

بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد محفظه پر شده از نانوسیال با یک مانع با طول متغیر و تحت میدان مغناطیسی

علیرضا عرب سلغار^۱، محمد شفیعی دهج^۱، مهدی داودیان^۲

۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، m.shafiey@vru.ac.ir

۲ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۳

چکیده

کاهش وزن، ابعاد و مصرف انرژی از جمله مسائل حائز اهمیت در صنایع هوافضا (فضاپیماها و ایستگاه فضایی) است. همین موارد سبب نیاز به یک سیستم خنک‌کننده با قابلیت بالا و ابعاد کوچکتر می‌شود. نانوسیالات می‌توانند در سیستم‌های سردکننده نقشی حیاتی ایفا کنند. در این مقاله به بررسی عددی جریان آرام، لایه‌ای با جابه‌جایی طبیعی نانوسیال، در یک محفظه مربعی تحت زوایای مختلف نسبت به افق با مانعی در وسط آن پرداخته شده است. در وسط محفظه، صفحه‌ای عمودی با ضخامت ناچیز 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 چون چرخش محفظه، عدد ریلی، نسبت حجمی نانوذرات و عدد هارتمن بر میدان جریان و انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که در چرخش محفظه، ماکزیمم انتقال حرارت وقتی صورت می‌پذیرد که صفحه گرم با افق دارای زاویه ۴۵ درجه باشد. صفحه میانی و افزایش عدد هارتمن موجب کاهش انتقال حرارت می‌شوند، حال آنکه افزایش عدد ریلی موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود. افزایش نسبت حجمی نانوذرات بسته به عدد ریلی ممکن است عملکرد حرارتی را تقویت یا تضعیف نماید.

واژگان کلیدی

جابه‌جایی آزاد، نانوسیال، محفظه، نرخ انتقال حرارت

۱. مقدمه

فضاپیماها و بسیاری از سیستم‌های دیگر به‌طور وسیع گسترش یافته است. جریان‌های جابه‌جایی ایجادشده در سیالات می‌توانند تحت تأثیر میدان مغناطیس قرار بگیرند، به همین دلیل بررسی

جریان جابه‌جایی در کانال‌ها به دلیل کاربرد فراوان آنها در صنایع انرژی خورشیدی، مبدل‌های حرارتی، راکتورهای هسته، خنک‌کاری کوره‌ها و محفظه‌های احتراق، قطعات الکترونیکی،

موارد سبب نیاز به یک سیستم خنک‌کننده با قابلیت بالا و ابعاد کوچکتر می‌شود. نانوسیالات می‌توانند در این سیستم‌های سردکننده نقشی حیاتی ایفا کنند [۵].

از جمله عوامل مؤثر در عملکرد صحیح ماهواره‌ها کنترل حرارت در آنهاست. گرمای تولیدشده تجهیزات الکترونیکی مانند تبدیل‌کننده‌های فرکانس، تقویت‌کننده‌ها، مولد قدرت و جز این‌ها بایستی از سیستم خارج گردد تا شرایط دمایی مناسب برای عملکرد آنها فراهم شود. لوله‌های حرارتی به دلیل انتقال حرارت بالا و عدم نیاز به انرژی خارجی یکی از مبدل‌های حرارتی رایج‌اند [۶]. عملکرد لوله حرارتی توسط برخی پژوهشگران در کاربردهای فضایی مطالعه شده است [۷].

در سال‌های اخیر استفاده از نانوسیالات به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محفظه‌ها، به‌طور جدی مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. نتایج این تحقیقات به‌طور 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 جابه‌جایی حاکم است) سبب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود.

سایتو و هیروس [۸] و دوهل دیویس [۹] جریان جابه‌جایی آزاد در یک محفظه مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی در دو دمای ثابت و متفاوت را به روش عددی حل نمودند. آنها با استفاده از روش‌های برون‌یابی جواب‌های دقیقی ارائه کردند که امروزه جهت کنترل جواب‌های مدل‌سازی در مسائل جابه‌جایی آزاد استفاده می‌شود. دنگ و همکاران [۱۰]، جابه‌جایی آزاد سیال آرام در محفظه مستطیلی با منابع حرارتی مجزا روی دیواره را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که به‌طور کلی نقش منابع حرارتی دما ثابت از منابع شار حرارتی ثابت، بیشتر است. اوزتوپ و آبونادا [۱۱] انتقال حرارت و میدان جریان را با در نظر گرفتن نقش نیروهای شناوری در محفظه بسته‌ای که به‌صورت منطقه‌ای گرم می‌شد و از نانوسیال پر بود، مطالعه کردند. آنها در مطالعاتشان از نانوذرات مختلف استفاده کردند و نشان دادند که استفاده از نانوسیال سبب بهبود انتقال حرارت می‌شود و این افزایش در نسبت ابعاد کم برجسته‌تر است. از طرفی با توجه به اینکه با استفاده از میدان مغناطیسی، جابه‌جایی‌های هیدرودینامیکی اجتناب‌ناپذیر را می‌توان کنترل و میرا کرد و

جریان جابه‌جایی سیال در حضور میدان مغناطیسی به دلیل رخداد مکرر آن در کاربردهای صنعتی مانند، طراحی حرارتی تجهیزات الکترونیک، انتقال گرما از مخازن زمین‌گرمایی، عایق‌کاری حرارتی، طراحی ژنراتورهای توان مغناطیسی، شتاب‌دهنده‌های میدان متقاطع، لوله‌های شوک‌دهنده، اندازه‌گیری جریان، بهینه‌سازی فرایندهای جامدسازی فلزات و آلیاژهای فلزی و رفتار خاکریزهای سوخت هسته‌ای اهمیت خاصی دارند [۱].

جریان‌های هیدرودینامیک مغناطیسی^۱ در سیالات به دلیل داشتن تأثیر مهم بر انتقال و جریان سیال در مواد مختلف از اهمیت خاصی برخوردارند، به‌طوری‌که یک روش مناسب برای سرعت بخشیدن به شلیک پلازما در دستگاه‌های همجوشی یا برای تولید تونل باد انرژی بالا جهت شبیه‌سازی پرواز مافوق صوت، جریان هیدرودینامیک مغناطیسی می‌باشد. این دسته از مسائل همچنین در بسته‌های الکترونیکی و دستگاه‌های میکروالکترونیک به‌هنگام کارکرد به‌وجود می‌آیند [۲]. برای افزایش راندمان حرارتی، با توجه به محدودیت‌های فضایی برای کاربرد جریان‌هایی چون جابه‌جایی طبیعی از نانوسیالات استفاده می‌شود. بنابراین با استفاده از نانوسیالات در جریان جابه‌جایی طبیعی هیدرودینامیک مغناطیسی می‌توان انتقال حرارت و جریان را کنترل نمود [۳].

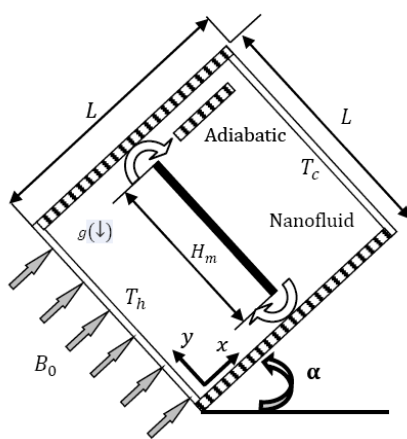
جابه‌جایی آزاد در محفظه‌ها، مسئله‌ای چالشی در موضوعات کاربردی است؛ زیرا محفظه‌های پر شده از سیال، یکی از اصلی‌ترین اجزای خنک‌کاری سیستم‌های ژئوفیزیکی و مهندسی را تشکیل می‌دهد. انتقال حرارت با وجود نانوسیال در جریان جابه‌جایی آزاد در حضور میدان مغناطیسی بدرون محفظه‌ها، کاربردهای وسیعی در صنعت و فناوری امروزه دارد. از جمله این کاربردها می‌توان به پدیده انتقال گرما از لوله‌ها، خطوط انتقال، وسایل الکترونیکی و ماشین‌های الکتریکی، سیستم‌های کابل زیرزمینی، خنک‌کاری وسایل میکروالکترونیک و جز این‌ها اشاره کرد [۴].

بهینه‌سازی و افزایش بازده سیستم‌های انتقال حرارت یکی از اساسی‌ترین چالش‌های مهندسان و طراحان طی سالیان اخیر بوده است، از همین‌رو، استفاده از نانوذرات در سیالات پایه به‌عنوان روشی غیرفعال در جهت بهبود انتقال حرارت و کوچک‌سازی سیستم‌های گرمایشی شناخته شده است. کاهش وزن، ابعاد و مصرف انرژی از مسائل حائز اهمیت در صنایع هوافضا (مثلاً بحث فضاپیماها، ایستگاه فضایی و سامانه‌های هوانوردی) است؛ همین

جابه‌جایی آزاد در یک محفظه مربعی محتوی نانوسیال آب - آلومینا، تحت زوایای مختلف نسبت به افق با یک مانع با طول متغیر و تحت میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعه عددی پارامترهای مؤثر بر جریان نانوسیال و انتقال حرارت درون محفظه با در نظر گرفتن شرایط حاکم بر مسئله، با نوشتن برنامه کامپیوتری مناسب، هدف اصلی این تحقیق است.

