

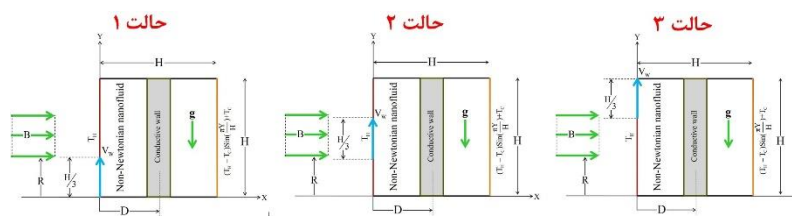
بررسی عددی از طریق روش شبکه بولتزمن برای تحلیل مقدار آنتروپی تولیدشده ناشی از انتقال حرارت جابجایی مزدوج نانو سیال غیر نیوتنی تحت اثر میدان مغناطیسی

محمد نعمتی^۱، محمد سفید^۲

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

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- بررسی اثر تغییر موقعیت اعمال میدان مغناطیسی و سرعت حرکت دیوار
- افزایش عدد ناسلت متوسط با افزایش فاصله دیوار رسانا از دیواره متحرک
- بیشتر بودن اثر میدان مغناطیسی به ازای کاهش شاخص توانی سیال و افزایش عدد ریچاردسون

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

*نویسنده مسئول:

mohammadnemati@stu.yazd.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

انتقال حرارت مزدوج

تغییر موقعیت مکانی اعمال میدان مغناطیسی

نانوسیال غیر نیوتنی

تولید آنتروپی

تغییر موقعیت مکانی اعمال سرعت

چکیده

هدف از این تحلیل عددی با استفاده از روش شبکه بولتزمن (LBM)، بررسی این مطلب است که با چه راهکارهای در دسترس می‌توان مقدار انتقال حرارت و آنتروپی تولیدشده را کنترل کرد. به این منظور، انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال غیر نیوتنی تحت اثر میدان مغناطیسی درون محفظه مربعی حاوی دیواره رسانا مورد تحلیل قرار گرفته است. اگرچه میدان مغناطیسی و سرعت حرکت دیواره عمودی محفظه ثابت در نظر گرفته شده‌اند، نتایج نشان داد که با تغییر موقعیت اعمال این پارامترها مشخصات جریان و ویژگی‌های انتقال حرارت به وجود آمده به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. چنانچه میدان مغناطیسی از نظر مکانی همانند با موقعیت اعمال سرعت اعمال شود، اثر افزایش عدد هارتمن در کاهش عدد ناسلت متوسط مشهودتر می‌شود. برای داشتن بیشترین مقدار عدد ناسلت، باید حرکت یک سوم بالایی دیواره مورد توجه باشد ولی بالین حال بیشترین تأثیرپذیری جریان سیال از میدان مغناطیسی به ازای حرکت یک سوم میانی دیواره مشاهده شد. با افزایش فاصله دیواره رسانا از دیواره متحرک، عدد ناسلت متوسط تا ۱/۵ برابر بیشتر می‌شود. با کاهش نسبت هدایت حرارتی از ۱۰ به ۰/۵ به‌طور میانگین عدد ناسلت تا حدود ۵۵ درصد کاهش می‌یابد. اگرچه قدرت جریان و عدد ناسلت رابطه معکوس با شاخص توانی دارد ولی با کسر حجمی نانو ذرات رابطه مستقیم دارد. مقدار آنتروپی تولیدشده، رابطه مستقیم/معکوس با عدد ریچاردسون/شاخص توانی سیال دارد.

۱- مقدمه

یکی از ابزارهای مفید برای کنترل جریان ایجادشده ناشی از حرکت سیالات، وجود اثر میدانهای خارجی مانند میدان مغناطیسی یا الکتریکی است. این میدانهای خارجی گاه ناخواسته بر کل جریان و یا بر بخشی از میدان جریان سیال تحمیل می‌شوند و گاهی نیز به اختیار برای رسیدن به هدفی خاص اعمال می‌شوند. در هر صورت وجود چنین میدانهایی سبب می‌شود مشخصات جریان و مقدار انتقال حرارت تا حد بسیار بالایی تغییر کند. کاربرد انتقال باوجود میدان مغناطیسی اخیراً به دلیل اهمیت آن در کاربردهای مهندسی مختلف مانند خنک‌کننده‌های رآکتورهای هسته‌ای، تصفیه فلزات مذاب و کاربرد در صنایع ریخته‌گری به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۱۴].

برای مدیریت و کنترل مقدار انتقال حرارت و تأثیر بر جریان جابجایی درون محفظه‌ها، استفاده از پارتیشن‌های رسانا یکی از راه‌کارهای سودمند است. در این نوع فرآیند که انتقال حرارت مزدوج نامیده می‌شود، حرارت درون دیواره رسانا پخش می‌شود و هم‌زمان دو نوع فرآیند انتقال حرارت هدایت و جابجایی وجود خواهد داشت. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده پارتیشن‌ها در مبدل‌های حرارتی، رآکتورهای هسته‌ای و ذخیره‌سازی برودتی اشاره داشت. اندازه، جنس و موقعیت قرارگیری پارتیشن‌ها هنگام طراحی تجهیزات انتقال حرارت در فرآیندهای انتقال حرارت مزدوج بسیار حائز اهمیت است [۱۵-۱۷].

تا چند سال پیش، در بسیاری از تحقیقات، محاسبه بازده سیستم‌های حرارتی تنها به بررسی قانون اول ترمودینامیک محدود می‌شد؛ اما در سال‌های اخیر، تحلیل مسائل با بهره‌مندی از قانون دوم ترمودینامیک قابل‌اعتمادتر شده است. تولید آنتروپی وابسته به برگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی است که در تمام فرآیندهای انتقال حرارت رایج است. از جمله مهم‌ترین پدیده‌هایی که منجر به تشکیل آنتروپی می‌شود، می‌توان از اصطکاک سیال، اختلاف دما و حضور میدان مغناطیسی نام برد. از آنجایی که تشکیل آنتروپی معیاری از هدر رفت کار در دسترس سیستم است، کاهش آنتروپی یکی از نتایج طراحی بهینه سیستم‌های انرژی است. تشکیل آنتروپی منجر به کاهش خروجی مفید

یکی از موارد مهم و مورد مطالعه توسط محققان از دیرباز تاکنون، بررسی جریان سیال و انتقال حرارت ناشی از آن درون محفظه‌های بسته بوده است. در این میان، انتقال حرارت درون محفظه‌هایی با مرزهای متحرک به دلیل کاربرد روزافزون آن در صنعت، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه و تأکید قابل توجه بوده است. ساخت کلکتورهای خورشیدی، کاربرد در مهندسی کوره، فناوری روانکاری و تجهیزات شیمیایی نمونه‌های عملی از این پدیده فیزیکی به شمار می‌رود. برهمکنش جریان برشی ناشی از حرکت دیواره و فرآیند جابجایی طبیعی درون محفظه‌ها یکی از جالب‌ترین موضوعاتی است که می‌تواند در طراحی و تحلیل بسیاری از سیستم‌های گرمایش یا سرمایش صنعتی مانند تهویه داخلی با رادیاتور، رآکتورهای هسته‌ای و مبدل‌های حرارتی مورد استفاده قرار گیرد [۳-۱]. از جمله پژوهش‌های مرتبط می‌توان به مطالعات ایشاک و همکاران [۴] (بررسی جابجایی ترکیبی و آنتروپی درون محفظه دوزنقه شکل حاوی نانوسیال)، ابراهیمی و همکاران [۵] (بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون محفظه‌ای به شکل قطاعی از دایره حاوی نانوسیال) و شاه و همکاران [۶] (بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال درون محفظه دوزنقه شکل حاوی مانعی بیضوی شکل) اشاره داشت.

