



تحلیل انتقال حرارت درون محفظه با هندسه مختلف حاوی نانوسیال در حضور میدان

مغناطیسی با وجود تولید/جذب حرارت به روش شبکه بولتزمن

محمد نعمتی^{۱*}، رامین جهانگیری^۲، مرتضی خلیلیان^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

* یزد، ۷۴۱ - ۸۹۱۹۵، mohammadnemati@stu.yazd.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
جریان سیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی در خنک‌کاری سیستم‌های الکترونیکی، رآکتورهای هسته‌ای و پدیده‌های فیزیکی مثل زمین‌شناسی مطرح است. در کار حاضر اثر میدان مغناطیسی بر میدان جریان و انتقال حرارت جایجایی طبیعی نانوسیال آب-مس با لحاظ اثر حرکت براونی نانوذرات با وجود تولید/جذب حرارت در محفظه با هندسه‌های مختلف به روش شبکه بولتزمن بررسی شده است. دیواره عمودی سمت چپ محفظه در دو حالت گرمایش دما ثابت و گرمایش بصورت دما خطی و دیواره سرد محفظه در سه شکل مختلف (الف) مورب، (ب) منحنی و (ج) صاف بررسی شده است. تأثیر پارامترهایی از قبیل عدد هارتمن، کسر حجمی نانوذرات، ضریب تولید/جذب حرارت، شکل دیواره سرد و نوع گرمایش دیواره بر ماهیت جریان و انتقال حرارت ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی حالات، افزایش قدرت میدان مغناطیسی و ضریب تولید/جذب حرارت سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌شود که اثر عدد هارتمن در حالات مختلف، متفاوت است. همچنین بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به حالتی است که گرمایش دما ثابت وجود داشته باشد. بعلاوه اثر میدان مغناطیسی زمانی که دیواره سرد به شکل صاف است، بیشتر از حالات دیگر است. اثر افزودن نانوذرات به سیال پایه در کاهش و یا افزایش عدد ناسلت متوسط به مقدار عدد هارتمن و ضریب تولید/جذب حرارت وابسته است.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۲۶ مهر ۱۳۹۸ پذیرش: ۲۸ بهمن ۱۳۹۸ ارائه در سایت: ۲۰ اسفند ۱۳۹۸
	کلیدواژگان تغییر شکل دیواره تولید/جذب حرارت جایجایی طبیعی روش شبکه بولتزمن میدان مغناطیسی نانوسیال

Analysis of heat transfer in the cavity with different shapes filled nanofluid in the presence of magnetic field with heat generation/absorption using LBM

Mohammad Nemati^{1*}, Ramin Jahangiri², Morteza Khalilian³

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

2,3- Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

* P.O.B. 89195-741 Yazd, Iran, mohammadnemati@stu.yazd.ac.ir

Article Information

Received 18 October 2019

Accepted 17 February 2020

Available Online 10 March 2020

Keywords

Variation of wall shape

Heat generation/absorption

Natural convection

LBM

Magnetic field

Nanofluid

ABSTRACT

In the present work, natural convection heat transfer in a two-dimensional enclosure with different shapes filled cu-water nanofluid with heat generating/absorbing in the presence of a magnetic field is simulated by lattice Boltzmann method (LBM). The left vertical wall of the enclosure is examined in two modes: constant temperature heating and linear temperature heating and the cold wall of the enclosure in three different forms (a) diagonal, (b) curved and (c) smooth. The effect of parameters such as Hartmann number, nanoparticle volume concentration, heat generation/absorption coefficient, cold wall shape and type of wall heating on the nature of flow and heat transfer is evaluated. The results show that in all cases, increasing the Hartmann number and heat generation/absorption coefficient decrease the average Nusselt number. The effect of Hartmann number in different states is different. The highest heat transfer also occurs when the vertical wall has a constant temperature. The effect of the magnetic field is greater when the cold wall is smooth. The effect of adding nanoparticles to the base fluid on decreasing or increasing the average Nusselt number depends on the Hartmann number and heat generation/absorption coefficient.

Please cite this article using:

Mohammad Nemati, Ramin Jahangiri, Morteza Khalilian Analysis of heat transfer in the cavity with different shapes filled nanofluid in the presence of magnetic field with heat generation/absorption using LBM, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 10, No. 4, pp. 51-62, 2020 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

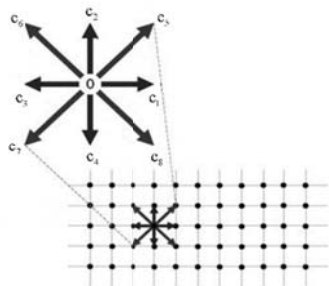
رشد روز افزون صنعت، بهبود پارامترهای انتقال حرارت را به منظور خنک‌کاری بهتر و بیشتر، ضروری ساخته است. امروزه صنعت، توانایی تولید تجهیزات را با تراکمی بالا از تراشه‌های کامپیوتری دارد. این دستگاه‌ها اغلب به دلیل تولید گرمای زیاد در سطحی کوچک، نیازمند روش‌های نوینی برای خنک‌کاری هستند. در سالیان اخیر، نانوسیالات که دارای ضریب رسانایی حرارتی بیشتری نسبت به سیالات معمولی می‌باشند، بیشتر مورد توجه بوده‌اند. رسانایی حرارتی بیشتر نانوذرات نسبت به سیال پایه که اغلب فلزی و یا در مواردی غیرفلزی مثل نانولوله‌های کربنی هستند، سبب بیشتر شدن رسانایی حرارتی نانوسیالات می‌شود [۱]. انتقال حرارت جابجایی طبیعی به دلیل کاربرد آسان، صدای کم و حذف اجزای متحرک مانند فن، همیشه مورد توجه محققین و مهندسان در بخش‌های مختلف صنعت چون سیستم‌های مهندسی و ژئوفیزیک بوده است. از آنجایی که در سیستم‌های انتقال حرارت جابجایی طبیعی، حرکت سیال در اثر اختلاف دما و یا غلظت به وجود می‌آید، این حرکت ضعیف بوده و در نتیجه طراحی شکل هندسی می‌تواند بر انتقال حرارت اثرگذار باشد. بنابراین طراحی سیستم‌هایی مبتنی بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی بسیار کاربردی و چالش برانگیز است؛ چرا که در مواردی همچون کلکتورهای خورشیدی و تهویه مطبوع ساختمان‌ها کاربرد دارد. نانوسیال تحت اثر میدان مغناطیسی، دارای این خصوصیت است که خواص مغناطیسی و سیال بودن را همزمان دارد. جریان سیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی در خنک‌کاری سیستم‌های الکترونیکی، رآکتورهای هسته‌ای، پدیده‌های فیزیکی مانند پدیده‌های زمین-شناسی و جریان‌های اتمسفری مطرح می‌باشد [۲]. برای مثال، وجود جریان‌های جابجایی در صنعت ریخته‌گری، باعث پدیدار شدن یک ساختار غیرهمگن و درشت‌دانه در قطعه می‌شود. یکی از روش‌هایی که برای رفع این مشکل مورد توجه قرار گرفته است، بهره‌گیری از هیدروپنماتیک مغناطیسی برای کاهش جابجایی طبیعی درون محفظه است. البته گاهی کاهش جریان‌های جابجایی در اثر وجود میدان مغناطیسی سبب کم شدن مقدار انتقال حرارت می‌شود که مطلوب نیست. نمونه این پدیده می‌تواند برای یک قطعه الکترونیکی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی است و توسط سیالی خنک شود، روی دهد. در این زمینه تحقیقات فراوانی به صورت عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی صورت گرفته است. طیبی و همکاران [۳] انتقال حرارت

