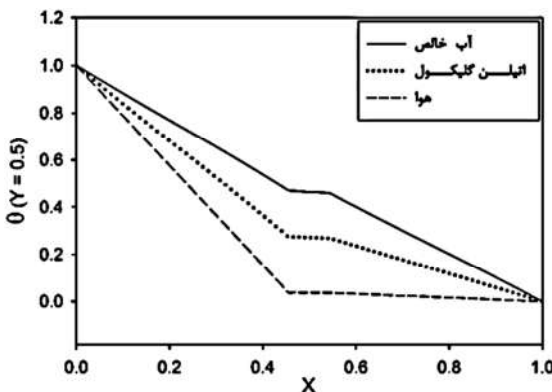
جدول ۵- عدد ناسلت متوسط دیواره گرم در محفظه ای با نانوسیالات مختلف ( $D = 0.5, W = 0.1, K = 2.3, \omega = 0^\circ$ )

Gr	Nu <sub>m</sub>				درصد خطا
	$\phi_1$	$\phi_2$	سلیمف دیجیل و ازتپ	کار حاضر	
۱۰ <sup>۵</sup>	۰/۰۱	۰/۰۳	۳/۵۳۶۸	۳/۵۱۷۵	-۰/۵۴
	۰/۰۲	۰/۰۳	۳/۴۷۹۷	۳/۵۳۲۸	۱/۵۲
	۰/۰۳	۰/۰۳	۳/۵۳۶۸	۳/۵۴۰۳	۰/۱۰
	۰/۰۴	۰/۰۳	۳/۵۹۱۶	۳/۵۴۴۰	-۱/۳۲



شکل ۴- خطوط جریان و همدمها به ازای  $Gr = 10^6$   
 $(D = 0.5, \phi = 0.03, W = 0.1, K = 10)$   
 (الف) آب (ب) اتیلن گلیکول (ج) هوا

در شکل های ۵ و ۶ اثر جنس سیال خالص بر تغییرات پروفیل دما در محور افقی مرکزی در  $Gr = 10^3$  و  $Gr = 10^6$  نشان داده شده است. به دلیل پایین بودن رسانایی گرمایی سیال خالص سمت چپ نسبت به نانوسیال تراکم خطوط همدمها در سیال خالص بیشتر است. نسبت رسانایی گرمایی آب به هوا و آب نسبت به اتیلن گلیکول به ترتیب برابر  $22/5$  و  $2/26$  است، در محفظه سمت چپ شیب پروفیل تغییرات دما در هوا بیشتر از اتیلن گلیکول و اتیلن گلیکول بیشتر از آب خالص است. ولی در محفظه سمت راست چون سیال پایه نانوسیال، آب است، قضیه برعکس شده و شیب نمودار دما در آب خالص بیشتر از اتیلن گلیکول و اتیلن گلیکول بیشتر از هواست.



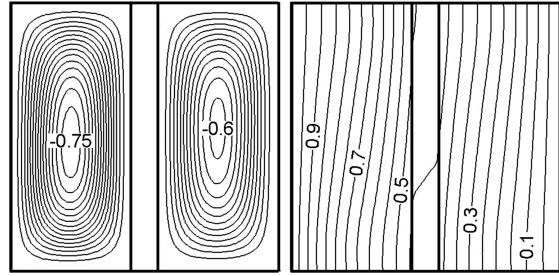
شکل ۵- اثر جنس سیال خالص بر تغییرات پروفیل دما در محور افقی مرکزی  $Gr = 10^3$   $(D = 0.5, \phi = 0.03, W = 0.1, K = 10)$

خطوط هم دما از حالت ساختار موازی نسبت به دیواره های محفظه خارج شده و به دلیل سرعت بالای بوجود آمده در محفظه منحرف می شوند. هر چه اختلاف رسانایی گرمایی دوسیال در محفظه بیشتر باشد، تراکم خطوط همدمها در یک طرف محفظه بیشتر و در طرف دیگر کمتر خواهد بود.