در کاربردهای انتقال حرارت، نانو ذرات به سیال پایه اضافه می‌شوند تا عملکرد انتقال حرارت را کنترل کنند. رسانایی حرارتی سیالات معمولی مانند آب و اتیلن گلیکول کم است و نانو ذرات فلزی یا غیرفلزی که رسانایی حرارتی بالاتری دارند، پتانسیل افزایش رسانایی حرارتی سیال پایه را با تأثیر کمی بر افت فشار دارند. اندازه، نوع و شکل ذرات بر افزایش رسانایی حرارتی سیال پایه تأثیر دارد. امروزه نانوسیالات به دلیل عملکرد حرارتی بهتر در مقایسه با سیالات خالص، به‌طور گسترده در صنعت استفاده می‌شوند. با توجه به اندازه کوچک و سطح مؤثر بسیار بزرگ نانو ذرات، این خنک‌کننده‌های نسل جدید دارای خواص برتری مانند هدایت حرارتی بالا، حداقل گرفتگی مسیرهای جریان و پایداری طولانی مدت هستند [۷-۱۰].

خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانو ذرات در جدول ۲ ارائه شده است.

در کار حاضر سیال با مدل توانی به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شده است. از جمله نمونه این دسته بندی سیالات در زندگی روزمره می توان به لوازم آرایشی، سس کچاپ و صابون اشاره داشت. خون جاری در رگها نیز نمونه بیولوژیکی این دسته از سیالات غیرنیوتنی است. با توجه به اینکه ویسکوزیته سیال غیرنیوتنی برای هر گره در حوزه محاسباتی متفاوت است، این پارامتر با توجه به معادلات (۱) تا (۳) تعیین می شود. با تعریف پارامترهای بدون بعد در رابطه (۴)، معادلات کلی حرکت سیال (مومنتم و انرژی) به صورت روابط (۵) تا (۸) بیان می شود [۲۱ و ۲۲].

$$\text{Tensor of shear strain: } \tau_{ij} = \mu_{NF} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\text{kinematic viscosity: } \nu(\mathbf{x}, t) = \nu_0 |\gamma|^{(n-1)}, \quad (2)$$

$$|\gamma| = \sqrt{2 \times 0.5 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \times 0.5 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)}$$

Dynamic viscosity:

$$\mu = \mu_0 \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (3)$$

$$\text{Gr} = \frac{(\rho\beta)_{NF} g \theta H^3}{\nu_{H_2O}^2}, \quad \text{Re} = \frac{V_w H}{\nu_{H_2O}}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu_0 H^{2-n}}{\alpha^{2-n}} \quad (4)$$

$$K_{TCR} = \frac{k_{wall}}{k_{nanofluid}}, \quad \text{Ha} = \text{BH}^n \sqrt{\frac{\sigma_{NF} \alpha^{1-n}}{\mu_0}}, \quad X = \frac{x}{H}$$

$$Y = \frac{y}{H}, \quad U = \frac{u}{V_w}, \quad V = \frac{v}{V_w}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad \text{Ri} = \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial p}{\partial X} \quad (6)$$

$$+ \frac{1}{\text{Re}} \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{NF}} \frac{1}{(1-\phi)^2} \left[2 \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right) \right]$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial p}{\partial Y} \quad (7)$$

$$+ \frac{\rho_{H_2O}}{\text{Re} \cdot \rho_{NF} (1-\phi)^2} \left[2 \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right) \right]$$

$$- \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{NF}} \frac{\text{Ha}^2}{\text{Re}} \frac{\sigma_{NF}}{\sigma_{H_2O}} V + \text{Ri} \theta \frac{(\rho\beta)_{NF}}{\beta_{H_2O} \rho_{NF}} \quad (8)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{NF}}{(\text{PrRe})_{\alpha_{H_2O}}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right)$$

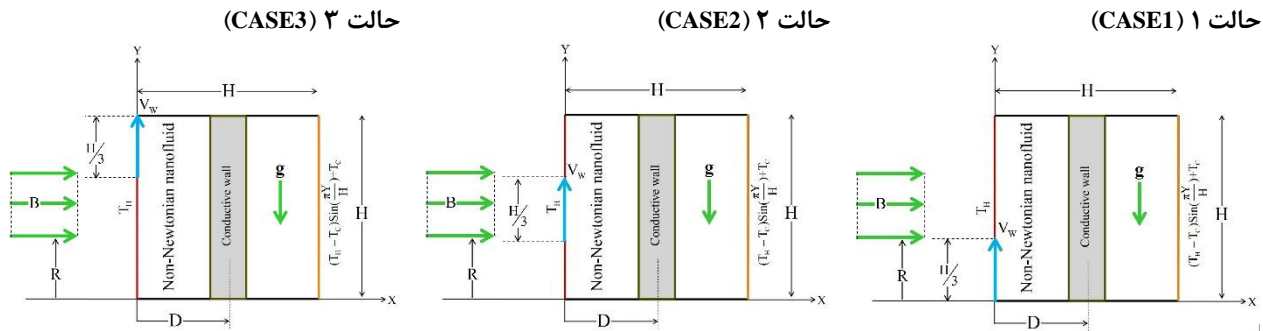
چرخه های توان یا افزایش توان ورودی سیکل های تبرید می شود. راندمان تجهیزات صنعتی به دلیل برگشت ناپذیری بسیار کاهش می یابد و بررسی آنتروپی معیار مناسبی را برای محققان فراهم می کند [۲۰-۱۸].

هدف از این شبیه سازی عددی، بررسی تأثیر تغییر موقعیت مکانی اعمال میدان مغناطیسی و سرعت حرکت دیواره محفظه است تا نشان داده شود با اعمال این تغییرات تا چه حد می توان بر مقدار انتقال حرارت و آنتروپی تولید شده اثر گذاشت. این بررسی که با استفاده از روش شبکه بولتزمن انجام شده است و تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است، اثر تغییر نسبت هدایت حرارتی دیوار جامد به نانوسیال غیرنیوتنی و موقعیت مکانی قرارگیری دیواره رسانا را بر مشخصات جریان ارزیابی می کند.

۲- شرح مسئله و معادلات حاکم

با در نظر گرفتن محفظه ای به شکل مربع مطابق با شکل ۱، فرآیند انتقال حرارت نانوسیال در کار حاضر مورد بررسی قرار می گیرد. سیال پایه رفتاری غیرنیوتنی از خود نشان می دهد به طوری که با مدل توانی تقریب زده شده است. نانو ذرات اکسید تیتانیوم به طور یکنواخت درون سیال پایه پخش شده است به طوری که محیطی همگن ایجاد شده است. دیواره های افقی، آدیاباتیک و دیواره های عمودی سمت چپ و سمت راست به ترتیب دما ثابت و دما سینوسی فرض شده اند. دیواره ای به عرض 0.2H با موقعیت متغیر و ضریب هدایت حرارتی مختلف نسبت به نانوسیال به منظور ایجاد فرآیند انتقال حرارت مزدوج درون محفظه تعبیه شده است. فرآیند جابجایی ترکیبی ناشی از اختلاف دمای دیواره ها و نیروی برشی ناشی از حرکت دیواره سمت چپ ایجاد می شود. میدان مغناطیسی به صورت یکنواخت از چپ به راست در سه موقعیت مختلف بر جریان نانوسیال اثر می گذارد. یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی، تغییر موقعیت اعمال سرعت حرکت دیواره است به گونه ای که طول اثر بخشی آن روی دیواره یکسان است ($H/3$).