۲. بیان مسئله

هندسه مورد نظر در این تحقیق، مطابق شکل ۱، محفظه‌ای مربعی‌شکل و دوبعدی 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. α زاویه محفظه با افق می‌باشد، وقتی که $\alpha = 0$ دیوار سمت چپ محفظه، دیوار گرم در دمای T_h و دیوار سمت راست آن، دیوار سرد در دمای T_c است و دیوارهای افقی آن عایق می‌باشند. 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 می‌گیرد. شتاب گرانش g در جهت منفی y عمل می‌کند. بر اثر اختلاف دمای دیوارهای سمت راست و چپ، در محفظه جریان جابه‌جایی طبیعی برقرار می‌شود. روی تمام دیوارها و صفحه میانی شرط عدم لغزش برقرار است و با فرض اینکه صفحه میانی نازک و بدون جرم است، دمای نانوسیال در دو طرف آن با هم برابر می‌باشند. در این تحقیق فرض می‌شود جریان لایه مرزی آرام و دائمی است و اتلاف حرارتی لزجت وجود ندارد. تولید انرژی صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین نانوسیال را عنوان یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و ذرات جامد لحاظ می‌شود.



شکل ۱. هندسه مسئله

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 جابه‌جایی طبیعی درون محفظه‌ها صورت گرفته است که نتایج کلی آنها کاهش جابه‌جایی جریان و نرخ انتقال حرارت در اثر اعمال میدان مغناطیسی می‌باشد [۱۲-۱۵]. تیمه [۱۶] و سیواسنکاران و هو [۱۷] با کمک حل عددی صورت گرفته به مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی درون محفظه پرداختند و نشان دادند که نرخ انتقال حرارت با افزایش شدت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد.

قاسمی و همکاران [۱۸] به بررسی جابه‌جایی طبیعی، دائمی و آرام جریان در حضور یک میدان مغناطیسی در یک محفظه مربع‌شکل با دیوارهای گرم و سرد در دو طرف و دو دیوار عایق در بالا و پایین پرداختند. آنها طی این بررسی به‌طور کلی به این نتیجه رسیدند که با افزایش عدد ریلی به دلیل افزایش قدرت جابه‌جایی، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد و با افزایش عدد هارتمن به دلیل افزایش نیروی لورنتز و کاهش قدرت جابه‌جایی، نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد و افزایش درصد حجمی نانوذرات در اعداد ریلی پایین و بالا باعث بهبود رفتار حرارتی و افزایش نوسلت متوسط می‌شود.

پیرمحمدی و قاسمی [۱۹] نشان دادند که با چرخش یک محفظه مربعی ساده میزان انتقال حرارت تغییر می‌کند و ماکزیمم انتقال حرارت زمانی صورت می‌گیرد که صفحه گرم با افق زاویه‌ای ۴۵ درجه داشته باشد. افزایش نرخ انتقال حرارت و چگونگی بهینه‌کردن آن، جایگاه ویژه‌ای در علم امروز پیدا کرده است. در مطالعات قبلی، بیشتر محفظه‌های مربعی ساده، جهت بررسی اثر میدان مغناطیسی بر قدرت جابه‌جایی مورد بررسی قرار گرفته است. در بسیاری از محفظه‌هایی که قطعات و مدارها مجتمع الکترونیکی در آنها قرار می‌گیرند و با جابه‌جایی آزاد خنک کاری می‌شوند از صفحه‌های نگه‌دارنده که قطعات الکترونیکی روی آنها نصب می‌شود استفاده می‌شود. این صفحه بر جریان جابه‌جایی آزاد که در محفظه ایجاد می‌شود اثر می‌گذارد. هندسه مورد استفاده در این مقاله یک مدل ساده‌شده از چنین محفظه‌هایی است. بنابراین در تحقیق حاضر، مشخصه‌های انتقال حرارت و پارامترهای مؤثر بر آن و خواص جریان برای جریان

۳. معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال نانو

معادلات حاکم برای جریان آرام دوبعدی و درون محفظه، با فرض سیال نیوتنی غیر قابل تراکم عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

مومنتم در راستای X:

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

مومنتم در راستای Y:

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_{nf}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra Pr \theta - Ha^2 Pr V \quad (3)$$

معادله انرژی:

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

به طوری که متغیرهای بی بعد استفاده شده در این معادلات عبارت‌اند از:

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{uH}{\alpha_f}, V = \frac{vH}{\alpha_f}, \quad (5)$$

$$P = \frac{\rho L^2}{\rho_{nf} \alpha_f^2}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$$

در روابط بالا، L طول محفظه و α_f ضریب پخش حرارتی سیال خالص است. تعریف اعداد بدون بعد نیز در ادامه آمده است:

$$Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Ra = \frac{g \beta_f H^3 (T_h - T_c)}{\nu_f \alpha_f}, \quad (6)$$

$$Ha = B_0 H \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\nu_f \rho_{nf}}}$$

۴. شرایط مرزی

شرایط برای $\alpha = 0$ برای سرعت، شامل شرط عدم لغزش برای کلیه دیواره‌ها و شرایط مرزی حرارتی شامل، دیواره گرم سمت چپ با دمای ثابت T_h و دیواره سرد سمت راست با دمای ثابت T_c و نیز برای دیواره‌های بالا و پایین شرط آدیاباتیک بودن یعنی $(\partial T / \partial y) = 0$ برای دیواره‌های عایق برقرار می‌باشد، این شرایط مرزی برای معادلات بی بعد در رابطه ۷ نشان داده شده‌اند. 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 بر میدان دما ناشی از تأثیرش بر میدان جریان است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار سیال در هر مرحله، عدد نوسلت متوسط روی ضلع گرم محفظه محاسبه می‌شود. این پارامتر برابر با گرادیان دمای بی بعد در سطح بوده و معیاری از انتقال حرارت جابه‌جایی در سطح است و برای به دست آوردن نوسلت متوسط با استفاده از نوسلت موضعی از رابطه ۸ استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} X=0 &\rightarrow U=V=0, \theta=1 \\ X=1 &\rightarrow U=V=0, \theta=0 \\ Y=0 &\rightarrow U=V=0, \partial\theta/\partial Y=0 \\ Y=1 &\rightarrow U=V=0, \partial\theta/\partial Y=0 \\ X=0.5, 0 \leq Y \leq H_m &\rightarrow U=V=0 \end{aligned} \quad (7)$$

عدد نوسلت موضعی با استفاده از رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$Nu_l = \frac{h l}{k_f} \quad (8)$$

که در رابطه ۸ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از رابطه ۹ پیروی می‌کند:

$$h = \frac{q_w}{T_h - T_c} \quad (9)$$

ضریب هدایت روی دیواره عمودی نیز از رابطه ۱۰ به دست می‌آید.

$$k_{nf} = -\frac{q_w}{\partial T / \partial x} \quad (10)$$

پس از ساده‌سازی رابطه ۱۱ به دست می‌آید:

$$Nu_Y = -\frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=0} \quad (11)$$

نوسلت متوسط روی دیواره گرم از انتگرال گیری معادله بالا روی دیواره گرم محفظه به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} Nu_m &= \frac{1}{2H} \left[\int_0^1 Nu_{Y1}(Y) dY + \int_0^1 Nu_{Y2}(Y) dY \right] \\ &= \frac{1}{H} \frac{k_{nf}}{k_f} \left[\int_0^1 \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=0} dY + \int_0^1 \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=1} dY \right] \end{aligned} \quad (12)$$

۵. روابط مربوط به خواص نانوسیال

همان‌طور که از معادلات حاکم بر مسئله دیده می‌شود، برای حل معادلات نیاز به خواص ترموفیزیکی نانوسیال است. چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت حرارتی و ضریب پخش حرارتی

به دست می‌آیند. همچنین از معیار همگرایی زیر استفاده شده است. در معادله ۲۰، K برابر تعداد سلول‌ها می‌باشد و φ متغیر عمومی (U, V, θ) را نشان می‌دهد.

$$\Phi = \sum_J \sum_I \left| \frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\varphi^{n+1}} \right|_{I,J} \leq 10^{-8} \quad (20)$$

