

بررسی عددی میدان جریان و دما جهت بهبود انتقال حرارت نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی

محمد رضا نجفی^{۱*}، علیرضا شاطری^۲

^۱ مربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهکرد، شهکرد

*مسئول مکاتبات: drmrnajafi7@gmail.com

چکیده

واژگان کلیدی

جابجایی توأم
محفظه C-شکل
میدان مغناطیسی
نانوسیال
عدد ناسلت

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۳/۲۴
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۶/۱۹

در این مقاله انتقال گرمای جابجایی توأم آزاد و اجباری در یک محفظه C-شکل حاوی نانوسیال به روش عددی بررسی شده است. این جریان از پایین محفظه وارد شده و از بالا خارج شده و دیواره در ارتباط با سیال در دمای T_h در نظر گرفته شد. محفظه تحت اثر میدان مغناطیسی بکنواختی قرار دارد. معادلات حاکم بر جریان از روش حجم کنترل و استفاده از الگوریتم سیمپل حل شده‌اند و میدان‌های جریان، دما و میزان انتقال گرما پیش بینی شد. بررسی‌ها به ازای تغییر اعداد ریچاردسون (Ri)، رایلی (Re)، هارتمن (Ha) و درصد حجمی نانوذرات در حالت دائم انجام شده است. نتایج این بررسی حاکی نشان داد با افزایش عدد رایلی از 10^3 به 10^5 ، بیشترین مقدار افزایش انتقال حرارت (افزایش مقدار تابع جریان) از $0/9$ به $16/06 m^2/s$ است ولی با افزایش عدد ریچاردسون از $0/1$ به 10 ، بیشترین کاهش انتقال حرارت از $11/02$ به $5/58 m^2/s$ اندازه‌گیری شد. مؤلفه‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر به صورت همزمان، در کارهای دیگر مورد توجه قرار نگرفته است.

۱ مقدمه

حجمی نانوذرات موجب افزایش عدد ناسلت (Nu) متوسط و کاهش دمای بالک می‌شود. محمودی و همکاران [۵] اثر موقعیت ورود و خروج نانوسیال خنک‌کننده در یک محفظه را بررسی نمودند. برای این منظور میزان انتقال حرارت در چهار حالت مختلف موقعیت ورود و خروج نانوسیال بررسی شده است.

قاسمی و همکاران [۶] اثر میدان مغناطیسی افقی بر جریان جابجایی آزاد یک محفظه بسته را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان حاکی از افزایش نرخ انتقال حرارت با افزایش عدد رایلی و کاهش آن با افزایش عدد هارتمن است. کدروی^۱ و همکاران [۷] میدان مغناطیسی عمودی در یک محفظه حاوی نانوسیال (آب و اکسید آلومینیوم) را بررسی نمودند. نتایج حاکی از تأثیر عدد هارتمن بر جریان و انتقال حرارت است. رحمان و همکاران [۸] اثر اعداد رینولدز و پرانتل را در جریان جابجایی توأم داخل یک محفظه تهویه‌شونده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که میدان‌های جریان و دما نیز مشابه نیروی دراگ^۲، دمای متوسط سیال و نرخ انتقال حرارت، متأثر از تغییر پارامترهای رینولدز، ریچاردسون و پرانتل است. نتایج تحقیقات شیخ‌الاسلامی و سیدنژاد نشان می‌دهد که بیشترین عدد ناسلت متعلق به بخش نانوذرات است و عدد ناسلت تابع افزایشی عدد داری، ولتاژ تغذیه و عدد رایلی است [۹]. به نظر می‌رسد که مطالعات مربوط به محفظه تهویه‌شونده در حضور میدان مغناطیسی تحقیقات بیشتری را طلب می‌کند. نتایج پژوهش شیخ‌الاسلامی و عاشوری‌نژاد نیز نشان می‌دهد که اثربخشی

جریان سیال و انتقال حرارت در یک محفظه تهویه‌شونده کاربرد بسیاری در طبیعت و در دستگاه‌های مهندسی دارد. در مواردی که انتقال حرارت جابجایی آزاد توانایی خنک کاری مطلوب را ندارد، انتقال حرارت جابجایی توأم آزاد و اجباری برای پراکنده کردن حرارت‌های زیاد در اجزای کامپیوتری پیشنهاد می‌شود [۱]. از نمونه کاربردهای جابجایی توأم می‌توان به تهویه ساختمانی، مبدل‌های حرارتی و سرد کردن دستگاه‌های الکترونیکی اشاره نمود [۲]. سیالات متداول در صنعت همچون آب، اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول ضرایب هدایت حرارتی پایینی دارند. لذا در مهر و موم‌های اخیر توجه بسیاری از محققین به نانوسیالات و کاربردهای آن در صنعت معطوف شده است. استفاده از نانوذرات فلزی با هدایت حرارتی بالا در سیالات مذکور تأثیر قابل توجهی در خواص هدایت حرارتی آن‌ها اعمال می‌کند. برای مثال افزودن فقط $0/3\%$ حجمی از نانوذرات مس با قطر 10 نانومتر به اتیلن گلیکول، ضریب هدایت حرارتی آن را تا 40% افزایش می‌دهد [۳] از طرفی در برخی موارد همچون رشد کریستال در سیالات، ریخته‌گری فلزات، راکتورهای هسته‌ای و استخراج انرژی زمین انتقال حرارت تحت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد. لذا تحقیقات بسیاری در زمینه انتقال حرارت در محفظه‌های بسته و محفظه‌های تهویه‌شونده حاوی نانوسیال در حضور میدان مغناطیسی صورت گرفته است. شاهی و همکاران [۴] اثر ورود و خروج نانوسیال خنک‌کننده در یک محفظه ارائه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد

¹Kadri ²drag

معادله (۲) مومنوم در راستای x را بیان می‌کند.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right). \quad (2)$$

معادله (۳) مومنوم در راستای y را بیان می‌کند.

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \beta_{nf} g (T - T_C) - \sigma_{nf} B_0^2 v \right]. \quad (3)$$

معادله انرژی با معادله (۴) توصیف می‌شود.

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

به منظور بی بعدسازی معادلات، از پارامترهای بدون بعد معادلات (۵) استفاده می‌کنیم:

$$\begin{cases} X = \frac{x}{L}, & Y = \frac{y}{L}, & U = \frac{u}{U_0}, & V = \frac{v}{U_0}, \\ P = \frac{\bar{P}}{\rho_{nf} U_0^2}, & Re = \frac{\rho U (L - D)}{\mu_f}, & Ri = \frac{Gr}{Re^2}, \\ Ra = \frac{g \beta_f L^3 (T_h - T_C)}{\nu_f \alpha_f}, & Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f} = \frac{Ra}{Gr}, \\ Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma_f}{\rho_f \nu_f}}, & Gr = \frac{g \beta_f L^3 (T_h - T_C)}{\nu_f^2}. \end{cases} \quad (5)$$

معادلات بی بعد حاکم بر مسئله علاوه بر معادله پیوستگی (۱) عبارتند از معادله مومنوم در راستای X که همانند معادله (۶) است.

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right). \quad (6)$$

معادله مومنوم در راستای Y مطابق معادله (۷) است.

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{\beta_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ri \theta - \frac{\rho_f \sigma_{nf}}{\rho_{nf} \sigma_f} \frac{Ha^2}{Re} V. \quad (7)$$

معادله انرژی با معادلات (۸) بیان می‌شود.

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{Re \cdot Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right). \quad (8)$$

شرایط مرزی نیز در معادلات (۹) اعمال می‌شود. در دیواره سمت چپ (ah):

$$\theta = 1, \quad U = V = 0. \quad (9)$$

دیواره سمت راست (ed) با معادلات (۱۰) بیان می‌شود.

$$\theta = 0, \quad U = V = 0. \quad (10)$$

ورودی (bc) با معادلات (۱۱) بیان می‌شود.

$$U = 1, \quad V = 0, \quad \theta_{in} = 0. \quad (11)$$

حجم نانوذرات برای یک عدد رایلی پایین در مقایسه با یک عدد رایلی بالا بیشتر است [۱۰].

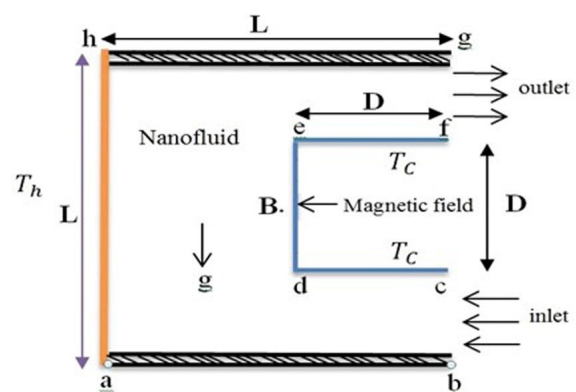
در مقاله حاضر اثر میدان مغناطیسی در محفظه C- شکل حاوی نانوسیال که جریان از قسمت پایین محفظه وارد شده و از بالا خارج می‌شود، مورد بررسی و بحث واقع شده است. در مطالعه حاضر، اثر پارامترهای مؤثر نظیر اعداد ریچاردسون، رایلی و هارتمن و همچنین درصد حجمی نانوذرات بررسی شده است که پیش از این بررسی همزمان این پارامترها و تأثیر درصد حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت مورد توجه قرار نگرفته است.

۲ بیان مسئله

شکل ۱ هندسه مسئله بررسی شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. محفظه‌ای C- شکل که عرض مجرای ورود و خروج هوا، سه دهم ارتفاع محفظه است ($D = 0.3L$). سطوح افقی و دیواره سمت چپ عایق بوده و جریان ثابتی با دمای سرد از پایین وارد محفظه شده و میدان مغناطیسی افقی و یکنواختی به محفظه اعمال می‌شود. در این پژوهش از نانوذره آلومینا استفاده شده است. نانوسیال نیوتونی و تراکم‌ناپذیر است و جریان دو بعدی و آرام و همچنین نانوسیال به صورت محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و نانوذرات در نظر گرفته می‌شود. خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی آب و Al_2O_3 [۱۱].

