

کاربرد روش شبکه بولتزمن در شبیه سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال درون یک محفظه متوازی الاضلاع شکل در حضور میدان مغناطیسی

در کار حاضر، برای اولین بار، جابجایی طبیعی نانوسیال درون محفظه متوازی-الاضلاع شکل با دو مانع مثلثی با شرایط دمایی متفاوت در حضور میدان مغناطیسی با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه سازی شده است. میدان سرعت و دما با استفاده از توابع توزیع مربوط به سرعت و دما با مدل شبکه $D2Q9$ محاسبه شده است. اعتبارسنجی نتایج با استفاده از تحقیقات معتبر گذشته صورت گرفته است. تأثیر عوامل مختلفی از قبیل عدد رایلی (10^5-10^3)، عدد هارتمن ($90-0$)، کسر حجمی نانوذرات ($0.05-0$) و شرایط دمایی متفاوت موانع مثلثی بر روی جابجایی طبیعی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد در یک عدد رایلی و هارتمن ثابت، بیشترین و کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط مربوط به زمانی است که موانع مثلثی بترتیب در دمای ثابت سرد و گرم قرار گرفته باشند. در همه موارد، افزایش عدد رایلی منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود. همچنین افزایش عدد هارتمن باعث کاهش سرعت جریان درون محفظه و کاهش نرخ انتقال حرارت می‌شود. بعلاوه افزایش کسر حجمی نانوذرات عموماً باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود.

احمد رضا رحمتی^۱

استادیار

محمد نعمتی^۲

کارشناسی ارشد

واژه های راهنما: روش شبکه بولتزمن، جابجایی طبیعی، نانوسیال، میدان مغناطیسی، محفظه متوازی الاضلاع
شکل.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر روش شبکه بولتزمن در تحلیل جریان سیال به عنوان راه کارآمد جایگزین برای روش‌های مرسوم در دینامیک سیالات محاسباتی، رشد چشمگیری داشته است [۱ و ۲]. مزیت این روش در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم در دینامیک سیالات محاسباتی، سهولت اعمال شرایط مرزی، محاسبات ساده‌تر و قابلیت موازی شدن است که برای حل مسائلی با هندسه پیچیده دارای کاربرد فراوانی است [۳]. مطالعه عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه‌های دوبعدی به دلیل کاربرد و اهمیت فراوانی که در مباحث مهندسی و صنایع الکترونیک دارند، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۴-۶].

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران ar_rahmati@kashanu.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران aminnemati1365@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۳۰، تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۰۵

اکثر این مطالعات مربوط به محفظه‌های مربعی بوده است ولی تعداد اندکی از این بررسی‌ها به محفظه‌هایی با هندسه‌های مختلف وجود داشته است. از جمله این مطالعات می‌توان به کار وارول و همکاران [۷] در سال (۲۰۰۷) اشاره کرد که به روش اختلاف محدود به بررسی تأثیر شرایط مرزی دمایی متفاوت مانع مربعی شکل درون محفظه مثلثی شکل در انتقال حرارت جابجایی طبیعی پرداختند. نتایج نشان داد که مشخصات جریان داخل محفظه بشدت وابسته به شرایط مرزی دمایی مانع است. ناتاراجان و همکاران [۸] در سال (۲۰۰۸) به بررسی انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه دوزنقه شکل با دمای ثابت و خطی دیواره پرداختند. صالح و مصطفی [۹] در سال (۲۰۱۴) به بررسی جابجایی طبیعی درون محفظه متوازی‌الاضلاع شکل با طول و مکان متغیر منبع حرارتی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش عدد ریلی منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود و طول و مکان منبع حرارتی پارامتر تعیین کننده‌ای در میزان انتقال حرارت است. حسیب و همکاران [۱۰] در سال (۲۰۱۵) به بررسی جابجایی ترکیبی نانوسیال درون محفظه دوزنقه شکل با درپوش متحرک پرداختند. مجری و همکاران [۱۱] در سال (۲۰۱۶) جابجایی طبیعی درون محفظه مثلثی شکل تحت زاویه را به روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار دادند نتایج نشان داد که افزایش عدد ریلی منجر به افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود و تغییر زاویه تمایل مثلث پارامتر بسیار مهمی در انتقال حرارت است. با روی کار آمدن ابررایانه‌ها و میکروچیپ‌های الکترونیکی، انتقال حرارت از مدارهای الکترونیکی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفت. مقدار حرارت تولید شده در این وسایل زیاده بود و فضای زیادی نیز برای خنک‌کاری آن‌ها در دسترس نیست. از طرفی سیال‌های عامل انتقال حرارت ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند و همین امر راه را برای ورود عرصه جدیدی از فناوری تحت عنوان نانوسیال هموار کرده است. نانوسیال توانایی انتقال حجم بالای حرارت در فضای کم را دارا می‌باشد. در زمینه جابجایی طبیعی و کاربردهای آن می‌توان به تحقیقات اشاره کرد.

عمدتاً در این تحقیقات مشاهده شده است که افزایش کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود. از جمله مطالعات در زمینه انتقال حرارت جابجایی نانوسیال می‌توان به تحقیقات شیخ‌الاسلامی و همکاران [۱۲]، ملکی و همکاران [۱۳]، جعفری و همکاران [۱۴] و چامخا و اسماعیل [۱۵]، قاسمی و امین‌الساداتی [۱۶]، جابجایی طبیعی نانوسیال درون محفظه C شکل توسط محمودی و همکاران [۱۷] و جابجایی طبیعی نانوسیال درون محفظه معکوس L شکل توسط دهنوی و رضوانی [۱۸] اشاره کرد. همراه با پیشرفت فناوری در زمینه‌هایی چون ریخته‌گری فلزات، رشد بلور و رآکتورهای هسته‌ای، تأثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی پا به عرصه مطالعات جدید گذاشت.

تیمه و مقلانی [۱۹] تأثیر میدان مغناطیسی بر محفظه مربعی پر شده از نانوسیال را مطالعه کردند. در این محفظه که تولید و جذب انرژی نیز وجود داشت به این نتیجه رسیدند که زمانی که میدان مغناطیسی ضعیفی اعمال می‌شود، اضافه نمودن درصد ذرات نانو برای افزایش انتقال حرارت لازم است ولی تحت میدان قوی این کار مناسب نیست. از جمله کارهای دیگر صورت گرفته می‌توان به کارهای محمودی و همکاران [۲۰] و مالسواران و سیواسانکاران [۲۱] اشاره کرد. در مطالعه حاضر اثر میدان مغناطیسی در محفظه متوازی‌الاضلاع شکل با دو مانع مثلثی پر شده از نانوسیال آب و مس مورد بررسی قرار می‌گیرد.

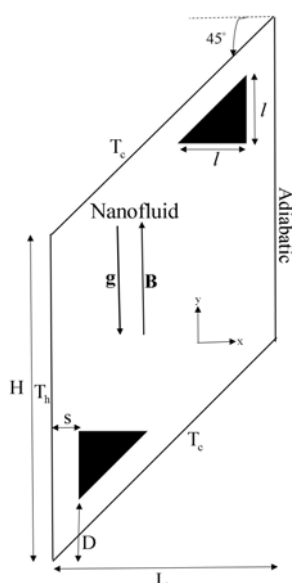
این مسأله که در مطالعات قبلی به چشم نمی‌خورد می‌تواند شبیه‌سازی خنک کاری یک قطعه الکترونیکی در فضای محدود یک متوازی‌الاضلاع با دو مانع باشد که تحت میدان مغناطیسی ناخواسته‌ای قرار دارد. در این بررسی برای بهبود انتقال حرارت از نانوسیال استفاده شده است تا بتوان تأثیر حضور میدان مغناطیسی بر کاهش انتقال حرارت را جبران کرده و بیشترین نرخ انتقال حرارت در کمترین حجم تجهیزات خنک‌کاری را ایجاد کرد [۲۲]. به این منظور تأثیر پارامترهایی از قبیل اعداد رایلی، هارتمن و کسر حجمی نانوذرات بررسی شده است تا بتوان بهترین طراحی ممکن را انجام داد.

