

جابه‌جایی آزاد نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم با خواص متغیر درون یک محفظه با وجود

منبع گرم و منبع سرد روی دیواره‌های عمودی آن

قنبرعلی شیخ‌زاده^{۱*}، محمد رضایی^۲، محمود احمدی^۲، محمدرضا بابائی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۵/۱۵	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۳	
واژگان کلیدی:	
نانوسیال،	انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم با خواص متغیر در یک محفظه مربعی با منابع حرارتی گرم و سرد برآمده روی دیواره‌های سمت چپ و راست آن به صورت عددی بررسی شده است. منابع حرارتی گرم و سرد به ترتیب در دماهای T_c و T_h می‌باشند و بقیه دیواره‌ها عایق می‌باشند. ویسکوزیته سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال تابع دما می‌باشند. معادلات حاکم در حالت دو بعدی با استفاده از روش حجم محدود و به‌کارگیری روش پیوندی منفصل و دستگاه معادلات جبری حاصله با روش مناسب حل شده است. بر اساس نتایج حاصله مشاهده شده است که برآمدگی منابع گرم و سرد نسبت به حالتی که درون دیواره قرار دارند، تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر الگوی خطوط جریان و خطوط هم‌دما دارند. محل قرارگیری منابع گرم و سرد روی دیواره‌ها و تغییر عدد رایلی الگوی خطوط جریان و خطوط هم‌دما را تغییر می‌دهند. برخلاف حالت خواص ثابت، عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات کاهش می‌یابد و لذا در هندسه مذکور، به کارگیری نانوسیال برای افزایش انتقال حرارت مطلوب نمی‌باشد. به ازای هر دو عدد رایلی 10^5 و 10^6 ، کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط برای حالت بالا-پایین و بیشترین مقدار آن برای حالت پایین-وسط رخ می‌دهد. بنابراین برای وضعیت قرارگیری منابع گرم و سرد در سیستم حرارتی مورد نظر، اگر کاهش انتقال حرارت مطلوب باشد، بصورت پایین-وسط و اگر افزایش انتقال حرارت مطلوب باشد، وضعیت بالا-پایین پیشنهاد می‌شود.

۱- مقدمه

تجهیزات می‌تواند به صورت جابه‌جایی آزاد به خارج از آنها منتقل شود. محدودیت افزایش انتقال حرارت به دلیل کم بودن ضریب هدایت حرارتی سیالات متداول از قبیل هوا، آب و روغن، استفاده از نانوسیالات را مورد توجه قرار داده است [۱]. تاکنون مطالعات زیادی در مورد خواص حرارتی

انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی یک پدیده مهم در سیستم‌های تبدیل انرژی می‌باشد، که کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی دارد. گرمای تولید شده در این

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: sheikhz@kashanu.ac.ir

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۳. مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بادرود

فردریک و والنسیا [۶]، بررسی شده است. آن‌ها محل قرارگیری منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها را در موقعیت‌های مختلف و به ازای اعداد رایلی 10^2 تا 10^7 در نظر گرفتند. آن‌ها نشان دادند که بیشترین انتقال حرارت زمانی اتفاق می‌افتد که منبع گرم در وسط دیواره قرار دارد. دنگ و همکاران [۷]، جابه‌جایی طبیعی آرام را در یک محفظه مستطیلی که منابع حرارتی به صورت جدا از هم روی دیواره‌های آن قرار داشتند، با استفاده از روش حجم محدود بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثر منابع حرارتی دما ثابت بر جریان و انتقال حرارت درون محفظه در مقایسه با منابع حرارتی شار ثابت بیشتر است. انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد هوا در یک محفظه مربعی با وجود منبع گرم و سرد روی دیواره‌های آن، توسط نیتیدی و همکاران [۸]، با استفاده از روش حجم محدود بررسی شده است. آن‌ها اثر نسبت طول به عرض محفظه و محل قرارگیری منابع حرارتی روی دیواره‌ها را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که انتقال حرارت در حالتی که منابع حرارتی در وضعیت پایین-وسط قرار دارند بیشترین مقدار و در حالتی که در وضعیت بالا-پایین قرار دارند کمترین مقدار را دارد. از توپ و ابونادا [۹]، مطالعه‌ای روی جابه‌جایی طبیعی درون یک محفظه مستطیلی که روی دیواره سمت چپ آن گرمکن حرارتی قرار داشت و با نانوسیال پر شده بود را با استفاده از روش حجم محدود انجام دادند. آن‌ها اثر عدد رایلی، ارتفاع گرمکن، محل قرارگیری گرمکن، نسبت طول به عرض محفظه و کسر حجمی نانوذرات را بر انتقال حرارت درون محفظه بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد و همچنین محل قرارگیری گرمکن حرارتی بر میدان جریان دما درون محفظه اثر می‌گذارد.

شیخ‌زاده و همکاران [۱۰]، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-مس در یک محفظه مربعی که منبع گرم و سرد در دیواره‌های آن قرار داشت را بصورت عددی مطالعه نمودند. آن‌ها اثرات عدد رایلی، محل قرارگیری منبع گرم و سرد در دیواره‌ها و کسر حجمی نانوذرات بر جریان سیال و

نانوسیالات انجام شده است. در یک کار آزمایشگاهی، ژای و همکاران [۱۲]، وابستگی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را به خواص ترموفیزیکی سیال پایه بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که نانوسیالی که فقط شامل مقدار کمی از نانوذرات اکسیدآلومینیوم باشد، دارای ضریب هدایت حرارتی بیشتری در مقایسه با سیال خالص است.

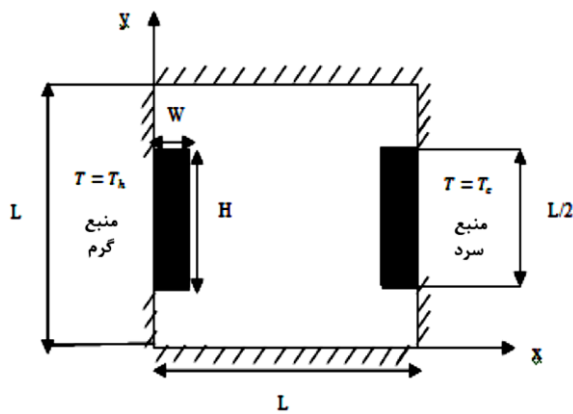
مدلسازی انتقال حرارت درون محفظه کاربردهای زیادی در علوم مهندسی دارد که به عنوان نمونه‌هایی از آن می‌توان به کلکتورهای خورشیدی، سیستم‌های ذخیره حرارت، خنک‌سازی میکروپروسورها، آی‌سی‌ها و بسیاری از تجهیزات الکترونیکی که در فضای محفظه دستگاه محبوس شده‌اند اشاره کرد؛ لذا تاکنون انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در محفظه‌های بسته توسط محققان زیادی بررسی شده است.

خانافر و همکاران [۱۳]، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در یک محفظه دو بعدی حاوی نانوسیال را به ازای اعداد گراشف 10^3 تا 10^5 با استفاده از روش حجم محدود بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که وجود نانوذرات منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت به ازای همه اعداد گراشف می‌شود. جو و تزنگ [۱۴]، مطالعه‌ای در مورد انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال در یک محفظه مستطیلی با استفاده از روش تفاضل محدود انجام دادند. آن‌ها تأثیر عدد رایلی، نسبت طول به عرض محفظه و کسر حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت درون محفظه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. پولیدوری و همکاران [۱۵]، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-آلومینا در جریان لایه مرزی آرام را با استفاده از معادلات انتگرالی، بررسی کردند. آن‌ها مدل‌های ویسکوزیته مختلفی را آزمایش کردند و نتیجه گرفتند که علاوه بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، ویسکوزیته نیز در انتقال حرارت نقش مهمی را ایفا می‌کند.

انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی هوا درون محفظه مربعی که روی دیواره‌های آن منبع گرم و سرد وجود دارند توسط

۲- هندسه مساله و معادلات حاکم

شماتیک محفظه در شکل ۱ نشان داده شده است. روی دیواره‌های سمت چپ و راست محفظه به ترتیب یک منبع گرم و سرد با دماهای ثابت T_h و T_c ($T_h > T_c$) قرار دارد و بقیه دیواره‌ها عایق و غیرفعال می‌باشند. طول منبع گرم و سرد با هم برابر بوده و برابر با نصف ارتفاع محفظه و عرض آن‌ها 0.1 ارتفاع محفظه می‌باشد. محفظه با نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم پر شده است. فرض می‌شود که نانوذرات دارای شکل و اندازه یکسان و یکنواخت بوده، هیچ لغزشی بین سیال و نانوذرات وجود ندارد و نانوسیال یک سیال نیوتنی می‌باشد.



شکل ۱- هندسه حل و شرایط مرزی برای محفظه مربعی با وجود منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها

وضعیت‌های قرارگیری منبع گرم و منبع سرد روی دیواره‌ها نسبت به خط مرکزی افقی محفظه برای حالت نشان داده شده در شکل ۱ متقارن هستند. این حالت از قرارگیری منبع گرم و سرد به اختصار وسط-وسط تعریف می‌شود و حالت‌های دیگر با تغییر دادن محل منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها ایجاد می‌شوند. ویسکوزیته سیال پایه و ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال وابسته به دما گرفته می‌شوند.

معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی برای جریان دائم نانوسیال با ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته متغیر درون محفظه به صورت زیر می‌باشند [۱۲].

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

انتقال حرارت درون محفظه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رایلی افزایش می‌یابد. در بیشترین و کمترین مقدار عدد رایلی، ماکزیمم عدد ناسلت متوسط به ترتیب در حالتی که منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها در وضعیت پایین-وسط و وسط-وسط قرار دارند اتفاق می‌افتد. کورشیونه [۱۱]، برای حالتی که خواص ترموفیزیکی نانوسیال متغیر است آزمایشاتی انجام داد و روابطی برای ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال بدست آورد. وی نشان داد که با افزایش دما و کسر حجمی نانوذرات و کاهش قطر نانو ذرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیال کاهش و با افزایش کسر حجمی و کاهش قطر نانوذرات، ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال افزایش می‌یابد و وابسته به دما نمی‌باشند.

در کار حاضر به عنوان کاری متفاوت با کارهای گذشته، فرایند انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال در یک محفظه مربعی که منابع گرم و سرد بصورت برآمدگی روی دیواره‌های آن قرار دارند، به صورت عددی و با استفاده از روش حجم محدود مدل‌سازی و بررسی می‌شود. در کارهای مشابه قبلی، منابع گرم و سرد در دیواره تعبیه شده بود و در برابر جریان بوجود آمده موانعی وجود نداشت. بنابراین در کار حاضر، با تعبیه منابع گرم و سرد بر روی دیواره (که در کاربردهای عملی رایج‌تر است)، تاثیر برآمدگی آن بر میدان جریان و انتقال حرارت بررسی می‌شود. از بین خواص ترموفیزیکی، ویسکوزیته سیال پایه و دانسیته، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال وابسته به دما می‌باشند. اثر محل قرارگیری منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها، افزایش کسر حجمی نانوذرات و تغییر عدد رایلی بر میدان جریان و انتقال حرارت بررسی می‌شود. هدف از این مطالعه یافتن حالت بهینه قرارگیری منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها و بهینه‌سازی انتقال انرژی بین منبع گرم و منبع سرد به ازای اعداد رایلی و کسر حجمی مختلف نانوذرات می‌باشد.

خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات در دمای ۲۹۵ کلون در جدول ۱، آورده شده‌اند.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات [۱۳]

خواص ترموفیزیکی	آب	اکسید آلومینیوم
گرمای ویژه	۴۱۷۹	۷۶۵
چگالی	۹۹۷/۸	۳۹۷۰
ضریب هدایت حرارتی	۰/۵۹	۴۰
ضریب انبساط حرارتی	$۲/۳ \times ۱۰^{-۴}$	$۰/۱۸۵ \times ۱۰^{-۴}$
قطر مولکول‌ها	$۰/۳۸۴ \times ۱۰^{-۹}$	۳۳×۱۰^{-۹}

بی‌بعد سازی توسط پارامترهای زیر انجام می‌شود.

$$X = \frac{x}{L} \quad Y = \frac{y}{L} \quad U = \frac{uL}{\alpha_f} \quad V = \frac{vL}{\alpha_f}$$

$$P = \frac{pL^2}{\rho_{nf} \alpha_f^2} \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad \mu^* = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{f,0}} \quad k^* = \frac{k_{nf}}{k_{f,0}}$$

شکل بی‌بعد معادلات به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (۱۲)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{f,0}}{\rho_{nf} \alpha_{f,0}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\mu^* \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\mu^* \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \right] \quad (۱۳)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{f,0}}{\rho_{nf} \alpha_{f,0}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\mu^* \frac{\partial V}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\mu^* \frac{\partial V}{\partial Y} \right) \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_{f,0}} Ra Pr \theta \quad (۱۴)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\mu_{f,0}}{(\rho c_p)_{nf} \alpha_{f,0}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(k^* \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(k^* \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right] \quad (۱۵)$$

که در آن، Ra (عدد رایلی) به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱].

$$Ra = \frac{g \rho_f \beta_f (T_h - T_c) L^3}{\mu_f \alpha_f} \quad (۱۶)$$

شرایط مرزی معادلات بالا در شکل بی‌بعد به صورت زیر می‌باشند.

$$U = V = 0 \quad \text{روی دیواره‌های محفظه و منابع گرم و سرد}$$

$$\theta = 0 \quad \text{روی منبع سرد}$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (۲)$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} \right] + (\rho\beta)_{nf} g (T - T_c) \quad (۳)$$

$$(\rho c_p)_{nf} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (۴)$$

خواص ترموفیزیکی نانوسیال شامل دانسیته، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند [۳ و ۱۰].

$$\rho_{nf} = 1001.064 + 2738.6191\phi - 0.2095T_r \quad (۵)$$

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p}{(1-\phi)(\rho)_f + \phi(\rho)_p} \quad (۶)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 4.4 Re^{0.4} Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.3} \phi^{0.66} \quad (۷)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (۸)$$

در رابطه (۷) T_{fr} برابر با ۰/۰۱ درجه سلسیوس می‌باشد. در معادلات بالا، Pr (عدد پرانتل) و Re (عدد رینولدز) به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۱].

$$Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \quad (۹)$$

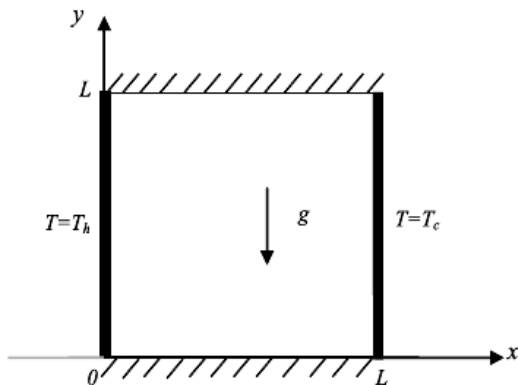
$$Re = \frac{2\rho_f k_B T}{\pi \mu_f^2 d_p} \quad (۱۰)$$

چون در کار حاضر از روابط کورشینونه [۱۱] برای ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته استفاده شده است، محدوده قابل بررسی دما و کسر حجمی، همان محدوده مربوط به روابط کورشینونه می‌باشد.

ویسکوزیته سیال پایه با برازش منحنی بر مقادیر موجود در مرجع [۱۲] به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\mu_f = 562.77 [\ln(T + 62.756)]^{-8.9137} \quad (۱۱)$$

از کار حاضر با کار دیگران در جدول ۲ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که مطابقت خوبی بین نتایج حاضر و نتایج دیگران وجود دارد.