با در نظر گرفتن حرکت براونی ذرات، روابط مربوط به تعیین خواص نانوسیال طبق جدول ۱ بیان می شود. همچنین



شکل (۱): طرحی شماتیک از مسئله مورد بررسی.

جدول (۱): روابط تعیین خصوصیات نانوسیال [۱۰].

شماره	رابطه	شماره	رابطه
(الف)	$\sigma_{NF} = \sigma_{H_2O} \left[1 + \frac{3\phi_{TiO_2} \left(\frac{\sigma_{TiO_2}}{\sigma_{H_2O}} - 1 \right)}{\left(\frac{\sigma_{TiO_2}}{\sigma_{H_2O}} + 1 \right) - \phi \left(\frac{\sigma_{TiO_2}}{\sigma_{H_2O}} - 1 \right)} \right]$	(ب)	$\mu_{NF} = \mu_{H_2O} (1 - \phi_{TiO_2})^{-2.5}$
(ج)	$(\rho C_p)_{NF} = (\rho C_p)_{TiO_2} \phi_{TiO_2} + (\rho C_p)_{H_2O} (1 - \phi_{TiO_2})$	(د)	$\alpha_{NF} = \frac{k_{NF}}{(\rho C_p)_{NF}}$
(ه)	$(\rho \beta)_{NF} = (\rho \beta)_{TiO_2} \phi_{TiO_2} + (\rho \beta)_{H_2O} (1 - \phi_{TiO_2})$	(و)	$\rho_{NF} = \rho_{TiO_2} \phi_{TiO_2} + \rho_{H_2O} (1 - \phi_{TiO_2})$
(ز)	$k_{NF} = k_{H_2O} \left[1 + \frac{k_{TiO_2}}{k_{H_2O}} \times \frac{d_{H_2O} \phi_{TiO_2}}{d_{TiO_2} (1 - \phi_{TiO_2})} + 72000 Pe \frac{k_{TiO_2}}{k_{H_2O}} \times \frac{d_{H_2O} \phi_{TiO_2}}{d_{TiO_2} (1 - \phi_{TiO_2})} \right]; Pe = \frac{2.76 \times 10^{-3} \theta}{\alpha_{H_2O} \pi \mu_{H_2O} d_{TiO_2}}$		

جدول (۲): خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانو ذرات [۷].

خاصیت	واحد	اکسید تیتانیوم (TiO ₂)	آب (H ₂ O)
ظرفیت حرارت ویژه C _p	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	۶۸۷	۹۹۷/۱
قطر ذرات d	nm	۵۰	۰/۳۸۵
ضریب هدایت حرارتی k	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	۸/۹۵	۰/۶۱۳
عدد پرانتل Pr	-	-	۶/۷۵
رسانایی الکتریکی σ	kg ⁻¹ .m ⁻³ .s ³ .A ²	۰/۸۵×۱۰ ^{۱۰}	۰/۰۵
ضریب انبساط حجمی β	K ⁻¹	۰/۹×۱۰ ^{-۱۰}	۲۱×۱۰ ^{-۵}
چگالی ρ	kg.m ⁻³	۴۲۵۰	۴۱۷۹

آمده بر طبق معادلات (۱۱) تا (۱۳) بیان می‌شوند [۱۰ و ۱۲۳]. S_{HT}^* ، S_{FF}^* و S_{MF}^* به ترتیب آنتروپی ناشی از انتقال حرارت، اصطکاک سیال و میدان مغناطیس است. معیاری که برای تعیین حرارت منتقل شده مورد استفاده قرار می‌گیرد، عدد ناسلت متوسط است که به صورت معادله (۱۴) بیان می‌شود. نسبت مقدار آنتروپی تولید شده ناشی از انتقال

با تعریف پارامتری به‌عنوان تابع جریان در رابطه (۹) که در تجزیه و تحلیل نتایج استفاده می‌شود، می‌توان حداکثر قدرت جریان تشکیل شده را تعیین کرد. معادله مربوط به تعامل دیوار جامد و نانوسیال طبق رابطه (۱۰) نوشته می‌شود. روابط مربوط به تعیین مقادیر برگشت‌ناپذیری‌های به وجود

$$\mathbf{c}_i = \begin{pmatrix} c_{ix} \\ c_{iy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$f_i^{eq} = \omega_i [1 + 3(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u}) - \frac{9}{2}(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \frac{3}{2}(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2] \quad (19)$$

$$\tau_i = 3\nu + 0.5 \quad (20)$$

$$\tilde{f}_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, t + 1) = f_i(\mathbf{x}, t) + \frac{[f_i^{eq}(\mathbf{x}, t) - f_i(\mathbf{x}, t)]}{\tau_v} \quad (21)$$

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, t + 1) = \tilde{f}_i(\mathbf{x}, t + 1) \quad (22)$$

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, t + 1) = f_i(\mathbf{x}, t) + \frac{[f_i^{eq}(\mathbf{x}, t) - f_i(\mathbf{x}, t)]}{\tau_1} \quad (23)$$

$$+ 3c_i [-\nu \omega_i \rho_{H_2O} Ha^2 (\frac{\mu_{NF}}{H^2}) + \omega_i g(\rho\beta)_{NF} \theta]$$

$$h_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, t + 1) = h_i(\mathbf{x}, t) + \frac{[h_i^{eq}(\mathbf{x}, t) - h_i(\mathbf{x}, t)]}{\tau_2} \quad (24)$$

$$h_i^{eq} = \omega_i T [1 + 3(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})] \quad (25)$$

$$\tau_2 = 3\alpha + 0.5 \quad (26)$$

$$\omega_0 = \frac{4}{9}, \omega_{1-4} = \frac{1}{9}, \omega_{5-8} = \frac{1}{36} \quad (27)$$

$$\text{Denisty: } \rho = \sum_{i=0}^8 f_i, \text{ Velocities: } \mathbf{u} = \frac{\sum_{i=0}^8 \mathbf{c}_i f_i}{\rho}, \quad (28)$$

$$\text{Temperature: } T = \sum_{i=0}^8 h_i$$

از مدل کمانه کردن برای اعمال شرایط مرزی در روش شبکه بولتزمن استفاده شده است که جزئیات بیشتر در مراجع مختلف ذکر شده است [۲۴-۲۶]. شرایط مرزی در کار حاضر به صورت کمیات ماکروسکوپیک در رابطه (۲۹) ارائه شده است: (۱) فرضیاتی که در این تحلیل عددی در نظر گرفته شده است عبارت‌اند از: نانوسیال غیرنیوتنی، غیرقابل تراکم و تک‌فاز است؛ (۲) جریان نانوسیال پایا، دویعدی و آرام است؛ (۳) اتلاف ویسکوز و اثرات تابش حرارتی ناچیز است؛ (۴) خواص فیزیکی نانوسیال ثابت است به جز چگالی که با دما تغییر می‌کند و از تقریب بوزینسک پیروی می‌کند.