Al_2O_3	آب	خواص ترموفیزیکی
	۶/۲	Pr
۰/۸۵	۲۱	$\beta (k^{-1}) \times 10^{-5}$
۳۹۷۰	۹۹۷/۱	$\rho (kg/m^3)$
۷۶۵	۴۱۷۹	$C_p (J/kg \cdot K)$
۴۰	۰/۶۱۳	$k (W/mK)$



شکل ۱: هندسه مسئله.

۱.۲ معادلات

معادلات حاکم بر سیستم با فرض جریان آرام دو بعدی و تقریب بوزینسک، عبارت‌اند از: معادله (۱) پیوستگی:

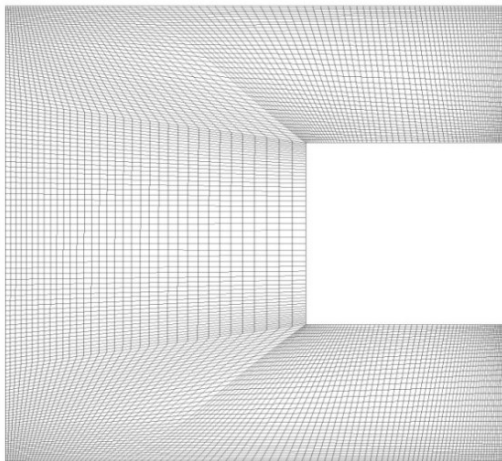
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

۲.۲ روش عددی

وابستگی معادلات حاکم بر مسئله، حل هم‌زمان آن‌ها را طلب می‌کند. در این تحقیق، معادلات به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل و استفاده از الگوریتم سیمپل [۱۰] حل شده‌اند و برای دستیابی به جواب‌های دقیق‌تر، دامنه حل به صورت شبکه‌بندی غیریکنواخت منظور شده و در کنارها ریزتر در نظر گرفته شده است. اثر تعداد گره‌های شبکه بر عدد ناسلت متوسط در جدول ۲ نشان داده شده است. در این مقاله برای عدم وابستگی مسئله به تعداد گره‌های شبکه، از تعداد گره‌های ۴۷۶۵۵ استفاده شده است. شکل ۲ شبکه‌بندی مسئله را نمایش می‌دهد. شرط همگرایی برای مسئله حاضر، کوچک‌تر شدن باقیمانده جرمی از ۸-۱۰ در هر حجم کنترل منظور شده است. در اولین قدم صحت‌سنجی برنامه را در دو حالت مختلف مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. ابتدا با مقایسه نتایج با حالت جابجایی توأم نانوسیال در یک محفظه مربعی [۴] کنترل شده است. در مرحله بعد، جهت صحت‌سنجی در حضور میدان مغناطیسی، جریان جابجایی آزاد در محفظه پر شده از نانوسیال و تحت میدان مغناطیسی افقی با فرض عایق بودن دیواره‌های افقی به طوری که دیواره سمت چپ در دمای ثابت گرم و دیواره سمت راست در دمای ثابت سرد هستند [۶]، بررسی می‌شود. مقادیر عدد ناسلت در هر دو قیاس، تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد. نتایج مذکور در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۲: تأثیر تعداد نقاط شبکه بر عدد ناسلت متوسط ($\phi = 0.03$ ، $Ha = 20$ ، $Ra = 10^5$ ، $Ri = 10$).

تعداد گره‌ها	عدد ناسلت متوسط
۲۴۸۵۲	۴/۷۴۲۹
۳۵۸۷۶	۴/۷۴۱۶
۴۷۶۵۵	۴/۷۳۰۷
۵۱۹۸۵	۷/۷۳۰۳
۵۵۷۵۰	۴/۷۳۰۱



شکل ۲: شبکه‌بندی استفاده شده.

جدول ۳: مقایسه عدد ناسلت از مطالعه حاضر با مرجع [۴].

خطا (%)	مرجع [۴]	مسئله حاضر	عدد رایلی
۰/۲۲۳	۲/۲۴۸	۲/۲۳۴	$Ra = 10^4$
۰/۳۹۸	۴/۵۰۳	۴/۵۲۱	$Ra = 10^5$
۰/۲۳۱	۹/۱۴۷	۹/۱۲۶	$Ra = 10^6$

خروجی (fg) طبق معادلات (۱۲) است.

$$P_{out} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0. \quad (12)$$

معادلات (۱۳) سایر سطوح افقی (gh, ef, cd, ab) را توضیح می‌دهد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0, \quad U = V = 0. \quad (13)$$

نرخ انتقال حرارت روی هر یک از این دیواره‌ها را می‌توان در قالب عدد ناسلت موضعی روی آن دیوار مطابق معادله (۱۴) تعریف نمود.

