

اثر شکل و نسبت ابعاد دیواره بر انتقال حرارت سیال غیرنیوتنی با مدل توانی در حضور میدان مغناطیسی

در این مطالعه، اثر میدان مغناطیسی و شکل و نسبت ابعاد دیواره محفظه بر انتقال حرارت سیال غیرنیوتنی با مدل توانی با استفاده از روش اختلاف محدود شبکه بولتزمن بررسی شده است. دیواره سمت چپ در دمای ثابت گرم قرار دارد و دیواره‌های مورد بررسی سمت راست محفظه در دمای ثابت سرد قرار دارند. سایر دیواره‌ها آدیاباتیک در نظر گرفته شده‌اند. تأثیر عدد هارتمن، مقدار شاخص توانی سیال غیرنیوتنی، نسبت ابعاد و شکل دیواره محفظه بر میزان انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش شاخص توانی، نسبت ابعاد و عدد هارتمن سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌گردد. همچنین عموماً بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به حالتی است که دیواره مورب باشد. علاوه بر افزایش شاخص توانی سبب کاهش اثر میدان مغناطیسی می‌گردد.

محمد نعمتی^۱

دانشجوی دکترا

محمد سفید^۲

استاد

هاجر محمدزاده ثانی^۳

دانشجوی دکترا

واژه‌های راهنما: روش شبکه بولتزمن، جابجایی طبیعی، سیال غیرنیوتنی، مدل توانی، میدان مغناطیسی، هندسه مختلف دیواره.

۱- مقدمه

مسأله کلاسیک انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه‌های بسته به دلیل کاربردهای فراوان در صنعت و مهندسی مانند تهویه ساختمان‌ها، کلکتورهای خورشیدی و رآکتورهای هسته‌ای همیشه مورد توجه محققان بوده است [۱-۴]. جابجایی طبیعی یکی از مکانیزم‌های انتقال حرارت است و زمانی روی می‌دهد که یک نیروی حجمی به واسطه ایجاد اختلاف چگالی ناشی از اختلاف دما در سیال به آن اعمال می‌شود. در حالت کلی جابجایی طبیعی به علت ساده بودن فرایند، صرفه اقتصادی، صدای کم و بازیابی مجدد، در شاخه‌های مختلف صنعت کاربرد فراوانی دارد. از طرفی همواره دستیابی به وسایلی با ابعاد کوچک‌تر، سبک‌تر و بازده بیشتر برای انتقال حرارت، مطلوب بوده است. بنابراین در طراحی تمامی این تجهیزات با توجه به ضرورت استفاده بهینه از فضا، استفاده از محفظه‌هایی با مقاطع مختلف مفید و ضروری است. به عنوان نمونه،

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، ایران mohammadnemati@stu.yazd.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، ایران mhsefid@yazd.ac.ir

^۳ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، ایران h_mohamadzade@mecheng.iust.ac.ir

یکی از روش‌های ساده برای خنک‌سازی المان‌های یک برد مدار الکترونیکی، استفاده از جابجایی طبیعی است. میزان انتقال حرارت درون محفظه را می‌توان با تغییر شکل هندسی دیواره‌ها کنترل نمود [۵-۷]. اکثر این مطالعات به محفظه‌های دوبعدی با دیواره‌های صاف مربوط می‌شود و مطالعه بر روی مرزهای منحنی و غیرصاف برای شرایط مرزی متفاوت و حالات مختلف چندان صورت نگرفته است. یکی دیگر از روش‌های کنترل انتقال حرارت جابجایی طبیعی می‌توان استفاده از تأثیر میدان مغناطیسی بر روی جریان جابجایی را نام برد. علاقه به مطالعه رفتار فرآیندهای انتقال حرارت در محفظه‌های بسته تحت اثر میدان مغناطیسی رو به افزایش است. نتیجه مشترک تمامی این مطالعات این است که سیال نیروی لورنز را تجربه می‌کند. این نیرو بر میدان جریان شناوری و انتقال حرارت اثر می‌گذارد [۸-۱۰].

از جمله این کاربردها می‌توان در صنایع ریخته‌گری و متالورژی اشاره کرد. بنابراین با استفاده از جریان طبیعی مگنتوهیدرودینامیک به راحتی می‌توان بر ویژگی‌های انتقال حرارت و جریان تأثیر گذاشت و آن را تحت کنترل درآورد. روش‌های تجربی، بررسی‌های تئوری و شبیه‌سازی‌های عددی بسیاری در زمینه‌هایی از جمله مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی، زمین‌شناسی و غیره صورت گرفته است، مهر تصدیقی بر این ادعا می‌باشد. رحمتی و نعمتی [۱۱] اثر میدان مغناطیسی بر جریان جابجایی ترکیبی نانوسیال درون محفظه K شکل را بررسی کردند. نتایج نشان داد، اعمال میدان مغناطیسی ماهیت جریان و انتقال حرارت را به صورت چشمگیری تحت تأثیر قرار داده و افزایش قدرت میدان مغناطیسی از میزان انتقال حرارت و بیشینه خطوط جریان کم می‌کند. ما و همکاران [۱۲] اثر میدان مغناطیسی را بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال درون محفظه U شکل بررسی کردند و نشان دادند که افزایش عدد هارتمن به دلیل کاستن سرعت، به خصوص در نزدیکی دیواره‌ها، سبب کاهش عدد ناسلت می‌شود. عبور جریان الکتریکی از داخل یک مدار و قطعات مربوطه، تولید میدان مغناطیسی می‌نماید. میدان مغناطیسی ایجاد شده بر روی میدان جریان و انتقال حرارت تأثیرگذار است. هرچند که ممکن است میدان مغناطیسی ایجاد شده متغیر باشد، ولی یکنواخت بودن آن در کار حاضر، از کلیت مسأله کم نمی‌کند. از ویژگی‌های سیالات نیوتنی این است که ویسکوزیته آنها تحت فشار تغییر نمی‌کند. ویسکوزیته در یک سیال نیوتنی تنها به دما و فشار بستگی دارد و به نیرویی که به آن اعمال می‌شود وابسته نیست. اما در برخی دیگر از سیالات، مقدار ویسکوزیته سیال به نیروی وارد شده به آن سیال بستگی دارد. این نوع از سیالات، سیالات غیرنیوتنی نامیده می‌شوند.