۳- بررسی استقلال شبکه و اعتبارسنجی

در کار حاضر با استفاده از روش شبکه بولتزمن و نوشتن کد رایانه‌ای به زبان فرترن، ارائه و تحلیل نتایج صورت گرفته است. برای تأیید این مطلب که اندازه شبکه انتخابی تأثیری بر نتایج حاصله ندارد، عدد ناسلت متوسط به ازای

حرارت به آنتروپی کل تحت عنوان عدد بجان شناخته می‌شود که طبق رابطه (۱۵) است. عدد بجان بزرگ‌تر از ۰/۵ نشان می‌دهد که انتقال حرارت بیشترین سهم را در ایجاد آنتروپی دارد [۴ و ۱۱]. اتمام محاسبات بر مبنای رابطه (۱۶) است. در روابط ارائه شده، n شاخص توانی سیال است. چون در کار حاضر سیال نازک‌شونده در نظر گرفته شده است، محاسبات به ازای $n < 1$ انجام شده است.

$$\mathbf{U} = \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{Y}} \text{ and } \mathbf{V} = -\frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{X}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(k_{wall} \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{X}})}{\partial \mathbf{X}} + \frac{\partial(k_{wall} \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{Y}})}{\partial \mathbf{Y}} = 0 \quad (10)$$

$$\mathbf{S}^* = \mathbf{S}_{FF}^* + \mathbf{S}_{HT}^* + \mathbf{S}_{MF}^* \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{FF}^* = \chi \frac{\sigma_{NF}}{\sigma_{H_2O}} [2((\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{X}})^2 + (\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Y}})^2) + (\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{Y}} + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{X}})^2] \\ \mathbf{S}_{HT}^* = \frac{k_{NF}}{k_{H_2O}} [(\frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{X}})^2 + (\frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{Y}})^2] \\ \mathbf{S}_{MF}^* = \chi \frac{\sigma_{NF}}{\sigma_{H_2O}} Ha^2 V^2 \end{cases}$$

$$\chi = \frac{\mu_{H_2O} \frac{T_H + T_C}{2}}{k_{H_2O}} (\frac{V}{T_H - T_C})^2 \quad (12)$$

$$S = \int_0^1 \int_0^1 S^* d\mathbf{X} d\mathbf{Y} = \int_0^1 \int_0^1 [\mathbf{S}_{FF}^* + \mathbf{S}_{HT}^* + \mathbf{S}_{MF}^*] d\mathbf{X} d\mathbf{Y} \quad (13)$$

$$Nu = -\frac{1}{H} \int_0^1 \frac{k_{NF}}{k_{H_2O}} (\frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{X}})_{\mathbf{X}=0} d\mathbf{Y} \quad (14)$$

$$Be = \int_0^1 \int_0^1 \frac{\mathbf{S}_{HT}^*}{[\mathbf{S}_{FF}^* + \mathbf{S}_{HT}^* + \mathbf{S}_{MF}^*]} d\mathbf{X} d\mathbf{Y} \quad (15)$$

$$Nu^{b+1} - Nu^b \leq 10^{-5} \quad (16)$$

شبیه‌سازی حاضر با استفاده از روش شبکه بولتزمن انجام شده است. در این تحلیل عددی از دو تابع توزیع جداگانه برای مدل کردن میدان‌های جریان و دما استفاده شده و برای هر دو میدان آرایش شبکه D_2Q_9 در نظر گرفته شده است. جزئیات بیشتر راجع به این روش حل عددی و نوع آرایش شبکه در مراجع مختلف ذکر شده است [۲۴-۲۶]. معادلات مرتبط با این حل عددی در روابط (۱۷) تا (۲۸) ارائه شده است.

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, t + 1) = f_i(\mathbf{x}, t) + \frac{[f_i^{eq}(\mathbf{x}, t) - f_i(\mathbf{x}, t)]}{\tau_i} \quad (17)$$

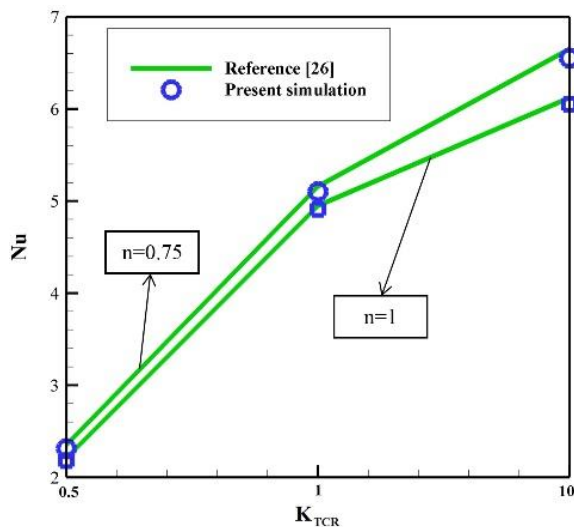
مقادیر مختلف شبکه در جدول ۳ ارائه شده است. برای CASE2, $Ri=0.25$, $K_{TCR}=10$, $\phi=0.05$, $D=0.5$, R_2

$$X=0 \rightarrow \theta=1, U=0, \begin{cases} \text{CASE1: } 0 \leq Y \leq H/3 \rightarrow V=V_w, H/3 < Y \leq H \rightarrow V=0 \\ \text{CASE2: } 0 \leq Y < H/3 \text{ and } 2H/3 < Y \leq H \rightarrow V=0, H/3 \leq Y \leq 2H/3 \rightarrow V=V_w \\ \text{CASE3: } 0 < Y < 2H/3 \rightarrow V=0, 2H/3 \leq Y \leq H \rightarrow V=V_w \end{cases} \quad (29)$$

$$X=H \rightarrow \theta=1, U=0=V \quad Y=0 \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial Y}=0, U=0=V \quad Y=H \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial Y}=0, U=0=V$$

$$\text{Boundary condition between solid and fluid walls: } K_{TCR} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{\text{fluid}} = \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{\text{wall}}$$

شبیه‌سازی شد و با مرجع [۲۵] مقایسه شده است. اختلاف ناچیز و قابل اغماض، درستی اعتبار و صحت کد نوشته شده را تأیید می‌کند.



شکل (۲): مقایسه شبیه‌سازی حاضر با مرجع [۲۶].

۴- ارائه و تحلیل نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در قالب جداول، نمودارها و کانتورهای جریان، دما و آنتروپی ارائه می‌شود. محاسبات به ازای عدد گراش $1/5 \times 10^4$ صورت گرفته است. لازم به ذکر است که در ارائه نتایج، R بیانگر موقعیت مکانی اعمال میدان مغناطیسی است که به ترتیب $R_1=0$ ، $R_2 = H/3$ ، $R_3 = 2H/3$ می‌باشد.

با توجه به شکل ۴، از آنجایی که یک سوم پایینی دیواره سمت چپ به سمت بالا حرکت می‌کند، در مجاورت دیواره داغ گردابه‌ای ساعت‌گرد در قسمت پایینی محفظه شکل

جدول (۳): عدد ناسلت متوسط به ازای ابعاد مختلف شبکه.