جابجایی طبیعی نانوسیال درون محفظه مربعی با گرمکن دایروی را تحت میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار دادند. ژانگ و همکاران [۴] اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال درون محفظه متمایل را به روش زمان آسایش چندگانه شبکه بولتزمن ارزیابی کردند. گاراندت و همکاران [۵] روشی تحلیلی را برای مطالعه تأثیر میدان مغناطیسی بر جابجایی طبیعی درون یک محفظه دوبعدی ارائه دادند. سجادی و همکاران [۶] براساس مدل زمان آسایش چندگانه به روش شبکه بولتزمن، اثر میدان مغناطیسی را بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه‌ای سه بعدی را بررسی کردند. نتیجه مطالعه محبی و همکاران [۷] بر روی انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال درون محفظه U شکل نشان داد که افزایش قدرت میدان مغناطیسی سبب سرکوب جریان و کاهش سرعت و نرخ انتقال حرارت می‌شود. تولید/جذب گرما نقش بسیار مهمی در پدیده‌های مختلفی چون انرژی هسته‌ای و مدلسازی احتراق دارد. از جمله روش‌هایی که محققین در تقویت عملکرد حرارتی سیستم‌های انرژی به کار گرفته‌اند، انتقال حرارت در محفظه تحت اثر میدان مغناطیسی با تولید/جذب حرارت است. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه جامی و همکاران [۸]، ملکی و همکاران [۹] و محمودی و همکاران [۱۰] اشاره نمود. عباسی و همکاران [۱۱] انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال تحت اثر میدان مغناطیسی درون محفظه مربعی با دیواره دارای توزیع دمای خطی با تولید/جذب حرارت را بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش قدرت میدان مغناطیسی سبب کاهش میزان سرعت و انتقال حرارت شده و تغییرات ضریب تولید/جذب حرارت تأثیر چشمگیری بر شکل جریان و انتقال حرارت دارد به نحوی که افزایش ضریب تولید/جذب حرارت سبب افزایش بیشینه مقدار تابع جریان می‌شود. یکی از نکات قابل تأمل در مطالعات مربوط به جابجایی نانوسیالات، عدم همخوانی بین نتایج تجربی و کارهای عددی [۱۲] است. شاید یکی از دلایل این اختلاف، عدم منظور داشتن برخی پدیده‌ها از جمله تأثیر حرکت براونی بر ضریب انتقال حرارت جابجایی است. حرکت براونی نانوذرات در نانوسیالات در واقع حرمت تصادفی و پیوسته آن‌ها در سیال است. مولکول‌های سیال مدام بر نانوذرات ضربه وارد کرده و آن‌ها را درون سیال پراکنده می‌کند [۱۳]. در مقاله حاضر اثر این پدیده بر ضریب رسانایی حرارتی نانوسیال در نظر گرفته شده است. پیشرفت فناوری و نیاز به نصب قطعات الکترونیکی در فضای محدود

هدف بررسی تأثیر ضریب تولید/جذب حرارت (۰، -۵، -۱۰، ۰، +۵ و +۱۰)، عدد هارتمن (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰)، نوع گرمایش دیواره عمودی محفظه، کسر حجمی‌های ۰، ۰/۰۳ و ۰/۰۶ و شکل دیواره سرد محفظه بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی است. در کار حاضر عدد 10^5 در نظر گرفته شده است. فرضیاتی که در این شبیه‌سازی لحاظ شده‌اند به شرح زیر است:

۱- جریان دو بعدی و آرام است، ۲- رژیم جریان غیر قابل تراکم است، ۳- سیال نیوتنی است، ۴- انتقال حرارت تشعشعی و اتلاف لژی ناچیز است و ۵- از تقریب بوزینسک استفاده شده است.

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 ماکروسکوپیک ارضا می‌کنند و برای هر دو میدان آرایش شبکه D2Q9 به کار گرفته شده است. در شکل ۲ آرایش این نوع شبکه نشان داده شده است. جزئیات این آرایش شبکه و مزیت‌های آن در مراجع مختلف ذکر شده است [۱۶].



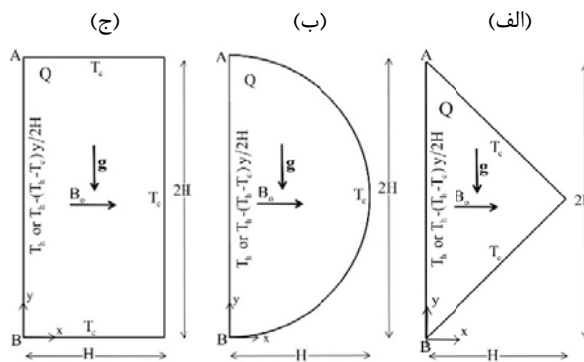
شکل ۲ بردارهای سرعت گسسته شده مدل D2Q9

معادله شبکه بولتزمن با استفاده از تقریب بی-جی-کی [۱۷] با وجود نیروی خارجی برای میدان جریان و دما به ترتیب به صورت روابط (۱) و (۲) بیان می‌شوند. تابع توزیع تعادلی در مدل D2Q9 برای میدان جریان و دما به ترتیب به صورت روابط (۳) و (۴) و کمیات ماکروسکوپیک به صورت روابط (۵) بیان می‌شوند. ضرایب وزنی و سرعت‌های گسسته به صورت روابط (۶) و (۷) می‌باشد. تأثیر نیروی شناوری و نیروی مغناطیسی به صورت عبارت چشمه طبق رابطه (۸) وارد رابطه (۱) می‌شود. زمان آسایش مربوط به میدان جریان و دما طبق رابطه (۹) و متغیرهای بی بعدی که در معادلات و ارائه نتایج مورد استفاده قرار گرفته‌اند به صورت رابطه (۱۰) است. ضریب هدایت

سبب شده است که مساله انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه‌های شکل‌دار (غیر مربعی) مهم و ضروری تلقی شود [۱۴]. در بیشتر مطالعات اخیر، محفظه‌های مربعی و مستطیلی به دلایل مختلف از جمله سادگی میدان محاسباتی، بیشتر متوجه بوده‌اند. از محفظه‌های شکل‌دار در میکروکانال‌ها، صنعت ریخته‌گری و قرارگیری یک قطعه الکترونیکی در فضاهاى ناخواسته استفاده می‌شود. 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. مزیت این روش در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم، سهولت در اعمال شرایط مرزی، محاسبات ساده‌تر و قابلیت موازی شدن است که برای حل مسائلی با هندسه پیچیده دارای کاربرد فراوانی است [۱۵]. با توجه به مطالعات صورت گرفته، ملاحظه می‌شود تاکنون میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی با وجود تولید/جذب حرارت در محفظه شکل‌دار مورد بررسی در کار حاضر، مطالعه نشده است.

۲- بیان و نحوه حل مسأله

مطابق شکل ۱ که هندسه مسأله را نشان می‌دهد، نقطه A به سه طریق به نقطه B متصل می‌شود: (الف) دیواره مورب، (ب) دیواره منحنی و (ج) دیواره صاف. ارتفاع محفظه دو برابر طول محفظه است. بجز دیواره AB در دو حالت گرمایش دما ثابت و گرمایش دما خطی بررسی می‌شود، سایر دیواره‌ها در دمای ثابت سرد قرار دارند. میدان مغناطیسی از چپ به راست و عمود بر نیروی جاذبه به محفظه اعمال می‌شود.