در سیالات نیوتنی، رابطه میان تنش و نرخ کرنش به صورت خطی است اما در سیالات غیرنیوتنی این رابطه، غیر خطی است و در این طیف از سیالات، مدت زمان اعمال تنش نقش مهمی در تنش برشی حاصل شده ایجاد می‌کند [۱۳-۱۶]. رفتار بیشتر سیالات مورد استفاده در صنایع مکانیکی و شیمیایی به صورت غیرنیوتنی می‌باشد. جریان‌های سیال غیرنیوتنی در بسیار از موارد طبیعی و کاربردهای صنعتی به کار رفته‌اند که از جمله این کاربردها می‌توان به خطوط انتقال محصولات صنعتی، فرآیندهای پلیمری و در بسیاری از کاربردهای بیولوژیکی مانند جریان خون در بدن اشاره نمود [۱۷ و ۱۸].

رئسی [۱۹] اثر یک جفت مانع را بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال غیرنیوتنی در یک محفظه مربعی بررسی کرد و نشان داد که کاهش شاخص توانی سبب کاهش ویسکوزیته ظاهری سیال شده و جابجایی طبیعی داخل محفظه را تقویت می‌کند. آقاخانی و همکاران [۲۰] به بررسی انتقال حرارت جابجایی طبیعی

سیال غیرنیوتنی با مدل توانی درون محفظه C شکل با نسبت ابعاد مختلف تحت اثر میدان مغناطیسی پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که افزایش قدرت میدان مغناطیسی، نسبت ابعاد محفظه و شاخص توانی منجر به کاهش اثرات جابجایی طبیعی و انتقال حرارت می‌گردد. روش عددی شبکه بولتزمن، علیرغم گذشت زمان کوتاه از پیدایش و مورد استفاده قرار گرفتن آن، موفقیت‌های چشمگیری را در حل جریان‌های پیچیده با دقت بالا بدست آورده است. در این روش، نیاز به حل معادلات دیفرانسیل نبوده و تمام محاسبات بصورت صریح صورت می‌پذیرد و همین قابلیت پردازش موازی یکی از مزایای این روش محسوب می‌شود. همچنین اعمال شرایط مرزی برای مدل‌سازی حرکت سیال در هندسه‌های پیچیده در این روش نسبت به سایر روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی، ساده‌تر است [۲۱-۲۳]. ژانگ و همکاران [۲] اثر میدان مغناطیسی بر میزان انتقال حرارت و تولید آنتروپی سیال غیرنیوتنی را به روش شبکه بولتزمن درون محفظه L شکل بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش قدرت میدان مغناطیسی و شاخص توانی سیال غیرنیوتنی منجر به کاهش میزان انتقال حرارت می‌شوند. کاربرد همزمان میدان مغناطیسی، سیال غیرنیوتنی و مرز غیرصاف به دلیل کاربردهای بی‌شمار مانند تحلیل مبدل‌های حرارتی، علت اصلی مطالعه اخیر است. لازم به ذکر است که چنین هندسه‌ای برای اولین بار به روش شبکه بولتزمن شبیه‌سازی شده است.

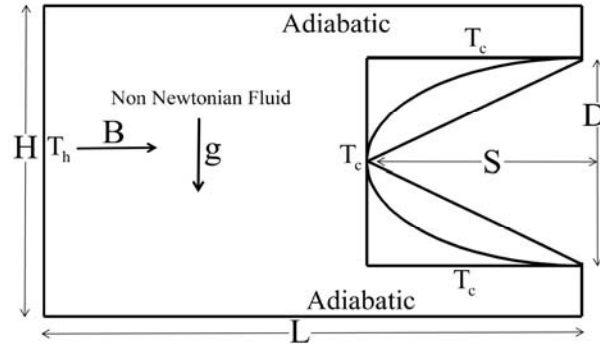
۲- بیان مسأله

مطابق شکل (۱)، هندسه مسأله شامل محفظه‌ای دوبعدی است که دیواره سمت چپ محفظه در دمای ثابت گرم (T_h) و دیواره‌های سمت راست در دمای ثابت سرد (T_c) قرار دارد. سایر دیواره‌ها آدیاباتیک در نظر گرفته شده‌اند. میدان مغناطیسی یکنواخت به صورت افقی از چپ به راست و عمود بر نیروی جاذبه به محفظه اعمال می‌شود. مشخصات هندسی به صورت $H/L=0.6$ و $D/L=0.4$ است. نسبت ابعاد محفظه به صورت $AR=S/D$ تعریف می‌شود.

هدف، بررسی تأثیر پارامترهایی چون شاخص توانی (0.7 ، 1 و $1/2$)، عدد هارتمن (0 ، 25 و 50) و نسبت ابعاد محفظه (0.5 ، 1 و $1/5$) برای سه حالت دیواره سمت راست محفظه (مورب، منحنی و صاف) بر روی مشخصات جریان و انتقال حرارت جابجایی طبیعی است. در کار حاضر، عدد رایلی ثابت و برابر 10^5 در نظر گرفته شده است. تمام مرزها غیرقابل نفوذ بوده و لغزشی روی سطوح وجود ندارد. در کار حاضر، جریان سیال غیرنیوتنی پایا و آرام در نظر گرفته شده است. چگالی از فرضیه بوزینسک پیروی کرده و از گرمای تولید شده ناشی از میدان مغناطیسی و تابش حرارتی صرف نظر شده است. از آنجایی که جریال سیال از قانون توانی تبعیت می‌کند، ویسکوزیته وابسته به نرخ برش بوده و عدد پرانتل متغییر است. به دلیل اینکه سیالات غیرنیوتنی استفاده شده در صنعت دارای عدد پرانتل بزرگی هستند، در کار حاضر عدد پرانتل 100 فرض شده است.

۳- معادلات حاکم و روش حل عددی

با فرض جریان غیرقابل تراکم، معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در روابط (۱) تا (۵) و تانسور تنش برشی و ویسکوزیته ظاهری برای سیال غیرنیوتنی با مدل توانی به صورت روابط (۶) و (۷) می‌باشد.