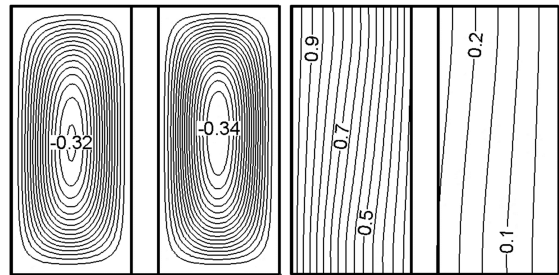
خطوط جریان

خطوط همدمها

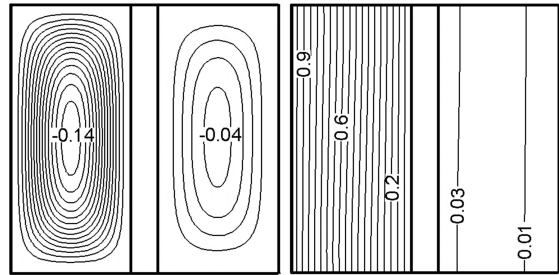
(الف)



(ب)



(ج)

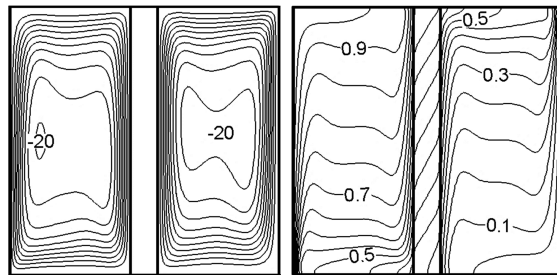


شکل ۴- خطوط جریان و همدمها به ازای  $Gr = 10^3$   
 $(D = 0.5, \phi = 0.03, W = 0.1, K = 10)$   
 (الف) آب (ب) اتیلن گلیکول (ج) هوا

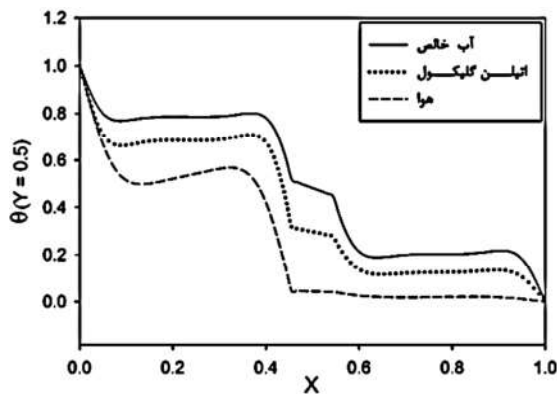
خطوط جریان

خطوط همدمها

(الف)



(ب)



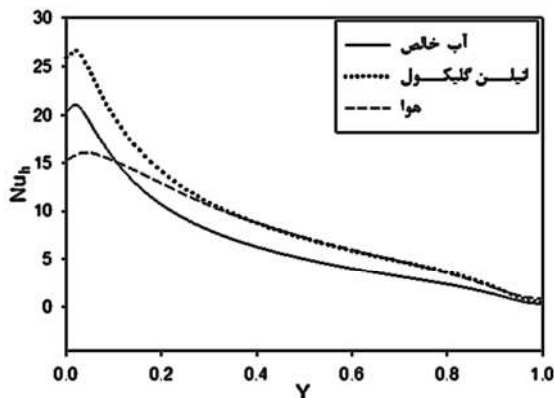
شکل ۶- اثر جنس سیال خالص بر تغییرات پروفیل دما در محور افقی مرکزی ( $D = 0.5, \phi = 0.03, W = 0.1, K = 10Gr = 10^6$ )

در شکل های ۷ و ۸ اثر جنس سیال خالص بر تغییرات ناسلت موضعی روی دیواره گرم و سرد به ازای مقادیر مختلف عدد گراشاف آورده شده است.