$$Nu = \frac{hL}{K_f}. \quad (14)$$

در معادله (۱۴) ضریب هدایت گرمایی سیال K_f و ضریب انتقال حرارت جابجایی h روی دیواره است. با استفاده از پارامترهای بی بعد، عدد ناسلت موضعی روی دیواره گرم به صورت معادله (۱۵) می‌شود:

$$Nu_s = -\frac{k_{nf}}{K_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right). \quad (15)$$

عدد ناسلت متوسط نیز از انتگرال‌گیری ناسلت موضعی در طول دیوار تحت شار حرارتی به دست می‌آید. ویسکوزیته دینامیکی و هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال توسط روابط مراجع [۱۲، ۱۳] در معادلات (۱۶) و (۱۷) مدل می‌شوند.

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - \phi)^{-2.5}, \quad (16)$$

$$k_{nf} = k_f \frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)}. \quad (17)$$

برای توصیف و رسم خطوط جریان، توابع جریان به صورت معادله (۱۸) تعریف می‌گردند.

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, \quad V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}. \quad (18)$$

اگر جریان سیال هادی الکتریسیته با سرعت \vec{u} در حضور میدان مغناطیسی \vec{B} رخ دهد، چگالی جریان الکتریکی \vec{J} ، مطابق با قانون القای فارادی به وجود می‌آید (معادله (۱۹)).

$$\vec{J} = \sigma(-\vec{\nabla} \Phi + \vec{u} \times \vec{B}), \quad (19)$$

که در آن σ ضریب هدایت الکتریکی محیط رسانا، Φ پتانسیل الکتریکی \vec{B} مطابق معادله (۲۰)، مجموع میدان مغناطیسی اعمالی (\vec{B}_0) و میدان مغناطیسی القایی (\vec{b}) است. به واسطه برهم‌کنش چگالی جریان الکتریکی با میدان مغناطیسی، نیروی لورنتس^۳ به صورت معادله (۲۱) فعال می‌شود [۱۳].

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{b}, \quad (20)$$

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}, \quad (21)$$

نیروی لورنتس بر تمام رساناهای متحرک که در معرض میدان مغناطیسی قرار گرفته‌اند عمل می‌کند.

³Lorentz

افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش عدد ریچاردسون از تراکم خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره گرم کاسته شده و عدد ناسلت کاهش می‌یابد. این کاهش انتقال حرارت در اعداد رایلی بزرگ‌تر (مانند $Ra = 10^5$)، مشهودتر است.

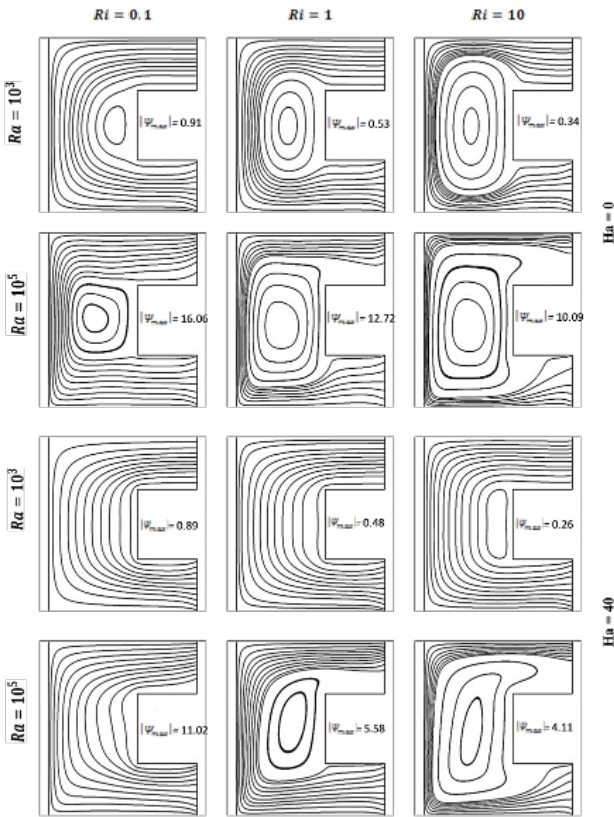
جدول ۴: مقایسه عدد ناسلت از مطالعه حاضر با مرجع [۶] ($Ra = 10^4$)، ($Ha = 30$).