۷. نتایج

برای حل عددی معادلات 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 نوسل متوسط دیوار گرم و مقدار ماکزیمم تابع جریان بررسی شد. این بررسی به ازای $\varphi = 0.03$ ، $Ha = 30$ ، $Pr = 6.2$ ، $Ra = 10^5$ و ارتفاع بی‌بعد صفحه میانی $Hm = 0.50$ صورت گرفته و نتایج آن در شکل ۲ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای شبکه‌های ریزتر از 101×101 نتایج تغییرات قابل ملاحظه‌ای نمی‌کنند و بدین ترتیب شبکه‌بندی یکنواخت 101×101 برای اجرای برنامه انتخاب شده است. جهت بررسی صحت عملکرد کد نوشته شده، در مراحل پیشرفت پروژه مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش‌های قبلی صورت گرفت. در اینجا به برخی از آنها اشاره می‌شود. ابتدا محفظه مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی در دو دمای مختلف T_C (دمای دیواره سرد) و T_H (دمای دیواره گرم) برای $Pr = 0.71$ و $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$ محاسبه و در جدول ۲ با نتایج موجود در مراجع مختلف مقایسه شده است. از مقایسه داده‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود که نتایج حاصل دارای دقت خوبی قابل قبول می‌باشد. در ادامه نیز، جهت بررسی بهتر صحت کد نوشته‌شده برای نانوسیال، محفظه مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی، در دو دمای مختلف سرد و گرم در نظر گرفته شد که درون محفظه، نانوسیال آب - آلومینا قرار دارد و میدان مغناطیسی بر سیال درون محفظه تأثیرگذار می‌باشد. با در نظر گرفتن درصد حجمی $\varphi = 0.03$ برای نانوسیال و عدد ریلی $Ra = 10^3$ و نیز اعداد هارتمن صفر و ۳۰ به محاسبه نوسل متوسط روی دیواره گرم پرداخته شده و نتایج موجود با مرجع [۱۸] مقایسه و در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. مقایسه تغییرات نوسل دیواره گرم با مرجع [۱۸] نشان از صحت کد کامپیوتری حاضر می‌باشد.

نانوسیال به کمک خواص سیال و نانوذرات از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۲]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (13)$$

$$\sigma_{nf} = (1 - \varphi)\sigma_f + \varphi\sigma_p \quad (14)$$

$$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho C_p)_{nf} \quad (15)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_p \quad (16)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \quad (17)$$

در خصوص ویسکوزیته نانوسیال روابط مختلفی در مراجع ارائه شده است که رابطه برینکمن [۸] بیشتر از سایر روابط مورد توجه محققان بوده است:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (18)$$

برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نیز روابط متعددی به دست آمده، که در اینجا از مدل ماکسول [۹] استفاده می‌شود.

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_p + 2k_f) - 2\varphi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \varphi(k_f - k_p)} \right] \quad (19)$$

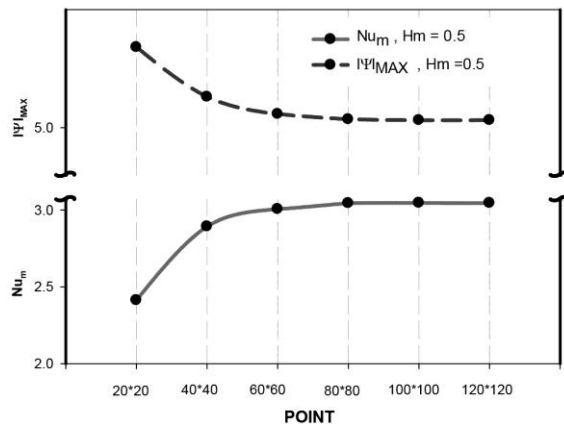
در رابطه فوق k_p ضریب هدایت نانوذرات و k_f ضریب هدایت سیال خالص است. خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات مورد استفاده در این مسئله در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی آب و آلومینا [۴]

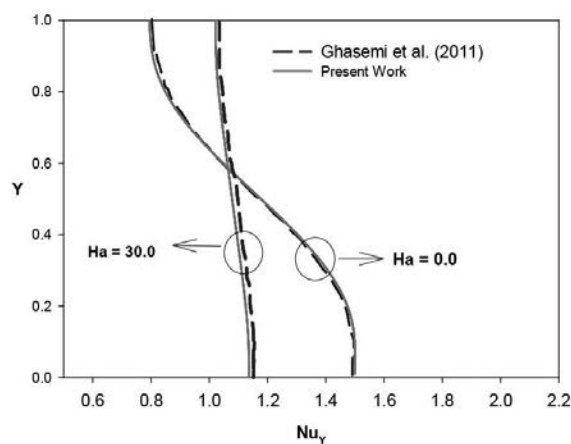
خاصیت	آب	Al ₂ O ₃
$c_p (J/kg.K)$	۴۱۷۹	۷۶۵
$\rho (kg/m^3)$	۹۹۷/۱	۳۹۷۰
$k (W/m.k)$	۰/۶۱۳	۴۰
$\beta (1/K)$	$۲/۷۶ \times 10^{-5}$	$۰/۸۵ \times 10^{-5}$
$\alpha (m^2/s)$	$۱/۴۷۱ \times 10^{-7}$	$۱/۳۲ \times 10^{-5}$

۶. روش عددی

معادلات حاکم همراه با شرایط مرزی به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده‌اند. میدان حل با روش شبکه جابه‌جاشده شبکه‌بندی شده است. در روش شبکه جابه‌جا شده، علاوه بر راحتی محاسبه دبی‌ها روی وجوه حجم کنترل، به علت معلوم بودن سرعت روی سطوح، مقادیر فشار در نقاط اصلی شبکه مشخص می‌شود. جهت حل همزمان معادلات جبری شده، از الگوریتم سیمپل، که جزئیات کامل آن در مرجع [۱۴] آمده است، استفاده شده است. همگرایی هنگامی 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



شکل ۲. نوسلت متوسط دیواره گرم و اندازه تابع جریان ماکزیمم، برای طول صفحه $Hm = 0.50$ و $\varphi = 0.03$ ، $Ra = 10^5$ ، $Ha = 30$



شکل ۳. مقایسه نوسلت دیواره گرم برای عدد ریلی $Ra = 10^3$

جدول ۲. نوسلت متوسط روی دیواره گرم برای محفظه مربعی با سیال هوا

رایلی	10^3	10^4	10^5	
کار حاضر	۱/۱۱۵	۲/۲۲۵	۴/۵۲۳	
مرجع [۱۱]	۱/۱۱۸	۲/۲۴۵	۴/۵۲۲	
مرجع [۱۲]	۱/۱۱۴	۲/۲۴۵	۴/۵۱۰	
مرجع [۱۳]	۱/۱۰۸	۲/۲۰۱	۴/۴۳۰	
مرجع [۱۴]	۱/۱۱۸	۲/۲۴۳	۴/۵۱۹	

جدول ۳. تابع جریان ماکزیمم به ازای زوایای متفاوت محفظه

زاویه	صفر	۴۵	۹۰	۱۳۵
تابع جریان	۵/۰۴۹۹۹	۶/۹۸۶۹	۷/۳۰۳۵۵	۸/۲۱۲۱۳
عدد ناسلت	۳/۱۸۱۶۰	۳/۷۸۶۴۹	۳/۰۹۸۷۹	۳/۹۷۲۴

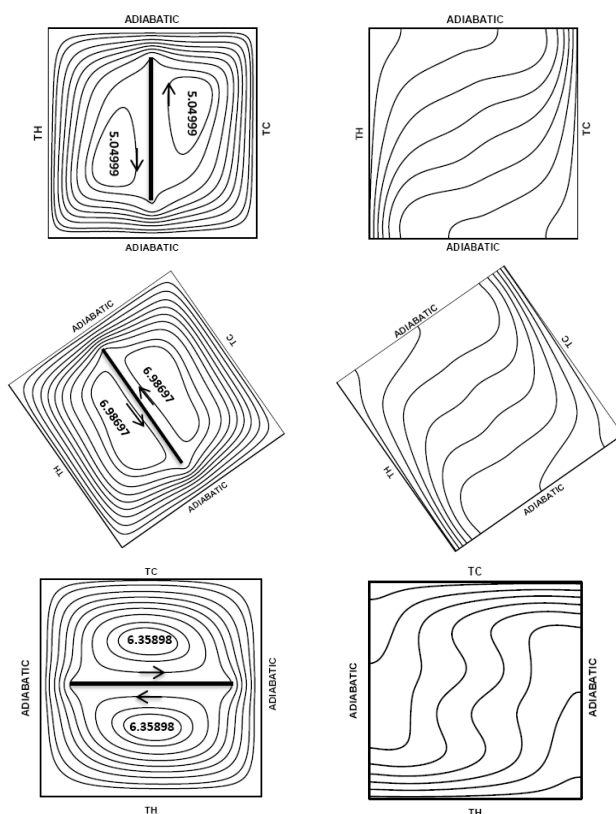
۷-۱ بررسی چرخش محفظه

میانای داخل محفظه قرار می‌گیرد، به دلیل شرط عدم لغزش سرعت، دو گردابه متقارن مرکزی در اطراف صفحه میانی تشکیل می‌شود و در عین حال یک گردابه ساعتگرد که این دو گردابه را دربردارد کل محفظه را اشغال کرده است. مقایسه خطوط جریان و

با تغییر زاویه محفظه نسبت به افق و بازای $0 \leq \alpha \leq 135$ و پارامترهای ثابت $Hm = 0.7$ ، $\varphi = 0.02$ ، $Ra = 10^5$ و $Ha = 25$ به بررسی تغییر اثر زاویه پرداخته می‌شود. در شکل ۴ خطوط جریان و خطوط هم‌دما رسم شده است. وقتی که صفحه

محفظه، یک نقطه عطف در پروفیل سرعت در $X = 0.5$ به وجود می‌آورد که نشان از تغییر جهت جریان در دو طرف صفحه میانی دارد. افزایش سرعت جریان سبب افزایش نرخ انتقال حرارت درون محفظه می‌شود که این موضوع در شکل ۶ که توزیع قدرمطلق دما در $Y = 0.5$ را نشان می‌دهد دیده می‌شود، به طوری که با تغییر زاویه محفظه از صفر به 135° درجه گرادیان دما روی دیوارهای کناری افزایش می‌یابد و در نهایت توزیع دما، با شیب بیشتری نمایان می‌شود.