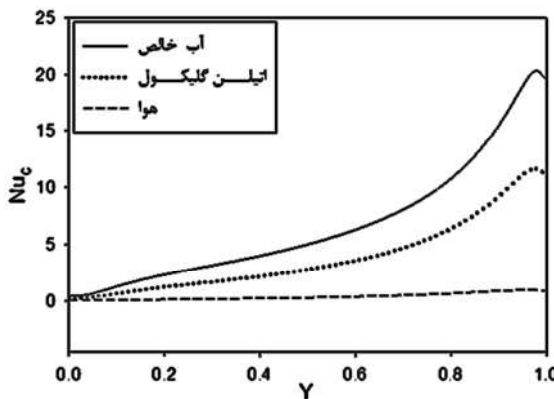
گلیکول و اتیلن گلیکول بیشتر از آب خالص است. بالعکس ناسلت موضعی روی دیواره سرد در حالی که سیال خالص، هوا باشد کمتر از اتیلن گلیکول و اتیلن گلیکول کمتر از آب خالص است. زیرا در این عدد گراشاف به دلیل حاکم بودن انتقال گرما رسانشی و پایین بودن نسبت رسانایی گرمایی هوا به آب خالص ( $k^a/k_f = 1/22.5$ ) و اتیلن گلیکول نسبت به آب خالص ( $k^e/k_f = 1/2.36$ )، در همه حالات تراکم خطوط همدم در محفظه سمت چپ بیشتر از محفظه سمت راست است.

طبق شکل ۸ در  $Gr = 10^6$  مومنوم سیال بیشتر شده، لذا جمله جابجایی در معادله انرژی موثرتر بوده و باعث حاکم شدن انتقال گرما جابجایی بر رسانشی می شود. بنابراین، ناسلت موضعی در اطراف دیواره گرم در حالی که سیال خالص اتیلن گلیکول باشد، بیشتر از آب خالص و آب خالص بیشتر از هوا خواهد بود. در اطراف دیواره سرد چون جنس سیال خالص همان سیال پایه نانوسیال (آب) است، همان نتایج قبلی حاصل شده با این تفاوت که شیب تغییرات ناسلت موضعی در اطراف دیواره ها بیشتر می شود.

(الف)



(ب)

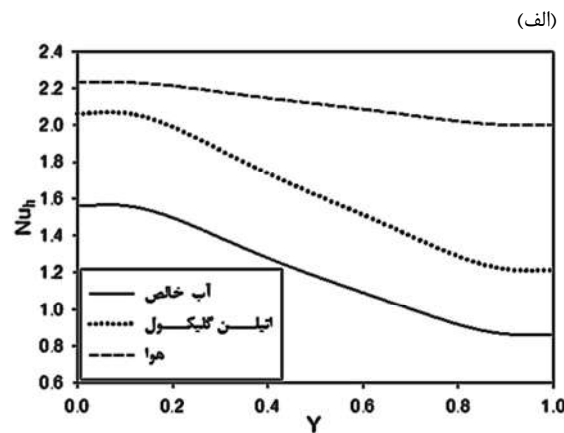


شکل ۸- اثر جنس سیال خالص بر تغییرات ناسلت موضعی در

$$(D = 0.5, \phi = 0.03, W = 0.1, K = 10) Gr = 10^6$$

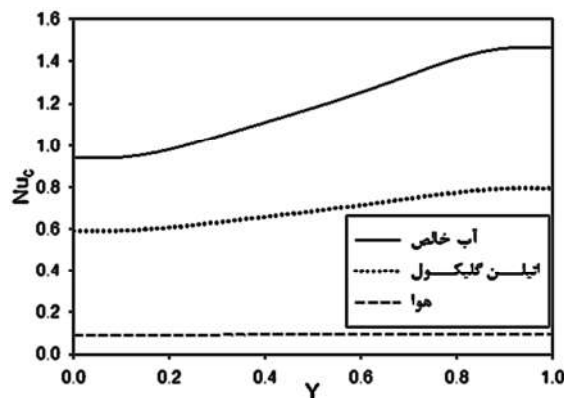
(الف) دیواره گرم (ب) دیواره سرد

جدول ۶ اثر جنس سیال خالص بر تغییرات ناسلت متوسط روی دیواره های گرم و سرد محفظه را به ازای مقادیر مختلف عدد  $Gr$  نشان می دهد. طبق این جدول علت اختلاف ناسلت متوسط دیواره های گرم



(الف)

(ب)



شکل ۷- اثر جنس سیال خالص بر تغییرات ناسلت موضعی در

$$(D = 0.5, \phi = 0.03, W = 0.1, K = 10) Gr = 10^3$$

(الف) دیواره گرم (ب) دیواره سرد

همانطور که در شکل ۷ دیده می شود در  $Gr = 10^3$  ناسلت موضعی روی دیواره گرم در حالی که سیال خالص، هوا باشد بیشتر از اتیلن-



نانوسیال، به دلیل بالاتر بودن رسانایی گرمایی نانوسیال نسبت به اتیلن- گلیکول، خطوط همدم در محفظه حاوی اتیلن گلیکول متراکم تر از محفظه حاوی نانوسیال است.