درصد نانوذرات	مسئله حاضر	مرجع [۶]	خطا (%)
$\phi = 0$	۱/۱۸۲	۱/۱۸۳	۰/۰۸۳
$\phi = 0/02$	۱/۲۰۸	۱/۲۱۲	۰/۳۳۱
$\phi = 0/04$	۱/۲۴۳	۱/۲۴۹	۰/۴۷۹
$\phi = 0/06$	۱/۲۸۸	۱/۲۹۱	۰/۲۳۲

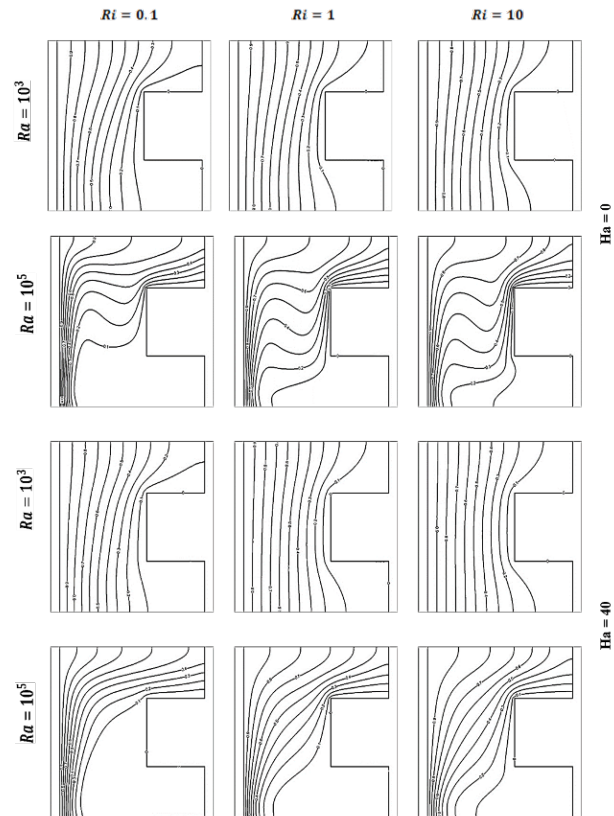
۳ نتایج

در این مقاله اثر میدان مغناطیسی بر جریان جابجایی توأم داخل یک محفظه C-شکل که حاوی نانوسیال آب-آلومینا است، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. برای هر مقدار از عدد رایلی ($10^3 \leq Ra \leq 10^6$) اعداد هارتمن ($0 \leq Ha \leq 40$) و اعداد ریچاردسون ($0 \leq Ri \leq 10$) تغییر می‌کند. علاوه بر این برای نشان دادن اثر نانوسیال بر میزان انتقال حرارت، محاسبات برای درصد حجمی نانوذرات ($0 \leq \phi \leq 0/05$) انجام شده است. شکل ۳ خطوط جریان با درصد حجمی $0/03$ ($\phi = 0/03$) را برای دو مقدار عدد رایلی ($Ra = 10^3, 10^5$) و هارتمن ($Ha = 0, 40$) در سه مقدار عدد ریچاردسون ($Ri = 0/1, 1, 10$) نشان می‌دهد. برای $Ra = 10^3$ در غیاب میدان مغناطیسی، جریان داخل محفظه پخش شده و گردابه کوچکی در مرکز محفظه به وجود می‌آید. با افزایش عدد ریچاردسون، به واسطه جذب انرژی بیشتر و به تبع آن افزایش انتقال حرارت جابجایی آزاد، گردابه‌های ساعت‌گرد بزرگ‌تر می‌شوند. از طرفی با افزایش عدد رایلی به $Ra = 10^5$ و در نتیجه افزایش نیروهای بویانسی، سیال مجاور دیوار گرم سبک شده و جریان سرد ورودی به سمت دیواره تحت دمای T_h کشیده شده و در نتیجه گردابه‌ها بزرگ‌تر می‌شوند و خطوط جریان ورودی در نزدیکی دیوار گرم متراکم می‌شوند. هرچه خطوط جریان سرد ورودی به این دیواره نزدیک‌تر باشند، عمل انتقال حرارت بهتر صورت گرفته و لذا عدد ناسلت بالاتری حاصل می‌شود. لذا افزایش عدد رایلی منجر به افزایش ناسلت گردیده است. با در نظر گرفتن همین حالت در حضور میدان مغناطیسی و افزایش عدد هارتمن، تأثیر کم‌رنگ‌تر عدد رایلی بر انتقال حرارت مشهود است.

هنگامی که محفظه در حضور میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، به دلیل اثر متقابل نیروهای لورنتس و بویانسی شکل خطوط جریان تغییر قابل توجهی داده است؛ به طوری که تعداد گردابه‌های کمتری نسبت به حالت قبل که میدان مغناطیسی وجود نداشت، تشکیل شده و میزان تراکم خطوط به سمت دیوار گرم نیز کمتر است. لذا می‌توان گفت با افزایش عدد هارتمن انتقال حرارت کاهش می‌یابد. از طرف دیگر در حضور میدان مغناطیسی همچنان با افزایش عدد رایلی فشردگی خطوط جریان در نزدیکی دیوار گرم بیشتر شده و از آنجا که سرعت سیال نیز افزایش یافته است، ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز افزایش یافته که منجر به افزایش انتقال حرارت و عدد ناسلت خواهد شد. شکل ۴ خطوط هم‌دما با درصد حجمی $0/03$ ($\phi = 0/03$) را برای دو مقدار عدد رایلی ($Ra = 10^3, 10^5$) و هارتمن ($Ha = 0, 40$) در سه مقدار عدد ریچاردسون ($Ri = 0/1, 1, 10$) نشان می‌دهد. در هر مقدار اعداد هارتمن و ریچاردسون، با افزایش رایلی تراکم خطوط هم‌دما در نزدیکی دیوار گرم بیشتر شده و بر اساس توضیحات قبلی انتقال حرارت و ناسلت نیز