شکل ۲- هندسه حل و شرایط مرزی برای آزمایش اول

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط دیواره گرم برای آزمایش اول: مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج دیگران

$Ra=10^6$	$Ra=10^5$	
۸/۹۸۹	۴/۵۴۴	کار حاضر
۸/۸۲۶	۴/۵۲۲	خانافر و همکاران [۳]
۸/۸۰۶	۴/۵۱۰	باراکوس و میتسولیس [۱۴]
۸/۷۵۴	۴/۴۳۰	مارکاتوس و پریکلوس [۱۵]
۸/۷۹۹	۴/۵۱۹	دی وال دیویس [۱۶]
۹/۰۱۲	۴/۶۴۶	فوسگی و همکاران [۱۷]

در آزمایش دوم جابه‌جایی طبیعی درون یک محفظه مربعی که منبع حرارتی گرم و سرد روی دیواره پایین قرار دارند بررسی شده است. کانتورهای تابع جریان و دما حاصل از کار حاضر با مرجع [۱۸] در شکل ۳ مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مطابقت خوبی بین نتایج وجود دارد.

۵- بررسی استقلال نتایج از شبکه

برای پیدا کردن یک شبکه مناسب در فرآیند عددی و مطالعه جریان سیال و انتقال حرارت درون محفظه مربعی که روی دیواره‌های عمودی آن منبع گرم و سرد وجود دارند و حاوی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم می‌باشد، آزمایش‌هایی با شش شبکه یکنواخت $N \times N$ با تعداد

روی منبع گرم $\theta = 1$

روی دیواره‌های عایق $\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0$

که در آن، n جهت عمودی بر دیواره‌های عایق است.

عدد ناسلت متوسط از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Nu_{ave} = \frac{hL}{k_f} = \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{1}{S} \int_0^S \frac{\partial \theta}{\partial n} ds \quad (17)$$

که در آن، S مجموع طول و عرض بی‌بعد قسمت‌هایی از منبع گرم است که درون محفظه با نانوسیال در تماس است؛ که در وضعیت وسط، $S=(2W+H)/L=0.7$ و در وضعیت بالا و پایین، $S=(W+H)/L=0.6$ می‌باشد.

۳- روش عددی

معادلات مربوطه همراه با شرایط مرزی با استفاده از روش حجم محدود به صورت عددی حل شده‌اند. برای منفصل کردن معادلات از روش پیوندی (ترکیب روش اختلاف مرکزی مرتبه ۲ و روش آپویند بسته به عدد پیکلت محلی) استفاده شده و از الگوریتم سیمپلر برای برقراری ارتباط بین میدان سرعت و فشار استفاده شده است. برای جلوگیری از بروز واگرایی از ضرایب زیر تخفیف مناسب استفاده شده است. حل معادلات با روش تکرار تا زمانی انجام شده است که مقادیر مجموع باقیمانده‌ها به اندازه کافی به صفر نزدیک شوند.

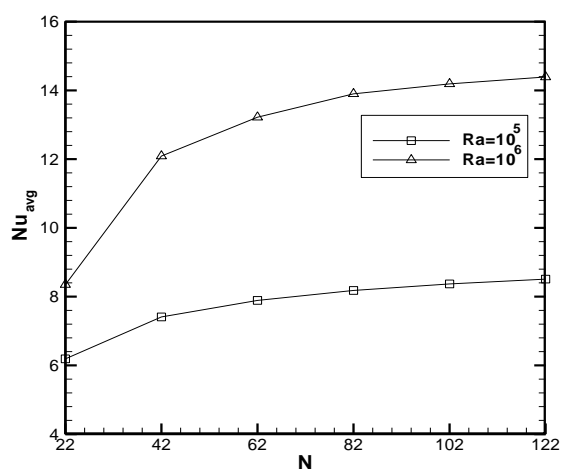
۴- بررسی صحت عملکرد برنامه

کامپیوتری

برای مطمئن شدن از صحت فرآیند حل عددی دو نوع آزمایش انجام شده و نتایج آن با نتایج موجود در مقالات مقایسه شده‌اند.

در آزمایش اول مطابق شکل ۲ جریان سیال و انتقال حرارت درون یک محفظه مربعی که با هوا پر شده است و دیواره‌های سمت چپ و راست آن در دماهای ثابت T_h و T_c ($T_h > T_c$) قرار دارند و دیواره‌های بالایی و پایینی عایق هستند، بررسی شده است و در فرآیند حل عددی از یک شبکه با تعداد گره 82×82 استفاده شده است. اعداد ناسلت متوسط دیواره گرم به ازای اعداد رایلی 10^5 و 10^6 حاصل

ایجاد شده و همچنین در داخل گردابه مرکزی در اکثر حالت‌ها دو گردابه ثانویه تشکیل می‌شود. البته اندازه و محل گردابه‌های ثانویه به آرایش منبع گرم و سرد بستگی دارد. نحوه قرارگیری منبع گرم و سرد، تأثیر قابل توجهی بر الگوی خطوط جریان دارد. با مقایسه حالت‌های مشابه در شکل‌های ۵ و ۶، مشاهده می‌شود که در عدد رایلی بزرگتر به دلیل تسلط پیدا کردن رژیم انتقال حرارت جابه‌جایی، خطوط جریان در نزدیکی منبع گرم و سرد دارای فشردگی بیشتری می‌باشند، که بیانگر جابه‌جایی قوی و سرعت بالا در این نواحی می‌باشد.



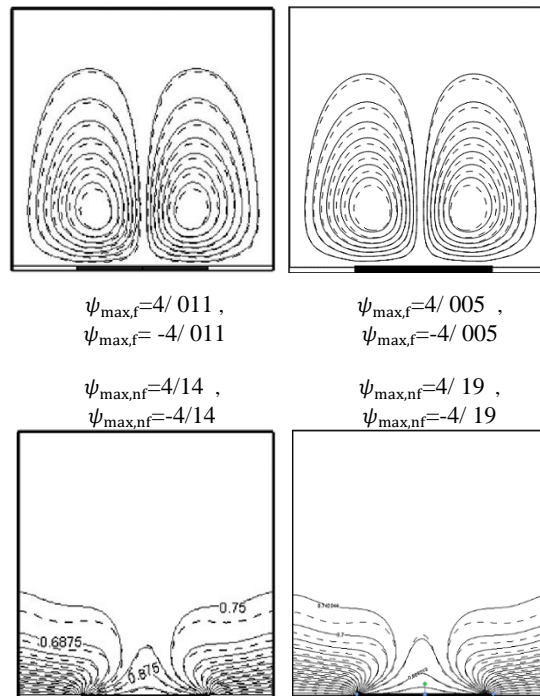
شکل ۴- تغییرات عدد ناسلت متوسط روی منبع گرم برحسب تعداد نقاط شبکه برای حالت وسط-وسط و رایلی‌های مختلف

در تمامی حالت‌های آرایش منبع گرم و سرد در عدد رایلی ۱۰^۶ (شکل ۶) در مقایسه با عدد رایلی ۱۰^۵ (شکل ۵)، ناحیه مرکزی در جهت افقی بیشتر کشیده شده‌اند.

همچنین از شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که الگوی خطوط جریان برای سیال پایه ($\varphi = 0$) و نانوسیال ($\varphi = 0.03$) بسیار شبیه یکدیگر می‌باشند، گرچه در بعضی نواحی با یکدیگر کمی اختلاف دارند.

برای مقایسه بهتر تأثیر افزودن نانوذرات بر میدان سرعت، در شکل‌های ۷ و ۸ پروفیل مولفه افقی سرعت در وسط محفظه برای اعداد رایلی ۱۰^۵ و ۱۰^۶ نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌ها پیداست با بکارگیری نانوسیال، از مقادیر سرعت به خصوص قله پروفیل سرعت کاسته می‌شود. این کاهش در سرعت، به واسطه افزایش دانسیته

گره‌های مختلف ۲۲×۲۲، ۴۲×۴۲، ۶۲×۶۲، ۸۲×۸۲، ۱۰۲×۱۰۲، ۱۲۲×۱۲۲ برای حالت وسط-وسط انجام شده است.