شکل ۱ هندسه مسأله مورد بررسی

$$Ra = \sqrt{\frac{\beta g (T_h - T_c) H^3}{\alpha \nu}}$$

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} = 1 + \frac{3 \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 1 \right) \varphi}{\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} + 2 \right) - \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 1 \right) \varphi} \quad (11)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_p \quad (12)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi) (\rho C_p)_f + \varphi (\rho C_p)_p \quad (13)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1 - \varphi) (\rho \beta)_f + \varphi (\rho \beta)_p \quad (14)$$

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

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

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{k_p}{k_f} (1 + cPe) \left\{ \frac{d_f}{d_p} \frac{\varphi}{1 - \varphi} \right\} \quad (17)$$

$$Pe = u_p d_p / \alpha_f \quad (18)$$

$$u_p = \frac{2k_B T}{\pi \mu_f d_p^2} \quad (19)$$

$$Nu = \frac{1}{2H} \int_0^1 - \frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=0} dY \quad (20)$$

به منظور اطمینان از صحت عملکرد کد حاضر در بازه رژیم غیر قابل تراکم، مشخصه سرعت جریان برای جابجایی طبیعی باید بسیار کوچکتر از سرعت صوت در سیال باشد. در کار حاضر، سرعت مشخصه برابر ۰/۱ سرعت صوت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است با ثابت بودن اعداد رایلی، پرانتل و ماخ، لزجت سینماتیکی طبق رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\nu_f = \sqrt{Pr/Ra} Ma C_s H \quad (21)$$

جهت مدل نمودن شرایط مرزی سرعت برای دیواره‌های صاف، از روش کمانه کردن استفاده می‌شود [۱۶]. به عنوان نمونه برای دیواره عمودی سمت چپ محفظه، در مورد شرایط مرزی سرعت و دما، رابطه (۲۲) برقرار است:

$$f_1 = f_3, f_5 = f_7, f_8 = f_6$$

$$g_1 = T_h(\omega_1 + \omega_3) - g_3$$

$$g_5 = T_h(\omega_5 + \omega_7) - g_7$$

$$g_8 = T_h(\omega_6 + \omega_8) - g_6 \quad (22)$$

برای محاسبه سرعت و دما بر روی مرزهای منحنی از روش-های ارائه شده توسط تائو و همکاران [۱۸] استفاده شده است. در شکل ۳ نمایی از مرز منحنی مورد استفاده و شبکه گره‌ها آورده شده است. در روش مذکور از بین گره‌های موجود در ناحیه مرز جامد تنها گره‌هایی وارد حوزه محاسباتی می‌شوند که

الکتریکی نانوسیال، چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب انبساط حرارتی، ضریب پخش حرارت، لزجت نانوسیال و ضریب هدایت حرارتی به ترتیب طبق روابط (۱۱) تا (۱۷) به دست می‌آیند [۱]. با در نظر گرفتن تأثیر حرکت براونی، مقدار ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بیش از حالتی است که این اثر در نظر گرفته نمی‌شود. رابطه (۱۷) برای نانوسیالات حاوی نانوذرات کروی با کسرحجمی بین ۱ تا ۸ درصد است و سیال پایه می‌تواند اتیلن گلیکول یا آب باشد [۱۳]. در این رابطه $c=36000$ بوده و d_f و d_p به ترتیب قطر مولکول‌های آب و نانوذرات مس است. خواص ترموفیزیکی نانوذرات و سیال پایه در جدول ۱ ارائه شده است. عدد ناسلت یکی از مهمترین اعداد بی بعد در تعیین میزان انتقال حرارت است. این مقدار به صورت متوسط، بر روی دیواره گرم به صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود.

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

$$g_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = g_i(\mathbf{x}, t) - \frac{\Delta t}{\tau_c} [(g_i(\mathbf{x}, t) - g_i^{eq}(\mathbf{x}, t))] + \left(\frac{Q}{\rho C_p} \right)_{nf} (T - T_c) \quad (2)$$

$$f_i^{eq} = \omega_i \left[1 + \frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})}{c_s^2} - \frac{1}{2c_s^2} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \frac{1}{2} \frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2}{c_s^4} \right] \quad (3)$$

$$g_i^{eq} = \omega_i T \left[1 + \frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})}{c_s^2} \right] \quad (4)$$

$$\rho = \sum_i f_i \cdot \rho \mathbf{u} = \sum_i c_i f_i \cdot T = \sum_i g_i \quad (5)$$

$$\omega_0 = \frac{4}{9}, \omega_i = \frac{1}{9}, i = 1.2.3.4.$$

$$\omega_i = \frac{1}{36}, i = 1.2.3.4 \quad (6)$$

$$c_0 = 0.$$

$$c_i = \{ \cos[(i-1)\pi/2], \sin[(i-1)\pi/2] \}$$

$$i = 1.2.3.4. \quad (7)$$

$$c_i = \sqrt{2} \left\{ \begin{array}{l} \cos[(i-5)\pi/2 + \pi/4], \\ \sin[(i-5)\pi/2 + \pi/4] \end{array} \right\}$$

$$i = 5.6.7.8$$

$$\mathbf{F}_i = F_y$$

$$F_y = -3\omega_i \rho \nu Ha^2 \mu / H^2 + 3\omega_i \mathbf{g} \rho \beta \theta \quad (8)$$

$$\tau_v = \frac{\nu}{c_s^2 \Delta t} + 0.5, \tau_c = \frac{\alpha}{c_s^2 \Delta t} + 0.5 \quad (9)$$

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

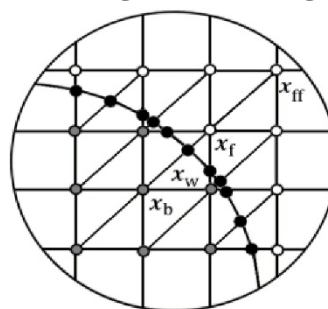
$$Ha = B_0 H \sqrt{\frac{\sigma_f}{\mu_f}}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (10)$$

در مجاورت مرز منحنی قرار دارد. این گره‌ها با زیرنویس b مشخص شده‌اند.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات [۱]

خواص فیزیکی	مس	آب (سیال پایه)
$C_p (Jkg^{-1}K^{-1})$	۳۸۵	۴۱۷۹
$\rho (kgm^{-3})$	۸۹۳۳	۹۹۷/۱
$k (Wm^{-1}K^{-1})$	۴۰۱	۰/۶۱۳
$\beta (K^{-1})$	$1/67 \times 10^{-5}$	21×10^{-5}
$\sigma (s^3A^2kg^{-1}m^{-1})$	$5/96 \times 10^{-7}$	۰/۰۵
$\mu (Pa \cdot s)$	-	۰/۰۰۱۰۰۳
d(nm)	۱۰۰	۲۰

محل تقاطع راستاهای هشت‌گانه شبکه با مرز منحنی با زیرنویس w نشان داده شده است. اولین و دومین گره در هر یک از راستاهای مذکور درون ناحیه محاسباتی نیز به ترتیب با زیرنویس‌های f و ff نام‌گذاری شده است. در این روش بعد از مرحله برخورد، با استفاده از تقریب برون‌یابی توابع توزیع چگالی و انرژی مربوط به تقاطع مجاور مرز درون حوزه حل و با کمک شرایط دمایی و سرعت مرز منحنی محاسبه می‌شوند. برای مرحله پخش، توابع توزیع محاسبه شده در گره‌های مرز جامد به گره‌های درون حوزه حل منتقل می‌شوند. تقریب برون‌یابی با توجه به محل تقاطع مرز منحنی و راستاهای شبکه از مرتبه اول یا دوم خواهد بود. برای این منظور پارامتر Δ به صورت توابع توزیع چگالی و انرژی استفاده می‌شود.