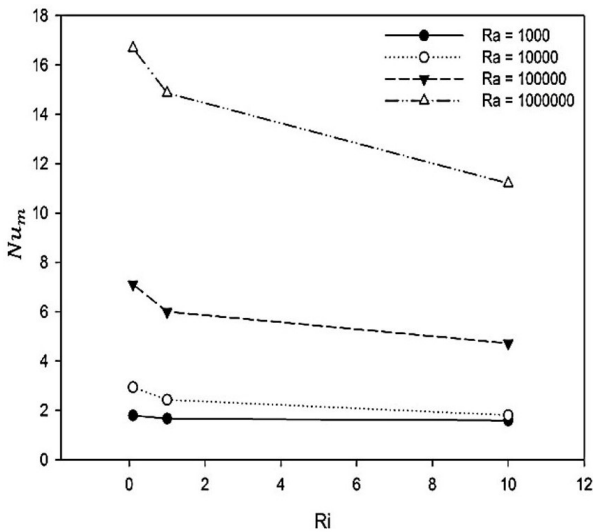


شکل ۳: خطوط جریان برای اعداد رایلی، ریچاردسون و هارتمن متفاوت ($\phi = 0/03$).



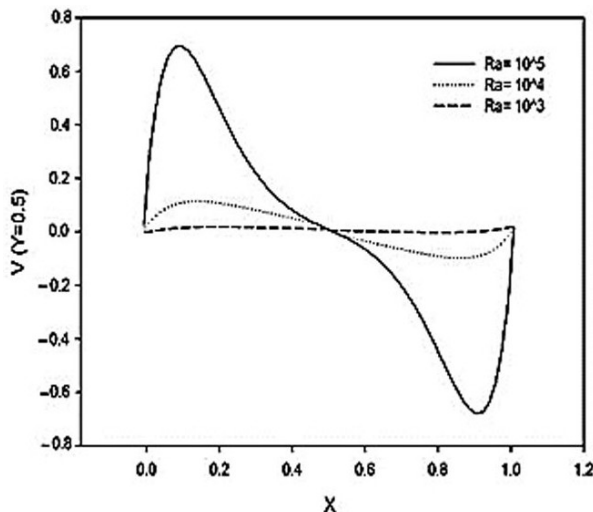
شکل ۴: خطوط هم‌دما برای اعداد رایلی، ریچاردسون و هارتمن متفاوت ($\phi = 0/03$).

شاهد افزایش عدد ناسلت هستیم که ناشی از افزایش سرعت سیال در نزدیکی دیواره گرم است.



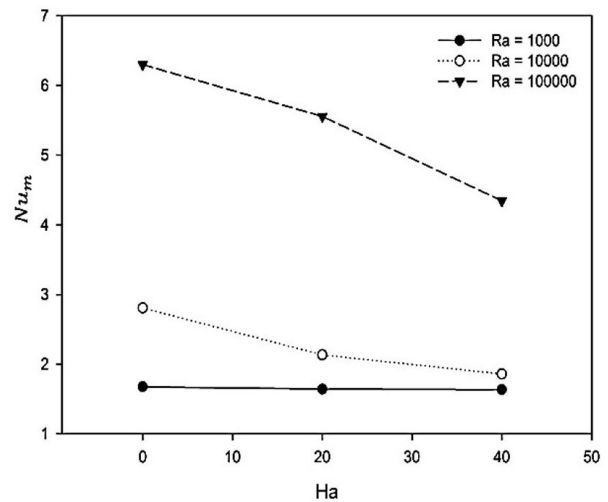
شکل ۷: تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد ریچاردسون در اعداد رایلی مختلف ($\phi = 0.03$ و $Ha = 20$).

برای درک بهتر رفتار جریان، پروفیل سرعت عمودی و دما، در راستای محور X و در $Y = 0.5$ در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است. پروفیل‌های سینوسی سرعت عمودی V ، جهت چرخش جریان داخل محفظه را نشان می‌دهد. در نزدیکی دیواره گرم، جریان به سمت بالا حرکت کرده و در مجاورت دیواره سرد حرکت سیال روبه پایین خواهد بود. با توجه به این‌که نقطه عطف پروفیل بیانگر سرعت محلی است که در آن، جهت حرکت گردابه عوض می‌شود و سرعت جریان به صفر می‌رسد، مشاهده می‌شود که پس از رسیدن به نقطه $X = 0.5$ سرعت به صفر می‌رسد. مقایسه پروفیل سرعت در اعداد رایلی مختلف نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی، اندازه سرعت افزایش می‌یابد. این مسئله می‌تواند به دلیل ایجاد جریان‌های بویانسی قوی‌تر در اعداد رایلی بالاتر باشد. از مقایسه پروفیل‌های سرعت در اعداد رایلی بالا و پایین، اندازه‌های سرعت در اعداد رایلی پایین، به دلیل نیروهای بویانسی ضعیف‌تر، در قیاس با اندازه‌های سرعت در اعداد رایلی بالاتر، ناچیز است.