شکل ۱- هندسه مسأله مورد بررسی

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۱)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (۲)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) + F_y \quad (۳)$$

$$F_y = \beta g(T - T_c) - \frac{\mu_a Ha^2}{H^2} v \quad (۴)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (۵)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu_a D_{ij} = \mu_a \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (۶)$$

$$\mu_a = K \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، K ، ضریب ثابت و n شاخص توانی است. $n < 1$ بیانگر سیال رقیق شونده، $n = 1$ سیال نیوتنی و $n > 1$ نشان دهنده سیال غلیظ شونده است. پارامترهای بی بعدی که در حل مسأله حاضر مورد استفاده قرار گرفته اند مطابق رابطه (۸) است. در کار حاضر از روش اختلاف محدود شبکه بولتزمن (FDLBM) استفاده شده است. برای هر دو میدان جریان و دما، شبکه $D2Q9$ مورد استفاده قرار گرفته است و در شکل (۲) نمایی از این نوع شبکه نشان داده شده است. روابط (۹) تا (۱۶)، معادلات استفاده شده از روش حاضر برای میدان جریان را ارائه می دهد و برای میدان دما نیز مشابه همین روابط برقرار خواهد بود که جزئیات آن در مراجعی چون [۲۴] و [۲۵] ارائه شده است.

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{uH}{\left(\frac{\alpha}{L}\right)Ra^{0.5}}, V = \frac{vH}{\left(\frac{\alpha}{L}\right)Ra^{0.5}}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (۸)$$

$$Ha = BH \sqrt{\frac{\sigma}{\mu_a}}, Ra = \frac{\rho \beta g (T_h - T_c) H^3}{\mu_a \alpha}, Pr = \frac{\mu_a}{\rho \alpha}, \alpha = \frac{k}{\rho C_p}, P = \frac{p}{\rho \left(\frac{\alpha}{L}\right)^2 Ra}$$

$$f_i(x, t + \Delta t) = f_i^{eq}(X, t) \quad (9)$$

$$\sum_{i=0}^8 f_i^{eq} = \rho = \text{constant} \quad (10)$$

$$f_i(x, t + \Delta t) = f_i^{eq}(X, t) \quad (11)$$

$$\sum_{i=0}^8 f_i^{eq} c_{ix} = \rho u \quad (12)$$

$$\sum_{i=0}^8 f_i^{eq} c_{iy} = \rho v \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^8 f_i^{eq} c_{ix}^2 = \rho u^2 + p - \tau_{xx} \quad (14)$$

$$\sum_{i=0}^8 f_i^{eq} c_{iy}^2 = \rho v^2 + p - \tau_{yy} \quad (15)$$

$$\sum_{i=0}^8 f_i^{eq} c_{ix} c_{iy} = \rho uv + \tau_{xy} \quad (16)$$

در روابط ارائه شده، c بیانگر توزیع سرعت میکروسکوپی ذرات در راستاهای شبکه است و در رابطه (۱۷) ارائه شده است.

$$c_0 = 0$$

$$c_{1-4} = \left[\cos\left(\frac{(i-1)\pi}{2}\right), \sin\left(\frac{(i-1)\pi}{2}\right) \right] \quad (17)$$

$$c_{5-8} = \sqrt{2} \left[\cos\left(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right), \sin\left(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \right]$$

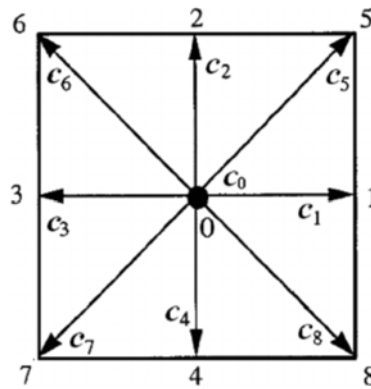
جهت مدل نمودن شرایط مرزی مورب و صاف از روش کمانه کردن استفاده می‌شود [۲۶]. این نام‌گذاری حاکی از آن است که یک ذره از سمت مرز جامد به سمت میدان جریان می‌رود. در شکل (۳) دیواره مورب محفظه بعد از مرحله انتشار نشان داده شده است. با مشخص بودن f_1 ، f_4 و f_8 و با توجه به ساکن بودن مرزهای جامد برای تابع توزیع جریان رابطه (۱۸) برقرار است.

$$f_3 = f_1, f_2 = f_4, f_6 = f_8 \quad (18)$$

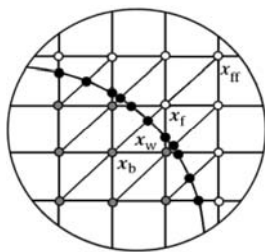
در مورد تابع توزیع دما، نحوه اعمال شرایط مرزی دما ثابت روی دیواره گرم عمودی به صورت رابطه (۱۹) است.

$$g_1 = (\omega_1 + \omega_3)T_h - g_3, g_5 = (\omega_5 + \omega_7)T_h - g_7, g_8 = (\omega_6 + \omega_8)T_h - g_6 \quad (19)$$

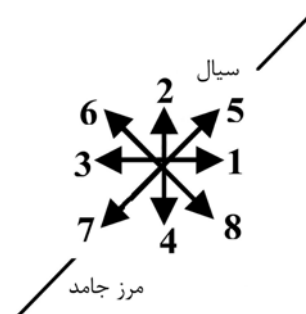
برای اعمال شرایط مرزی روی مرزهای منحنی، از روش‌های به کار رفته در مطالعات مراجعی چون [۲۷] و [۲۸] استفاده شده است که نمایی از آن در شکل (۴) نشان داده شده است. در روش مذکور از بین گره‌های موجود در ناحیه مرز جامد تنها گره‌هایی وارد حوزه محاسباتی می‌شوند که در مجاورت مرز منحنی قرار دارد. این گره‌ها با زیرنویس b مشخص شده‌اند. 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.