شکل ۳ مرز دیواره منحنی و گره‌ها

۳- نتایج

به منظور یافتن شبکه مناسبی که منجر به استقلال نتایج از شبکه شود، عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای شبکه با ابعاد مختلف به دست آمده و به همراه شرایط منظور شده در جدول ۲ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، شبکه با

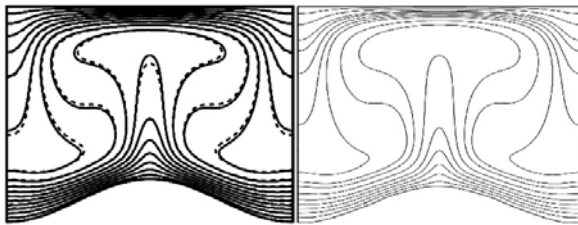
ابعاد 160×80 مناسب است. نحوه عملکرد شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی توسط کد حاضر تحت اثر میدان مغناطیسی با مرجع [۱۹] در جدول ۳ برای عدد رایلی 10^5 و برای صحت‌سنجی بر روی مرزهای منحنی با مرجع [۲۰] در شکل ۴ مقایسه شده است. همانطور که دیده می‌شود، اطلاعات به دست آمده از برنامه کار حاضر تطابق مناسبی با کارهای انجام شده دارد. با توجه به اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری و اطمینان از دقت نتایج بدست آمده، در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ارائه و بیان می‌شود. هدف بررسی تأثیر جدول ۲ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای توزیع دمای دیواره خطی، دیواره سرد منحنی، $Ha=60$ و $q=+5$

ابعاد سبکه	40×80	60×120	80×160	100×200
Nu	۱/۰۶۷	۱/۰۸۹	۱/۱۳۳	۱/۱۴۱

پارامترهای مؤثر از قبیل عدد هارتمن، ضریب تولید/جذب حرارت، کسر حجمی نانوسیال، شکل دیواره سرد و نوع گرمایش محفظه بر روی ماهیت و عملکرد انتقال حرارت جابجایی طبیعی است. شکل ۵ خطوط جریان را به ازای مقادیر مختلف ضریب تولید/جذب حرارت و عدد هارتمن برای گرمایش دما ثابت نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود تا عدد هارتمن ۳۰ و به ازای مقادیر $q < +5$ گردابه‌ای ساعتگرد درون محفظه شکل می‌گیرد ولی به ازای مقادیر بزرگتر از صفر برای ضریب تولید/جذب حرارت، گردابه ثانویه با قدرتی کمتر برای $q = +5$ و با قدرتی بیشتر برای $q = +10$ در نزدیکی دیواره گرم شکل می‌گیرد. زیرا با افزایش ضریب تولید حرارت، دمای نانوسیال افزایش یافته و انتقال حرارت از سیال به دیواره گرم صورت می‌گیرد. ولی برای عدد هارتمن ۶۰ مشاهده می‌شود که بجز در $q = +15$ در بقیه موارد تنها یک گردابه به وجود می‌آید. ملاحظه می‌شود که در تمامی موارد، با افزایش عدد هارتمن از مقدار بیشینه خطوط جریان کاسته می‌شود، زیرا افزایش قدرت میدان مغناطیسی سبب کاهش سرعت نانوسیال داخل محفظه می‌شود. بعنوان نمونه در $q = 0$ افزایش عدد هارتمن از ۰ تا ۶۰ سبب کاهش ۸۴ درصدی بیشینه خطوط جریان می‌شود. همچنین افزایش ضریب تولید/جذب حرارت منجر به افزایش سرعت نانوسیال داخل

جدول ۳ مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و مرجع [۱۹]

عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم			
درصد اختلاف	کار حاضر	مرجع [۱۹]	Ha
۰/۹۸	۱۲/۱۱	۱۲/۲۳	۰
۲/۰۴	۱۲/۴۹	۱۲/۷۵	۵۰
۳/۱۱	۱۲/۷۷	۱۳/۱۸	۱۰۰



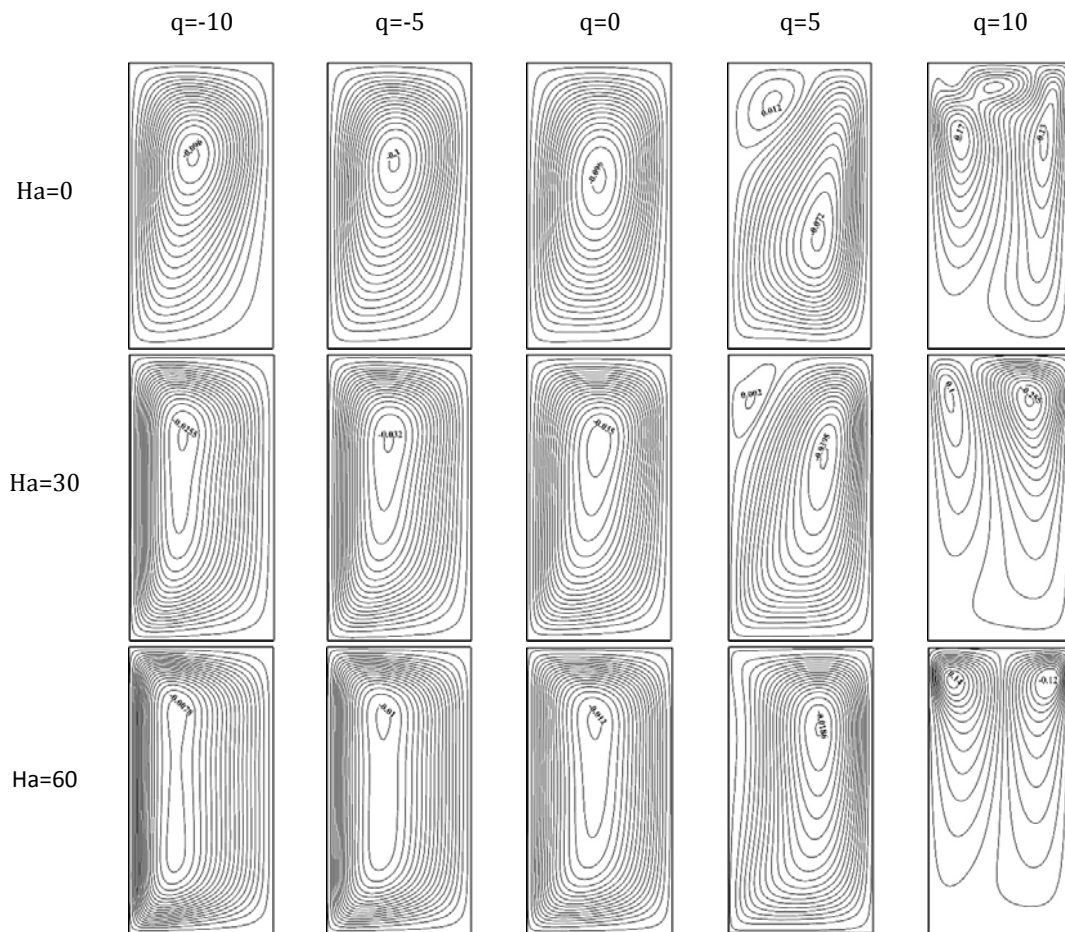
شکل ۴ مقایسه خطوط همدمای بین الف) کار حاضر (سمت راست) و ب) مرجع [۲۰] (سمت چپ) در عدد رایلی 10^5