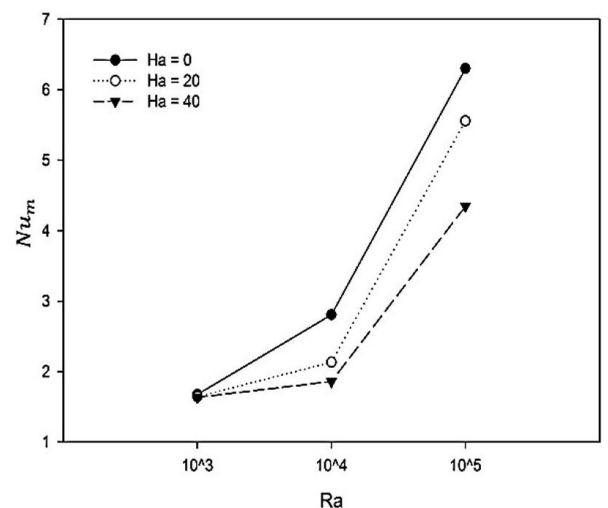
شکل ۸: پروفیل سرعت عمودی در راستای محور X و در $Y = 0.5$ ، $\phi = 0.03$ ، $Ha = 20$ ، $Ri = 1$.

شکل ۵ تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد رایلی را برای $Ri = 1$ و $\phi = 0.03$ در اعداد هارتمن مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رایلی در مقادیر مختلف هارتمن، عدد ناسلت افزایش می‌یابد که این موضوع به افزایش سرعت جریان و افزایش نیروی بویانسی برمی‌گردد. همچنین در هر مقدار عدد رایلی، با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت کاهش می‌یابد که دلیل آن تقابل نیروی لورنتس با انتقال حرارت جابجایی است که منجر به کاهش سرعت و در نتیجه کاهش انتقال حرارت گردیده است.



شکل ۵: تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد رایلی در اعداد هارتمن مختلف ($\phi = 0.03$ و $Ri = 1$).

شکل ۶ تغییر عدد ناسلت متوسط با عدد هارتمن را برای $Ri = 1$ و $\phi = 0.03$ در اعداد رایلی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد هارتمن شاهد کاهش انتقال حرارت خواهیم بود که دلیل آن تقابل نیروی لورنتس با انتقال حرارت جابجایی آزاد است.



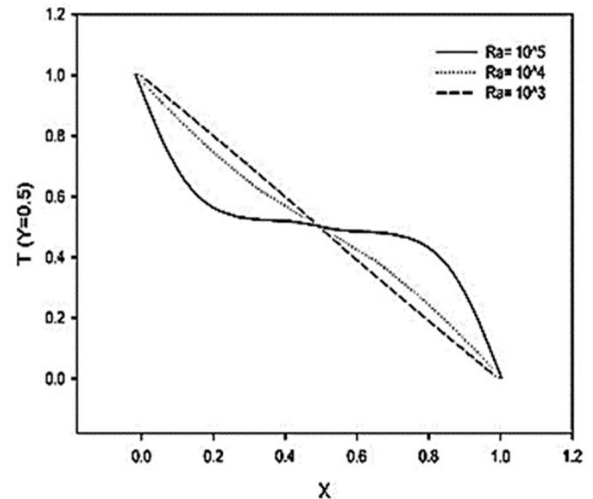
شکل ۶: تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد هارتمن در اعداد رایلی مختلف ($\phi = 0.03$ و $Ri = 1$).

شکل ۷ تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد ریچاردسون را برای $\phi = 0.03$ و $Ha = 40$ در اعداد رایلی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رایلی در مقادیر مختلف عدد ریچاردسون

قدرت میدان مغناطیسی بیشتر شود، از تأثیر عدد رایلی کاسته خواهد شد. افزایش عدد ریچاردسون بر میزان انتقال حرارت تأثیرگذار است. از آنجاکه با ثابت گرفتن عدد رایلی حاصل ضرب Re^2 در Ri می‌بایست عددی ثابت (Gr) شود. در نتیجه با افزایش عدد ریچاردسون رینولدز کاهش می‌یابد. با این که با افزایش عدد ریچاردسون به واسطه جذب بیشتر انرژی از منبع حرارتی، انتقال حرارت جابجایی آزاد افزایش می‌یابد اما به واسطه کاهش بیشتری که در عدد رینولدز وجود دارد، در مجموع افزایش عدد ریچاردسون موجب کاهش عدد ناسلت خواهد شد. که این تأثیر در اعداد رایلی بزرگ‌تر، بیشتر است.