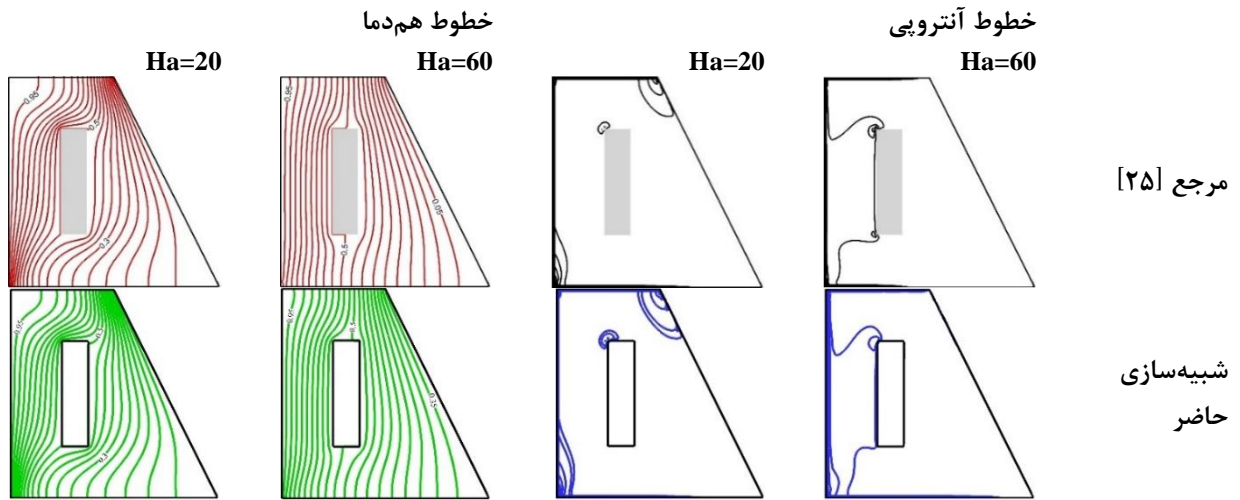
ابعاد	۶۰×۶۰	۹۰×۹۰	۱۲۰×۱۲۰	۱۵۰×۱۵۰	
Ha=0					
	۹/۴۷	۹/۷۷	۹/۹۸	۱۰/۰۹	n=0.45
اختلاف	-	۳/۲۵	۲/۰۵	۱/۱۵	
	۵/۴۱	۵/۵۵	۵/۶۲	۵/۶۷	n=0.95
اختلاف	-	۲/۷۵	۱/۳۵	۱/۰۵	
Ha=90					
	۴/۵۱	۴/۶۳	۴/۷۱	۴/۷۵	n=0.45
اختلاف	-	۲/۸۵	۱/۷۵	۰/۸۵	
	۳/۱۱	۳/۱۵	۳/۱۸	۳/۱۹	n=0.95
اختلاف	-	۱/۳۸	۰/۹۵	۰/۵۸	

همان‌گونه که مشخص است، با انتخاب شبکه 120×120 می‌توان از مستقل بودن نتایج نسبت به شبکه انتخابی اطمینان حاصل کرد؛ زیرا میانگین اختلاف نتایج حاصله ناشی از انتخاب شبکه 120×120 با شبکه 150×150 کم‌تر از ۱/۵ درصد است. معیار تعیین درصد اختلاف به صورت زیر تعریف می‌شود:

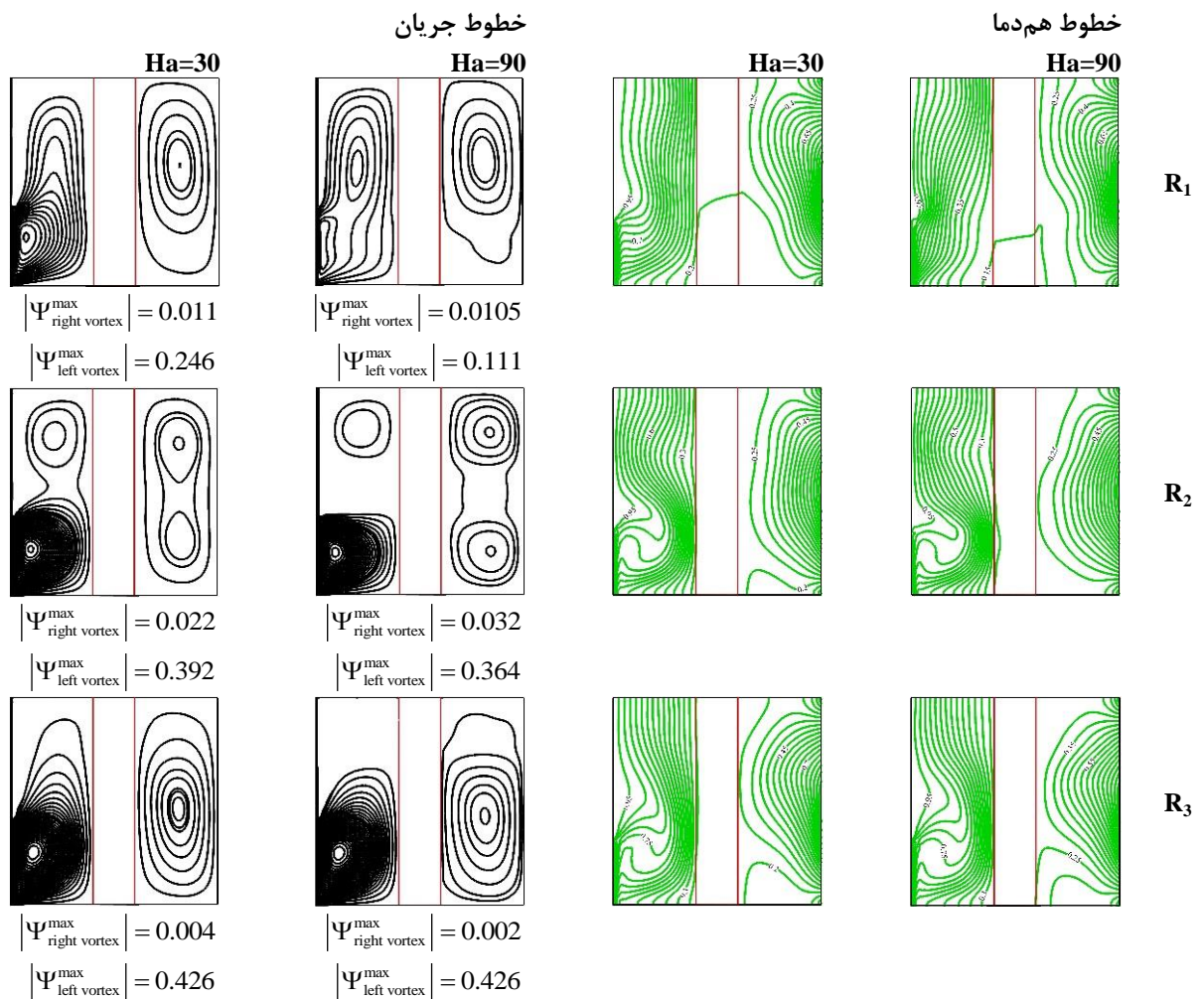
$$\text{Difference} = \left| \frac{\text{Nu}^{\text{New}} - \text{Nu}^{\text{Old}}}{\text{Nu}^{\text{Old}}} \right| (\%)$$

برای تأیید صحت کد نوشته شده، شبیه‌سازی موجود با مرجع [۲۶] به صورت مقادری در شکل ۲ مقایسه شده است. این اعتبارسنجی به ازای جابجایی طبیعی سیال غیرنیوتنی با مدل توانی در معرض میدان مغناطیسی نانوسیال برای انتقال حرارت مزدوج انجام شد. در اعتبارسنجی دیگر به صورت کیفی مطابق با شکل ۳، انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون محفظه دوزنقه شکل حاوی مانع نیمه گرم

می‌گیرد در حالی در سمت راست، گردابه‌های پادساعت‌گرد با قدرتی به مراتب کمتر شکل می‌گیرد.