یعنی در $q=+10$ نانوسیال بیشترین دما را دارد. همچنین لازم به ذکر است که وقتی دیواره دارای دمای ثابت است، دمای سیال داخل محفظه نسبت به حالتی که گرمایش دیواره به صورت خطی است، بیشتر است. شکل ۸-ب نیز دمای بی بعد را برای مقادیر مختلف کسر حجمی در دو عدد هارتمن ۱۵ و ۴۵ نشان می دهد. مشاهده می شود که در عدد هارتمن ۴۵، هدایت پدیده غالب انتقال حرارت است. همچنین وقتی $Ha=45$ است، با افزایش کسر حجمی تا $X=0.4$ دما افزایش می یابد ولی برای مقادیر بزرگتر X ، پروفیل سرعت ثابت می شود که نشان از بی اثر شدن افزودن نانوذرات دارد. برای $Ha=15$ دو ناحیه قابل ذکر است؛ برای $0 < X < 0.4$ افزایش کسر حجمی سبب افزایش دما و برای $X > 0.4$ عکس این اثر مشاهده می شود. نانوسیال ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به سیال پایه دارد که با افزودن آن به سیال پایه انتقال حرارت در مجاورت دیواره گرم افزایش و انتقال حرارت در نزدیکی دیواره سرد کاهش می یابد که این اثر برای عدد هارتمن کمتر مشاهده می شود ولی برای عدد هارتمن بیشتر فقط افزایش انتقال حرارت در نزدیکی دیواره گرم دیده می شود و این اثر در نزدیکی دیواره سرد قابل چشم پوشی است [۹]. با توجه به شکل ۱۰ ملاحظه می شود که افزایش عدد هارتمن به دلیل افزایش نیروی مقاوم در برابر حرکت نانوسیال، سبب کاهش سرعت می شود. این عامل منجر به کاهش قدرت جریان و سپس کاهش میزان انتقال حرارت می شود. به عنوان

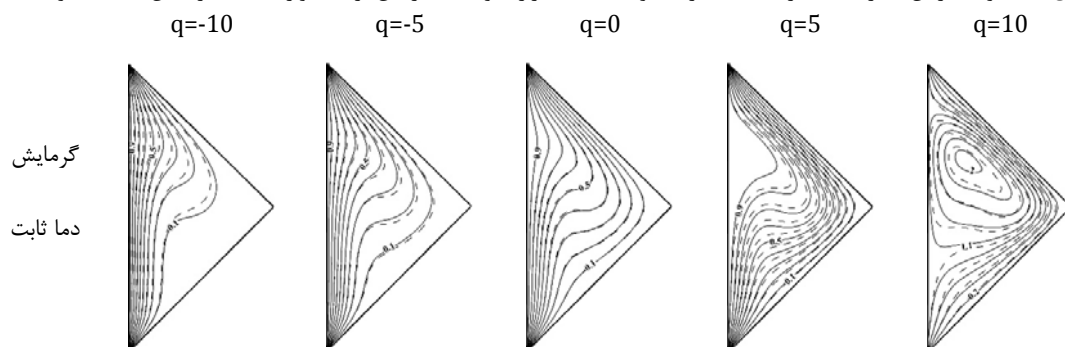
محفظه و افزایش قدرت جریان می گردد ولی چون گردابه واحد به دو گردابه تبدیل می شود، از قدرت گردابه اصلی کاسته می شود. شکل ۶ خطوط همدمای را برای دیواره مورب به ازای مقادیر مختلف q برای دو نوع گرمایش دیواره و کسر حجمی ۰ و ۰/۰۶ نشان می دهد. ملاحظه می شود برای $q < 0$ که جذب حرارت وجود دارد، دمای نانوسیال درون محفظه خیلی کمتر از دمای دیواره گرم محفظه شده و همین امر سبب افزایش تراکم خطوط همدمای در نزدیکی دیواره گرم می شود. برعکس به ازای $q > 0$ که تولید حرارت وجود دارد، چون دمای نانوسیال بیشتر از دمای دیواره گرم است، تراکم خطوط در نزدیکی دیواره گرم خیلی کمتر می شود و انتقال حرارت از نانوسیال به دیواره صورت می گیرد. بعلاوه دیده می شود زمانی که دیواره بصورت دما ثابت است، خطوط همدمای در نزدیکی دیواره گرم متراکم تر بوده که نشان از بیشتر بودن میزان انتقال حرارت دارد. همانطور که دیده می شود تغییر ضریب تولید/جذب حرارت، ساختار جریان و نوع انتقال حرارت را بصورت بارزی تحت تأثیر قرار می دهد [۸]. با توجه به شکل ۷ که خطوط همدمای را به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن برای دو نوع گرمایش دیواره عمودی نشان می دهد، ملاحظه می شود که افزایش عدد هارتمن سبب کم شدن انحنای خطوط شده و خطوط به موازات دیواره ها قرار می گیرند. این عامل نشان از غالب شدن هدایت و کم اثر شدن جابجایی و به تبع آن کاهش میزان انتقال حرارت است. همچنین مشاهده می شود زمانی که دیواره به صورت دما ثابت گرم می شود، تراکم خطوط بیشتر و میزان انتقال حرارت بیشتر خواهد بود. شکل ۸-الف دمای بی بعد را به ازای مقادیر مختلف ضریب تولید/جذب حرارت نشان می دهد. همانطور که دیده می شود، با افزایش q دمای نانوسیال داخل محفظه بیشتر می شود و دامنه این تغییرات بیشتر است.

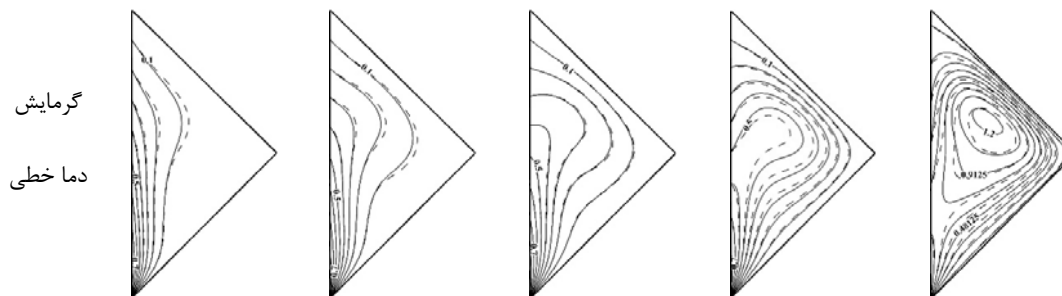
است که دیواره دما ثابت است. در جداول ۴ تا ۹ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم محفظه به ازای تغییرات عدد هارتمن، ضریب تولید/جذب حرارت، شکل دیواره سرد و نوع گرمایش دیواره عمودی سمت چپ محفظه نشان داده شده است. ملاحظه

نمونه زمانی که دیواره دارای گرمایش خطی است، افزایش عدد هارتمن از صفر به ۶۰ منجر به کاهش ۸۵ درصدی بیشترین مقدار سرعت می‌شود. همچنین دیده می‌شود زمانی که دیواره دارای گرمایش بصورت خطی است سرعت سیال کمتر از حالتی



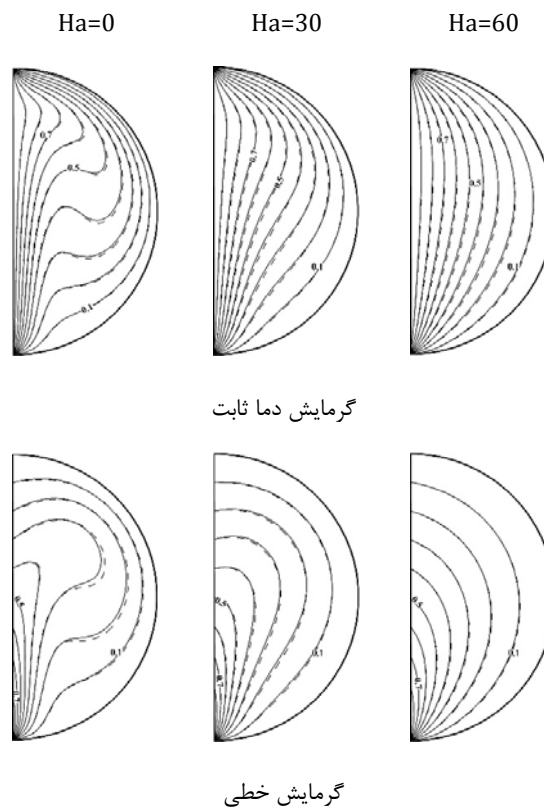
شکل ۵ خطوط جریان به ازای مقادیر مختلف ضریب تولید/جذب حرارت و عدد هارتمن برای دیواره صاف، گرمایش دما ثابت و $\varphi=0.0$