خطوط هم‌دما نشان می‌دهد که در تغییر زاویه محفظه از صفر درجه به 45° درجه ماکزیمم تابع جریان و سرعت جریان افزایش پیدا کرده و در نتیجه آن مقدار انتقال حرارت ناشی از جابه‌جایی افزایش پیدا خواهد کرد و خطوط هم‌دما با شیب ملایم تری نسبت به محور X نمایان خواهد شد. در شکل ۵ پروفیل مؤلفه عمودی سرعت درون محفظه در وسط دیواره گرم رسم شده است، با توجه به شکل ۵ دیده می‌شود که با تغییر زاویه محفظه از صفر به 135° درجه سرعت جریان افزایش پیدا کرده است. صفحه میانی درون



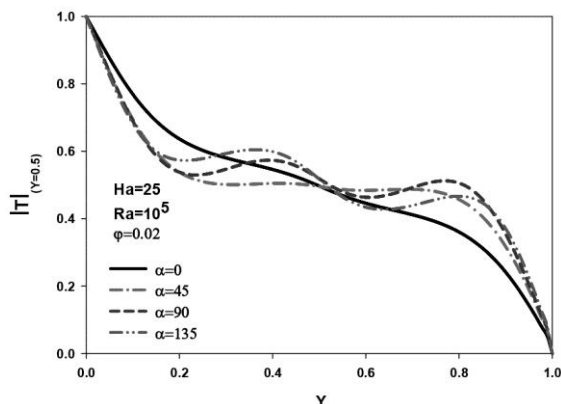
شکل ۴. خطوط جریان (چپ) و هم‌دما (راست) در 90° ، 45° ، 0° و 135° (به ترتیب از بالا به پایین)

انتقال حرارت، برای $\alpha = 90^\circ$ صورت می‌پذیرد. در شکل ۸ خطوط هم‌دما و خطوط جریان در زاویه‌های متفاوت با هم مقایسه شده‌اند. برای این کار با چرخاندن شکل محفظه در زاویه‌های متفاوت و مطابقت دادن آن با هم از یک زاویه، به مقایسه خطوط جریان و خطوط هم‌دما پرداخته شده است. با توجه به شکل ۸، در تغییر زوایای محفظه از صفر به 135° درجه در تمامی حالات خطوط جریان افزایش پیدا کرده و سرعت جریان درون محفظه افزایش پیدا کرده است؛ زیرا در تمامی موارد جریان مربوط به خط چین فشرده‌تر از خط پر است. در مورد مقایسه خطوط هم‌دما،

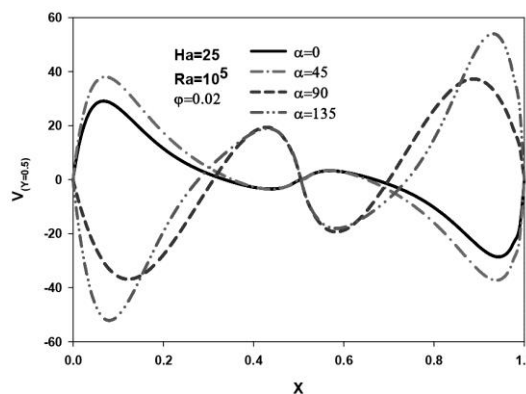
در شکل ۷، نوسلت موضعی دیوار گرم برای تغییر زاویه محفظه از صفر به 135° درجه رسم شده است. با توجه به توضیحات شکل ۴ و ۵ با تغییر زاویه محفظه از صفر به 135° درجه مشاهده می‌شود که نوسلت موضعی برای α برابر با 45° و 135° درجه در محدوده زیادی بیشتر از نوسلت موضعی α صفر و 90° درجه است، با توجه به مطالب بیان شده به نظر می‌رسد قرار دادن محفظه به طوری که با افق دارای زاویه باشد در بهبود عملکرد انتقال حرارت کمک خواهد کرد، در جدول ۳ با مقایسه اعداد نوسلت متوسط، ماکزیمم انتقال حرارت برای $\alpha = 135^\circ$ و مینیمم

حالت سینوسی پیدا کرده است و این باعث کم شدن انتقال حرارت شده است. برای سایر موارد نیز چنین تغییری حکم فرماست. میدان مغناطیسی به دلیل ایجاد نیروی لورنتز، تأثیر به‌سزایی در میدان جریان و به تبع آن میدان دما دارد. در ادامه به ازای مقادیر $Hm = 0.7$ ، $Ra = 10^5$ ، $\alpha = 0^\circ$ و $\varphi = 0.02$ برای هارتمن‌های متفاوت در زوایای گوناگون به تأثیر عدد هارتمن بر میدان جریان و انتقال حرارت پرداخته شده است.

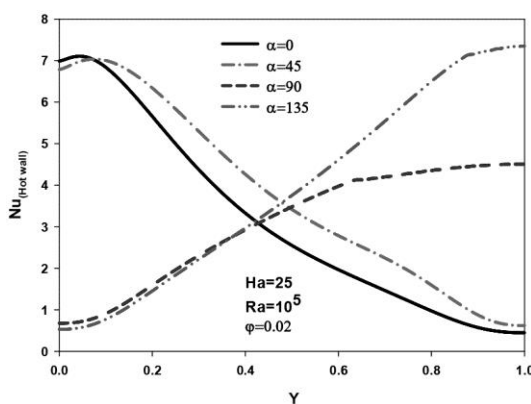
کم شدن شیب خطوط هم‌دما نسبت به افق، نشان از افزایش انتقال حرارت و در جایی که خطوط هم‌دما با شیب بیشتری نسبت به افق حرکت کرده است نشان کاهش انتقال حرارت دارد، با دقت در شکل ۸ الف مشاهده می‌شود که در تغییر زاویه محفظه از $\alpha = 0^\circ$ به $\alpha = 45^\circ$ خطوط هم‌دما به سمت افقی شدن میل کرده است و نشان از افزایش انتقال حرارت دارد، در شکل ۸ ب و در چرخش ۹۰ درجه‌ای محفظه خطوط هم‌دما تغییر شکل داده و



شکل ۶. تغییرات دمای بی بعد، در راستای محور افقی و در $Y = 0.5$



شکل ۵. پروفیل سرعت عمودی در راستای محور افقی و در $Y = 0.5$

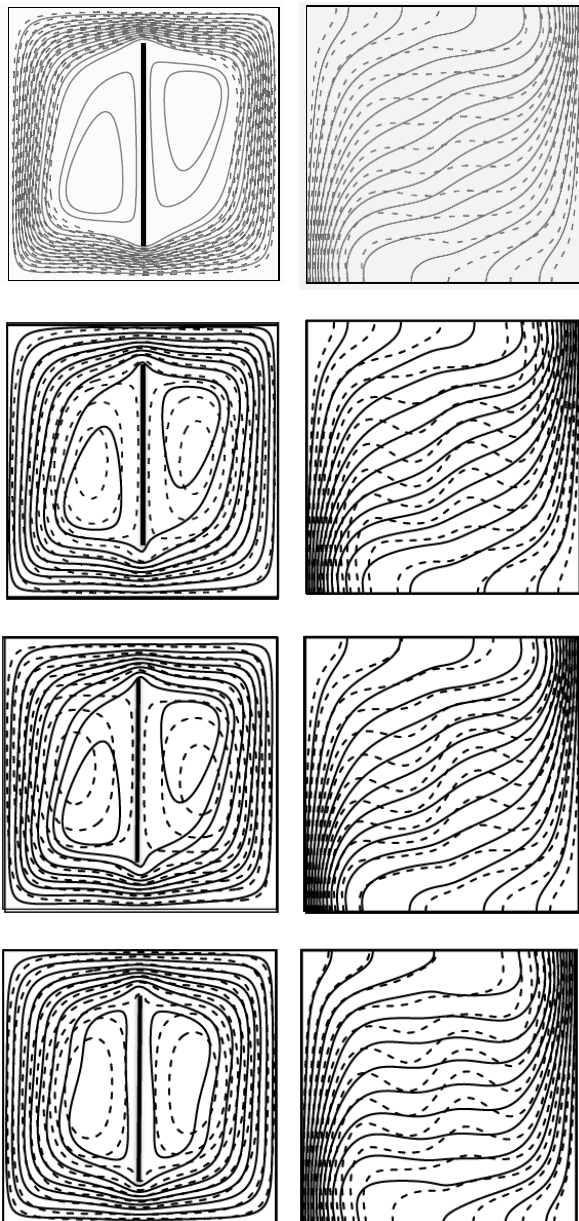


شکل ۷. نوسلت موضعی دیوار گرم برای تغییر زاویه محفظه

موضعی کاهش می‌یابد. باتوجه 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 به‌گونه‌ای 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 و به همین ترتیب خطوط هم‌دما در گوشه پایینی متمرکز و در گوشه بالایی از هم فاصله می‌گیرند. جدول ۴ مقادیر نوسلت متوسط را در هارتمن‌های