شکل ۲- بردارهای سرعت گسسته شده برای مدل D₂Q₉



شکل ۴- مرز دیواره منحنی و گره‌ها



شکل ۳- نحوه اعمال شرایط مرزی میدان دما

در این روش پس از گام برخورد، به وسیله تقریب برون‌یابی توابع توزیع چگالی و انرژی مربوط به تقاطع مجاور مرز درون حوزه حل، با کمک شرایط دمایی و سرعت مرز منحنی محاسبه 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 $\Delta = \frac{|x_f - x_w|}{|x_f - x_b|}$ تعریف شده است که برای محاسبه توابع توزیع چگالی و انرژی استفاده می‌شود. همچنین عدد ناسلت متوسط، روی دیواره گرم محفظه، به صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود.

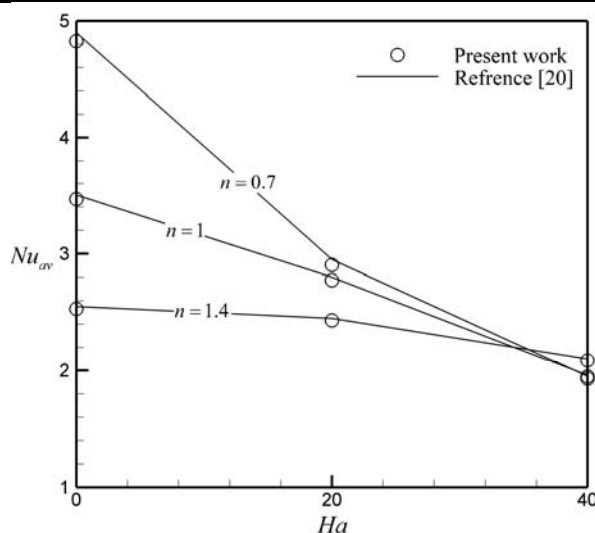
$$Nu_{av} = \frac{1}{H} \int_0^1 - \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=0} dY \quad (20)$$

۴- استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی

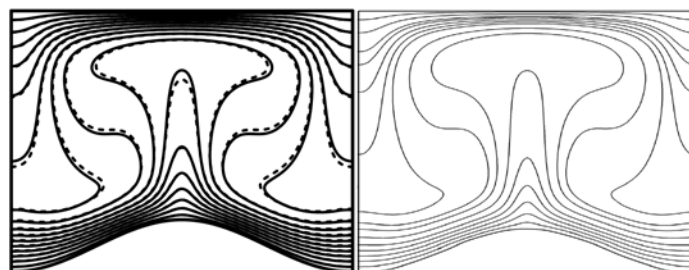
برای بدست آوردن استقلال جواب‌ها از تعداد نقاط شبکه، شبیه‌سازی بر روی هندسه‌های مورد بررسی با در نظر گرفتن تمامی پارامترها در شبکه با ابعاد مختلف صورت گرفت و در مورد عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم سمت چپ محفظه با خطای کمتر از ۱/۲۳ درصد، شبکه ۱۵۰×۹۰ برای شبیه‌سازی مسأله حاضر انتخاب شد که در جدول (۱) نشان داده شده است. به منظور صحت‌سنجی کد نوشته شده، کار حاضر با مرجع [۲۰] در شکل (۵) مقایسه شده است. همچنین برای راستی‌آزمایی کد نوشته شده در مواجهه با مرز منحنی، کار حاضر با مرجع [۲۹] مقایسه شده است و در شکل (۶) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نتایج کار حاضر، تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد و می‌توان از درستی کد نوشته شده اطمینان حاصل کرد.

جدول ۱- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای شبکه با ابعاد مختلف برای $Ha=50$ ، $AR=1$ و $n=0.7$

عدد ناسلت متوسط				
ابعاد شبکه	۱۳۰×۷۸	۱۴۰×۸۴	۱۵۰×۹۰	۱۶۰×۹۶
دیواره مورب	۴/۴۲۷	۴/۶۱۲	۴/۷۰۸	۴/۷۶۶
دیواره منحنی	۴/۳۶۵	۴/۵۵۷	۴/۶۵۱	۴/۷۰۵
دیواره صاف	۴/۲۳۸	۴/۴۳۸	۴/۵۵۱	۴/۶۰۴



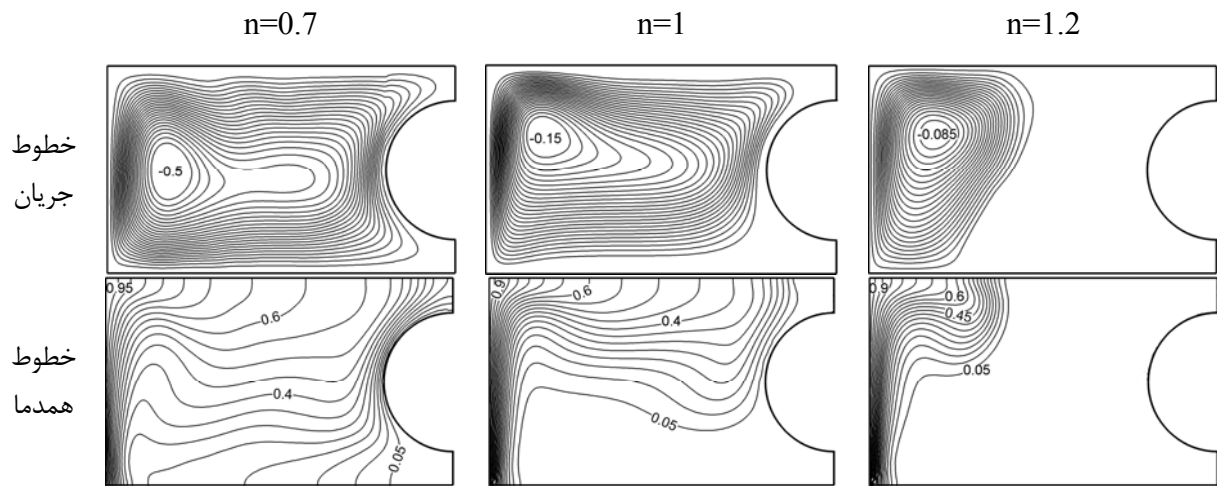
شکل ۵- مقایسه عدد ناسلت متوسط بین کار حاضر و مرجع [۲۰]