شکل ۶ خطوط همدمای برای دیواره مورب و دو نوع گرمایش دیواره عمودی محفظه در $Ha=0$ ، $\phi=0.0$ (---) و $\phi=0.05$ (-)

دو پارامتر موجب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌گردد. مثلاً در حالتی که دیواره مورب و دمای دیواره گرم ثابت است، افزایش عدد هارتمن از صفر به ۶۰ سبب کاهش ۷ و ۶۵ درصدی عدد ناسلت متوسط به ترتیب برای $q=-15$ و $q=+15$ می‌شود. بعلاوه اثر میدان مغناطیسی در هر سه نوع دیواره در حالتی که دیواره دارای گرمایش خطی است، کمتر از حالت دما ثابت است. به عنوان نمونه در $q=0$ و دیواره منحنی، افزایش عدد هارتمن از ۰ به ۶۰ سبب کاهش ۸/۵ و ۱۷/۵ درصدی عدد ناسلت به ترتیب برای گرمایش دما خطی و ثابت می‌شود. دیده می‌شود که با ثابت بودن سایر پارامترها، بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط به ترتیب متعلق به دیواره مورب، منحنی و صاف است. همچنین اثر افزایش عدد هارتمن در کاهش عدد ناسلت متوسط در حالت دیواره صاف بیشترین و دیواره مورب کمترین است. زیرا در حالتی که دیواره صاف است، قدرت جابجایی و حرکت نانوسیال درون محفظه بیشتر از حالتی است که دیواره مورب است و به همین جهت افزایش Ha تأثیر بیشتری در کاهش انحنای خطوط همدمای دارد. مثلاً در حالتی که $q=+5$ و گرمایش دیواره به صورت خطی است، افزایش عدد هارتمن از صفر به ۶۰ سبب کاهش ۱۰/۲، ۵۶ و ۶۷ درصدی عدد ناسلت متوسط به ترتیب برای دیواره مورب، منحنی و صاف می‌گردد. بعلاوه دیده می‌شود که با ثابت بودن سایر پارامترها، افزایش ضریب تولید/جذب حرارت سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌شود، زیرا با افزایش ضریب تولید/جذب حرارت از ۱۰- تا ۱۰+، از تراکم خطوط همدمای کاسته می‌شود. مثلاً در حالتی که دیواره صاف، دیواره گرمایش دما خطی و در غیاب میدان

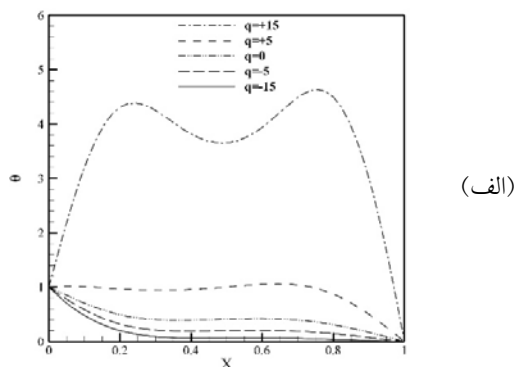
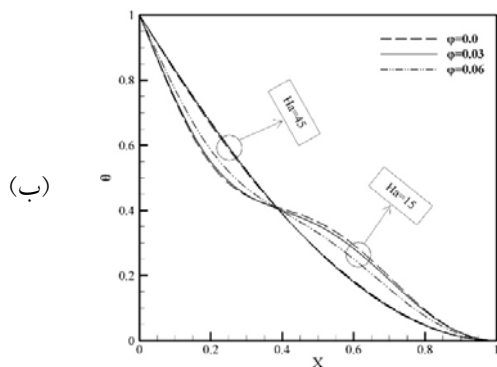


شکل ۸ خطوط همدمای برای دیواره منحنی و دو نوع گرمایش در $q=0$ ، $\phi=0.0$ (---) و $\phi=0.05$ (-)

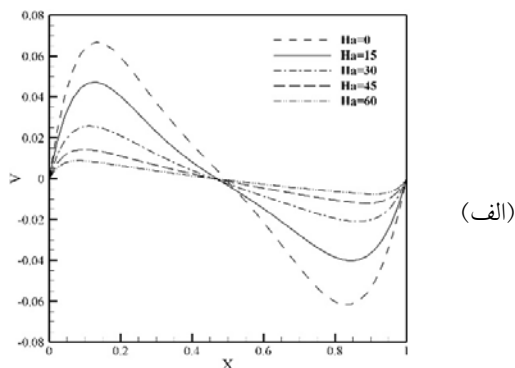
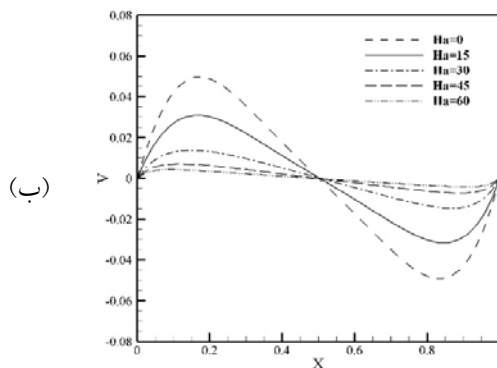
می‌شود که در تمامی حالات، افزایش قدرت میدان مغناطیسی سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌گردد. زیرا همانگونه که بیان شد، با افزایش عدد هارتمن، نیروی لورنتز، نیروی مقاوم در برابر حرکت جریان افزایش می‌یابد و سبب کند شدن حرکت نانوسیال می‌شود به همین دلیل از قدرت جریان و تراکم خطوط همدمای نزدیکی دیواره گرم کاسته می‌شود. لازم به ذکر است که این تأثیر با افزایش q از ۱۵- به ۱۵+ افزایش می‌یابد. زیرا افزایش هر

ناسلت متوسط روی دیواره گرم این است که دمای سیال بیشتر از دیواره بوده و حرارت از سیال به دیواره منتقل می‌شود.

مغناطیسی، افزایش q از -10 به $+10$ سبب کاهش 93 درصدی عدد ناسلت متوسط می‌شود. دلیل منفی شدن عدد



شکل ۸ دمای بی بعد در $Y=0.5$ و گرمایش دما ثابت دیواره منحنی (الف) به ازای تغییرات q در $Ha=0$ و (ب) به ازای تغییرات φ در $q=0$



شکل ۹ سرعت عمودی در $Y=0.5$ به ازای تغییرات Ha برای $q=0$ و دیواره صاف (الف) گرمایش دما ثابت و (ب) گرمایش دما خطی

جدول ۴ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای دیواره مورب و گرمایش دما ثابت در $\varphi=0.0$

	$q=-10$	$q=-5$	$q=0$	$q=+5$	$q=+10$
$Ha=0$	۱۰/۸۶۶	۹/۰۵۱	۷/۷۱۱	۵/۶۳۲	۱/۵۶۶
$Ha=15$	۱۰/۶۳۷	۸/۶۸۷	۷/۳۲۲	۵/۲۸۱	۱/۳۶۲
$Ha=30$	۱۰/۳۳۱	۸/۳۱۱	۶/۸۶۲	۴/۷۱۲	۱/۰۹۶
$Ha=45$	۱۰/۲۳۲	۸/۰۹۹	۶/۶۱۹	۴/۵۵۹	۰/۹۴۳
$Ha=60$	۱۰/۱۳۱	۷/۸۸۲	۶/۳۵۱	۴/۲۳۳	۰/۵۵۲