کار حاضر امین الساداتی و قاسمی [۱۸]

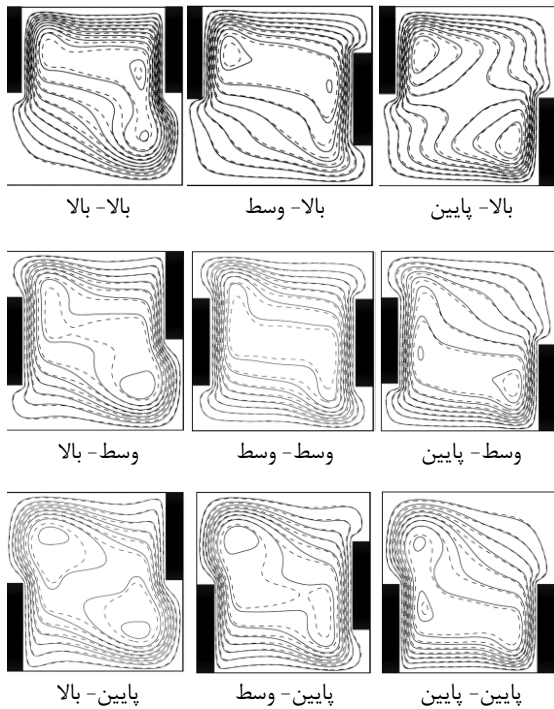
شکل ۳- کانتورهای تابع جریان و دما در آزمایش دوم به ازای رایلی ۰، ۱۰^۵ و $\varphi = 0.04$ (—) و $\varphi = 0.05$ (---):

مقایسه نتایج کار حاضر با کار امین‌الساداتی و قاسمی [۱۸]

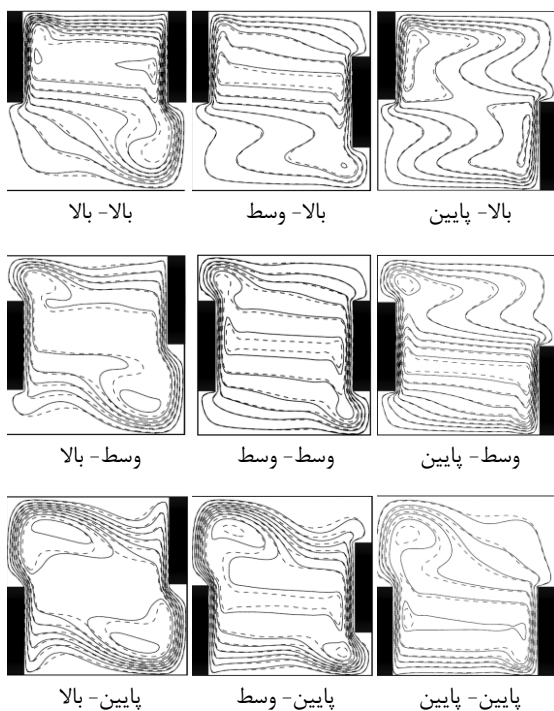
در شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت متوسط روی منبع گرم بر حسب تعداد نقاط شبکه برای اعداد رایلی ۱۰^۵ و ۱۰^۶ و کسر حجمی ۰/۰۳ نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که تغییرات عدد ناسلت متوسط از شبکه یکنواخت ۸۲×۸۲ به بالا بسیار کم بوده و به خوبی استقلال نتایج از شبکه را تأمین می‌کند و در کلیه محاسبات از آن استفاده شده است.

۶- نتایج و بحث

در شکل‌های ۵ و ۶ خطوط جریان برای نه حالت قرارگیری منبع گرم و سرد روی دیواره‌های عمودی محفظه به ازای کسر حجمی صفر و ۰/۰۳، با اعداد رایلی ۱۰^۵ و ۱۰^۶ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمام حالات، یک گردابه اصلی در جهت عقربه‌های ساعت



شکل ۵- خطوط جریان برای موقعیت‌های مختلف منبع گرم و سرد برای $Ra = 10^5$ ، $\varphi = 0$ (—) و $\varphi = 0.03$ (----)



شکل ۶- خطوط جریان برای موقعیت‌های مختلف منبع گرم و سرد برای $Ra = 10^6$ ، $\varphi = 0$ (—) و $\varphi = 0.03$ (----)

و لزجت نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌باشد. لازم به ذکر است که با افزودن نانوذرات دانسیته و لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد که باعث مقاومت بیشتر در جریان یافتن سیال به واسطه نیروی شناوری می‌شوند. البته باید توجه کرد که دبی سیال جریان یافته به حاصل ضرب سرعت و دانسیته وابسته است. با افزودن نانوذرات یکی کاهش و یکی افزایش می‌یابد و لذا قدرت جریان نانوسیال بستگی به میزان تاثیر هریک از این دو عامل دارد.

برآمدگی منابع گرم و سرد نیز در مقایسه با منابع گرم و سرد تعبیه شده داخل دیواره که در مرجع [۱۰] بررسی شده، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر شکل گردابه اصلی داشته است. به عنوان نمونه کانتورهای جریان برای حالت‌های وسط-پایین، وسط-وسط و وسط-بالا به ازای رایلی 10^5 و 10^6 به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه شده‌اند.

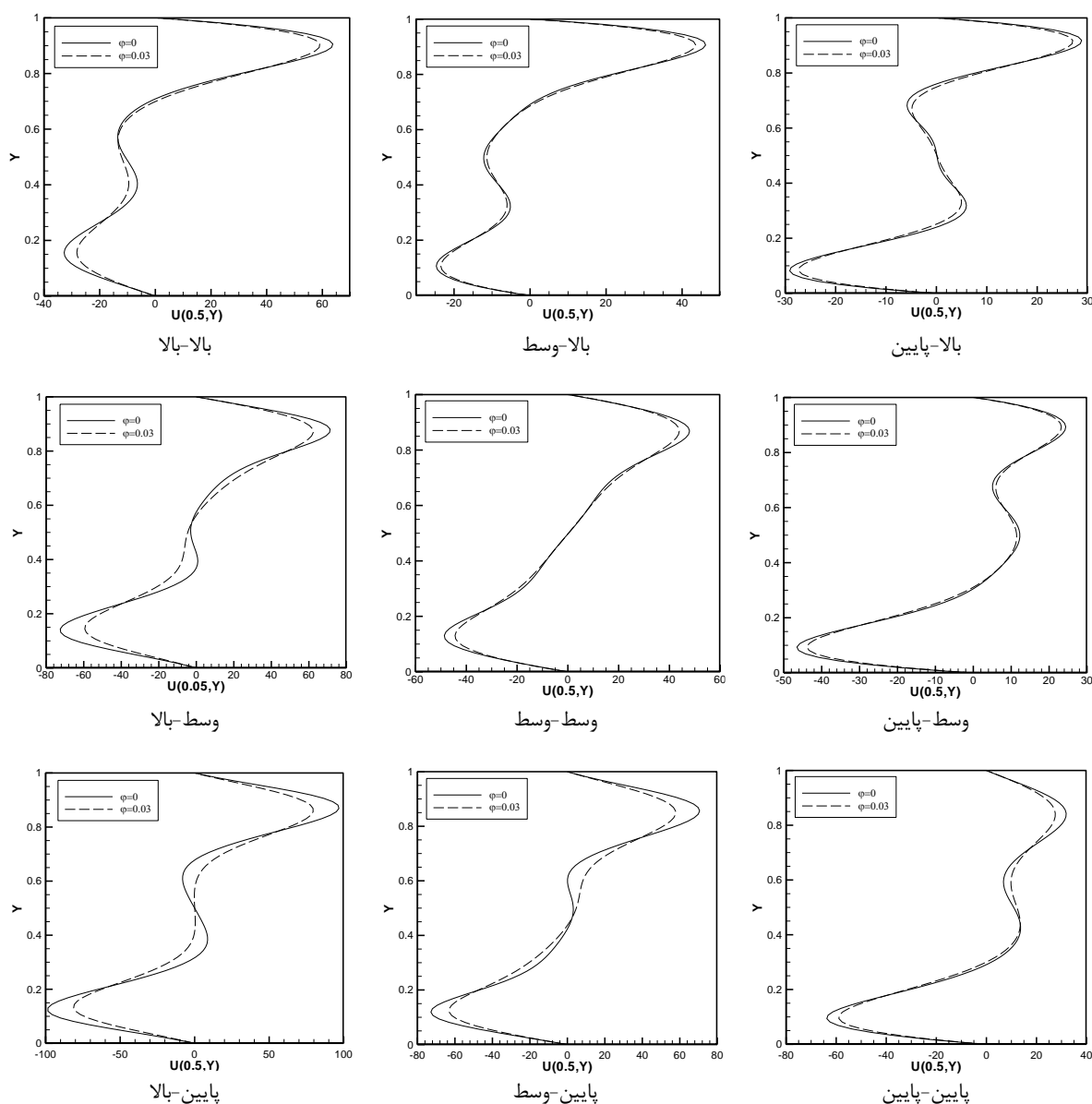
در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ خطوط هم‌دما برای نه حالت قرارگیری منابع گرم و سرد در دیواره‌های عمودی محفظه به ازای کسر حجمی صفر و 0.03 و اعداد رایلی 10^5 و 10^6 نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که از شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشخص است، در تمامی حالت‌ها خطوط هم‌دما در نزدیکی منابع گرم و سرد نسبت به دیگر نواحی دارای تراکم بیشتری هستند که بیانگر گرادیان شدید دما در این نواحی است.