۲- شرح و نحوه حل مسأله

در این بخش به بیان مسأله و نحوه حل آن پرداخته شده است. این بخش شامل بیان مسأله، روش حل، نحوه اعمال شرایط مرزی، استقلال حل از شبکه در نظر گرفته شده می‌باشد.

۲-۱- بیان مسأله

مطابق شکل (۱) هندسه مسأله شامل محفظه‌ای متوازی‌الاضلاع شکل حاوی نانوسیال با دو مانع مثلثی یکسان و هم اندازه با شرایط مرزی دمایی متفاوت در بالا و پایین محفظه است. موانع مثلثی در سه حالت (الف) هر دو مانع در دمای ثابت سرد، (ب) هر دو مانع آدیاباتیک و (ج) هر دو مانع در دمای ثابت گرم، بررسی می‌شوند. مشخصات هندسی محفظه بصورت $l=S=D=0.2H$ است. دیواره عمودی سمت چپ در دمای ثابت گرم، دیواره‌های مایل محفظه در دمای ثابت سرد و دیواره عمودی سمت راست آدیاباتیک می‌باشد. خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات استفاده شده در جدول (۱) بیان شده است. هدف بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر روی جریان نانوسیال با کسر حجمی متفاوت نانوذرات بر روی انتقال حرارت جابجایی طبیعی و ویژگی‌های انتقال حرارتی جریان بوجود آمده می‌باشد.



شکل ۱- هندسه مسأله مورد بررسی

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات [۲۳]

چگالی (kg/m^3)	ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})	ضریب هدایت حرارتی (w/mK)	گرمای ویژه (J/kgK)	عدد پرانتل	قطر ذرات (nm)	
۹۹۷/۱	۲۱×۱۰^{-۵}	۰/۶۱۳	۴۱۷۹	۶/۲	۰/۳۸۴	آب
۸۹۵۴	$۰/۱۶۷ \times ۱۰^{-۵}$	۴۰۰	۳۸۳	-	۱۰۰	مس

در این بررسی تأثیر پارامترهایی چون عدد رایلی، عدد هارتمن، کسر حجمی نانوذرات و شرایط مرزی دمایی موانع مثلثی ارزیابی شده است. به منظور ایجاد دامنه حل متوازی الاضلاع شکل، یک محفظه مستطیل شکل را در نظر گرفته، دیواره‌های مورب را به صورت زیگزاگ فرض کرده و سلول‌های خارج از دامنه غیر فعال شده‌اند. فرضیاتی که در کار حاضر در نظر گرفته شده است عبارتند از:

۱- جریان دو بعدی و آرام، ۲- سیال نیوتنی، ۳- رژیم جریان تراکم ناپذیر، ۴- ناچیز بودن اتلاف لزجی و انتقال حرارت و ۵- استفاده از تقریب بوزینسک

۲-۲- روش حل و معادلات

شبیه‌سازی عددی مسأله توصیف شده با استفاده از روش شبکه بولتزمن صورت می‌گیرد و در ادامه به جزئیات این روش اشاره شده است.

۲-۲-۱- روش شبکه بولتزمن

در سال‌های اخیر، روش شبکه بولتزمن به یک روش قدرتمند در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی تبدیل شده است. این روش بر اساس روش سلولی گاز بنا شده است [۲۴]. در کار حاضر از دو تابع توزیع برای میدان جریان و دما استفاده شده است که معادلات پیوستگی، مومنتوم ناویراستوکس و انرژی را در مقیاس ماکروسکوپی ارضا می‌کنند و برای هر دو میدان آرایش شبکه D2Q9 به کار گرفته شده است. جزئیات و شکل این آرایش شبکه و مزیت‌های آن در مراجع مختلف ذکر شده است [۲۵]. f و g به ترتیب نشان‌دهنده توابع توزیع مربوط به میدان جریان و دما می‌باشد.

معادله شبکه بولتزمن با استفاده از تقریب بی-جی-کی ۱ با وجود نیروی خارجی برای جریان به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود [۲۶]:

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) - \frac{\Delta t}{\tau_v} [(f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t))] + \Delta t c_i \mathbf{F}_i \quad (1)$$

¹ Bhatnagar–Gross–Krook Approximation (BGK)

برای میدان دما نیز رابطه زیر برقرار است:

$$g_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = g_i(\mathbf{x}, t) - \frac{\Delta t}{\tau_c} (g_i(\mathbf{x}, t) - g_i^{eq}(\mathbf{x}, t)) \quad (2)$$

که در آن Δt گام زمانی شبکه، \mathbf{c}_i سرعت گسسته شبکه در جهت i ، \mathbf{F}_i نیروی خارجی در جهت سرعت شبکه، τ_c و τ_v به ترتیب بیانگر زمان آسایش برای میدان جریان و دما می‌باشد [۲۵]. بر اساس آرایش شبکه مدنظر و قرار گرفتن در نقاط مختلف شبکه به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$\mathbf{c}_i = \begin{cases} 0 & i = 0 \\ c(\cos(\frac{(i-1)\pi}{2}), \sin(\frac{(i-1)\pi}{2})) & i = 1, 2, 3, 4 \\ \sqrt{2}c(\cos(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}), \sin(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4})) & i = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (3)$$

زمان آسایش شبکه مربوط به میدان جریان و دما از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\tau_v = \frac{v}{c_s^2 \Delta t} + 0.5, \quad \tau_c = \frac{\alpha}{c_s^2 \Delta t} + 0.5 \quad (4)$$

که در آن v لزجت سینماتیکی، α ضریب پخش حرارتی و c_s سرعت صوت شبکه بوده و برابر است با $c_s = \frac{c}{\sqrt{3}}$ که در آن c فواصل مکانی شبکه می‌باشد [۲۵]. به دلیل مثبت بودن لزجت و ضریب پخش حرارتی

همواره $\tau > 0.5$ خواهد بود. توابع توزیع تعادلی به صورت روابط (۵) و (۶) ظاهر می‌شوند:

$$f_i^{eq} = \omega_i [1 + \frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})}{c_s^2} - \frac{1}{2c_s^2} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \frac{1}{2} \frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2}{c_s^4}] \quad (5)$$

$$g_i^{eq} = \omega_i T [1 + \frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})}{c_s^2}] \quad (6)$$

که \mathbf{u} سرعت سیال و ω_i بنا بر انتخاب آرایش شبکه D2Q9 برای هر دو میدان به صورت رابطه (۷) تعریف می‌گردد:

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{4}{9} & i = 0 \\ \frac{1}{9} & i = 1, 2, 3, 4 \\ \frac{1}{36} & i = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (7)$$

همچنین تأثیر حضور میدان مغناطیسی و شناوری به صورت عبارت چشمه و به صورت رابطه (۸) وارد معادله (۱) می‌شود [۲۷]:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{F}_x + \mathbf{F}_y \\ F_x &= 3\omega_i \rho_f \chi (v \sin \zeta \cos \zeta - u \sin^2 \zeta) \\ F_y &= 3\omega_i \rho_f \chi (u \sin \zeta \cos \zeta - v \cos^2 \zeta) + 3\omega_i g(\rho\beta)_{nf} \theta \\ \chi &= Ha^2 \left(\frac{\mu_{nf}}{H^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

که Ha عدد هارتمن، H طول مشخصه و در جهت میدان گرانش و \hat{y} جهت اعمال میدان مغناطیسی و x و y معرف جهات محورهای مختصات است. در کار حاضر به منظور اطمینان از غیرقابل تراکم بودن جریان، عدد ماخ برابر 0.1 در نظر گرفته شده است. با ثابت بودن عدد رینولدز، عدد پرانتل و عدد ماخ، لزجت از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد:

$$v_f = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} H Mac_s \quad (9)$$

که در آن Pr و Ra نشان‌دهنده عدد رایلی و عدد پرانتل است و به صورت $Pr = \frac{v_f}{\alpha_f}$ و $Ra = \frac{\beta_f g H^3 (T_h - T_c)}{v_f \alpha_f}$ تعریف می‌شوند. رابطه زیر پارامترهای بی‌بعدی که در معادلات و ارائه نتایج مورد استفاده قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{uL}{\alpha_f}, V = \frac{vL}{\alpha_f}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, Ha = B_o L \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\rho_{nf} v_{nf}}} \quad (10)$$