برای این منظور عدد هارتمن در بازه $0 \leq Ha \leq 75$ تغییر داده شده است. با دقت در داده‌های جدول ۴ مشاهده می‌شود که در یک α ثابت با افزایش عدد هارتمن، Nu_m همواره کاهش پیدا می‌کند. وجود میدان مغناطیسی سبب ایجاد نیروی لورنتز می‌شود که اثر آن به صورت جمله $(-Ha^2 Pr V)$ در معادله مومنتم در راستای Y ظاهر شده است. به این ترتیب وجود میدان مغناطیسی سبب کاهش سرعت و قدرت جابه‌جایی سیال می‌شود. در شکل ۹ نوسلت موضعی دیواره گرم در هارتمن‌های مختلف رسم شده است که باتوجه به توضیحات ارائه شده با افزایش هارتمن، نوسلت

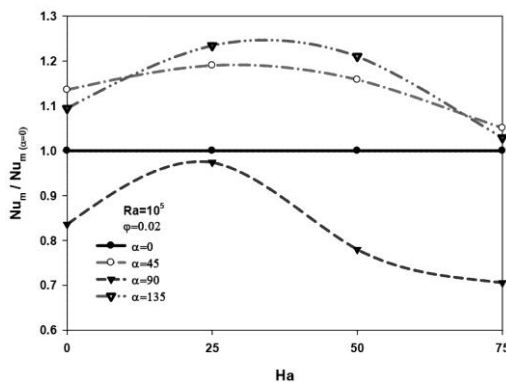
۱۱، که در آن نسبت جریان ماکزیمم به جریان ماکزیمم در $\alpha = 0^\circ$ بیان شده است، مشاهده می‌شود که ماکزیمم جریان در حالتی است که محفظه دارای زاویه $\alpha = 135^\circ$ نسبت به افق باشد؛ زیرا با افزایش ریلی اختلاف دمای صفحه گرم و سرد زیاد شده و عامل حرکت نانوسیال با قدرت بیشتری صورت می‌پذیرد. در شکل ۱۲ و جدول ۷ پارامتر $(Nu_m/Nu_{m(\alpha=0)})$ برحسب عدد ریلی آورده شده است.



شکل ۸ مقایسه خطوط جریان (چپ) و خطوط همدم (راست) برای $\alpha = 0$ خط پر و $\alpha = 90$ خط چین، $\alpha = 0$ خط پر و $\alpha = 135$ خط چین، $\alpha = 45$ خط پر و $\alpha = 90$ خط چین، $\alpha = 45$ خط پر و $\alpha = 135$ خط چین، $\alpha = 90$ خط پر و $\alpha = 135$ خط چین

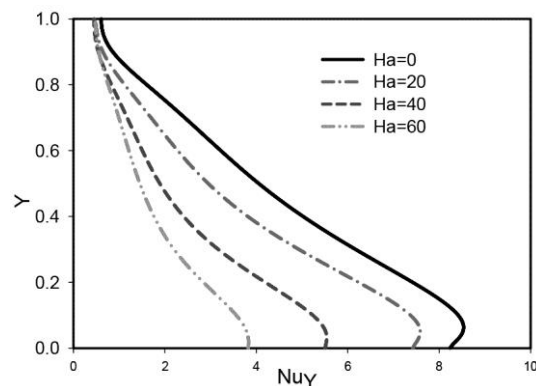
مختلف و برای زوایای متفاوت نشان می‌دهد که مطابق انتظار با افزایش هارتمن مقدار نوسلت متوسط کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۴ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در $\alpha = 0^\circ$ انتقال حرارت نسبت به $\alpha = 90^\circ$ بهتر صورت می‌گیرد، در نتیجه برای کاربردهایی که انتقال حرارت با سرعت بیشتر مورد نظر است، دیواره گرم به‌طور عمودی قرار می‌گیرد. برای محفظه زاویه‌دار نسبت به افق، وقتی $Ha = 0$ است، قرار دادن محفظه به‌صورت $\alpha = 45^\circ$ در بهبود انتقال حرارت کمک خواهد کرد، اما با افزایش عدد هارتمن و در هارتمن‌های متوسط، شرایط به‌طور کلی عوض می‌شود و قرار دادن محفظه به‌صورتی که $\alpha = 135^\circ$ انتقال حرارت را تسریع می‌کند. در هارتمن‌های بالا شرایط برای هر دو حالت $135^\circ, 45^\circ$ تقریباً یکسان می‌باشد. مقایسه تمامی حالت‌ها نشان می‌دهد که برای $Ha = 25, 50$ بهترین حالت در تسریع انتقال حرارت در $\alpha = 135^\circ$ صورت می‌گیرد و برای $Ha = 0$ نیروی لورنتز وجود ندارد. همان‌طور که مشاهده شد، افزایش عدد هارتمن سبب افزایش نیروی لورنتز و یکی از عوامل کاهش جریان نانوسیال درون محفظه می‌باشد که در نتیجه آن میزان انتقال حرارت، ناشی از جابه‌جایی کاهش پیدا می‌کند. عدد هارتمن را می‌توان از عوامل کنترل جریان و میزان انتقال حرارت دانست. از عوامل دیگر کنترل جریان درون محفظه، صفحه میانی درون محفظه می‌باشد؛ زیرا طبق اصل عدم لغزش، سرعت نانوسیال درون محفظه روی صفحه میانی به صفر می‌رسد، هرچه طول بی‌بعد صفحه میانی بیشتر باشد، سرعت جریان درون محفظه بیشتر کاهش می‌یابد و میزان انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد، در نتیجه با تغییر ارتفاع صفحه میانی همانند تغییر عدد هارتمن می‌توان جریان و میزان انتقال حرارت را کنترل کرد. در ادامه کار و برای شرایط ثابت $Hm = 0.7$ ، $Ha = 25$ و $\phi = 0.02$ با متغیر قرار دادن $0 \leq \alpha \leq 135$ و $10^3 \leq Ra \leq 10^5$ به بررسی تغییرات عدد ریلی پرداخته شده است. با توجه به جدول ۵ با افزایش عدد ریلی از $Ra = 10^3$ به $Ra = 10^5$ انتقال حرارت به‌شدت افزایش پیدا می‌کند، دلیل آن را می‌توان اینگونه بیان کرد که با افزایش عدد ریلی میزان اختلاف دما بین دیواره گرم و سرد افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه سرعت نانوسیال درون محفظه افزایش می‌یابد که این خود سبب افزایش جابه‌جایی نانوسیال و میزان انتقال حرارت جابه‌جایی خواهد شد. با توجه به جدول ۶ و مقایسه نمودار رسم‌شده در شکل

در محدوده‌ای که انتقال حرارت هدایتی مکانیزم غالب است ($Ra = 10^3, 10^4$)، افزایش ریلی سبب افزایش نوسلت متوسط و در محدوده‌ای که جابه‌جایی مکانیزم غالب است ($Ra = 10^5$)، افزایش ریلی سبب کاهش نوسلت متوسط می‌شود. دقت در اعداد جدول ۵ برای $\alpha = 90^\circ$ نشان می‌دهد که جریان در ریلی $Ra = 10^3, 10^4$ صفر است؛ زیرا وقتی که صفحه گرم به صورت افقی قرار می‌گیرد، برای ایجاد جریان نانوسیال درون محفظه اختلاف دمای صفحه گرم و سرد باید به مقدار خاصی برسد، در این حالت انتقال حرارت فقط از طریق هدایت صورت می‌گیرد و مقدار نوسلت بیان‌شده ناشی از هدایت می‌باشد، این در حالی است که وقتی صفحه‌های گرم و سرد به صورت زاویه‌دار نسبت به افق قرار گیرند با کمترین اختلاف دما جریان نانوسیال درون محفظه برقرار خواهد شد.