۵- در اعداد گرافش پایین به دلیل غلبه انتقال گرمای رسانی بر جابجایی، آهنگ انتقال گرما روی دیواره گرم در حالی که سیال خالص، هوا باشد، بیشتر از اتیلن گلیکول و اتیلن گلیکول بیشتر از آب است. در اعداد گرافش بالا به دلیل غلبه انتقال گرما جابجایی بر رسانی، آهنگ انتقال گرما روی دیواره گرم در حالی که سیال خالص، اتیلن گلیکول باشد، بیشتر از هوا و هوا بیشتر از آب است. این در حالی است که در اطراف دیواره سرد چون جنس سیال خالص همان سیال پایه نانوسیال (آب) است، در همه اعداد گرافش، آهنگ انتقال گرما روی دیواره سرد در حالی که سیال خالص، آب باشد، بیشتر از اتیلن گلیکول و اتیلن- گلیکول بیشتر از هوا است.

### ۸- فهرست علائم

$C_p$	گرمای ویژه ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$d_s$	قطر نانوذرات (nm)
$d$	اندازه مانع (m)
$D$	موقعیت بدون بعد مانع (d/L)
$g$	شتاب جاذبه زمین ( $\text{m}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$Gr$	عدد گرافش
$h$	ارتفاع مانع (m)
$H$	ارتفاع بدون بعد مانع (h/L)
$k$	رسانایی گرمایی ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$K$	نسبت رسانایی گرمایی مانع به آب ( $k_s/k_f$ )
$L$	طول و ارتفاع محفظه (m)
$Nu$	عدد ناسلت
$p$	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$P$	فشار بدون بعد ( $\rho L^2/\rho_f \alpha_f^2$ )
$Pr$	عدد پرانتل
$Ra$	عدد رایلی
$S_\phi$	جمله چشمه
$T$	دما (K)
$u, v$	مولفه‌های سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )
$U, V$	مولفه‌های سرعت ( $\text{uL}/\alpha_f, \text{vL}/\alpha_f$ )
$w$	ضخامت مانع (m)
$W$	ضخامت بدون بعد مانع (w/L)
$x, y$	مولفه‌های مختصات (m)
$X, Y$	مولفه‌های بدون بعد مختصات (x/L, y/L)

### علائم یونانی

$\alpha$	پخشندگی گرمایی ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )
$\beta$	ضریب انبساط گرمایی ( $\text{K}^{-1}$ )
$\Gamma$	جمله پخش
$\theta$	دمای بدون بعد ( $(T - T_i)/(T_h - T_i)$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\nu$	لزجت سینماتیکی ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )

و سرد محفظه به ضریب رسانایی گرمایی متفاوت نانوسیال و سیال خالص بستگی دارد. طبق رابطه  $\overline{Nu}_h = \frac{k_{nf}}{k_p} \overline{Nu}_c$  هنگامی که سیال خالص، سیال پایه نانوسیال (آب) باشد، مقدار بسیار کمی از  $k_f$  بزرگتر است. لذا  $\overline{Nu}_h$  نیز کمی بزرگتر از  $\overline{Nu}_c$  است. همچنین هنگامی که سیال خالص، هوا و اتیلن گلیکول باشد، رابطه بین ناسلت متوسط دیواره های گرم و سرد محفظه نیز به ترتیب برابر  $\frac{\overline{Nu}_h}{\overline{Nu}_c} = \frac{k_{nf}}{k_a} = 22.5$  و  $\frac{\overline{Nu}_h}{\overline{Nu}_c} = \frac{k_{nf}}{k_e} = 2.36$  است.