سرانجام کمیت‌های ماکروسکوپی با توجه به مقادیر بدست آمده از حل توابع توزیع به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\rho = \sum_i f_i, \rho \mathbf{u} = \sum_i \mathbf{c}_i f_i, T = \sum_i g_i \quad (11)$$

عدد ناسلت متوسط یکی از مهمترین اعداد بی بعد در توصیف میزان انتقال حرارت است که بصورت رابطه (۱۲) روی دیواره گرم محاسبه می‌شود:

$$NU_{avg} = \frac{1}{H} \int_0^1 -\frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=0} dY \quad (12)$$

۲-۲-۲- مدل و روابط به کار رفته برای نانوسیال

با شروط تعادل گرمایی و عدم وجود لغزش بین نانوذرات و سیال پایه می‌توان نانوسیال را بصورت سیال خالص در نظر گرفت که خواص آن از قبیل چگالی، ظرفیت حرارتی و ضریب انبساط حرارتی طبق روابط (۱۳) تا (۱۵) محاسبه می‌شوند [۲۸ و ۱۳]:

$$NU_{avg} = \frac{1}{H} \int_0^1 -\frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=0} dY \quad (13)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (14)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho \beta)_f + \phi(\rho \beta)_s \quad (15)$$

که در آن ϕ کسر حجمی نانوذرات و زیرنویس‌های f ، s و nf به ترتیب مربوط به سیال پایه، نانوذرات و نانوسیال می‌باشد. لزجت نانوسیال از رابطه زیر که معروف به برینکمن است بدست می‌آید [۲۸ و ۱۳]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^2} \quad (16)$$

همچنین برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از مدل پاتل [۲۹] به صورت زیر استفاده شده است:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + mk_s Pe \frac{A_s}{k_f A_f} \quad (17)$$

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f \varphi}{d_s (1 - \varphi)} \quad (18)$$

$$Pe = \frac{u_s}{d_s \alpha_s} \quad (19)$$

$$u_s = \frac{2k_B T}{\pi \mu_f d_s^2} \quad (20)$$

که در روابط فوق m یک ضریب تجربی، d بیانگر قطر ذرات، u_s سرعت حرکت براونی ذرات و k_B ثابت بولتزمن است.

۲-۲-۳- شرایط مرزی

جهت مدل نمودن شرایط مرزی از روش کمانه کردن^۱ استفاده می‌شود [۲۵]. این نام‌گذاری حاکی از آن است که یک ذره از سمت مرز جامد به سمت میدان جریان می‌رود. این شرط مرزی را می‌توان در مورد تابع جریان به کار برد ولی در مورد تابع توزیع مربوط به دما شرایط متفاوت خواهد بود. در حل عددی روش شبکه بولتزمن فرآیند در دو مرحله انتشار و برخورد رخ می‌دهد که اعمال شرایط مرزی کمانه کردن بعد از مرحله انتشار صورت می‌پذیرد. در شکل (۲) دیواره عمودی سمت چپ محفظه بعد از مرحله انتشار نشان داده شده است. با مشخص بودن f_3 ، f_6 و f_7 و با توجه به ساکن بودن مرزهای جامد برای تابع توزیع جریان رابطه (۲۱) برقرار است:

$$\begin{aligned} f_1 &= f_3 \\ f_5 &= f_7 \\ f_8 &= f_6 \end{aligned} \quad (21)$$

در مورد تابع توزیع دما، نحوه اعمال شرایط مرزی دما ثابت روی دیواره گرم عمودی سمت چپ بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} g_1 &= (\omega_1 + \omega_3)T_h - g_3 \\ g_8 &= (\omega_8 + \omega_6)T_h - g_6 \\ g_5 &= (\omega_5 + \omega_7)T_h - g_7 \end{aligned} \quad (22)$$

۲-۳- استقلال حل از شبکه حل

به منظور اطمینان از مستقل بودن نتایج از شبکه انتخابی، عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم محفظه با استفاده از شبکه‌هایی با ابعاد مختلف در حضور تمامی پارامترهای تأثیرگذار بررسی می‌شود.

¹ Bounce Back

به این منظور، کسر حجمی نانوذرات برابر ۰/۰۵، عدد هارتمن برابر ۳۰، عدد رایلی 10^5 و موانع مثلثی در حالت سرد در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود اختلاف ناچیزی بین شبکه 100×100 و 120×120 وجود دارد و از همین رو شبکه 100×100 انتخاب مناسبی است.

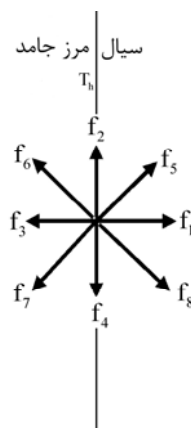
همچنین معیار همگرایی برای مطالعه حاضر بصورت رابطه (۲۳) در نظر گرفته شده است:

$$\max \frac{|\Gamma^{n+1} - \Gamma^n|}{|\Gamma^n|} \leq 10^{-7} \quad (23)$$

که در آن n نشان‌دهنده تعداد تکرار و Γ متغیر عمومی (U, V, θ) می‌باشد.

۲-۴- اعتبارسنجی

یکی از الزامات شبیه‌سازی‌های عددی، تأیید صحت و اعتبار آن می‌باشد. این کار با حل مسأله‌ای از تحقیقات معتبر گذشته و تطابق آن با نتایج بدست آمده صورت می‌گیرد. حال با توجه به مفاهیمی چون نانو سیال، میدان مغناطیسی، موانع داخل محفظه و مرزهای زاویه دار، از سه مرجع معتبر برای تأیید عملکرد برنامه استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری، در جدول (۳) نحوه عملکرد شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی بوسله کد حاضر در حضور مانع مربعی شکل آدیاباتیک با مطالعه حسین و همکاران [۶] مقایسه شده است. این مقایسه در غیاب میدان مغناطیسی و برای عدد پرانتل ۵ و اعداد رایلی متفاوت صورت گرفته است. درصد اختلاف کم در عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای عدد رایلی 10^5 ، نشان‌دهنده عملکرد خوب برنامه نوشته شده است.



شکل ۲- نحوه اعمال شرایط مرزی

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای ابعاد مختلف شبکه

ابعاد شبکه	50×150	70×170	90×190	110×210
Nu_{avg}	۱۲/۸۸	۱۳/۰۳	۱۳/۱۶	۱۳/۲۸

جدول ۳- مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و مطالعه حسین و همکاران [۶] در $Ra=10^5$
 $Pr=5$ و $Ha=0$

	$Ra=10^3$	$Ra=10^4$	$Ra=10^5$
کار حاضر	۰/۹۰۱	۲/۳۳	۵/۰۵
حسین و همکاران [۶]	۰/۸۹۴	۲/۲۸	۴/۸۱

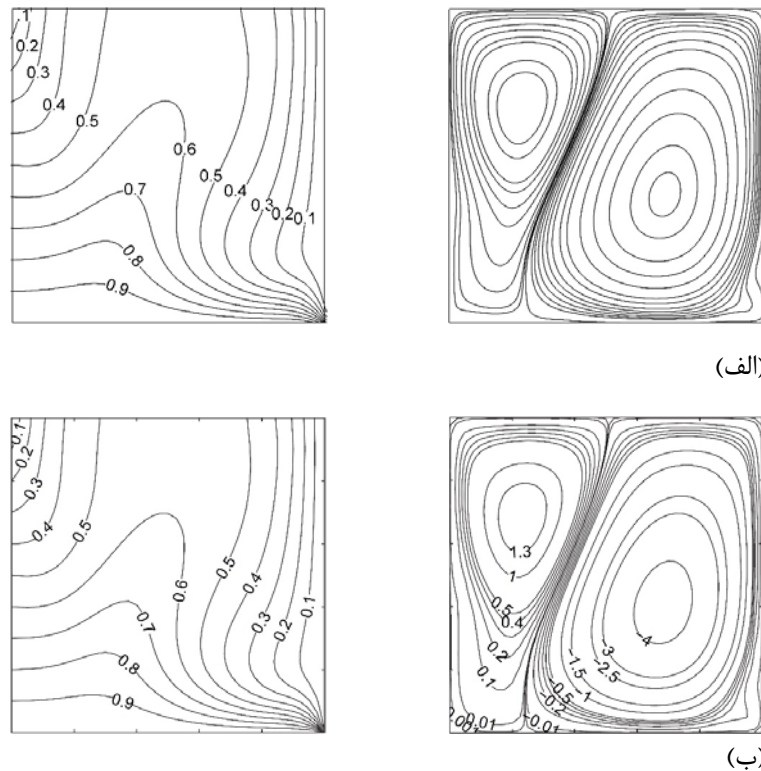
جدول ۴- مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در حضور نانوسیال بین کار حاضر و مطالعه قاسمی و امین‌الساداتی [۱۶]