شکل ۱۰. تغییرات عدد ناسلت متوسط بی بعد شده در مقابل عدد هارتمن در زوایای مختلف

مشاهده می‌شود که با تغییر α افزایش Ra در زاویه‌های متفاوت رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد، این نسبت برای $Ra = 10^3, 10^4$ کاهش و برای $Ra = 10^5$ افزایش می‌یابد با توجه به شکل برای $Ra = 10^3, 10^4$ ماکزیمم انتقال حرارت به ترتیب در زاویه‌های صفر، ۴۵ و ۱۳۵ و سپس ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در $Ra = 10^5$ ماکزیمم انتقال حرارت در زاویه ۱۳۵ صورت می‌پذیرد. از طرفی در یک زاویه ثابت، با افزایش عدد ریلی، نسبت نوسلت متوسط ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در واقع وقتی میدان مغناطیسی وجود داشته باشد، افزایش عدد ریلی از یک طرف سبب افزایش جابه‌جایی می‌شود و از طرف دیگر به دلیل وجود ترم ($-Ha^2 Pr V$) در معادله مومنوم Y ، وقتی V افزایش یابد، تأثیر این جمله منفی بیشتر می‌شود و سبب تضعیف جابه‌جایی در جهت V می‌گردد، لذا



شکل ۹. نوسلت موضعی روی دیوار گرم در $\alpha = 0^\circ, Hm = 0.70, \phi = 0.02, Ra = 10^5$

جدول ۴. تغییرات نوسلت متوسط و تابع جریان ماکزیمم به ازای هارتمن‌های مختلف

هارتمن	۷۵	۵۰	۲۵	صفر
عدد ناسلت	صفر	۱/۴۸۵۱۶	۲/۰۳۲۸۵	۳/۳۰۹۰۸
	۴۵	۱/۵۶۰۲۶	۲/۳۵۴۷۲	۴/۸۹۴۰۵
	۹۰	۱/۰۴۷۸۶	۱/۵۸۵۷۲	۳/۶۰۱۷۳
	۱۳۵	۱/۵۲۸۰۲	۲/۴۶۰۶۲	۴/۷۱۶۲۱
تابع جریان	صفر	۱/۶۴۲۲۳	۲/۷۷۳۵۳	۸/۳۰۸۸۸
	۴۵	۱/۸۵۸۸۲	۳/۵۷۰۴۱	۱۲/۴۳۷۵۴
	۹۰	۰/۰۰۰	۲/۳۹۱۶۰	۱۲/۰۲۶۸۵
	۱۳۵	۲/۰۲۳۴۰	۴/۱۴۱۸۹	۱۲/۴۵۵۰۲

درون محفظه می‌گردد. در این قسمت اثر تغییرات ϕ و تغییر زاویه محفظه به‌طور همزمان بررسی شده است. برای این کار پارامترهای ثابت را به صورت $Hm = 0.7$ ، $Ha = 25$ و برای

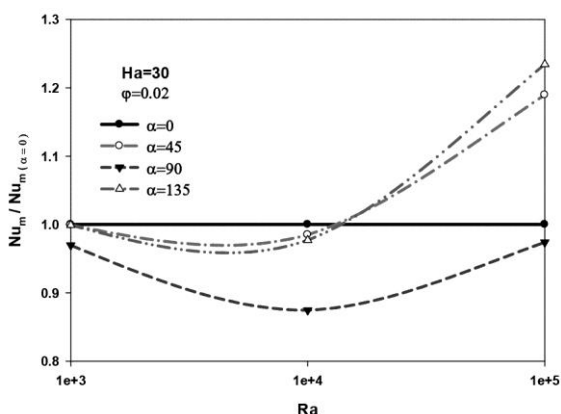
چون تغییر نسبت حجمی نانوذرات باعث تغییر خواص ترموفیزیکی نانوسیال مطابق با روابط ۱۳ تا ۱۷ می‌شود، موجب تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال

می‌شویم که افزایش φ باعث افزایش ρ_{nf} و μ_{nf} می‌شود، از طرفی طبق رابطه‌های ۲ و ۳ سرعت U, V با μ_{nf} رابطه مستقیم و با ρ_{nf} رابطه معکوس دارد، در این مورد خاص و با پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده افزایش ویسکوزیته سبب کاهش $|\Psi|_{\max}$ شده است در حالی که حالت عکس نیز امکان پذیر است.

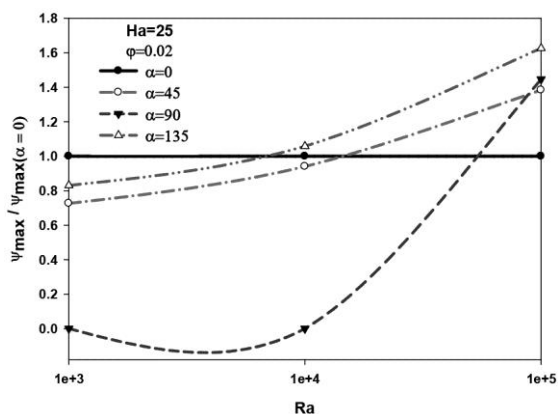
در $0.00 \leq \varphi \leq 0.06$ و $0 \leq \alpha \leq 135$ ، $Ra = 10^4, 10^5$ نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد حجمی برای هر دو حالت، $Ra = 10^4, 10^5$ ، $|\Psi|_{\max}$ کاهش پیدا می‌کند، زیرا با افزایش φ به دلیل افزایش ویسکوزیته، $|\Psi|_{\max}$ کم می‌شود. با دقت در رابطه‌های ۱۳ و ۱۸ متوجه

جدول ۵. تغییرات نوسلت متوسط و تابع جریان ماکزیمم به ازای ریلی‌های مختلف

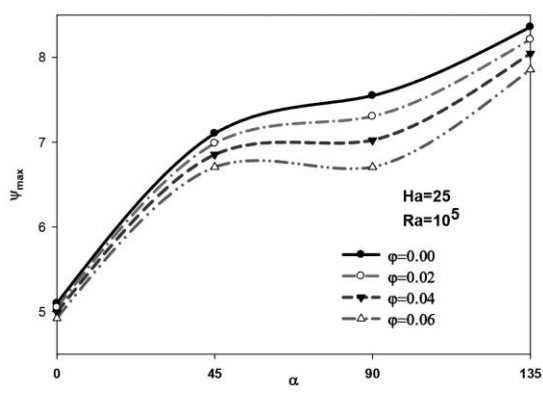
رایلی	-	10^5	10^4	10^3
عدد ناسلت	صفر	۱/۱۸۱۶۱	۱/۱۹۸۱۱	۱/۰۴۹۶۳
	۴۵	۳/۷۸۶۴۹	۱/۱۸۰۱۴	۱/۰۴۸۷۹
	۹۰	۳/۰۹۸۷۹	۱/۰۴۷۸۶	۱/۰۴۷۸۶
	۱۳۵	۳/۹۲۷۴۷	۱/۱۷۰۵۴	۱/۰۴۸۷۱
تابع جریان	صفر	۵/۰۴۹۹۹	۰/۹۲۶۱۷	۰/۰۹۵۴۲
	۴۵	۶/۹۸۷۹۷	۰/۸۷۰۹۴	۰/۰۶۹۲۸
	۹۰	۷/۳۰۳۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
	۱۳۵	۸/۲۱۲۱۳	۰/۹۷۹۶۹	۰/۰۷۹۲۸



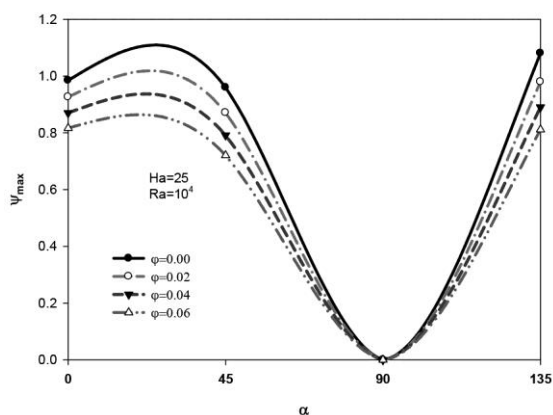
شکل ۱۲. تغییرات عدد ناسلت متوسط بی بعد شده در مقابل عدد رایلی در زوایای مختلف قرارگیری



شکل ۱۱. تغییرات تابع جریان حداکثر بدون بعد در مقابل عدد رایلی در زوایای مختلف قرارگیری



شکل ۱۳. تغییرات تابع جریان حداکثر در زوایای دلخواه برای کسرهای مختلف حجمی نانوذرات



در $Ra = 10^4$ با چرخش محفظه از $\alpha = 0^\circ$ تا $\alpha = 135^\circ$ در تمامی حالات انتقال حرارت کاهش یافته است $\left(\frac{Nu_m}{Nu_m(\alpha=0.00)} \leq 1.0 \right)$.

نسبت $Nu_m/Nu_m(\alpha=0.00)$ با افزایش درصد حجمی نانوذرات برای $\alpha = 45^\circ, 135^\circ$ شیب منفی دارد به این معنا که با افزایش درصد حجمی نانوذرات، $Nu_m/Nu_m(\alpha=0.00)$ افزایش و در $\alpha = 90^\circ$ حالت عکس صورت می‌گیرد و با افزایش درصد حجمی نانوذرات $Nu_m/Nu_m(\alpha=0.00)$ کاهش می‌یابد.