جدول ۵ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای دیواره مورب و گرمایش دما خطی در $\varphi=0.0$

	$q=-10$	$q=-5$	$q=0$	$q=+5$	$q=+10$
$Ha=0$	۷/۴۱۲	۶/۱۸۳	۵/۴۶۶	۴/۴۱۶	۱/۲۳۷
$Ha=15$	۷/۳۹۲	۶/۱۰۸	۵/۲۷۴	۴/۲۷۵	۱/۱۴۵
$Ha=30$	۷/۳۷۳	۶/۰۳۳	۵/۱۳۳	۴/۰۶۶	۱/۰۵۲
$Ha=45$	۷/۳۶۲	۵/۹۹۹	۵/۰۷۹	۴/۰۴۵	۰/۹۶۴
$Ha=60$	۷/۳۵۱	۵/۹۶۶	۵/۰۰۱	۳/۹۶۶	۰/۸۶۳

جدول ۶ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای دیواره منحنی و گرمایش دما ثابت در $\varphi=0.0$

	$q=-10$	$q=-5$	$q=0$	$q=+5$	$q=+10$
--	---------	--------	-------	--------	---------

Ha=0	۹/۸۳۳	۸/۰۰۳	۶/۴۱۲	۳/۲۵۲	۰/۷۱۱
Ha=15	۹/۳۹۲	۷/۴۳۸	۵/۷۶۲	۲/۷۳۲	۰/۵۵۳
Ha=30	۸/۹۵۲	۶/۷۳۳	۵/۰۰۵	۲/۱۵۳	۰/۳۹۸
Ha=45	۸/۸۲۵	۶/۴۳۱	۴/۵۲۵	۱/۴۶۱	۰/۲۰۱
Ha=60	۸/۷۱۱	۶/۱۱۶	۴/۰۱۶	۰/۷۳۳	-۰/۰۴۱

جدول ۷ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای دیواره منحنی و گرمایش دما خطی در $\phi=0.0$

	q=-10	q=-5	q=0	q=+5	q=+10
Ha=0	۶/۱۶۶	۴/۸۵۴	۴/۰۱۲	۲/۶۱۲	۰/۵۵۴
Ha=15	۶/۰۷۳	۴/۶۳۶	۳/۶۶۴	۲/۱۴۵	۰/۴۶۱
Ha=30	۵/۹۵۱	۴/۳۸۳	۳/۳۳۳	۱/۶۵۲	۰/۳۵۵
Ha=45	۵/۹۳۲	۴/۳۴۹	۳/۲۱۱	۱/۳۹۴	۰/۲۶۸
Ha=60	۵/۹۱۶	۴/۳۱۶	۳/۰۶۵	۱/۱۳۳	۰/۲۱۱

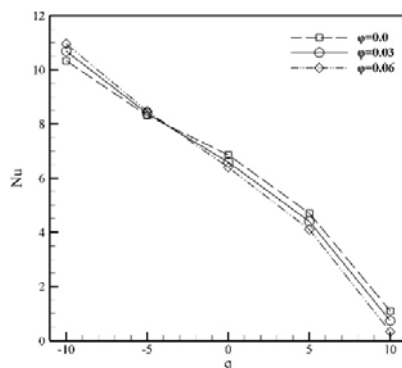
جدول ۸ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای دیواره صاف و گرمایش دما ثابت در $\phi=0.0$

	q=-10	q=-5	q=0	q=+5	q=+10
Ha=0	۹/۷۹۸	۷/۹۸۳	۶/۳۳۷	۳/۰۱۶	۰/۵۹۲
Ha=15	۹/۴۱۲	۷/۳۵۲	۵/۱۹۱	۲/۵۳۳	۰/۳۱۱
Ha=30	۸/۹۶۶	۶/۶۸۵	۴/۹۸۳	۱/۹۶۲	۰/۱۴۸
Ha=45	۸/۸۲۲	۶/۳۸۶	۴/۳۸۵	۱/۰۷۸	۰/۰۷۲
Ha=60	۸/۶۸۳	۶/۰۶۶	۳/۸۶۶	۰/۲۵۴	-۰/۱۹۶

جدول ۹ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای دیواره صاف و گرمایش دما خطی در $\phi=0.0$

	q=-10	q=-5	q=0	q=+5	q=+10
Ha=0	۶/۰۹۱	۴/۸۴۲	۴/۰۰۱	۲/۵۵۱	۰/۴۲۲
Ha=15	۶/۰۳۶	۴/۶۵۱	۳/۶۸۳	۱/۹۸۹	۰/۳۲۴
Ha=30	۵/۹۱۶	۴/۳۳۳	۳/۲۸۳	۱/۵۱۶	۰/۲۰۳
Ha=45	۵/۸۹۱	۴/۲۹۹	۳/۱۰۱	۱/۰۳۱	۰/۱۱۳
Ha=60	۵/۸۶۶	۴/۲۶۷	۲/۹۱۶	۰/۸۵۴	-۰/۰۴۲

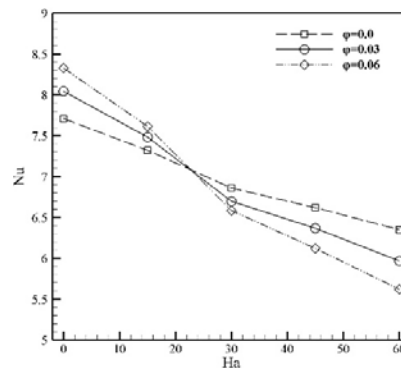
افزودن نانوذرات در بیشترین مقدار عدد هارتمن مشاهده می-شود. شایان ذکر است، زمانی که عدد هارتمن کم است، افزودن نانوذرات برای افزایش میزان انتقال حرارت، ضروری است. در حالی که برای اعداد هارتمن بالا، نیاز به اضافه کردن نانوذرات نیست زیرا از میزان انتقال حرارت کاسته می-شود.



(الف)

باتوجه به شکل ۱۰-الف ملاحظه می-شود که q پارامتری تعیین کننده بر اثرگذاری افزودن نانوذرات است. مشاهده می-شود در $q=-10$ افزودن نانوذرات سبب افزایش مقدار عدد ناسلت متوسط می-شود و بیشترین اثرگذاری افزودن نانوذرات در همین مقدار ضریب تولید/جذب حرارت اتفاق می-افتد. ولی در $q=-5$ اثر افزودن نانوذرات در مقدار عدد ناسلت متوسط ناچیز است. به ازای $q>-5$ با افزودن نانوذرات از مقدار عدد ناسلت متوسط کاسته می-شود که این اثر به ازای $q>+5$ مشهودتر است. این اثر به دلیل ذخیره انرژی در نانوذرات است. شکل ۱۰-ب کنترل اثر افزودن نانوذرات توسط میدان مغناطیسی را نشان می-دهد. به ازای $Ha<15$ افزودن نانوذرات سبب افزایش انتقال حرارت می-شود در حالی که به ازای مقادیر بزرگتر از ۱۵، کاهش مقدار عدد ناسلت متوسط را شاهد خواهیم بود. همچنین بیشترین تأثیر

- بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط زمانی حاصل می‌شود که دیواره سرد محفظه بصورت مورب باشد ولی اثر میدان مغناطیسی در این حالت کمتر است.
- به ازای $Ha=30$ ، برای $q < 0$ ، افزایش φ منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط و برای مقادیر $q > 0$ افزایش کسر حجمی ماده جامد سبب کاهش میزان انتقال حرارت می‌شود.