	$Ri=1$				$Ri=100$			
ϕ	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵
کار حاضر	۲۱/۸۱	۲۲/۰۳	۲۲/۴۵	۲۲/۸۶	۱۲/۰۱	۱۲/۱۱	۱۲/۵۴	۱۲/۸۲
قاسمی و امین‌الساداتی [۱۶]	۲۱/۸۹	۲۲/۱۹	۲۲/۷۱	۲۳/۱۵	۱۲/۰۵	۱۲/۲۳	۱۲/۷۵	۱۳/۱۸

جدول ۵- مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در حضور میدان مغناطیسی بین کار حاضر و مطالعه ساتیامورتی و چامخا [۳۰] در عدد رایلی 10^5 و عدد پرانتل ۰/۰۲۵

	$Ha=0$	$Ha=50$	$Ha=100$
کار حاضر	۱۲/۱۱	۱۲/۵۴	۱۲/۸۷
ساتیامورتی و چامخا [۳۰]	۱۲/۲۳	۱۲/۷۵	۱۳/۱۷

برای شبیه‌سازی مرز زاویه‌دار و نانوسیال، کار حاضر با مطالعه قاسمی و امین‌الساداتی [۱۶] بصورت عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در عدد ریچاردسون ۱ و ۱۰۰ در جدول (۴) مقایسه شده است. تطابق خوب این مقایسه نشان‌دهنده عملکرد خوب کد پیش رو برای شبیه‌سازی نانوسیال درون محفظه با دیواره زاویه‌دار است. در شکل (۳) و جدول (۵) نحوه عملکرد شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی بوسیله کد حاضر تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت عمودی با مطالعه ساتیامورتی و چامخا [۳۰] مقایسه شده است. حداکثر درصد اختلاف ۵ درصد در عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در اعداد هارتمن مختلف برای عدد رایلی 10^5 و عدد پرانتل ۰/۰۲۵ نشان‌دهنده عملکرد خوب برنامه کامپیوتری نوشته شده است.



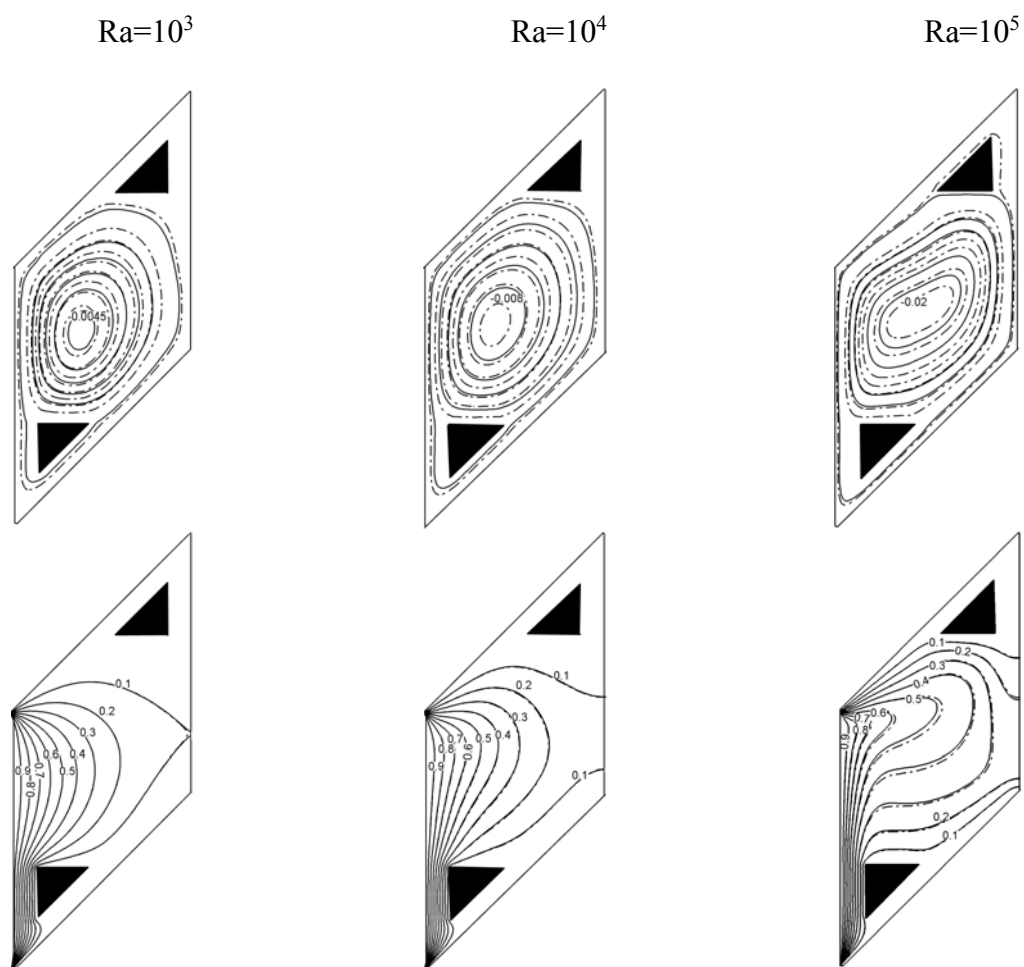
شکل ۳- مقایسه خطوط جریان و همدمای در عدد رایلی 10^5 ، عدد پرانتل 0.25 و عدد هارتمن ۵۰ بین (الف) کار حاضر و (ب) ساتیامورتی و چامخا [۳۰]

۳- نتایج

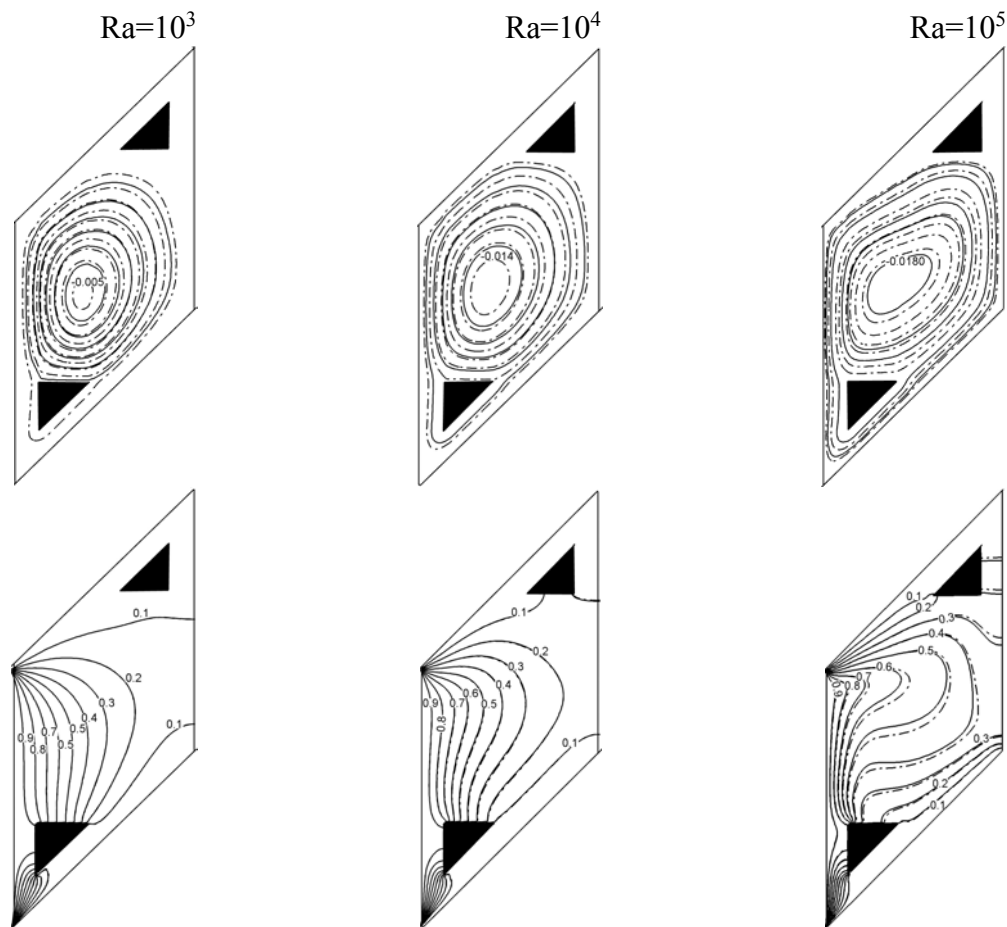
با توجه به اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری و اطمینان از دقت نتایج بدست آمده، در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی های صورت گرفته ارائه و بیان می شود. هدف بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر از قبیل عدد رایلی، عدد هارتمن و شرایط مرزی دمایی موانع مثلی بر روی ماهیت و عملکرد انتقال حرارت جابجایی طبیعی و همچنین تأثیر وجود نانوذرات بر روی انتقال حرارت است.