شکل ۶- مقایسه خطوط همدمما برای عدد رایلی 10^5 و در غیاب میدان مغناطیسی بین کار حاضر (سمت راست) و مرجع [۲۹] (سمت چپ)

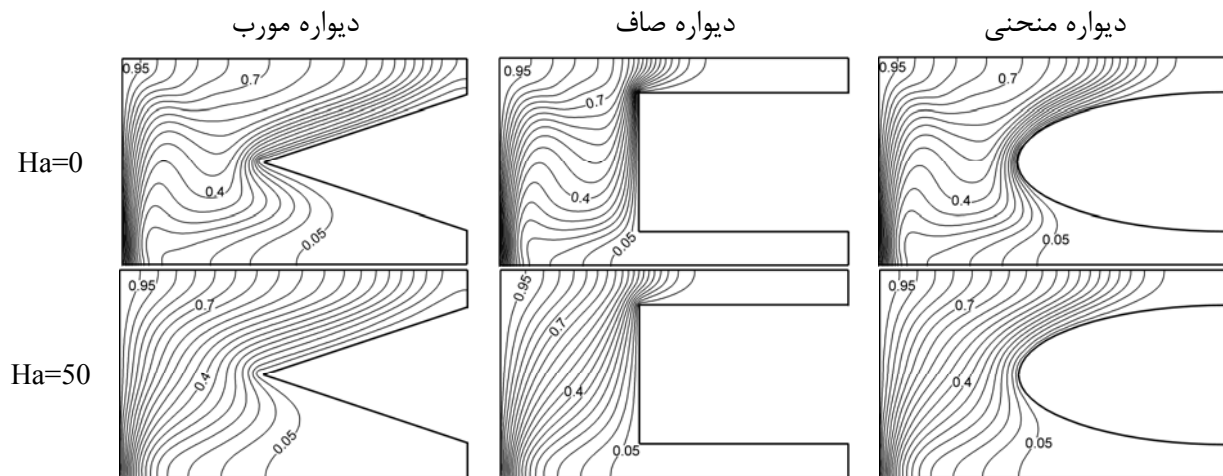
۵- نتایج و بحث

شکل (۷) خطوط جریان و همدمما را برای دیواره منحنی به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی و در غیاب میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش شاخص توانی به دلیل افزایش ویسکوزیته ظاهری، قدرت حرکت سیال داخل محفظه کم می‌شود و سیال نمی‌تواند به خوبی در همهی فضا به گردش درآید به نحوی که با افزایش شاخص از 0.7 به 1.2 ، بیشینه مقدار تابع جریان حدود 85% کاهش می‌یابد. بعلاوه دیده می‌شود، زمانی که n زیاد می‌شود، پراکندگی خطوط همدمما به شدت کاهش می‌یابد و خطوط به موازات دیواره گرم قرار می‌گیرند که نشان می‌دهد هدایت سهم بیشتری از جابجایی در مکانیزم انتقال حرارت دارد. خطوط همدمما به ازای سه نوع شکل دیواره برای عدد هارتمن صفر و 50 در

شکل (۸) ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود، اعمال میدان مغناطیسی به سبب ایجاد نیروی بازدارنده در برابر حرکت جریان سیال، سبب کاهش قدرت جابجایی می‌شود. تأثیر این نیرو روی خطوط همدمای اینگونه است که از انحنای خطوط می‌کاهد و سبب می‌شود خطوط همدمای بیشتر به موازات دیواره‌ها قرار بگیرند. همچنین ملاحظه می‌گردد زمانی که دیواره سمت راست به ترتیب به صورت مورب، منحنی و صاف است، پراکندگی خطوط همدمای بیشتر است و این نشان از قدرت بیشتر جابجایی طبیعی در حالتی است که دیواره مورب باشد. شکل (۹-الف) سرعت عمودی به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی و (۹-ب) سرعت عمودی به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که افزایش شاخص توانی سبب کم شدن ماکزیمم سرعت می‌شود که نتیجه آن کم شدن قدرت جابجایی به سبب افزایش ویسکوزیته ظاهری می‌شود. بعلاوه دیده می‌شود که ماکزیمم سرعت در نزدیک دیواره رخ می‌دهد که نتیجه آن افزایش مقدار انتقال حرارت است. افزایش قدرت میدان مغناطیسی نیز سبب کاهش سرعت و اثرات جابجایی می‌شود که موجب کم شدن میزان انتقال حرارت می‌گردد.

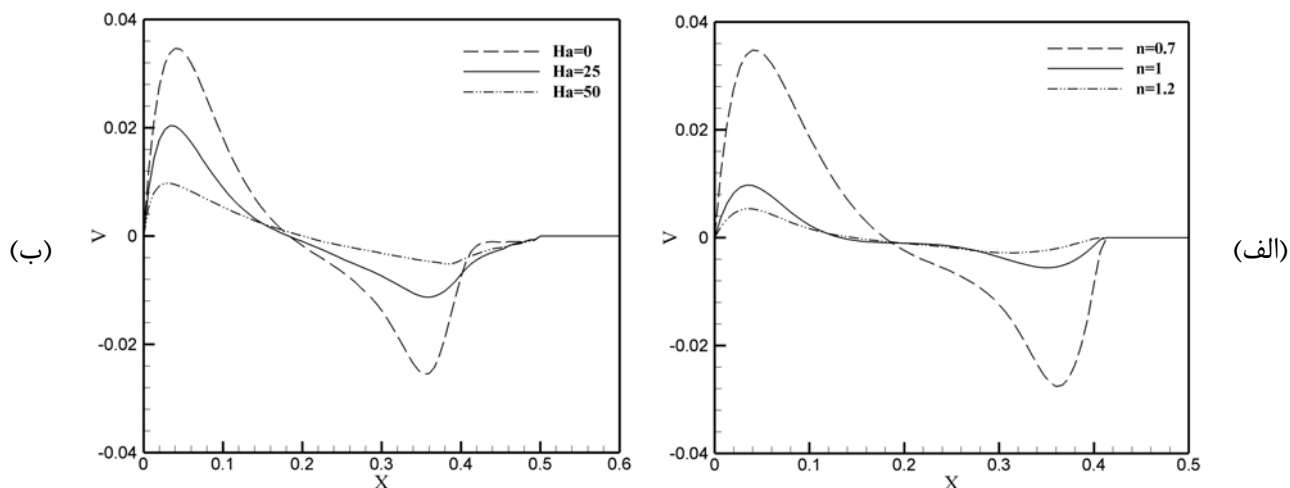


شکل ۷- خطوط جریان و همدمای به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی در غیاب میدان مغناطیسی و $AR=0.5$ برای دیواره منحنی