حداکثر مقدار $|\Psi|_{max}$ برای $\alpha = 135^\circ$ ایجاد می‌شود. در جدول ۸، Nu_m بیان شده است. با توجه به جدول ۸ مشاهده می‌شود که برای $Ra = 10^4$ در تمامی موارد افزایش درصد حجمی به بهبود انتقال حرارت کمک می‌کند، اما برای $Ra = 10^5$ شرایط متفاوتی ایجاد می‌شود، در $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 135^\circ$ با افزایش درصد حجمی Nu_m کاهش و برای $\alpha = 90^\circ$ افزایش Nu_m را داریم. در شکل ۱۴، $Nu_m/Nu_m(\alpha=0.00)$ برای درصد حجمی‌های مختلف به‌طور همزمان رسم شده است. در

جدول ۶. نسبت تابع جریان ماکزیمم به جریان ماکزیمم $\omega_{Max}(\alpha=0^\circ)/\omega_{Max}$ در $\alpha = 0^\circ$ در زوایای و عددهای رایلی مختلف

رایلی	10^3	10^4	10^5
صفر	۱	۱	۱
۴۵	۰/۷۲۶۱	۰/۹۴۰۴	۱/۲۸۳۶
۹۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۴۴۶۳
۱۳۵	۰/۸۳۰۹	۱/۰۵۷۸	۱/۶۲۶۲

جدول ۷. نسبت نوسلت متوسط به نوسلت متوسط در $\alpha = 0^\circ$ $(Nu_m/Nu_m(\alpha=0^\circ))$ در زوایای و عددهای رایلی مختلف

رایلی	10^3	10^4	10^5
صفر	۱	۱	۱
۴۵	۰/۹۹۹۲	۰/۹۸۵۰	۱/۱۸۹۶
۹۰	۰/۹۶۹۷	۰/۸۷۴۶	۱/۹۷۴۰
۱۳۵	۰/۹۹۹۱	۰/۹۷۷۰	۱/۲۳۴۴

جدول ۸. تغییرات عدد ناسلت متوسط برای کسرهای مختلف حجمی نانوذرات در زوایای مختلف و عددهای رایلی 10^4 و 10^5

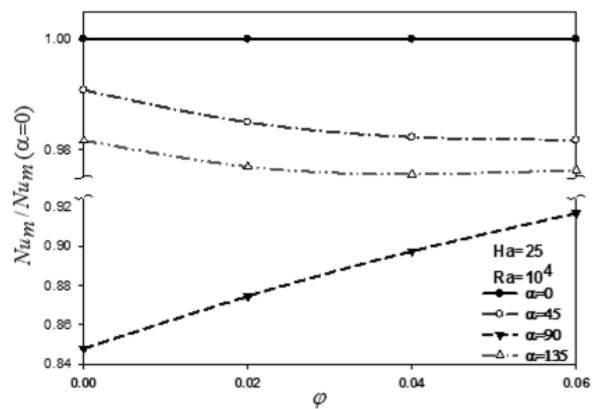
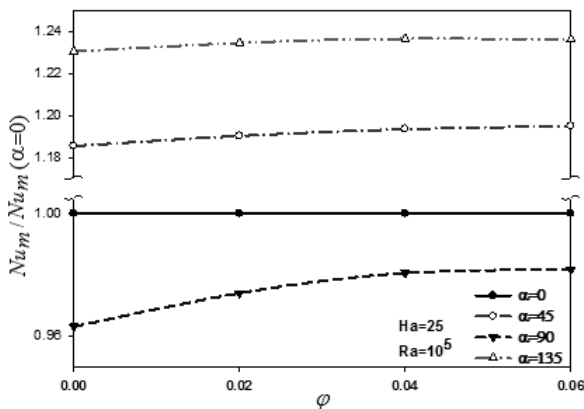
ناسلت متوسط	$0/0$	$0/2$	$0/4$	$0/6$
صفر	۱/۱۶۷۷۹	۱/۱۹۸۱۱	۱/۲۳۴۳۷	۱/۲۷۶۴۳
۴۵	۱/۱۵۷۰۷	۱/۱۸۰۱۴	۱/۲۱۲۵۳	۱/۲۵۳۱۹
۹۰	۰/۹۹۰۰۰	۱/۰۴۷۸۶	۱/۱۰۸۰۱	۱/۱۷۰۶۰
۱۳۵	۱/۱۴۶۴۴	۱/۱۷۰۵۴	۱/۲۰۴۲۳۶	۱/۲۴۶۲۹
صفر	۳/۱۹۵۱۰	۳/۱۸۱۶۱	۳/۱۶۳۶۹	۳/۱۴۱۸۵
۴۵	۳/۷۸۷۲۴	۳/۷۸۶۴۹	۳/۷۷۵۴۸	۳/۷۵۳۹۷
۹۰	۳/۷۶۸۰	۳/۰۹۸۷۹	۳/۱۰۲۱۹	۳/۰۸۴۴۵
۱۳۵	۳/۹۳۰۹۶	۳/۹۲۷۴۷	۳/۹۱۱۶۹	۳/۸۸۳۵۹

انتقال حرارت کاهش پیدا کرده است. با چرخش محفظه از $\alpha = 0^\circ$ به $\alpha = 45^\circ, 135^\circ$ با افزایش درصد حجمی نانوذرات، $Nu_m/Nu_m(\alpha=0.00)$ افزایش پیدا کرده است و در $\alpha = 90^\circ$ با

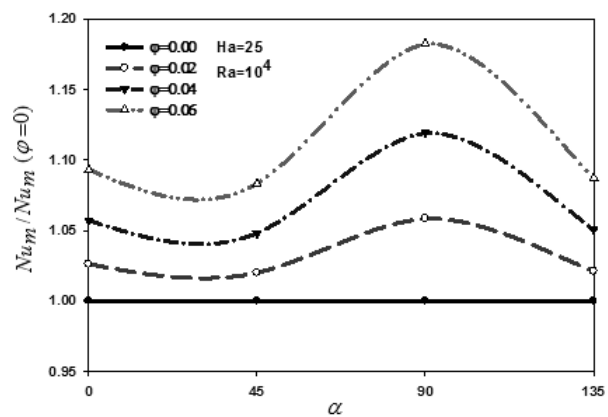
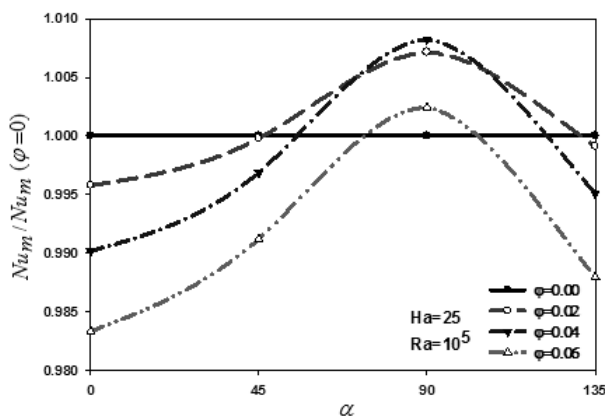
در $Ra = 10^5$ با چرخش محفظه از $\alpha = 0^\circ$ به $\alpha = 45^\circ, 135^\circ$ انتقال حرارت افزایش یافته است $\left(\frac{Nu_m}{Nu_m(\alpha=0.00)} \geq 1.0 \right)$ در حالی که در $\alpha = 90^\circ$

نتیجه آن جابه‌جایی کاهش پیدا می‌کند از طرفی باعث افزایش هدایت می‌شود. در یک زاویه ثابت و در ریلی‌های کوچک، با افزایش φ ، هدایت افزایش و جابه‌جایی کاهش پیدا می‌کند، جریان هدایت در تمام محفظه حاکم است در نتیجه آن نوسلت موضعی و در پی آن نوسلت متوسط افزایش می‌یابد، در ریلی $Ra = 10^5$ ، هدایت مکانیزم غالب نیست بنابراین با افزایش φ نوسلت موضعی عموماً کاهش یافته و نوسلت متوسط نیز کاهش یافته است. با چرخش محفظه، معادله مومنتم با $\sin \alpha$ و $\cos \alpha$ تغییر می‌کند، از طرفی افزایش φ جابه‌جایی را کاهش و هدایت را افزایش می‌دهد، در زاویه $\alpha = 0^\circ$ معادله مومنتم در جهت X جمله $\frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} RaPr\theta \sin \alpha$ بی‌تأثیر می‌شود و در $\alpha = 90^\circ$ معادله مومنتم در جهت Y جمله $\frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} RaPr\theta \cos \alpha$ بی‌تأثیر می‌شود، در سایر موارد هر دو جمله اثرگذار می‌باشند، که بیشترین تأثیر با افزایش و چرخش محفظه در زاویه خود را نشان می‌دهد.