در شکل های (۴) تا (۶) خطوط جریان و خطوط همدمای به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و شرط دمایی موانع مثلی برای سیال پایه ($\phi=0$) و نانوسیال ($\phi=0.05$) نشان داده شده است. برای حالتی که موانع مثلی در دمای ثابت سرد و آدیاباتیک هستند، تنها یک گردابه ساعتگرد فضای محفظه را پر می کند ولی برای حالتی که موانع مثلی در دمای ثابت گرم قرار دارند دو گردابه، یک گردابه اصلی در قسمت پایین محفظه و ساعتگرد و دیگری گردابه ای با قدرت کمتر در بالای محفظه ناشی از مجاورت موانع گرم با دیواره سرد، ایجاد می شود. با توجه به خطوط جریان و همدمای ملاحظه می شود که افزایش عدد رایلی، چرخش سیال درون محفظه را تحت تأثیر قرار می دهد.

در هر سه حالت دمایی موانع مثلثی، افزایش عدد رایلی سبب می‌شود که مرکز گردابه‌ها به سمت بالا منتقل شده و قدرت گردابه‌ها و جریان افزایش یابد. افزایش عدد رایلی سبب می‌شود تجمع خطوط در نزدیکی دیواره گرم افزایش یابد و همین امر باعث افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود. همچنین افزایش عدد رایلی منجر به انحنای بیشتر خطوط همدمما می‌شود که نشان از افزایش اثرات جابجایی است. در حالتی که موانع در دمای سرد هستند، تجمع خطوط همدمما در مجاورت دیواره گرم و موانع مثلثی در پایین محفظه نشان از گرادیان دمایی زیاد و انتقال حرارت بالا دارد.

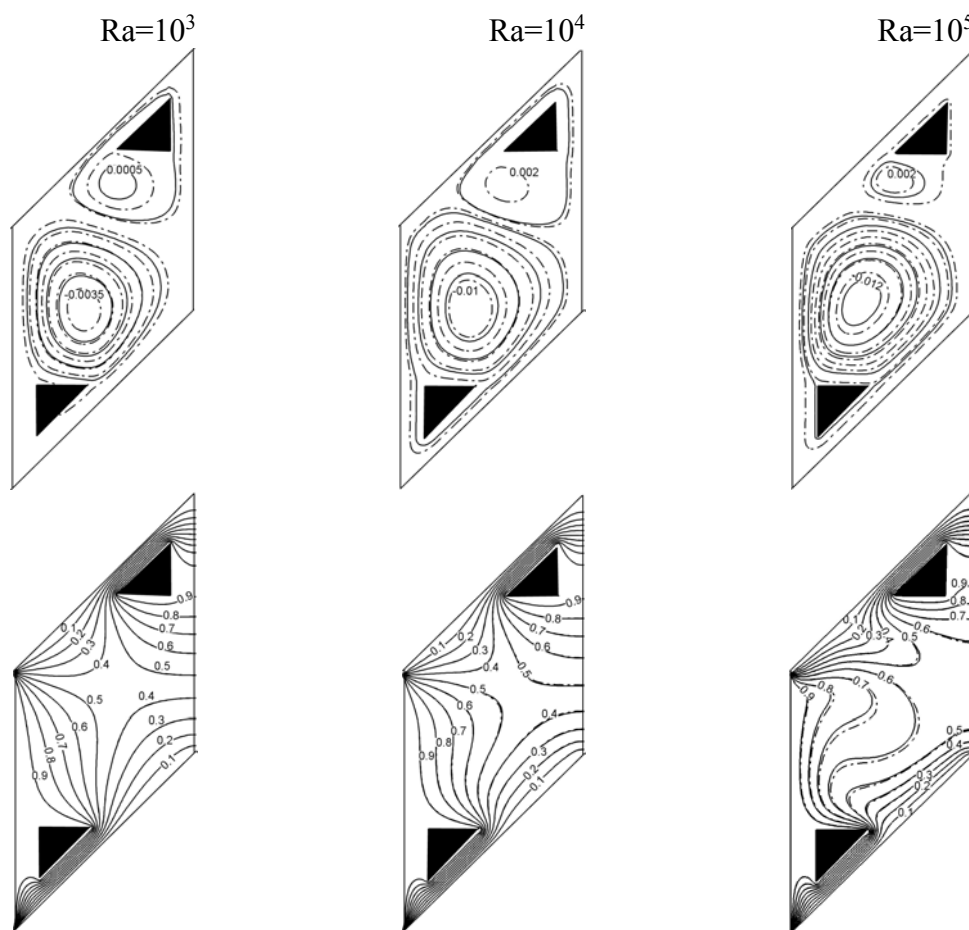


شکل ۴- خطوط جریان (ردیف بالا) و خطوط همدمما (ردیف پایین) به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و موانع سرد در $Ha=30$ ، $\phi=0$ (-) و $\phi=0.05$ (-+)



شکل ۵- خطوط جریان (ردیف بالا) و خطوط همدمای (ردیف پایین) به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و موانع آدیاباتیک در $Ha=30$ ، $\varphi=0$ و $\varphi=0.05$

به منظور درک بهتر از رفتار نانوسیال درون محفظه، سرعت عمودی در بخش میانی محفظه به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی، عدد هارتمن و شرط مرزی دمایی موانع مثلثی در شکل (۷) تا (۹) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در هر سه مقدار عدد رایلی و برای هر سه نوع شرط دمایی موانع، افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش سرعت جریان می شود. بعلاوه اینکه در یک عدد هارتمن ثابت و شرط مرزی دمایی موانع خاص، افزایش عدد رایلی منجر به افزایش سرعت می شود که همین امر موجب افزایش نرخ انتقال حرارت می شود. همچنین ملاحظه می شود در تمامی اعداد رایلی، سرعت داخل محفظه در حالتی که موانع در حالت آدیاباتیک هستند بیشتر از حالتی است که موانع در دمای ثابت گرم قرار دارند و کمتر از حالتی است که موانع در دمای ثابت سرد هستند. در جداول (۶) تا (۸) عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و عدد رایلی برای حالات مختلف موانع مثلثی در $\varphi=0.05$ ارائه شده است. همانطور که دیده می شود در یک عدد هارتمن ثابت و شرایط مرزی دمایی خاص موانع، افزایش عدد رایلی منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می شود.