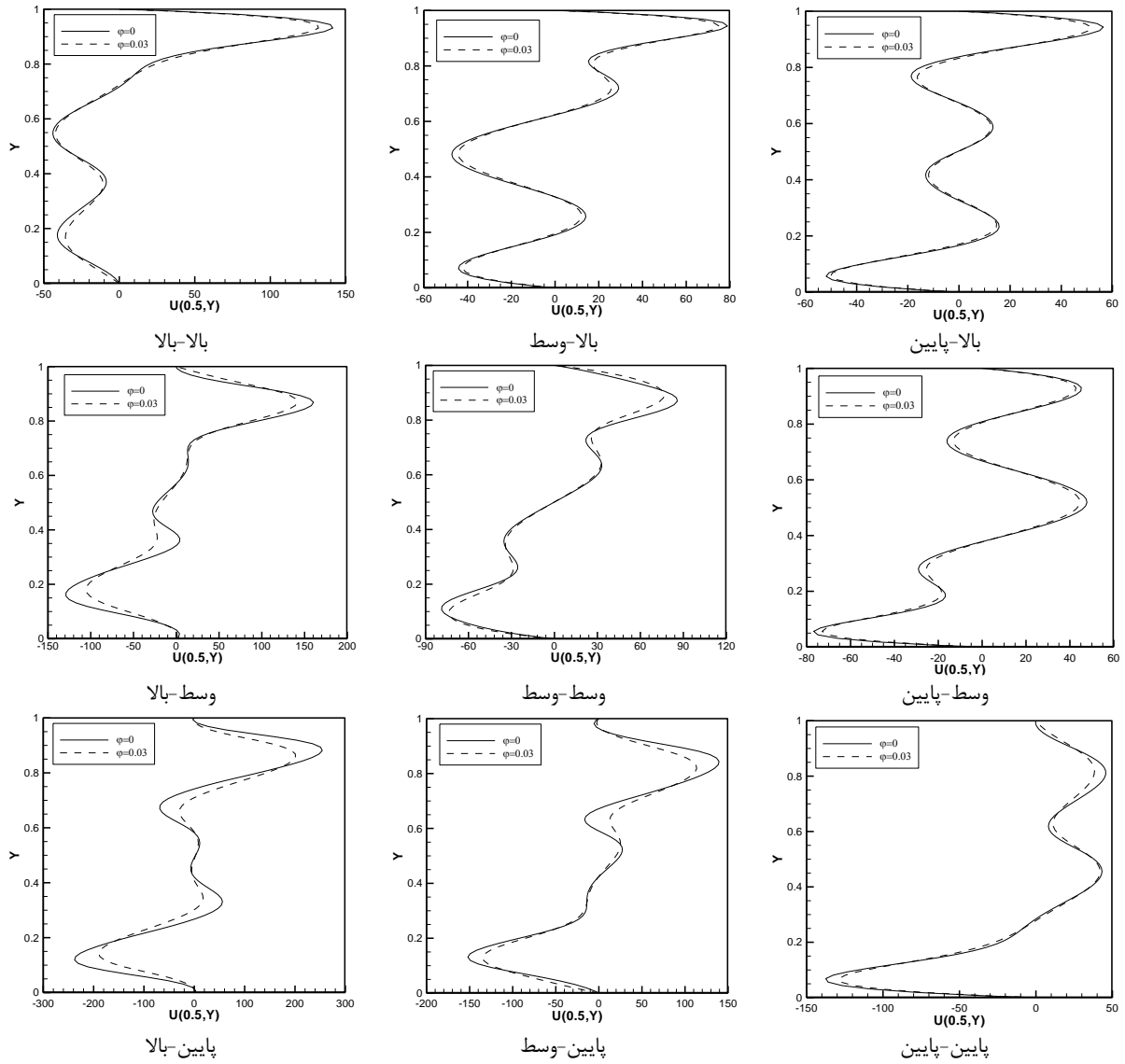
همچنین خطوط هم‌دما در ناحیه مرکزی بصورت افقی وجود دارند، که بیانگر لایه‌بندی حرارتی در این نواحی می‌باشند. همچنین برای بعضی از حالت‌ها یک ناحیه گرم در بالای محفظه و یا یک ناحیه سرد در پائین محفظه شکل می‌گیرد. به عنوان نمونه در وضعیت‌های بالا-بالا و بالا-وسط، یک ناحیه هم‌دمای سرد در پایین محفظه و در وضعیت‌های پایین-پایین و پایین-وسط، یک ناحیه هم‌دمای گرم در بالای محفظه شکل می‌گیرد. البته نحوه قرارگیری منابع گرم و سرد بر فشردگی خطوط هم‌دما در نزدیکی این منابع و اندازه نواحی هم‌دما تاثیر می‌گذارد.

خطوط هم‌دما نیز تاثیر می‌گذارد. به عنوان نمونه خطوط هم‌دما برای حالت‌های وسط-پایین، وسط-وسط و وسط-بالا به ازای رایلی 10^5 و 10^6 به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالتی که منابع گرم و سرد روی سطوح محفظه بصورت برآمده نصب شده‌اند، خطوط هم‌دما به صورت افقی در وسط محفظه شکل می‌گیرند.

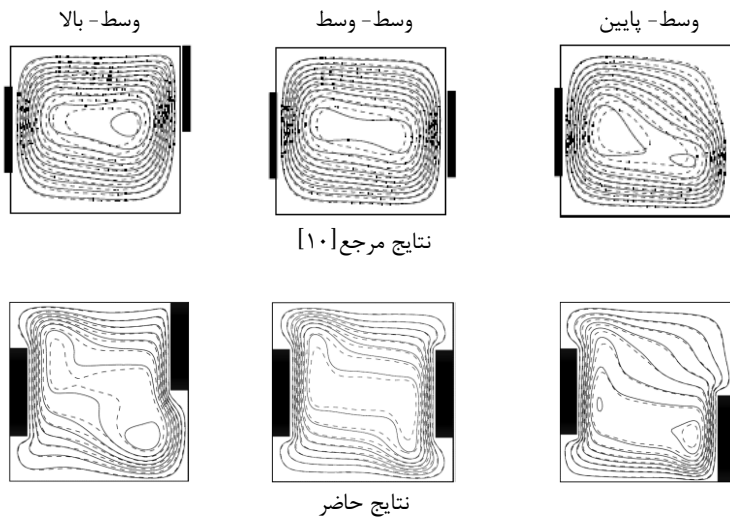
با مقایسه حالت‌های مشابه در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که در عدد رایلی بزرگتر، خطوط هم‌دما فشردگی بیشتری دارند و لایه‌های مرزی حرارتی باریکتر می‌شوند، که بیانگر انتقال گرمای بیشتر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که الگوی خطوط هم‌دما برای سیال پایه ($\varphi = 0$) و نانوسیال ($\varphi = 0.03$) بسیار شبیه یکدیگر می‌باشند. همانند میدان جریان، برآمدگی منابع گرم و سرد در مقایسه با منابع گرم و سرد تعبیه شده داخل دیواره [۱۰] بر شکل