افزایش درصد حجمی نانوذرات $Nu_m/Nu_m(\alpha=0.00)$ ، به سمت هم‌اندازه شدن با انتقال حرارت در $\alpha = 0^\circ$ میل می‌کند. در شکل ۱۵، $Nu_m/Nu_m(\varphi=0.00)$ در زاویه‌های مختلف رسم شده است. با توجه به شکل در $Ra = 10^4$ با افزایش درصد حجمی نانوذرات انتقال حرارت افزایش یافته است این در حالی است که در $Ra = 10^5$ فقط در $\alpha = 90^\circ$ با افزایش درصد حجمی نانوذرات انتقال حرارت افزایش یافته است و در سایر موارد انتقال حرارت کاهش می‌یابد. انتقال حرارت از سه روش هدایت، جابه‌جایی و تشعشع صورت می‌پذیرد، چون تأثیر تشعشع قابل چشم‌پوشی است، در نتیجه انتقال حرارت از طریق هدایت و جابه‌جایی صورت می‌پذیرد. با توجه به معادله مومنتم نقش جمله $\frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} RaPr\theta \sin \alpha$ و $\frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} RaPr\theta \cos \alpha$ خیلی حائز اهمیت است؛ زیرا با عدد ریلی رابطه مستقیم و با چگالی نانوسیال رابطه عکس دارد. افزایش φ چگالی نانوسیال را افزایش می‌دهد که در



شکل ۱۴. تغییرات عدد ناسلت میانگین در زوایای دلخواه برای کسره‌های مختلف حجمی نانوذرات



شکل ۱۵. تغییرات عدد ناسلت متوسط بی‌بعد شده در زوایای مختلف برای کسره‌های حجمی نانوذرات

۸. نتیجه‌گیری

نمی‌شود، این در حالی است که برای زوایای صفر و ۹۰ درجه چنین اتفاقی صورت نمی‌گیرد و همواره با افزایش هارتمن صفحه گرم عمودی عملکرد بهتری در انتقال حرارت نسبت به صفحه آدیاباتیک عمودی دارد. هرچه طول بی‌بعد صفحه میانی بیشتر باشد، سرعت جریان درون محفظه و انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد. لذا با تغییر ارتفاع صفحه میانی همانند تغییر عدد هارتمن می‌توان جریان و میزان انتقال حرارت را کنترل کرد. افزودن نانوذرات به آب و افزایش نسبت حجمی نانوذرات، 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 افزایش میزان ضریب هدایت حرارتی انتقال حرارت افزایش می‌یابد. با افزایش ریلی انتقال حرارت جابه‌جایی تأثیر خود را نمایان می‌کند و با افزایش نسبت حجمی به علت افزایش لزجت و کاهش سرعت نانوسیال و ضعیف شدن جریان، انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد، در حالی که هدایت افزایش پیدا کرده و میزان انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

در این بررسی، به جریان جابه‌جایی آزاد درون یک محفظه با یک مانع در وسط محفظه به روش عددی پرداخته شد. نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد. در تغییر زاویه محفظه و برای $Ra = 10^5$ ، ماکزیمم انتقال حرارت درون محفظه‌های مربعی درحالی صورت می‌پذیرد که صفحه گرم با افق دارای زاویه ۴۵ درجه ($\alpha = 135^\circ$) باشد. باتوجه به حجم و کاربرد محفظه در صورتی که امکان قراردادن محفظه با زاویه دلخواه وجود نداشته باشد، برای عملکرد بهتر در انتقال حرارت، بهترین حالت در تسریع انتقال حرارت وقتی صورت می‌پذیرد که صفحه آدیاباتیک با افق دارای زاویه صفر باشد. در حالی که محفظه تحت میدان مغناطیسی نباشد، بیشترین انتقال حرارت حالت وقتی است که صفحه آدیاباتیک با افق زاویه ۴۵ دارد، اما وقتی نانوسیال درون محفظه تحت میدان مغناطیسی باشد، بهترین حالت انتقال حرارت در زاویه محفظه ۱۳۵ صورت می‌پذیرد. در هارتمن‌های بالا، انتقال حرارت برای هر دو حالت ۴۵ و ۱۳۵ درجه تقریباً یکسان می‌باشد و تفاوتی چندانی مشاهده

فهرست علائم

X	فاصله افقی بدون بعد از مبدا مختصات (m)	\vec{B}	میدان مغناطیسی
y	فاصله عمودی از مبدا مختصات (m)	c_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg \cdot K^{-1}$)
Y	فاصله عمودی بدون بعد از مبدا مختصات (m)	g	شتاب جاذبه (m/s^2)
	علائم یونانی	H	ارتفاع بدون بعد صفحه
α	زوایه محفظه با افق (m^2/s^{-1})	Ha	عدد بدون بعد هارتمن
α_p	ضریب رهایی فشار	Hm	ارتفاع صفحه میانی (m)
β	ضریب انبساط گرمایی (K^{-1})	J	پارامتر گرمایش ژول
φ	درصد حجمی نانوسیال	K	ضریب هدایت حرارتی
μ_0	نفوذ پذیری	L	طول بدون بعد صفحه
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	Nu	عدد نوسلت
θ	دمای بدون بعد	Pr	عدد پرانتل
ϑ	لزجت سینماتیکی (m^2/s^{-1})	Ra	عدد بدون بعد ریلی
ρ°	چگالی در زمان اولیه (kgm^{-3})	S	ترم چشمه
ρ	چگالی (kgm^{-3})	T	دمای دیواره (K)
σ	ضریب هدایت الکتریکی	u	سرعت افقی (ms^{-1})
	زیر نویس‌ها	U	سرعت افقی بدون بعد
c	دیواره سرد	v	سرعت عمودی (ms^{-1})
f	خواص مربوط به سیال	V	سرعت عمودی بدون بعد
h	دیواره گرم	x	فاصله افقی از مبدا مختصات (m)
nf	خواص مربوط به نانو سیال		
P	خواص مربوط به نانوذرات		

- [1] S. Sadeghi, B. Ghasemi, Mixed Convection Heat Transfer of Nanofluids in an Inclined Channel Under Magnetic Field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 7, pp. 18-31, 2018 (in Persian)
- [2] G. Kefayati, M. Gorji, H. Sajjadi, D. D. Ganji, Investigation of Prandtl number effect on natural convection MHD in an open cavity by Lattice Boltzmann Method, *Engineering Computations*, Vol. 30, No. 1, pp. 97-116, 2012.
- [3] Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider E, S. Xi, A review on development of nanofluid preparation and characterization, *Journal of Powder Technology*, Vol. 196, No. 2, pp. 89-101, 2009
- [4] A. Shahriari, Effect of magnetic field on natural convection heat transfer of nanofluid in wavy cavity with non-uniform temperature distribution, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 29-40, 2017. (in Persian)
- [5] M. Raihani, A. Abedin, A. Ebrahimi, Study the Properties of Performance and Sustainability of Nanofluids and ferrofluids, *Journal of ISME*, , Vol. 26, No. 116, pp. 51-65, 2017 (in Persian).
- [6] H. Fazeli, P. Rahim mashaei, M. Shahryari, S. Madan, Investigation & simulation of Nanoparticle application in satellite equipment cooling; simultaneous use of Nano fluid and a heat pipe with three evaporators, *Journal of Aerospace Knowledge and Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 41-54 Summer 2017. (in Persian)
- [7] Z. H. Liu, Y. Y. Li, A new frontier of nanofluid research-application of nanofluids in heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 6786-6797, 2012.
- [8] T. Saitoh, K. Hirose, High-accuracy benchmark solutions to natural convection in a square cavity, *Journal of Computational Mechanics*, Vol. 13, No. 4, pp.417-427, 1989.
- [9] G. De Vahl Davis, Natural convection of air in a square cavity :a Benchmark solution, *International Journal for numerical methods in fluids*, Vol. 3, No. 3, pp. 249-264, 1983.
- [10] Q. H. Deng, G. F. Tang, Y. A. Li, combined temperature scale for analyzing natural convection in rectangular enclosures with discrete wall heat sources, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 16, pp.3437-3446, 2002.
- [11] H. F. Oztop, E. Abu-Nada, Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids, *International journal of heat and fluid flow*, Vol. 29, No. 5, pp. 1326-1336, 2008.
- [12] M.S. Krakov, I.V. Nikiforov, To the influence of uniform magnetic field on thermomagnetic convection in square cavity, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 252, pp. 209-211, 2002.
- [13] T. Jue, Analysis of combined thermal and magnetic convection ferrofluid flow in a cavity, *International communications in heat and mass transfer*, Vol. 33, No. 7, pp. 846-852, 2006.
- [14] H. L. G. Couto, N. B. Marcelino, F. R. Cunha, A study on magnetic convection in a narrow rectangular cavity, *Journal of Magnetohydrodynamics*, Vol 43, No. 4, pp. 421-428, 2007.
- [15] N. C. Markatos, K. A. Pericleous, Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, No. 5, pp. 772-775, 1984.
- [16] M. A. Teamah, Numerical simulation of double diffusive natural convection in rectangular enclosure in the presences of magnetic field and heat source, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, No.3, pp. 237-248, 2008.
- [17] 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 of Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 9, pp. 1184-1194, 2008.
- [18] B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, A. Raisi, Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 9, pp. 1748-1756, 2011.
- [19] M. Pirmohammadi, M. Ghassemi, Effect of magnetic field on convection heat transfer inside a tilted square enclosur, *International*

پی‌نوشت

1. MHD