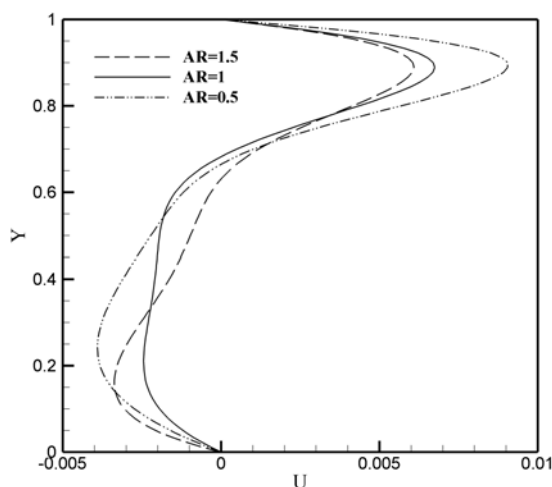


شکل ۸- خطوط همدمای برای سه نوع دیواره برای عدد هارتمن صفر و ۵۰، $AR=1.5$ و $n=0.7$

زیرا افزایش شاخص توانی سبب کم شدن اثرات جابجایی طبیعی می‌شود که همین عامل سبب کم شدن اثر میدان مغناطیسی می‌شود. همچنین باتوجه به شکل، زمانی که نسبت ابعاد کمتر باشد، به دلیل بیشتر بودن اثرات جابجایی، اثر میدان مغناطیسی بیشتر است. تأثیر افزایش نسبت ابعاد محفظه بر روی پروفیل سرعت در شکل (۱۰) نشان داده شده است. دیده می‌شود که افزایش نسبت ابعاد محفظه به سبب کاهش فضای حرکتی سیال سبب کاهش سرعت می‌شود که این تأثیر زمانی که بیشترین نسبت ابعاد را داشته باشیم، بیشتر است. در جدول (۲) عدد ناسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی و نسبت ابعاد محفظه برای هر سه نوع دیواره در غیاب میدان مغناطیسی ارائه شده است. دیده می‌شود که در تمامی حالات، با افزایش شاخص توانی، به دلیل افزایش ویسکوزیته ظاهری، اثرات جابجایی کم شده و از میزان انتقال حرارت کاسته می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود، به غیر از نسبت ابعاد $1/5$ که بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط برای دیواره صاف می‌دهد، در بقیه موارد بیشترین میزان انتقال حرارت به ترتیب برای دیواره مورب، منحنی و صاف اتفاق می‌افتد.



شکل ۹- سرعت عمودی در $Y=0.3$ (الف) دیواره منحنی، $Ha=0$ و $AR=1.5$ و (ب) دیواره مورب، $n=0.7$ و $AR=1.5$

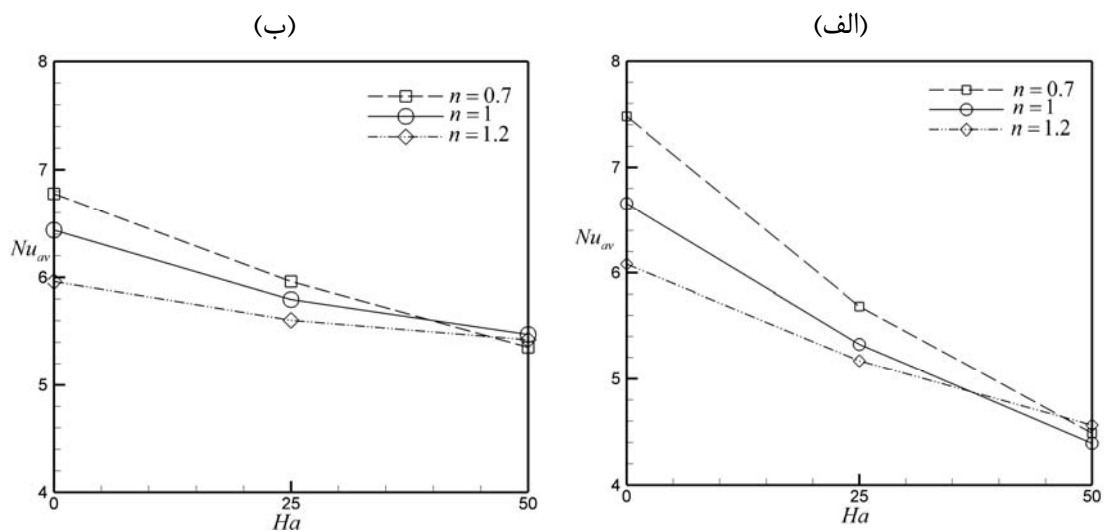


شکل ۱۰- سرعت افقی به ازای مقادیر مختلف نسبت ابعاد محفظه در $Ha=0$ ، $n=1$ و دیواره مورب

شکل (۱۱) عدد ناسلت متوسط را به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و شاخص توانی برای دیواره مورب در دو نسبت ابعاد ۰/۵ و ۱/۵ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که افزایش عدد هارتمن به دلیل کاستن سرعت سیال، سبب کاهش عدد ناسلت متوسط در تمامی حالات می‌شود. همانطور که دیده می‌شود، شیب کاهش عدد ناسلت با افزایش عدد هارتمن، با افزایش شاخص توانی کاهش می‌یابد.