جدول ۶- اثر جنس سیال خالص بر تغییرات ناسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف  $Gr (D = 0.5, \phi = 0.03, W = 0.1, K = 10)$

$Gr$	جنس سیال خالص	$\overline{Nu}_h$	$\overline{Nu}_c$
$10^3$	آب	۱/۱۹۹۴	۱/۱۹۲۳
	اتیلن گلیکول هوا	۱/۶۳۴۲ ۲/۱۱۷۵	۰/۶۸۹۱ ۰/۰۹۳۵
$10^4$	آب	۱/۹۲۷۴	۱/۹۱۶۲
	اتیلن گلیکول هوا	۲/۵۲۱۴ ۲/۳۰۱۵	۱/۰۶۳۲ ۰/۱۰۱۷
$10^5$	آب	۳/۷۰۴۵	۳/۶۸۳۳
	اتیلن گلیکول هوا	۴/۹۲۸۵ ۴/۳۷۲۸	۲/۰۷۸۴ ۰/۱۹۳۲
$10^6$	آب	۶/۷۰۶۱	۶/۶۷۰۷
	اتیلن گلیکول هوا	۹/۰۷۷۳ ۸/۲۴۵۶	۳/۸۲۹۱ ۰/۳۶۴۳

### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله انتقال گرما ترکیبی جابجایی آزاد و رسانی درون محفظه مربعی شکل پر از نانوسیال آب-اکسید مس و سیال خالص جدا شده با یک مانع، بررسی شد. معادلات حاکم توسط الگوریتم SIMPLE حل شدند. تأثیر جنس سیال خالص و اعداد گرافش مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی می توان نتایج را به صورت زیر جمع بندی کرد:

- ۱- مانع علاوه بر تقسیم محفظه به دو بخش، به کنترل انتقال گرما و جریان با استفاده از مواد مختلف می پردازد.
- ۲- برای کلیه سیالات خالص در اعداد گرافش کوچک انتقال گرما غالب از نوع رسانی می باشد و با افزایش عدد گرافش مکانیزم غالب انتقال گرما از نوع جابجایی خواهد شد. در این شرایط آهنگ انتقال گرما نیز افزایش می یابد
- ۳- در محفظه حاوی هوا- نانوسیال به دلیل بالا بودن لزجت نانوسیال نسبت به هوا، قدرت جریان گردابه ها در محفظه حاوی هوا خیلی بیشتر از محفظه حاوی نانوسیال است. همچنین در محفظه حاوی اتیلن گلیکول- نانوسیال به دلیل بالا بودن لزجت اتیلن گلیکول نسبت به نانوسیال، قدرت جریان گردابه ها در محفظه حاوی نانوسیال بیشتر از محفظه حاوی اتیلن گلیکول است.
- ۴- در محفظه حاوی هوا- نانوسیال، تراکم خطوط هم دما در ناحیه نانوسیال به دلیل حمل و نقل ضعیف گرما و بالا بودن رسانایی گرمایی نانوسیال نسبت به هوا، بسیار کم است. در محفظه حاوی اتیلن گلیکول-

[۱۲] حسینی م، قاسمی ب و رئیسی ا، "جایجایی آزاد نانوسیال در یک محفظه مثلثی با تیغه گرمزا" مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی: ۷۹، جلد ۴۷، شماره: ۲، ص ۵۹-۶۷، تابستان ۱۳۹۶.

[۱۳] قناعتیان ع، قاسمی ب و رئیسی ا، "جایجایی آزاد در یک محفظه مربعی مورب حاوی نانوسیال تحت میدان مغناطیسی" مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی: ۷۶، جلد ۴۶، شماره: ۳، ص ۱۵۵-۱۶۵، پاییز ۱۳۹۵.

[14] Mazrouei S., Mahmoodi M., Hashemi M., Effect of nanofluid variable properties on mixed convection in a square cavity, International Journal of Thermal Sciences Vol. 52, pp.112-126, 2012.

[15] Koo J, Kleinstreuer C. A new thermal conductivity model for nanofluids, Journal of Nanoparticle Research, pp.577-88, 2004.

[16] Aminossadati SM, Ghasemi B., Natural convection of water-CuO nanofluid in a cavity with two pairs of heat source-sink, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No.5, pp. 672-678, 2011.