مراجع

- [1] Kennedy, K J and Zebib, A. Combined free and forced convection between horizontal parallel planes: some case studies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 26(3):471-474, 1983.
- [2] Zhao, Fu-Yun, Liu, Di, Tang, Li, Ding, Yu-Long, and Tang, Guang-Fa. Direct and inverse mixed convections in an enclosure with ventilation ports. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(19-20):4400-4412, 2009.
- [3] Talebi, Farhad, Mahmoudi, Amir Houshang, and Shahi, Mina. Numerical study of mixed convection flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(1):79-90, 2010.
- [4] Shahi, Mina, Mahmoudi, Amir Houshang, and Talebi, Farhad. Numerical study of mixed convective cooling in a square cavity ventilated and partially heated from the below utilizing nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(2):201-213, 2010.
- [5] Mahmoudi, Amir Houshang, Shahi, Mina, and Talebi, Farhad. Effect of inlet and outlet location on the mixed convective cooling inside the ventilated cavity subjected to an external nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(8):1158-1173, 2010.
- [6] Ghasemi, B, Aminossadati, S M, and Raisi, A. Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(9):1748-1756, 2011.
- [7] Kadri, S, Mehdaoui, R, and Elmir, M. A vertical magneto-convection in square cavity containing a Al_2O_3 + water nanofluid: cooling of electronic compounds. *Energy Procedia*, 18:724-732, 2012.
- [8] Rahman, Md M, Parvin, S, Rahim, N A, Islam, M R, Saidur, R, and Hasanuzzaman, M. Effects of Reynolds and Prandtl number on mixed convection in a ventilated cavity with a heat-generating solid circular block. *Applied Mathematical Modelling*, 36(5):2056-2066, 2012.
- [9] Sheikholeslami, Mohsen and Seyednezhad, Mohadeseh. Simulation of nanofluid flow and natural convection in a porous media under the influence of electric field using CVFEM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120:772-781, 2018.



شکل ۹: پروفیل دما در راستای محور X و در $\phi = 0.3$, $Ha = 20$, $Y = 0.5$ ، $Ri = 1$.

پروفیل دما نیز نشان می‌دهد که در رایلی های پایین شیب دما تقریباً خطی است و این ناشی از غلبه انتقال حرارت هدایت بر جابجایی است. چراکه سرعت متعادل ناشی از رایلی کم باعث غلبه هدایت بر جابجایی می‌شود. با افزایش عدد رایلی در ابتدای محفظه شیب زیاد و پس از آن کم شدن شیب پروفیل، حکایت از برتری انتقال حرارت جابجایی بر هدایت دارد. زیرا سرعت جابجایی سیال تحت رایلی های بالا به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و در نتیجه آن انتقال حرارت صورت پذیرفته را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله جریان جابجایی توأم داخل یک محفظه تهویه‌شونده C- شکل و حاوی نانوسیال که یک میدان مغناطیسی افقی یکنواخت به آن اعمال می‌شود، مورد مطالعه قرار گرفت. محفظه به‌گونه‌ای است که جریان سرد از پایین وارد و از بالا خارج می‌شود و دیواره سمت چپ در دمای T_h است. اثر پارامترهای ریچاردسون، رایلی، هارتمن و درصد حجمی نانوذرات بر نرخ انتقال حرارت، خطوط جریان و خطوط هم‌دما بررسی و نتایج مطلوب حاصل شد. بررسی مؤلفه‌های حاضر در این پژوهش به صورت همزمان در کارهای دیگر مورد توجه قرار نگرفته است.

اثر پارامتر مربوط به میدان مغناطیسی (Ha) بر میدان‌های جریان و دما در اعداد رایلی مختلف و درصد حجمی‌های متفاوت قابل توجه است. به‌طوری که افزایش عدد هارتمن از ۰ به ۴۰ در عدد رایلی ۱۰۵ موجب کاهش عدد ناسلت تقریباً از ۶/۵ به ۴ می‌شود.

با افزایش عدد رایلی تعداد و قدرت گردابه‌های ایجادشده در خطوط جریان افزایش یافته و موجب متراکم نمودن خطوط جریان در نزدیکی دیوار گرم می‌شوند.

در غیاب میدان مغناطیسی اثر عدد رایلی بر محفظه آشکارتر است. بدین ترتیب که افزایش عدد رایلی در غیاب میدان مغناطیسی باعث افزایش بیشتر عدد ناسلت تقریباً از ۱/۵ به ۶/۵ می‌شود. البته در حضور میدان مغناطیسی نیز همچنان با افزایش عدد رایلی شاهد افزایش عدد ناسلت هستیم اما هرچه

- [10] Sheikholeslami, M., Ashorynejad, H.R., and Rana, P. Lattice boltzmann simulation of nanofluid heat transfer enhancement and entropy generation. *Journal of Molecular Liquids*, 214:86 – 95, 2016.
- [11] Abu-Nada, E, Masoud, Z, and Hijazi, A. Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(5):657–665, 2008.
- [12] Brinkman, H C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 20(4):571, 1952.
- [13] Maxwell, James Clerk. *A treatise on electricity and magnetism*, vol. 1. Oxford: Clarendon Press, 1873.