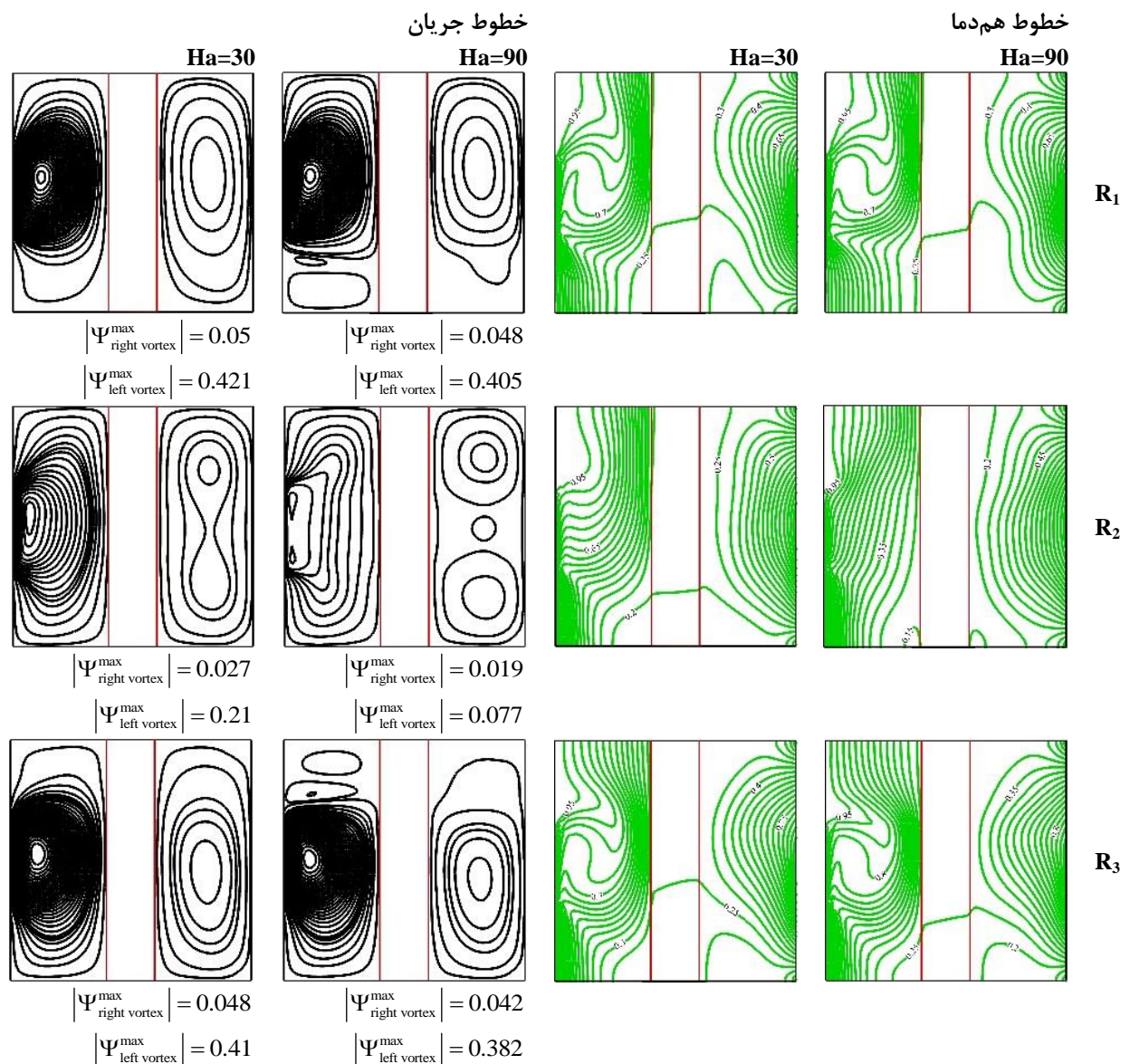
شکل (۳): مقایسه شبیه‌سازی حاضر با مرجع [۲۵]



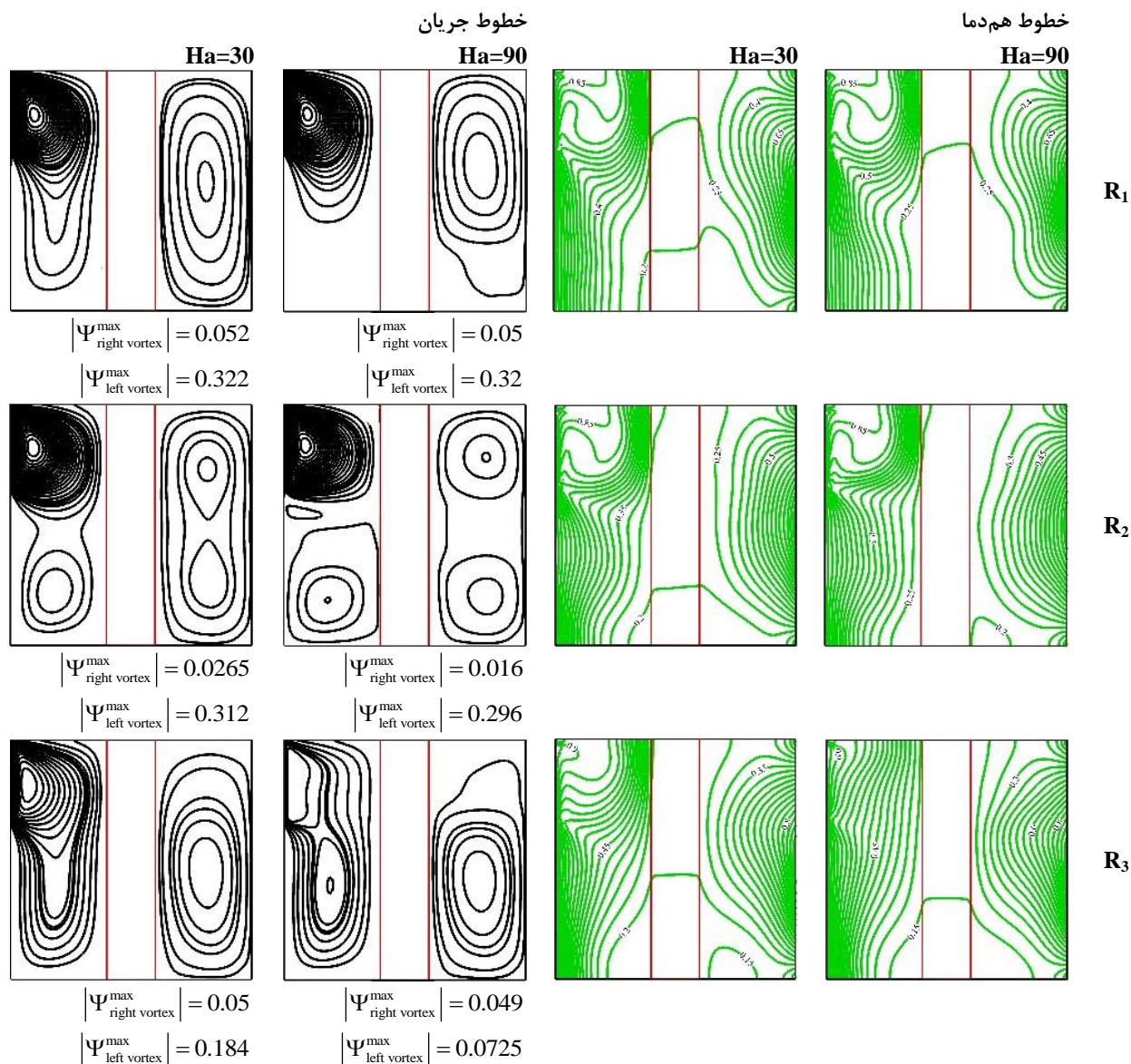
شکل (۴): خطوط جریان و خطوط هم‌دما به ازای $Ri=0.25$, $n=0.7$, $K_{\text{TCR}}=10$, $\phi=0.05H$, $D=0.5$, CASE1

معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، گردابه اصلی به گردابه‌های کوچک‌تر شکسته می‌شود. روند کلی تغییرات پیرامون شکل‌های ۵ و ۶ همانند شکل ۴ است؛ یعنی، اگر میدان مغناطیسی هم موقعیت با سرعت اعمال شود، اثربخشی افزایش عدد هارتمن بیشتر است. کاهش گرادیان دما ناشی از افزایش عدد هارتمن در تمامی موارد، مشهود است.

اگرچه در حالت کلی افزایش عدد هارتمن کم شدن قدرت جریان و کاهش انحنای خطوط هم‌دما را در پی دارد ولی بیشتر بودن اثر افزایش عدد هارتمن به ازای R_1 نکته حائز اهمیت این شکل است؛ زیرا در این حالت میدان مغناطیسی هم موقعیت با سرعت حرکت دیواره اعمال می‌شود جایی که بیشترین اثرات جابجایی وجود دارد. همچنین با توجه به موقعیت اعمال میدان مغناطیسی، شکل گردابه‌ها تغییر می‌کند و در حالتی که جریان سیال از قسمت میانی در



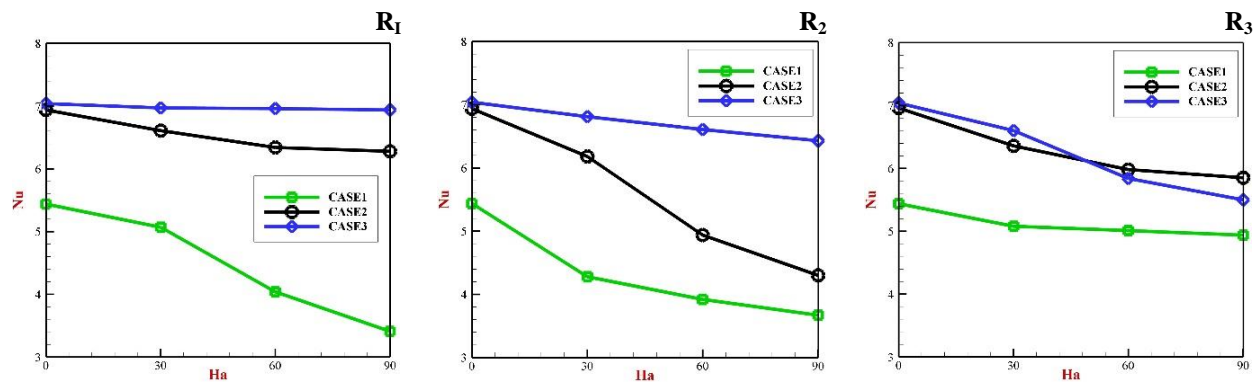
شکل (۵): خطوط جریان و خطوط هم‌دما به ازای $Ri=0.25$, $n=0.7$, $K_{TCR}=10$, $\phi=0.05$, $D=0.5H$, CASE2



شکل (۶): خطوط جریان و خطوط هم‌دما به ازای $Ri=0.25$, $n=0.7$, $K_{TCR}=10$, $\phi=0.05$, $D=0.5H$, CASE3

بیشتر می‌شود که این عوامل فرآیند جابجایی قوی‌تری را موجب می‌شود؛ (۲) با رشد مقدار عدد هارتمن، در تمامی موارد مورد بررسی، عدد ناسلت کاهش می‌یابد؛ زیرا افزایش عدد هارتمن، نیروی لورنز (نیروی مقاومی که خلاف نیروی گرانش عمل می‌کند بر طبق معادله (۷)) قوی‌تری را به جریان نانوسیال تحمیل می‌کند؛ (۳) چنانچه میدان مغناطیسی هم موقعیت با حرکت دیواره اعمال شود، بیشترین اثر را در کاهش عدد ناسلت دارد.

برای درک بهتر این مطلب که اثر افزایش عدد هارتمن و تغییر موقعیت اعمال میدان مغناطیسی و سرعت حرکت دیواره چه تأثیری بر عملکرد حرارتی سیستم مورد بررسی دارد، چند نکته راجع به عدد ناسلت متوسط که در شکل ۷ ارائه شده است قابل‌بیان است: (۱) هرچه دیواره محفظه از قسمت بالاتری تحت سرعت قرار گیرد، می‌توان به عدد ناسلت بیشتری دست‌یافت؛ زیرا در قسمت‌های بالایی محفظه با حرکت دیواره، تغییر در گرادیان‌های سرعت و دما



شکل (۷): عدد ناسلت متوسط به ازای $Ri=0.25, n=0.7, K_{TCR}=10, \phi=0.05, D=0.5H$

جدول (۴): مقدار آنتروپی تولیدشده و عدد بجان به ازای $Ri=0.25, n=0.7, K_{TCR}=10, \phi=0.05, D=0.5H$

S			Be			
حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	
						R₁
۴۳/۲۵	۴۴/۲۱	۴۲/۸۱	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۷۴	Ha=0
۴۱/۹۵	۴۲/۶۵	۴۱/۲۳	۰/۷۲	۰/۶۸	۰/۷۹	Ha=30
۴۰/۶۵	۴۰/۸۵	۳۹/۱۵	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۸۵	Ha=60
۳۹/۳۵	۳۹/۷۵	۳۸/۱۵	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۸۹	Ha=90
						R₂
۴۳/۲۵	۴۴/۲۱	۴۲/۸۱	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۷۴	Ha=0
۴۱/۳۱	۴۱/۱۵	۴۱/۶۵	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۷	Ha=30
۳۹/۴۵	۳۹/۳۵	۴۰/۴۵	۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۸۲	Ha=60
۳۸/۵۵	۳۷/۵۷	۳۹/۳۹	۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۸۶	Ha=90
						R₃
۴۳/۲۵	۴۴/۲۱	۴۲/۸۱	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۷۴	Ha=0
۴۱/۰۱	۴۲/۵۵	۴۱/۳۱	۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۶۹	Ha=30
۳۹/۱۵	۴۰/۸۵	۳۹/۷۵	۰/۷۹	۰/۷۴	۰/۷۴	Ha=60
۳۷/۶۲	۳۹/۳۴	۳۸/۵۵	۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۷۸	Ha=90

تا (۱۳)). با این حال به دلیل کاهش اثرات جابجایی، عدد بجان با افزایش عدد هارتمن، افزایش می‌یابد؛ زیرا در این حالت سهم فرآیند هدایت حرارتی بیشتر شده و انتقال حرارت عامل اصلی ایجادکننده آنتروپی است. با توجه به جدول ۴ به‌وضوح دیده می‌شود که با تغییر موقعیت اعمال میدان مغناطیسی و سرعت حرکت دیوار می‌توان به‌خوبی مقدار آنتروپی و عدد بجان را کنترل کرد. یکی از راهکارهای

همچنین به‌طور کلی با توجه به شیب نمودارها، چنانچه میدان مغناطیسی در موقعیت R_2 اعمال شود، به ازای تمامی موقعیت‌های اعمال سرعت، افزایش عدد هارتمن مؤثرتر است. با توجه به جدول ۴، مقدار آنتروپی با افزایش عدد هارتمن در تمامی حالات کاهش می‌یابد. کاهش گرادیان‌های سرعت و دما و مقدار سرعت ناشی از افزایش عدد هارتمن دلیل این اتفاق است (با توجه به معادلات (۱۱))

دارد. کم اثر بودن اعمال میدان مغناطیسی به ازای $D=0.2H$ و $K_{TCR} \leq 1$ قابل مشاهده است.