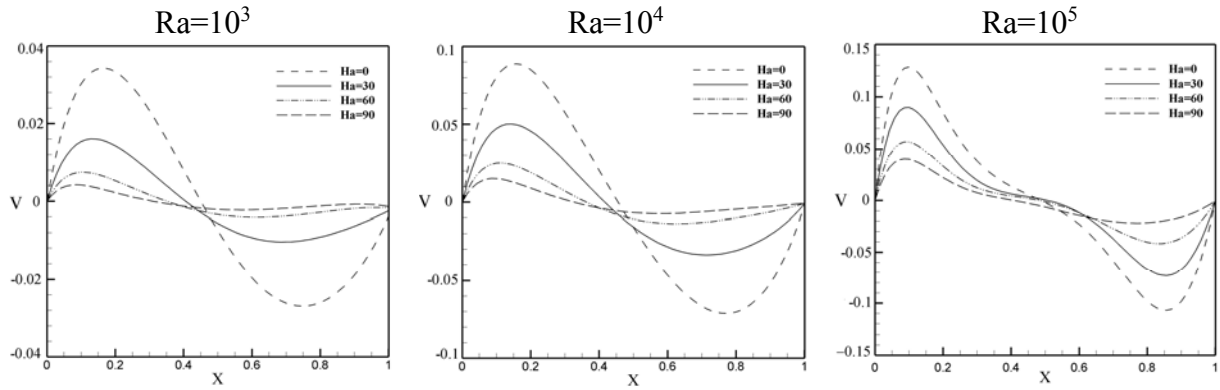


شکل ۶- خطوط جریان (ردیف بالا) و خطوط همدمما (ردیف پایین) به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و

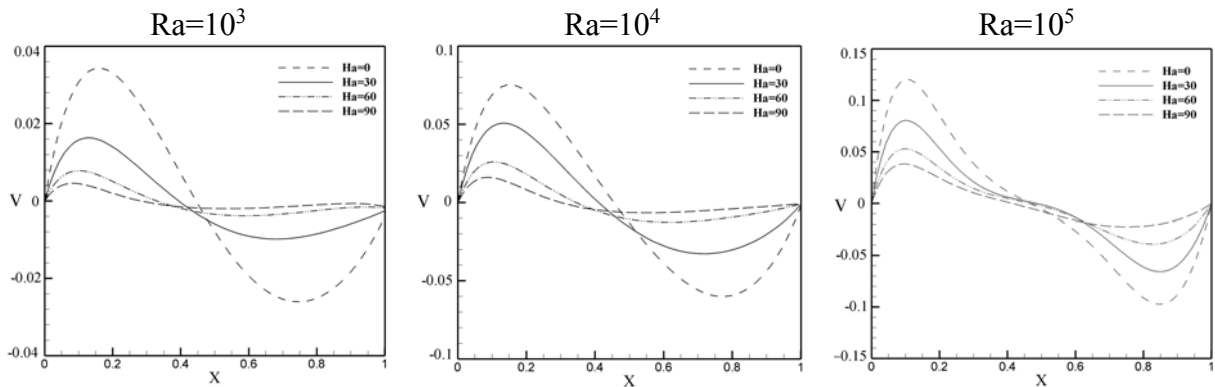
موانع گرم در $Ha=30$ ، $\phi=0^{(-)}$ و $\phi=0.05^{(-)}$

تأثیر افزایش عدد هارتمن بر عدد ناسلت متوسط در عدد رایلی 10^3 عموماً بی تأثیر است زیرا در این حالت هدایت پدیده غالب انتقال حرارت است. به ازای اعداد رایلی 10^4 و 10^5 افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش عدد ناسلت متوسط می‌گردد که این تأثیر در حالتی که موانع در دمای سرد باشند بعلت بیشتر بودن اثرات جابجایی، بیشتر از دو حالت دیگر است. بعلاوه در یک عدد هارتمن و عدد رایلی ثابت، بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط در حالتی رخ می‌دهد که موانع مثلثی در دمای ثابت سرد باشند. عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم محفظه به ازای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات و عدد رایلی برای هر سه حالت شرایط دمایی موانع مثلثی در عدد هارتمن ۳۰ در جداول (۹) تا (۱۱) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود افزایش کسر حجمی نانوذرات منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می‌گردد و این افزایش به عدد رایلی وابسته است به طوری که در عدد رایلی 10^3 این تأثیر بیشتر مشاهده می‌شود. زیرا در عدد رایلی کم، چون هدایت پدیده غالب انتقال حرارت است، افزودن نانوذرات سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود که سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود.

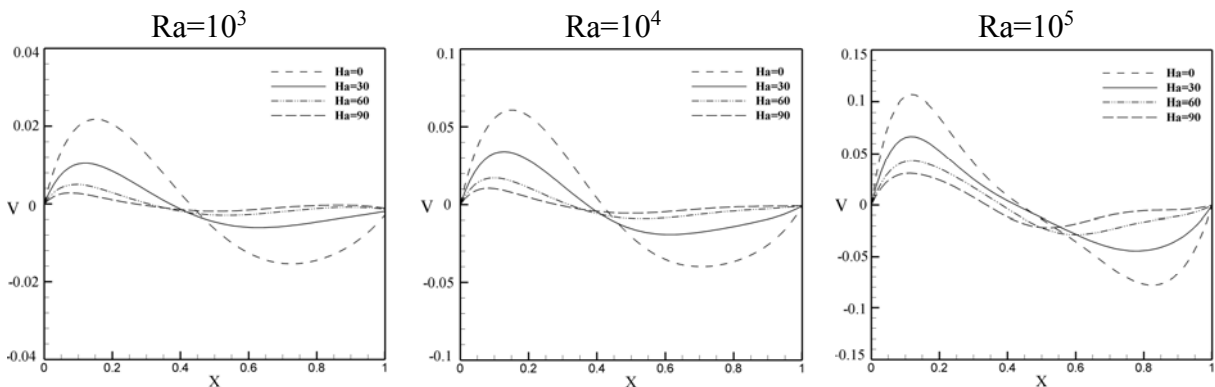
به عنوان نمونه برای حالتی که موانع در دمای سرد قرار دارند، افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰ به ۰/۰۵ منجر به افزایش در حدود ۲۰، ۱۸ و ۱۵ درصد در عدد ناسلت متوسط برای اعداد رایلی 10^3 ، 10^4 و 10^5 می شود.



شکل ۷- سرعت عمودی در بخش میانی محفظه به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و عدد هارتمن برای موانع سرد و $\phi=0.05$



شکل ۸- سرعت عمودی در بخش میانی محفظه به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و عدد هارتمن برای موانع آدیاباتیک و $\phi=0.05$



شکل ۹- سرعت عمودی در بخش میانی محفظه به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و عدد هارتمن برای موانع گرم و $\phi=0.05$

جدول ۶- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و عدد هارتمن برای موانع سرد و $\phi=0.05$

	$Ra=10^3$	$Ra=10^4$	$Ra=10^5$
Ha=0	۱۰/۵۳۱	۱۲/۰۸۱	۱۳/۷۱۴
Ha=30	۱۰/۵۲۲	۱۱/۶۸۱	۱۳/۱۶۱
Ha=60	۱۰/۵۲۲	۱۱/۳۱۱	۱۲/۵۷۲
Ha=90	۱۰/۵۲۲	۱۰/۸۹۲	۱۱/۶۱۲

جدول ۷- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و عدد هارتمن برای موانع آدیاباتیک و $\phi=0.05$

	$Ra=10^3$	$Ra=10^4$	$Ra=10^5$
Ha=0	۷/۵۷۱	۹/۲۹۳	۱۰/۸۲۳
Ha=30	۷/۵۵۲	۸/۸۶۱	۱۰/۴۱۱
Ha=60	۷/۵۵۲	۸/۵۲۳	۹/۷۱۳
Ha=90	۷/۵۵۱	۸/۳۴۲	۹/۴۴۳

جدول ۸- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و عدد هارتمن برای موانع گرم و $\phi=0.05$

	$Ra=10^3$	$Ra=10^4$	$Ra=10^5$
Ha=0	۶/۴۸۱	۷/۴۶۱	۷/۸۸۱
Ha=30	۶/۴۱۱	۷/۱۳۱	۷/۵۷۶
Ha=60	۶/۴۰۸	۶/۸۰۱	۷/۱۹۴
Ha=90	۶/۴۰۸	۶/۷۶۶	۷/۰۱۲

جدول ۹- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات برای موانع سرد و Ha=30