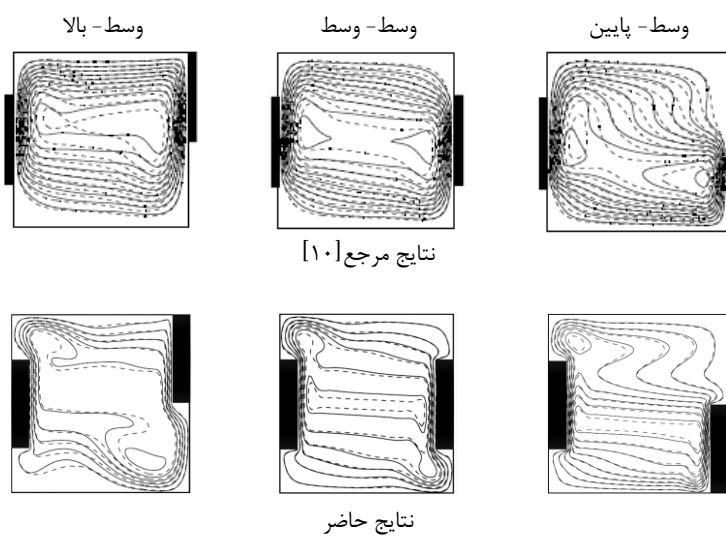
شکل ۷: مولفه افقی سرعت برای موقعیت‌های مختلف منابع گرم و سرد به ازای $\varphi = 0.03$ و $\varphi = 0$, $Ra = 10^6$



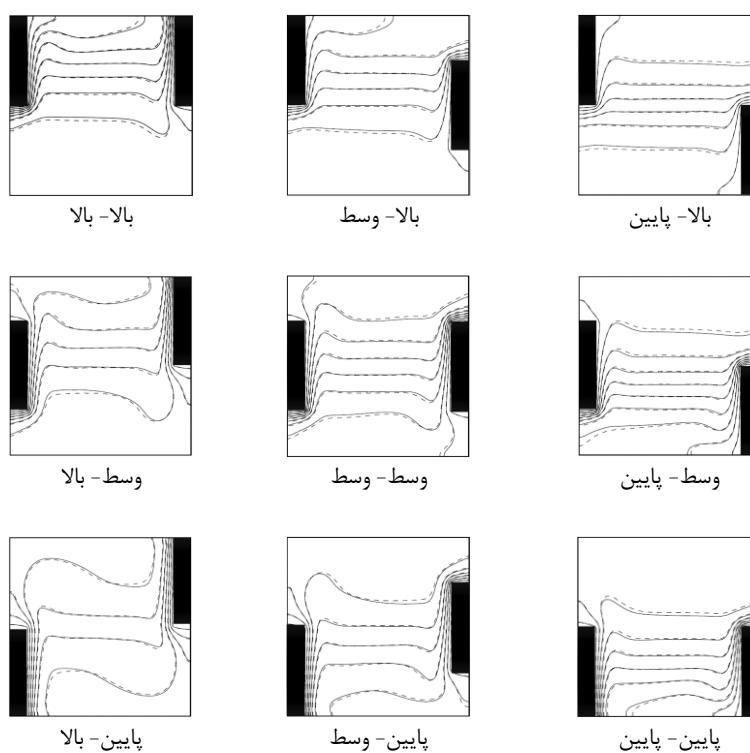
شکل ۸: مولفه افقی سرعت برای موقعیت‌های مختلف منابع گرم و سرد به ازای $Ra=10^6$ ، $\varphi=0$ و $\varphi=0.03$



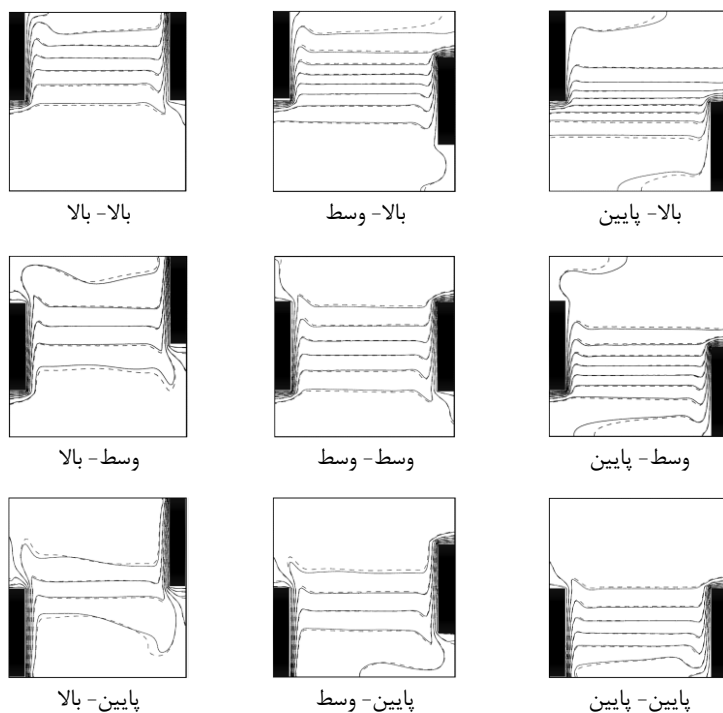
شکل ۹- مقایسه خطوط جریان برای موقعیت‌های مختلف منابع گرم و سرد برای $Ra = 10^5$



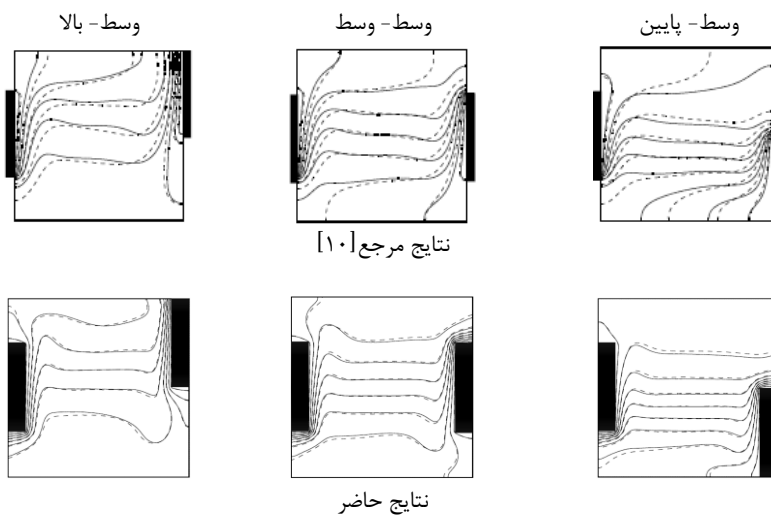
شکل ۱۰- مقایسه خطوط جریان برای موقعیت‌های مختلف منابع گرم و سرد برای $Ra = 10^6$



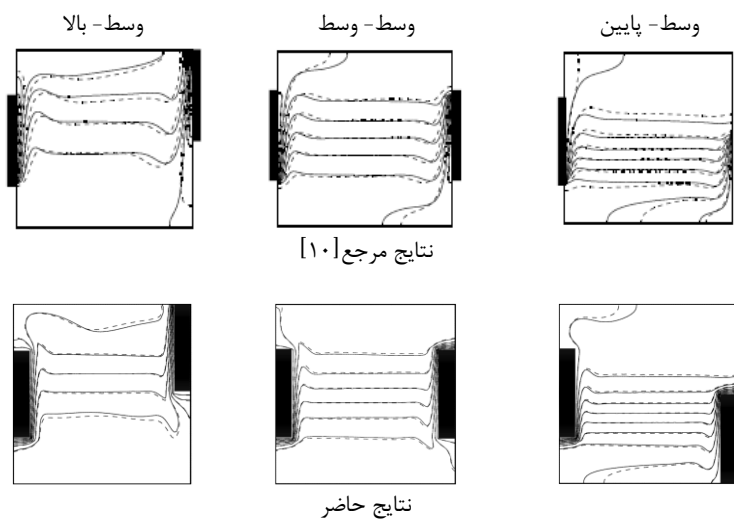
شکل ۱۱- خطوط هم‌دما برای موقعیت‌های مختلف منابع گرم و سرد برای $Ra = 10^5$, $\varphi = 0$ (—) و $\varphi = 0.03$ (---)