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در غیاب میدان مغناطیسی

	n=0.7	n=1	n=1.2
دیواره مورب			
AR=0.5	۷/۴۷۷	۶/۶۵۴	۶/۰۸۱
AR=1	۷/۲۴۴	۶/۵۹۲	۶/۰۱۲
AR=1.5	۶/۷۷۶	۶/۴۳۷	۵/۹۶۱
دیواره منحنی			
AR=0.5	۷/۳۲۱	۶/۵۱۵	۶/۰۰۳
AR=1	۷/۱۱۷	۶/۵۱۲	۵/۹۰۷
AR=1.5	۶/۶۶۵	۶/۲۹۸	۵/۹۰۵
دیواره صاف			
AR=0.5	۷/۲۲۵	۶/۳۵۹	۵/۸۵۲
AR=1	۷/۱۱۲	۶/۴۷۲	۵/۹۰۲
AR=1.5	۶/۹۱۲	۶/۵۱۲	۶/۰۱۲



شکل ۱۱- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و شاخص توانی برای

دیواره مورب (الف) AR=0.5 و (ب) AR=1.5

۶- نتیجه گیری

انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال غیرنیوتنی با مدل توانی درون محفظه‌ای دو بعدی با سه شکل مختلف دیواره در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت با استفاده از روش اختلاف محدود شبکه بولتزمن در مطالعه حاضر مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. کار حاضر با مطالعات معتبر قبلی اعتبارسنجی شد و از صحت اطلاعات به دست آمده اطمینان حاصل شد. برای مدلسازی هر دو میدان جریان و دما از آرایش شبکه D_2Q_9 استفاده شد. در این مطالعه عددی، تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله عدد هارتمن، شکل دیواره، شاخص توانی سیال و نسبت ابعاد محفظه بررسی شد. خلاصه نتایج به دست آمده را می‌توان در چند مورد زیر ارائه نمود:

- روش شبکه بولتزمن، روشی قدرتمند در شبیه‌سازی مسائل دینامیک سیالات محاسباتی با هندسه و شرایط مرزی گوناگون است.
- با ثابت بودن تمامی پارامترها، افزایش عدد هارتمن به دلیل کاستن از سرعت جریان به خصوص در نزدیک دیواره‌ها، میزان انتقال حرارت را کاهش می‌دهد.
- شاخص توانی پارامتر بسیار مهمی در تعیین میزان انتقال حرارت است به نحوی که افزایش آن، به سبب افزایش ویسکوزیته ظاهری از اثرات جابجایی کاسته و انتقال حرارت را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. همچنین افزایش شاخص توانی منجر به کم شدن اثر میدان مغناطیسی می‌شود.
- افزایش نسبت ابعاد محفظه به دلیل کم کردن فضای حرکتی سیال سبب کاهش اثرات جابجایی و قدرت جریان و به تبع آن کاهش انتقال حرارت می‌شود.
- عموماً دیواره مورب در تمامی حالات انتقال حرارت بیشتری را سبب می‌شود.

مراجع

- [1] Raizah, Z.A.S., Abdelraheem, M. Aly., and Ahmed, S. E., "Natural Convection Flow of a Power-law Non-Newtonian Nanofluid in Inclined Open Shallow Cavities Filled with Porous Media", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 140, pp. 376-393, (2018).
- [2] Zhang, R., Aghakhani, S., Pordanjani, A. H., Vahedi, S. M., Shahsavari, A., and Afrand, M., "Investigation of the Entropy Generation during Natural Convection of Newtonian and Non-Newtonian Fluids Inside the L-shaped Cavity Subjected to Magnetic Field: Application of Lattice Boltzmann Method", *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135, pp. 184, (2020).
- [3] Alwawi, F. A., Alkasasbeh, H. T., Rashad, A., and Idris, R., "MHD Natural Convection of Sodium Alginate Casson Nanofluid over a Solid Sphere", *Results in Physics*, Vol. 16, pp. 802-818, (2020).
- [4] Nemati, M., Jahangiri, R., and Khalilian, M., "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, pp. 51-62, (2020).

- [5] Vijaybabu, T., and Dhinakaran, S., "MHD Natural Convection Around a Permeable Triangular Cylinder Inside a Square Enclosure Filled with $Al_2O_3-H_2O$ Nanofluid: An LBM Study", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 153, pp. 500-516, (2019).
- [6] Alhashash, A., "Natural Convection of Nanoliquid from a Cylinder in Square Porous Enclosure using Buongiorno's Two-phase Model", *Scientific Reports*, Vol. 10, pp. 1-12, (2020).
- [7] Yazdani, K., Sahebamei, M., and Ahmadpour, A., "Natural Convection Heat Transfer and Entropy Generation in a Porous Trapezoidal Enclosure Saturated with Power-law Non-Newtonian Fluids", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 41, pp. 982-1001, (2020).
- [8] Nemati, M., Sefid, M., Rahmati A. R., "The Effect of Changing the Position of the Hot Wall and Increasing the Amplitude and Number of Oscillations of Wavy Wall on the Flow and Heat Transfer of Nanofluid Inside the Channel in the Presence of Magnetic Field", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 10, pp. 219-236, (2020).
- [9] Ghadikolaei, S., Gholinia, M., Hoseini, M., and Ganji, D., "Natural Convection MHD Flow Due to MoS_2-Ag Nanoparticles Suspended in $C_2H_6O_2H_2O$ Hybrid Base Fluid with Thermal Radiation", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 97, pp. 12-23, (2019).
- [10] Du, R., Gokulavani, P., Muthamilselvan, M., Al-Amri, F., and Abdalla, B., "Influence of the Lorentz Force on the Ventilation Cavity Having a Centrally Placed Heated Baffle Filled with the $Cu-Al_2O_3-H_2O$ Hybrid Nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 116, pp. 104676, (2020).
- [11] Rahmati, A. R., and Nemati, M., "Investigation of Magnetic Field Effect on Nanofluid Mixed Convection Inside Lid-driven K-shaped Enclosure using Lattice Boltzmann Method", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 8, pp. 111-126, (2018).
- [12] Ma, Y., Mohebbi, R., Rashidi, M., Yang, Z., and Sheremet, M. A., "Numerical Study of MHD Nanofluid Natural Convection in a Baffled U-shaped Enclosure", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 130, pp. 123-134, (2019).
- [13] Siavashi, M., Karimi, K., Xiong, Q., and Doranehgard, M. H., "Numerical Analysis of Mixed Convection of Two-phase Non-Newtonian Nanofluid Flow Inside a Partially Porous Square Enclosure with a Rotating Cylinder", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 137, pp. 267-287, (2019).
- [14] Bozorg, M. V., and Siavashi, M., "Two-phase Mixed Convection Heat Transfer and Entropy Generation Analysis of a Non-Newtonian Nanofluid Inside a Cavity with Internal Rotating Heater and Cooler", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 151, pp. 842-857, (2019).
- [15] Naganthran, K., Nazar, R., and Pop, I., "A Study on Non-Newtonian Transport Phenomena in a Mixed Convection Stagnation Point Flow with Numerical Simulation and Stability Analysis", *The European Physical Journal Plus*, Vol. 134, pp. 1-14, (2019).