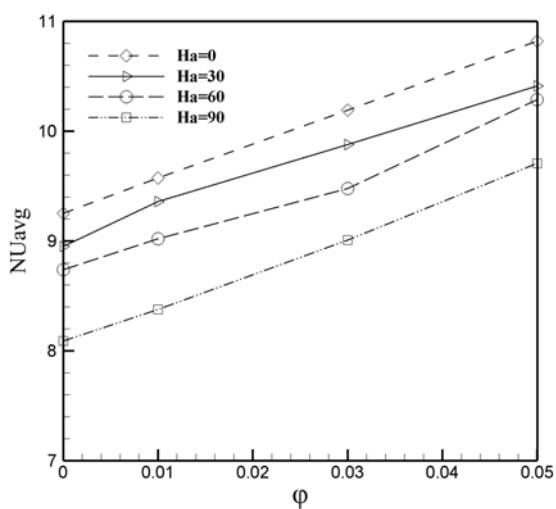
	$Ra=10^3$	$Ra=10^4$	$Ra=10^5$
$\phi=0$	۸/۸۱۱	۹/۸۹۸	۱۱/۳۶۱
$\phi=0.01$	۹/۲۱۱	۱۰/۲۴۹	۱۱/۷۱۱
$\phi=0.03$	۹/۹۰۲	۱۰/۸۸۹	۱۲/۵۸۱
$\phi=0.05$	۱۰/۵۲۱	۱۱/۶۵۱	۱۳/۱۵۲

جدول ۱۰- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات برای موانع آدیاباتیک و Ha=30

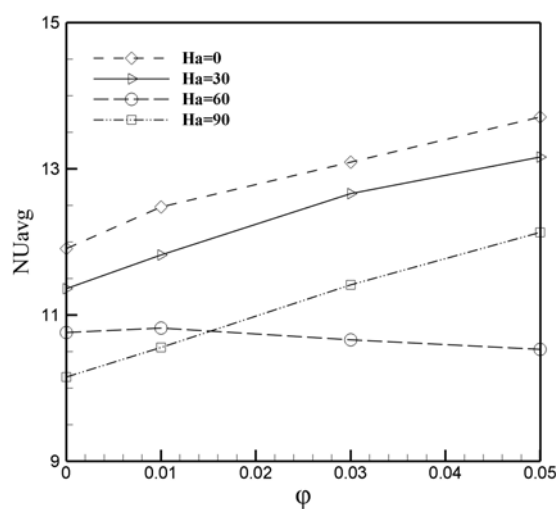
	$Ra=10^3$	$Ra=10^4$	$Ra=10^5$
$\phi=0$	۶/۳۹۸	۷/۵۷۳	۸/۹۵۲
$\phi=0.01$	۶/۵۲۱	۷/۸۶۱	۹/۲۳۱
$\phi=0.03$	۷/۱۱۲	۸/۳۱۲	۹/۹۱۲
$\phi=0.05$	۷/۵۵۲	۸/۸۶۱	۱۰/۴۱۱

جدول ۱۱- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات برای موانع گرم و

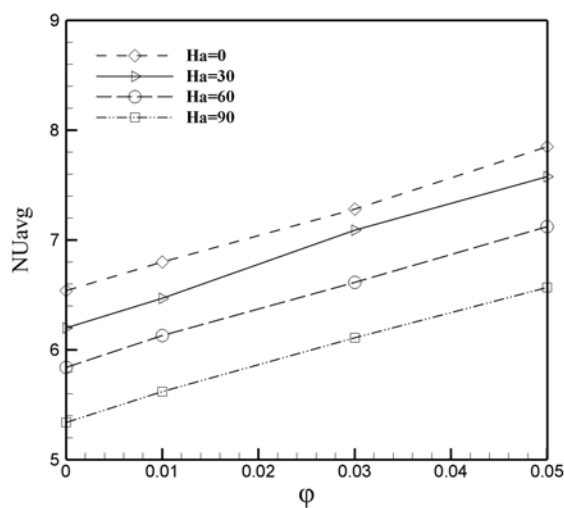
Ha=30			
	Ra=10 ³	Ra=10 ⁴	Ra=10 ⁵
$\phi=0$	۵/۱۲۸	۵/۷۶۲	۶/۱۹۱
$\phi=0.01$	۵/۴۸۱	۶/۰۸۲	۶/۵۰۵
$\phi=0.03$	۶/۰۸۴	۶/۶۸۹	۷/۰۷۷
$\phi=0.05$	۶/۴۱۱	۷/۱۳۱	۷/۵۷۶



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۰- تغییرات عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و کسر حجمی نانوذرات برای

موانع سرد، (الف) موانع آدیاباتیک و (ج) موانع گرم Ra=10⁵

در شکل (۱۰) تغییرات عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در عدد رایلی 10^5 به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و کسر حجمی ماده جامد برای حالات مختلف دمایی موانع مثلثی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر سه حالت دمایی موانع، در تمامی مقادیر عدد هارتمن، افزایش کسر حجمی نانو ذرات سبب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود بجز عدد هارتمن ۶۰ در حالتی که موانع سرد هستند که افزایش کسر حجمی ماده جامد سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌شود. لازم به ذکر است که تأثیر افزودن نانوذرات بر افزایش عدد ناسلت متوسط در اعداد هارتمن بالاتر مشهودتر است.

۴- نتیجه‌گیری

در کار حاضر انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال درون یک محفظه متوازی‌الاضلاع شکل با دو مانع مثلثی با شرایط مرزی دمایی متفاوت در حضور میدان مغناطیسی با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه‌سازی شد. در این مطالعه عددی، تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله عدد رایلی، کسر حجمی ماده جامد، عدد هارتمن و شرایط مرزی دمایی متفاوت موانع بررسی شد. خلاصه نتایج بدست آمده را می‌توان در چند مورد زیر ارائه نمود:

- شرایط مرزی دمایی موانع مثلثی، پارامتر مهمی در تعیین مشخصات جریان از جمله خطوط جریان و همدمای است و بشدت بر روی میزان انتقال حرارت تأثیرگذار است. با ثابت بودن تمامی پارامترهای تأثیرگذار، بیشترین عدد ناسلت متوسط مربوط به حالتی است که موانع در دمای ثابت سرد قرار دارند.
- افزایش عدد هارتمن سبب کاهش سرعت جریان داخل محفظه شده و همین امر انتقال حرارت را کاهش می‌دهد.
- در عدد رایلی 10^3 به دلیل اینکه انتقال حرارت هدایتی پدیده غالب است، میدان مغناطیسی تأثیر بسیار ناچیزی بر جریان و انتقال حرارت دارد.
- افزایش کسر حجمی نانوذرات عموماً منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط و انتقال حرارت می‌شود ولی در اعداد رایلی و میدان مغناطیسی با شدت‌های متفاوت رفتار یکسانی دیده نمی‌شود.
- همواره افزایش عدد رایلی منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود که درصد این افزایش برای حالتی که موانع مثلثی در دمای سرد هستند بیشتر از حالتی است که موانع در دمای گرم قرار دارند و کمتر از حالتی است که موانع آدیاباتیک هستند.
- به منظور بررسی بیشتر کار حاضر می‌توان جریان مغشوش در حالتی که محیط متخلخل است را بررسی نمود.

مراجع

- [1] Li, Z., Yang, M., and Zhang, Y., "Lattice Boltzmann Method Simulation of 3-D Natural Convection with Double MRT Model", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 94, pp. 222-238, (2016).