(ب)

شکل ۱۰ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای تغییرات φ و دیواره مورب و گرمایش دما ثابت (الف) $Ha=30$ (ب) $q=0$

۴- نتیجه‌گیری

در کار حاضر، انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال درون محفظه‌ای دو بعدی با هندسه‌های مختلف با وجود تولید/جذب حرارت تحت اثر میدان مغناطیسی با استفاده از روش شبکه بولتزنن شبیه‌سازی شد. در این مطالعه عددی، تأثیر عدد هارتمن، ضریب تولید/جذب حرارت، شکل دیواره سرد، کسر حجمی نانوذرات و نوع گرمایش دیواره عمودی محفظه بررسی شد. خلاصه نتایج بدست آمده را می‌توان در چند مورد زیر خلاصه نمود:

- در تمامی حالات، افزایش عدد هارتمن به دلیل کاستن از سرعت سیال درون محفظه سبب کاهش قدرت جریان و عدد ناسلت متوسط می‌شود که این تأثیر با افزایش ضریب تولید/جذب حرارت بیشتر می‌شود.

- به ازای $q=0$ ، تا عدد هارتمن ۱۵، افزایش φ منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط و برای مقادیر عدد هارتمن بیشتر از ۱۵، افزایش کسر حجمی ماده جامد سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌شود.

- با ثابت ماندن تمامی پارامترها، افزایش ضریب تولید/جذب حرارت به دلیل افزایش دمای نانوسیال، سبب کاهش عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم محفظه می‌شود.

- بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط مربوط به زمانی است که دیواره عمودی سمت چپ محفظه در دمای ثابت گرم قرار داشته باشد که در این حالت اثر میدان مغناطیسی نیز بیشتر است.

۵- فهرست علائم

قدرت میدات مغناطیسی	B_0
سرعت صوت شبکه	$c_s = 1/\sqrt{3}$
سرعت مجازی ذرات روی شبکه	c_i
گرمای ویژه	C_p
نیروهای خارجی	F_i
تابع توزیع چگالی	f
عدد هارتمن	Ha
تابع توزیع انرژی	g
ضریب هدایت حرارتی	k
عدد ناسلت	Nu
سرعت ماکروسکوپی	$u(u, v)$
مختصات شبکه	$x(x, y)$
ضریب بی بعد تولید/جذب حرارت	$q = \frac{QH^2}{(\rho C_p)_{nf} \alpha_{nf}}$
علائم یونانی	
ضریب پخش حرارتی	α
کسر حجمی نانوذرات	φ
چگالی	ρ
ضریب آسایش میدان دما	τ_c
ضریب آسایش میدان جریان	τ_v
دمای بی بعد	θ
لزجت سینماتیکی	ν
لزجت دینامیکی	μ
ضریب وزنی	ω
بالانویس‌ها	
تعادلی	eq
زیرنویس‌ها	
سیال	f
شماره لینک شبکه	i

- [10] A. Mahmoudi, I. Mejri, M. A. Abbassi, A. Omri, Analysis of MHD natural convection in a nanofluids filled open cavity with non uniform boundary condition in the presence of uniform heat generation/absorption, *Powder Technol*, 2015, 269, 275–289.
- [11] M. A. Abbassi, B. Mliki, A. Omri, and B. Zeghmati, Augmentation of natural convective heat transfer in linearly heated cavity by utilizing nanofluids in the presence of magnetic field and uniform heat generation/absorption, *Powder Technology*, 2015, 284, 312-325.
- [12] A. Izadi, M. Siavashi, H. Rasam, and Q. Xiong, "MHD enhanced nanofluid mediated heat transfer in porous metal for CPU cooling, *Applied Thermal Engineering*, 2020, 168, 152-166.
- [13] A. Rahmati, and M. Nemati, Investigation of magnetic field effect on nanofluid mixed convection inside lid-Driven K-shaped enclosure using lattice Boltzmann method, 2017, *Journal of solid and fluid mechanics*, 8, 111-126.
- [14] S. H. Zadeh, M. Sabour, S. Sazgara, and M. Ghalambaz, Free convection flow and heat transfer of nanofluids in a cavity with conjugate solid triangular blocks: Employing Buongiorno's mathematical model, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 538, 211-223.
- [15] G. Imani, Lattice Boltzmann method for conjugate natural convection with heat generation on non-uniform meshes, *Computers & Mathematics with Applications*, 2020, 79, 1188-1207.
- [16] A. A. Mohamad, Lattice Boltzmann method: fundamentals and engineering applications with computer codes, *Springer Science & Business Media*, 2011.
- [17] P. L. Bhatnagar, E. P. Gross, and M. Krook, A model for collision processes in gases. I. Small amplitude processes in charged and neutral one-component systems, *Physical review*, 1954, 94, 511-525.
- 18- S. Tao, A. Xu, Q. He, B. Chen, and F. G. Qin, A curved lattice Boltzmann boundary scheme for thermal convective flows with Neumann boundary condition, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 150, 119-125.
- [19] M. Sathiyamoorthy, A. Chamkha, 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 Science*, 2010, 49, 1856-1865.
- [20] A. Shahriari and H. R. Ashorynejad, Numerical study of heat transfer and entropy generation of Rayleigh–Benard convection nanofluid in wavy cavity with magnetic field, 2017, *Modares Mechanical Engineering*, 17, 385-396.

نانو سیال nf

ذره p

۶-مراجع

- [1] A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, and G. A. Sheikhzadeh, Effects of magnetic field on mixed convection heat transfer and entropy generation of Cu-water nanofluid in a trapezoidal enclosure, *Modares Mechanical Engineering*, 2014, 14, 183-194.
- [2] M. Hashemi-Tilehnoee, A. Dogonchi, S. M. Seyyedi, A. J. Chamkha, and D. Ganji, "Magneto-hydrodynamic natural convection and entropy generation analyses inside a nanofluid-filled incinerator-shaped porous cavity with wavy heater block, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 51, 1-13.
- [3] T. Tayebi, A. Dogonchi, A. J. Chamkha, and D. Ganji, Natural convection analysis in a square enclosure with a wavy circular heater under magnetic field and nanoparticles, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 139, 661-671.
- [4] T. Zhang, D. Che, Y. Zhu, H. Shi, and D. Chen, Effects of magnetic field and inclination on natural convection in a cavity filled with nanofluids by a double multiple-relaxation-time thermal lattice boltzmann method, *Heat Transfer Engineering*, 2020, 41, 252-270.
- [5] J. Garandet, T. Alboussiere, and R. Moreau, Buoyancy driven convection in a rectangular enclosure with a transverse magnetic field, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1992, 35, 741-748.
- [6] H. Sajjadi, A. A. Delouei, M. Sheikholeslami, M. Atashafrooz, and S. Succi, Simulation of three dimensional MHD natural convection using double MRT Lattice Boltzmann method, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, 515, 474-49.
- [7] R. Mohebbi, Y. Ma, M. Rashidi, Z. Yang, and M. A. Sheremet, Numerical study of MHD nanofluid natural convection in a baffled U-shaped enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 130, 123-134.
- [8] M. Jami, A. Mezrhab, M. h. Bouzidi, and P. Lallemand, Lattice Boltzmann method applied to the laminar natural convection in an enclosure with a heat-generating cylinder conducting body, *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, 46, 38-47.
- [9] B. Mliki, M. A. Abbassi, A. Omri, and B. Zeghmati, Effects of nanoparticles Brownian motion in a linearly/sinusoidally heated cavity with MHD natural convection in the presence of uniform heat generation/absorption, *Powder Technology*, 2016, 295, 69-83, 2016.