- [16] Mohebbi, R., Delouei, A. A., Jamali, A., Izadi, M., and Mohamad, A. A., "Pore-scale Simulation of Non-Newtonian Power-law Fluid Flow and Forced Convection in Partially Porous Media: Thermal Lattice Boltzmann Method", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 525, pp. 642-656, (2019).
- [17] Moradicheghamahi, J., Sadeghiseraji, J., and Jahangiri, M., "Numerical Solution of the Pulsatile, Non-Newtonian and Turbulent Blood Flow in a Patient Specific Elastic Carotid Artery", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 150, pp. 393-403, (2019).
- [18] Foong, L. K., Shirani, N., Toghraie, D., Zarringhalam, M., and Afrand, M., "Numerical Simulation of Blood Flow Inside an Artery under Applying Constant Heat Flux using Newtonian and Non-Newtonian Approaches for Biomedical Engineering", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 190, pp. 105375, (2020).
- [19] Raisi, A., "The Influence of a Pair Constant Temperature Baffles on Power-law Fluids Natural Convection in a Square Enclosure", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 215-224, (2015).
- [20] Aghakhani, S., Pordanjani, A. H., Karimipour, A., Abdollahi, A., and Afrand, M., "Numerical Investigation of Heat Transfer in a Power-law non-Newtonian Fluid in a C-Shaped Cavity with Magnetic Field Effect using Finite Difference Lattice Boltzmann Method", *Computers & Fluids*, Vol. 176, pp. 51-67, (2018).
- [21] Kefayati, G. R., and Tang, H., "MHD Thermosolutal Natural Convection and Entropy Generation of Carreau Fluid in a Heated Enclosure with Two Inner Circular Cold Cylinders, using LBM", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 508-530, (2018).
- [22] Toghaniyan, A., Zarringhalam, M., Akbari, O. A., Shabani, G. A. S., and Toghraie, D., "Application of Lattice Boltzmann Method and Spinodal Decomposition Phenomenon for Simulating Two-phase Thermal Flows", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 509, pp. 673-689, (2018).
- [23] Rahimi, A., Sepehr, M., Lariche, M. J., Mesbah, M., Kasaeipoor, A., and Malekshah, E. H., "Analysis of Natural Convection in Nanofluid-filled H-shaped Cavity by Entropy Generation and Heatline Visualization using Lattice Boltzmann Method", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 97, pp. 347-362, (2018).
- [24] Kefayati, G. R., "FDLBM Simulation of Mixed Convection in a Lid-driven Cavity Filled with Non-Newtonian Nanofluid in the Presence of Magnetic Field", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 95, pp. 29-46, (2015).
- [25] Kefayati, G. R., "FDLBM Simulation of Entropy Generation in Double Diffusive Natural Convection of Power-law Fluids in an Enclosure with Soret and Dufour Effects", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 89, pp. 267-290, (2015).
- [26] Yin, X., and Zhang, J., "An Improved Bounce-back Scheme for Complex Boundary Conditions in Lattice Boltzmann Method", *Journal of Computational Physics*, Vol. 231, pp. 4295-4303, (2012).

- [27] Nemati, M., Mohamadzade, H., Sefid, M., "Investigation the Effect of Direction of Wall Movement on Mixed Convection in Porous Enclosure with Heat Absorption/Generation and Magnetic Field", Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 99-115, (2020).
- [28] Wang, Z., Wei, Y., and Qian, Y., "A Bounce Back-immersed Boundary-lattice Boltzmann Model for Curved Boundary", Applied Mathematical Modelling, Vol. 81, pp. 428-440, (2020).
- [29] Shahriari, A., and Ashorynejad, H. R., "Numerical Study of Heat Transfer and Entropy Generation of Rayleigh-Benard Convection Nanofluid in Wavy Cavity with Magnetic Field", Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, pp. 385-396, (2017).

فهرست نمادهای انگلیسی

AR: نسبت ابعاد

B: قدرت میدان مغناطیسی

C: سرعت گسسته شبکه

f: تابع توزیع جریان

g: تابع توزیع دما

H: عرض محفظه

Ha: عدد هارتمن

L: طول محفظه

n: شاخص توانی سیال غیرنیوتنی

Nu: عدد ناسلت

Ra: عدد رایلی

T: دما

$\mathbf{u}(u, v)$: سرعت

$\mathbf{x}(x, y)$: مختصات شبکه

نمادهای یونانی

μ_a : لزجت ظاهری

θ : دمای بی بعد

ρ : چگالی

بالانویس

eq: تعادلی

زیرنویس ها

C: سرد

h: گرم

i: شماره لینک مدل شبکه

Abstract

In this paper, the effect of shape and aspect ratio of wall on natural convection heat transfer of non-Newtonian fluid with power law model within two-dimensional enclosure in the presence of a uniform magnetic field by lattice Boltzmann method (LBM) is investigated. The left wall is at a constant hot temperature, while the right wall is kept on cold constant temperature and other walls are considered adiabatic. In this simulation, the flow field and temperature are calculated by simultaneously solving the flow and temperature distribution functions. The effect of various parameters such as Hartmann number, aspect ratio, different shape of the wall and power index of non-Newtonian fluid is investigated.

The results show that increasing power index, aspect ratio and Hartmann number decrease the average Nusselt number. Also, the highest amount of heat transfer is generally associated with the case of a triangular wall. In addition, increasing the power index reduces the effect of the magnetic field.