- [2] Himika, T.A., Hasan, M.F., and Molla, M.M., "Lattice Boltzmann Simulation of Airflow and Mixed Convection in a General Ward of Hospital", *Journal of Computational Engineering*, Vol. 2016, pp. 1-15, (2016).
- [3] Yang, M., Ding, Z., Lou, Q., Wang, Z., and Zhang, Y., "Lattice Boltzmann Method Simulation of Natural Convection Heat Transfer in Horizontal Annulus", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 31, No. 3, pp. 1-12, (2017).
- [4] Kahwaji, G., and Ali, O.M., "Numerical Investigation of Natural Convection Heat Transfer from Square Cylinder in an Enclosed Enclosure Filled with Nanofluids", *International Journal of Recent Advances in Mechanical Engineering (IJMECH)*, Vol. 4, No. 4, pp. 1-17, (2015).
- [5] Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., and Ganji, D., "Lattice Boltzmann Method for MHD Natural Convection Heat Transfer using Nanofluid", *Powder Technology*, Vol. 254, pp. 82-93, (2014).
- [6] Hussein, A.K., Ashorynejad, H., Sivasankaran, S., Kolsi, L., Shikholeslami, M., and Adegun, I., "Modeling of MHD Natural Convection in a Square Enclosure Having an Adiabatic Square Shaped Body using Lattice Boltzmann Method", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55, pp. 203-214, (2016).
- [7] Varol, Y., Oztop, H.F., and Yilmaz, T., "Two-dimensional Natural Convection in a Porous Triangular Enclosure with a Square Body", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 238-247, (2007).
- [8] Natarajan, E., Basak, T., and Roy, S., "Natural Convection Flows in a Trapezoidal Enclosure with Uniform and Non-uniform Heating of Bottom Wall", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 747-756, (2008).
- [9] Salih, E.A., and Mustafa, A.W., "Natural Convection in a Parallelogrammic Enclosure Partially Heated from Below", *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*, Vol. 26, pp. 43-60, (2014).
- [10] Hasib, M.H., Hossen, M.S., and Saha, S., "Effect of Tilt Angle on Pure Mixed Convection Flow in Trapezoidal Cavities Filled with Water-Al₂O₃ Nanofluid", *Procedia Engineering*, Vol. 105, pp. 388-397, (2015).
- [11] Mejri, I., Mahmoudi, A., Abbassi, M.A., and Omri, A., "LBM Simulation of Natural Convection in an Inclined Triangular Cavity Filled with Water", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55, pp. 1385-1394, (2016).
- [12] Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., and Ganji, D., "Lattice Boltzmann Method for MHD Natural Convection Heat Transfer using Nanofluid", *Powder Technology*, Vol. 254, pp. 82-93, (2014).
- [13] Mliki, B., Abbassi, M.A., Guedri, K., and Omri, A., "Lattice Boltzmann Simulation of Natural Convection in an L-Shaped Enclosure in the Presence of Nanofluid", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, pp. 503-511, (2015).

- [14] Jafari, M., Farhadi, M., Akbarzade, S., and Ebrahimi, M., "Lattice Boltzmann Simulation of Natural Convection Heat Transfer of SWCNT-Nanofluid in an Open Enclosure", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 6, pp. 913-927, (2015).
- [15] Chamkha, A.J., and Ismael, M.A., "Magnetic Field Effect on Mixed Convection in Lid-driven Trapezoidal Cavities Filled with a Cu–water Nanofluid with an Aiding or Opposing Side Wall", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 8, pp. 310-319, (2016).
- [16] Ghasemi, B., and Aminossadati, S., "Mixed Convection in a Lid-driven Triangular Enclosure Filled with Nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1142-1148, (2010).
- [17] Mahmoodi, M., and Hashemi, S.M., "Numerical Study of Natural Convection of a Nanofluid in C-shaped Enclosures", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 55, pp. 76-89, (2012).
- [18] Dehnavi, R., and Rezvani, A., "Numerical Investigation of Natural Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Γ Shaped Cavity", *Superlattices and Microstructures*, Vol. 52, pp. 312-325, (2012).
- [19] Teamah, M.A., and El-Maghlany, W.M., "Augmentation of Natural Convective Heat Transfer in Square Cavity by Utilizing Nanofluids in the Presence of Magnetic Field and Uniform Heat Generation/Absorption", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 58, pp. 130-142, (2012).
- [20] Mahmoudi, A., Mejri, I., Abbassi, M.A., and Omri, A., "Lattice Boltzmann Simulation of MHD Natural Convection in a Nanofluid-filled Cavity with Linear Temperature Distribution", *Powder Technology*, Vol. 256, pp. 257-271, (2014).
- [21] Malleswaran, A., and Sivasankaran, S., "A Numerical Simulation on MHD Mixed Convection in a Lid-driven Cavity with Corner Heaters", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 9, pp. 311-319, (2016).
- [22] Choi, S.U.S., "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles", *ASME Fluids Engineering Division*, Vol. 231, pp. 99-106, (1995).
- [23] Nemati, H., Farhadi, M., Sedighi, K., Fattahi, E., and Darzi, A., "Lattice Boltzmann Simulation of Nanofluid in Lid-driven Cavity", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1528-1534, (2010).
- [24] Wolf-Gladrow, D.A., "*Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models: an Introduction*", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, (2004).
- [25] Mohamad, A.A., "*Lattice Boltzmann Method: Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes*", Springer-Verlag, London, (2011).
- [26] Bhatnagar, P.L., Gross, E.P., and Krook, M., "A Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems", *Physical Review*, Vol. 94, pp. 511-525, (1954).

- [27] Kefayati, G.R., Gorji-Bandpy, M., Sajjadi, H., and Ganji, D., "Lattice Boltzmann Simulation of MHD Mixed Convection in a Lid-driven Square Cavity with Linearly Heated Wall", *Scientia Iranica*, Vol. 19, pp. 1053-1065, (2012).
- [28] Khanafer, K., Vafai, K., and Lightstone, M., "Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two-dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3639-3653, (2003).
- [29] Patel, H.E., Sundararajan, T., Pradeep, T., Dasgupta, A., Dasgupta, N., and Das, S.K., "A Micro-convection Model for Thermal Conductivity of Nanofluids", *Pramana-Journal of Physics*, Vol. 65, pp. 863-869, (2005).
- [30] Sathiyamoorthy, M., and Chamkha, A., "Effect of Magnetic Field on Natural Convection Flow in a Liquid Gallium Filled Square Cavity for Linearly Heated Side Wall (s)", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 1856-1865, (2010).

فهرست نمادهای انگلیسی

سطح مقطع	A
اندازه میدان مغناطیسی	Bo
سرعت میکروسکوپی ذرات	c
سرعت صوت	c_s
سرعت گسسته شبکه	c
گرمای ویژه در فشار ثابت	Cp
قطر ذرات	d
نیروی خارجی	F
تابع توزیع جریان	f
شتاب جاذبه	g
تابع توزیع دما	g
عرض محفظه	H
عدد هارتمن	Ha
ضریب هدایت حرارتی	k
طول شبکه	L
عدد ماخ	Ma
عدد ناسلت	NU
عدد پکله	Pe
عدد پرانتل	Pr
عدد رایلی	Ra

دما	T
سرعت در جهات شبکه	$u(u,v)$
مختصات شبکه	$x(x,y)$

نمادهای یونانی

گام زمانی	Δt
زمان آسایش میدان دما	τ_c
زمان آسایش میدان جریان	τ_v
لزجت سینماتیکی	ν
ضریب هدایت الکتریکی	σ
ضریب پخش حرارتی	α
ضریب انبساط حرارتی	β
چگالی	ρ
کسر حجمی ماده جامد	ϕ
لزجت دینامیکی	μ
زاویه اعمال میدان مغناطیسی	ξ
دمای بی بعد	θ
ضریب وزنی	ω

بالانویس

تعادلی	eq
--------	------

زیرنویسها

متوسط	avg
سرد	c
سیال	f
گرم	h
شماره لینک مدل شبکه	i
نانوسیال	nf
جامد	s

Abstract

In this paper, for the first time, natural convection heat transfer of a nanofluid in the presence of a uniform magnetic field inside a parallelogram shaped cavity with two triangular obstacles with different boundary conditions is simulated by using lattice Boltzmann method. The right vertical wall of the cavity is assumed to be adiabatic and the inclined walls are kept at constant cold temperature, while the left vertical walls are kept at constant hot temperature. The flow and temperature field is calculated by solving lattice Boltzmann equations for velocity and temperature distribution functions simultaneously. D2Q9 lattice arrangement for each distribution function is used. The results have been validated with available results in the literature. The effects of different parameters such as Rayleigh number (10^3 - 10^5), Hartmann number (0-90), nanoparticle volume fraction (0-0.05) and different boundary conditions at triangular obstacles on natural heat convective heat transfer are investigated.

The results show that, at a constant Rayleigh and Hartmann number, the average Nusselt number takes its maximum and minimum value when the triangular obstacles are kept at constant cold and hot temperatures, respectively. For all cases, it is found that the average Nusselt number increases with enhancement of Rayleigh number. Also, increasing of Hartman number decreases the flow velocity and heat transfer rate. Furthermore, increase of volume fraction of nano particles enhances heat transfer rate, however its changes for different Rayleigh and Hartman numbers are not the same.