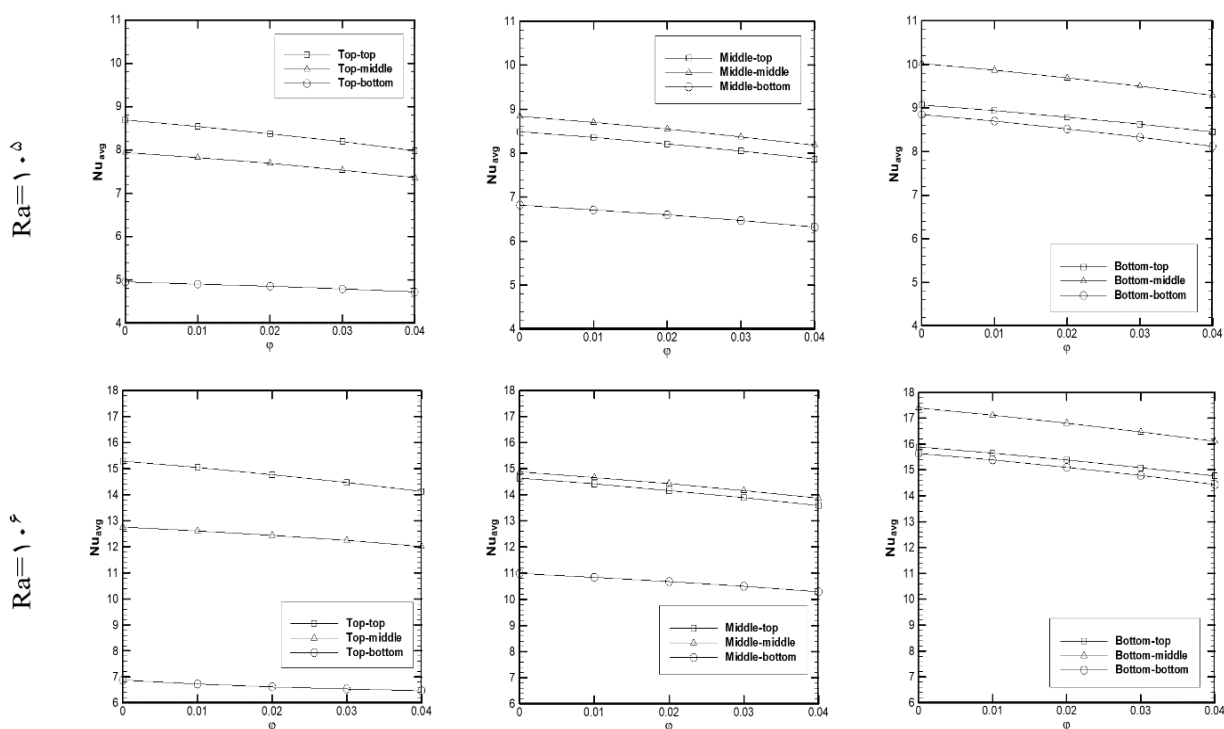
شکل ۱۲- خطوط هم‌دما برای موقعیت‌های مختلف منابع گرم و سرد برای $Ra = 10^6$, $\varphi = 0$ و $\varphi = 0.03$ (---) و (—)



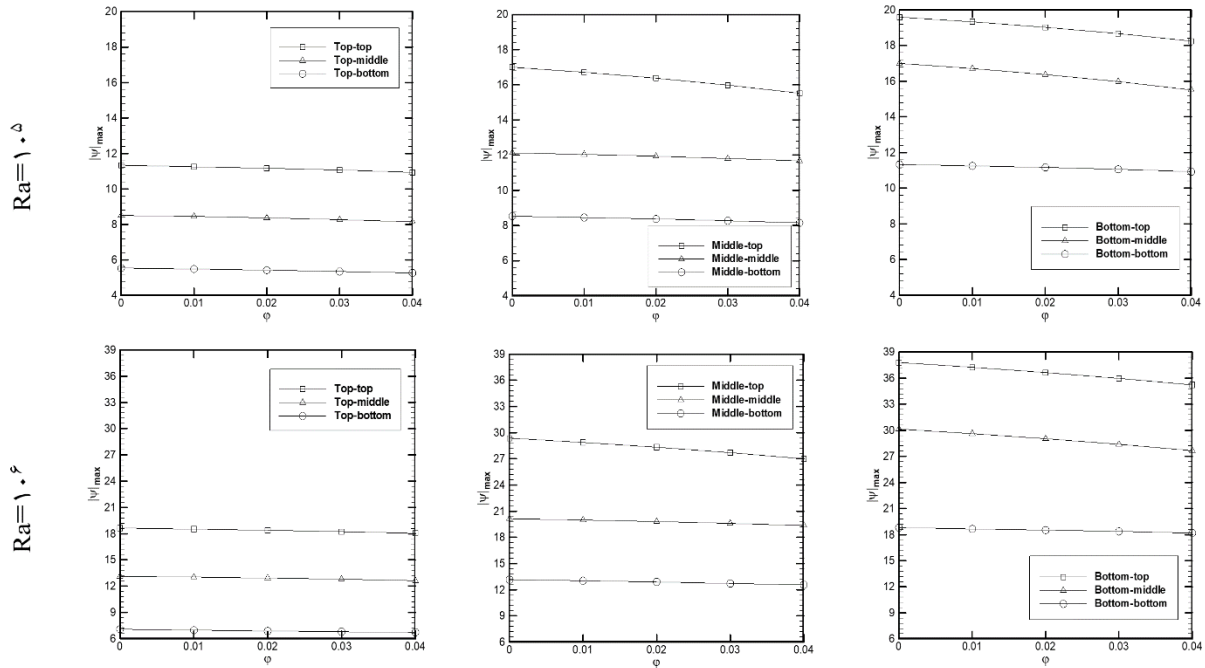
شکل ۱۳- مقایسه خطوط هم‌دما برای موقعیت‌های مختلف منابع گرم و سرد برای $Ra=10^5$



شکل ۱۴- مقایسه خطوط هم‌دما برای موقعیت‌های مختلف منابع گرم و سرد برای $Ra=10^6$



شکل ۱۵- تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی نانوذرات برای موقعیت‌های مختلف منابع گرم و سرد به ازای رایلی‌های مختلف



شکل ۱۶- تغییرات تابع جریان ماکزیمم بر حسب کسر حجمی نانوذرات برای موقعیت‌های مختلف منابع گرم و سرد به ازای رایلی‌های مختلف

می‌دهد که منبع سرد نیز در بالا باشد. در غیر این صورت، صرفنظر از محل قرارگیری منبع گرم، عدد ناسلت متوسط ماکزیمم در حالتی رخ می‌دهد که منبع سرد در وسط دیواره قرار گیرد. برای هر سه حالت منبع گرم، عدد ناسلت کمتر برای حالتی رخ می‌دهد که منبع سرد در پایین قرار گیرد. قابل ذکر است که انتقال حرارت ماکزیمم (عدد ناسلت ماکزیمم) برای حالت پایین-وسط و انتقال حرارت مینیمم (عدد ناسلت مینیمم) برای حالت بالا-پایین اتفاق می‌افتد.

از شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که ماکزیمم تابع جریان با افزایش کسر حجمی نانوذرات کم می‌شود که می‌تواند یکی از دلایل کاهش عدد ناسلت باشد. در رایلی 10^5 بیشترین و کمترین مقدار تابع جریان $19/59$ و $5/27$ بوده که به ترتیب در حالت‌های پایین-بالا و بالا-پایین اتفاق می‌افتد. در رایلی 10^6 نیز بیشترین و کمترین مقدار تابع جریان به ترتیب در حالت‌های پایین-بالا و بالا-پایین رخ می‌دهد که برابر با $37/8$ و $6/72$ می‌باشد.

لازم به ذکر است که هر چه مقدار تابع جریان بیشتر باشد، جریان داخل محفظه از قدرت بیشتری برخوردار است و

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب تغییرات عدد ناسلت متوسط روی منبع گرم و بیشترین مقدار تابع جریان بر حسب کسر حجمی نانوذرات برای حالت‌های مختلف در اعداد رایلی 10^5 و 10^6 نشان داده شده است.

در شکل ۱۵ می‌توان دید که در تمام حالت‌ها، با افزایش کسر حجمی نانوذرات عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. بنابراین به کارگیری نانوسیال برای افزایش انتقال حرارت مناسب نمی‌باشد. این در حالیست که در اکثر کارهای عددی که خواص نانوسیال تابع کسر حجمی ولی مستقل از دما در نظر گرفته شده است، افزایش عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانوذرات گزارش شده است. همانطور که قبلاً ذکر شد، افزودن نانوذرات باعث افزایش لزجت نانوسیال می‌شود. شایان ذکر است که مدل‌های ارزیابی لزجت نانوسیال مستقل از دما، مقادیر کمتری نسبت به مدل‌های وابسته به دما برای لزجت پیش‌بینی می‌کنند. این موضوع در کارهای قبلی نیز برای نانوسیالات و هندسه‌های متفاوت گزارش شده است [۱۹-۲۰].

از شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که حالتی که منبع گرم در بالا قرار گیرد، عدد ناسلت متوسط ماکزیمم در حالتی رخ

- برخلاف حالت خواص ثابت، عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات کاهش می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد به کارگیری نانوسیال در هندسه مورد مطالعه برای افزایش انتقال حرارت مطلوب نمی‌باشد.

۸- تقدیر و تشکر

نویسندگان مایل‌اند از پژوهشکده انرژی و معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان به سبب حمایت مالی از این تحقیق تشکر نمایند.

انتظار می‌رود انتقال حرارت نیز بیشتر باشد. از سوی دیگر نحوه قرارگیری و فاصله منابع گرم و سرد نیز بر انتقال حرارت اثر گذار است. به عنوان مثال حالت‌هایی که منابع حرارتی فاصله بیشتری دارند (حالت‌های بالا-پایین و پایین-بالا)، دارای مقاومت حرارتی هدایتی بیشتری می‌باشند. لذا مشاهده می‌شود که گرچه در حالت پایین-بالا تابع جریان بیشتر است، اما عدد ناسلت ماکزیمم در این حالت رخ نمی‌دهد، بلکه در حالت پایین-وسط رخ می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با خواص متغیر در یک محفظه مربعی با منابع حرارتی گرم و سرد برآمده روی دیواره‌های عمودی آن که طول آن‌ها برابر با نصف طول محفظه و عرض آن‌ها برابر با $0/1$ ارتفاع محفظه می‌باشند به صورت عددی مدل‌سازی و مطالعه شد. اثر برآمدگی منابع گرم و سرد نسبت به حالتی که درون دیواره قرار دارند، محل قرارگیری منابع گرم و سرد روی دیواره‌ها، تغییر کسر حجمی نانوذرات و تغییر عدد رایلی با در نظر گرفتن خواص متغیر بر جریان و انتقال حرارت درون محفظه بررسی شد. براساس نتایج عددی بدست آمده موارد زیر قابل ذکر است:

- در هر دو مقدار عدد رایلی بررسی شده، برآمدگی منابع گرم و سرد نسبت به حالتی که درون دیواره قرار دارد، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر الگوی خطوط جریان و هم‌دما دارد.

- محل قرارگیری منابع گرم و سرد روی دیواره‌ها و تغییر عدد رایلی الگوی خطوط جریان و خطوط هم‌دما را تغییر می‌دهند.

- در هر دو عدد رایلی 10^5 و 10^6 ، کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط برای حالت بالا-پایین و بیشترین مقدار آن برای حالت پایین-وسط رخ می‌دهد. بنابراین اگر در سیستم حرارتی مورد نظر، کاهش یا افزایش انتقال حرارت مطلوب باشد، به ترتیب وضعیت قرارگیری بالا-پایین و پایین-وسط برای منبع گرم و منبع سرد پیشنهاد می‌شود.

فهرست علائم اختصاری	
u, v	مولفه‌های سرعت در راستای x, y (ms^{-1})
U, V	مولفه‌های سرعت بی بعد در راستای x, y
علائم یونانی	
α	ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})
β	ضریب انبساط حرارتی (k^{-1})
φ	کسر حجمی نانوذرات
ν	ویسکوزیته سینماتیکی (m^2s^{-1})
θ	دمای بی بعد
ψ	تابع جریان (m^2s^{-1})
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	ویسکوزیته دینامیکی (Nsm^{-2})
μ_{eff}	ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال (Nsm^{-2})
اندیس‌ها	
nf	نانوسیال
f	سیال
p	نانوذرات
h	گرم
c	سرد
s	جامد
c_p	گرمای ویژه ($kjkg^{-1}k^{-1}$)
d	قطر مولکول‌ها (m)
g	شتاب گرانشی (ms^{-2})
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($wm^{-2}k^{-1}$)
k	ضریب هدایت حرارتی ($wm^{-1}k^{-1}$)
k_b	ثابت بولتزمن ($1.38066 \times 10^{-23} (jk^{-1})$)
k_{eff}	ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال ($wm^{-1}k^{-1}$)
l	طول و عرض محفظه (m)
Nu	عدد ناسلت
Nu_{avg}	عدد ناسلت متوسط
p	فشار (Nm^2)
P	فشار بی بعد
pr	عدد پرانتل
N	تعداد گره‌ها در هر راستا
Ra	عدد رایلی
T	دما (k)
T_r	دمای مرجع سیال پایه (k)
T_{fr}	نقطه انجماد سیال پایه (k)

۹- مراجع

- [1] Choi, U.S. (1995). "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles". ASME Fluids Eng, Div. 231, pp. 99–105.
- [2] Xie, H.Q., Wang, J.C., Xi, T.G., Li, Y., Ai, F. (2002). "Dependence of the thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture on the base fluid". J. Mater. Sci, Lett. 21, pp. 1469–147.
- [3] Khanafer, K., Vafai, K., Lightstone, M. (2003). "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids". Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 46, pp. 3639–3653.
- [4] Jou, R.Y., Tzeng, S.C. (2006). "Numerical research of nature convective heat transfer enhancement filled with nanofluids in rectangular enclosures". Int. Commun. Heat Mass Transfer, Vol. 33, pp. 727–736.
- [5] Polidori, G., Fohanno, S., Nguyen, C.T. (2007). "A note on heat transfer modeling of Newtonian nanofluids in laminar free convection". Int. J. Therm. Sci, Vol. 46, pp. 739–744.
- [6] Valencia, A., Frederick, R.L. (1998). "Heat transfer in square cavities with partially active vertical walls". Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, pp. 1567–1574.
- [7] Deng, Q.H., Tang, G.F., Li, Y. (2002). "A combined temperature scale for analyzing natural convection in rectangular enclosures with discrete wall heat sources". Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 45, pp. 3437–3446.
- [8] Nithyadevi, N., Kandaswamy, P., Lee, J. (2007). "Natural convection in a rectangular cavity with partially active side walls". Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 50, pp. 4688–4697.
- [9] Oztop, H.F., Abu-Nada, E. (2008). "Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids". Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 29, pp. 1326–1336.
- [10] Sheikhzadeh, G.A., Arefmanesh, A., Kheirkhah, M.H., Abdollahi, R. (2011). "Natural convection of Cu–water nanofluid in a cavity with partially active side walls". European Journal of Mechanics B/Fluids, Vol. 30, pp. 166–176.

- [11] Corcione, M. (2011). "Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids". *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 789–793.
- [12] Bijan, A. (1984). "Convection heat transfer", third edition, Wiley, New York.
- [13] Alloui, Z., Vasseur, P., Reggio, M. (2010). "Natural convection of nanofluids in a shallow cavity heated from below". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 1-9.
- [14] Barakos, G., Mitsoulis, E. (1994). "Natural convection flow in a square cavity revisited, laminar and turbulent models with wall functions". *Internat. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 18, pp. 695–719.
- [15] Markatos, N.C., Pericleous, K.A. (1984). "Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity". *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 772–775.
- [16] De Vahl Davis, G. (1983). "Natural convection of air in a square cavity, a benchmark numerical solution". *Internat. J. Numer. Methods Fluids*, Vol.3, pp. 249–264.
- [17] Fusegi, T., Hyun, J.M., Kuwahara, K., Farouk, B. (1991). "A numerical study of three dimensional natural convection in a differentially heated cubical enclosure". *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 1543–1557.
- [18] Aminossadati, S.M., Ghasemi, B. (2011). "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, pp. 672–678.
- [19] Abu-Nada, E., Chamkha, A.J. (2010). "Effect of nano fluid variable properties on natural convection in enclosures filled with a CuO-EG- Water nanofluid", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 2339-2352.
- [20] Abu-Nada, E. (2010). "Effect of nano fluid variable properties on natural convection in enclosures filled with a CuO-EG-Water nanofluid", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, pp. 679-690.