[17] Abu-Nada E., Masoud Z., Hijazi A., Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 35, No. 5, pp. 657-665, 2008.

[18] Ogut EB., "Natural convection of water-based nanofluids in an inclined enclosure with a heat source", Inter J Therm Sci, 48(11), pp. 2063-73, 2009.

[19] Abu-Nada E., Masoud Z., Hijazi A., Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids, International Communications in Heat and Mass Transfer 35 (5), pp. 657-665. 2008.

[20] Davis G.V., Natural convection of air in a square cavity, a benchmark numerical solution, International Journal for Numerical Methods in Fluids.Vol. 3, No. 3, pp. 462-942, 1983.

[21] Barakos G., Mitsoulis E., Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall fraction, International Journal for Numerical Methods in Fluids. Vol. 18, No. 7, pp. 695-719, 1994.

[22] Pericleous K.A., Markatos N.C., Laminar and turbulent natural convection an enclosed cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No. 5, pp. 577-277, 1984.

$\rho$  چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )

$\varphi$  متغیر عمومی

$\phi$  درصد حجمی نانوذرات جامد

$\Psi$  تابع جریان بی بعد

#### زیر نویس

a هوا

c دیوار سرد

e اتیلن گلیکول

f سیال پایه نانوسیال (آب)

h دیوار گرم

m متوسط

nf نانو سیال

p سیال خالص

s نانوذرات

#### ۹- مراجع

[1] Anderson R. and Bejan A., Heat transfer through single and double vertical walls in natural convection : theory and experiment, J. Heat Transfer 24, pp. 1611-1620, 1981.

[2] Nishimura T., Shiraishi M. and Kawamura Y., Natural convection heat transfer in enclosures with an off-center partition, Heat Mass Transfer 30, pp. 1756 - 1758, 1987.

[3] Nishimura T., Shiraishi M., Nagasawa F. and Kawamura Y., "Natural convection heat transfer in enclosures with multiple vertical partitions", Heat Mass Transfer 31, pp. 1679-1686, 1988.

[4] Dzodzo D. M. C., Dzodzo M. B., Pavlovic M. D., Laminar natural convection in a fully partitioned enclosure containing fluid with nonlinear thermophysical properties, Heat Mass Transfer 20 , pp. 614 - 623, 1999.

[۵] نظری م و رضانی س، انتقال گرما جایجایی آزاد در یک حفره مربعی با وجود مانع گرم به روش شبکه بولتزمن، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس، دوره: ۱۱، شماره: ۲، ص ۱۱۹-۱۳۳، تابستان ۱۳۹۰.

[6] Munshi M. J. H., Bhuiyan A. H. , Alim M. A., A Numerical Study of Natural Convection in a Square Enclosure with Non-Uniformly Heated Bottom Wall and Square Shape Heated Block, American Journal of Engineering Research (AJER), Vol. 4, pp. 124-137, 2015.

[7] Khatamifar M., Lin W., Armfield S. W., Holmes D., Kirkpatrick M. P., Conjugate natural convection heat transfer in a partitioned differentially-heated square cavity, International Communications in Heat and Mass Transfer 12, pp. 35-49, 2016.

[8] Boulahia Z., Wakif A., and Sehaqui R., Natural Convection Heat Transfer of the nanofluids in a Square Enclosure with an Inside Cold Obstacle, J. Heat Transfer, ISSN 2351-8014 Vol. 21 No , pp 367-375, 2016.

[9] Mohebbi R., Rashidi M. M., Numerical simulation of natural convection heat transfer of a nanofluid in an L-shaped enclosure with a heating obstacle, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Volume 72, pp. 70-84, 2017.

[10] Selimefendigil F., Oztop H. F., Conjugate natural convection in a cavity with a conductive partition and filled with different nanofluids on different sides of the partition, Journal of Molecular Liquids 216, pp. 67-77, 2016.

[11] Garoosi F., Talebi F., Numerical analysis of conjugate natural and mixed convection heat transfer of nanofluids in a square cavity using the two-phase method, Advanced Powder Technology Volume 28, Issue 7, pp. 1668-1695, 2017.