با توجه به جدول ۵ دو نکته قابل بیان است: (۱) با افزایش فاصله دیواره رسانا از دیواره متحرک و افزایش نسبت هدایت حرارتی، مقدار آنتروپی تولیدی کم می شود؛ (۲) بیشترین مقدار عدد بجان متعلق به نسبت هدایت حرارتی 0.5 است، جایی که مقاومت حرارتی دیواره بیشترین مقدار را داراست. با افزایش پارامتر D ، سهم انتقال حرارت در تولید آنتروپی کاهش می یابد.

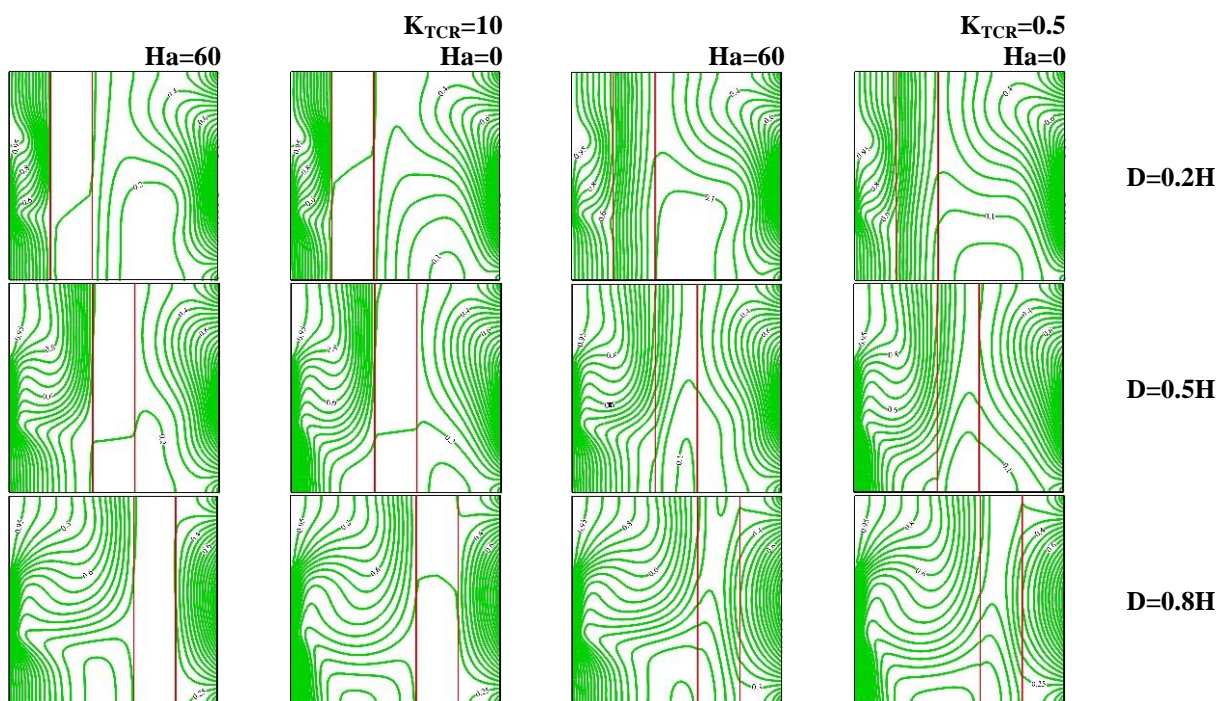
با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می شود که به ازای $n=0.95$ و عدد ریچاردسون بزرگتر از 0.25 خطوط همدمای بیشتر تابعی از X است. ولی به ازای موارد دیگر خطوط همدمای همزمان تابعیت X و Y دارد. این عامل نشان می دهد اثرات جابجایی زیاد می شود که به ازای $n=0.45$ اثرات جابجایی حداکثر است. با توجه به خطوط آنتروپی شکل ۱۰ دیده می شود با کاهش شاخص توانی سیال، تراکم خطوط بیشتر می شود که این اثر به ازای کاهش عدد ریچاردسون بسیار مشهودتر است؛ زیرا در این حالت گرادیان های سرعت و دما به خصوص در مجاورت دیواره داغ بیشتر می شود.

کنترل مقدار انتقال حرارت، تغییر در مقدار نسبت هدایت حرارتی دیوار جامد به سیال و تغییر موقعیت دیواره رسانا است.

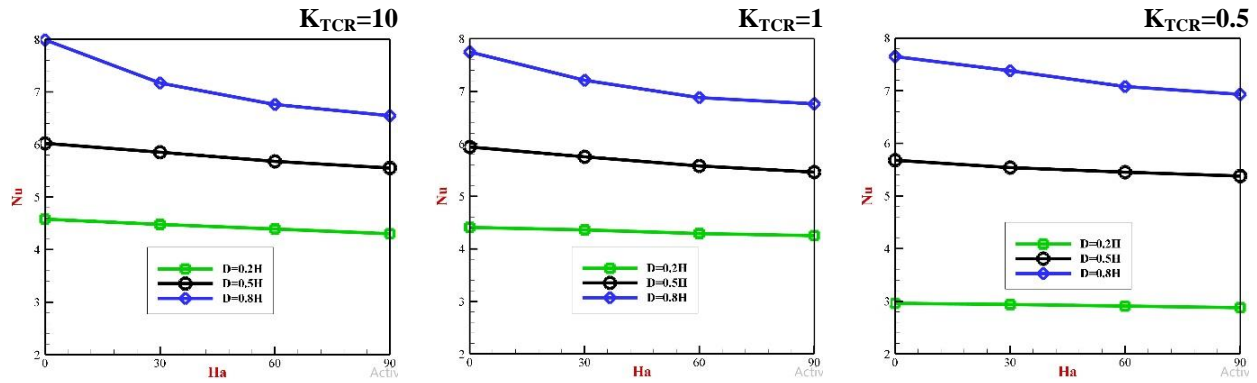
با توجه به شکل ۸، به ازای $K_{TCR}=0.5$ ، دما درون دیواره رسانا تنها تابعی از دما است ولی به ازای افزایش نسبت هدایت حرارتی تابعیت دما نسبت به دو متغیر X و Y دیده می شود. برای بهتر نشان دادن اثر تغییر موقعیت دیواره رسانا و نسبت هدایت حرارتی، عدد ناسلت متوسط در شکل ۹ ارائه شده است. برای افزایش عدد ناسلت کافی است K_{TCR} افزایش یابد؛ زیرا از این طریق حرارت بیشتری قابلیت انتقال به سمت دیگر دیواره را دارد. با این اقدام، عدد ناسلت با

$$\text{معیار (\%)} = \left| \frac{Nu^{K_{TCR}=10} - Nu^{K_{TCR}=0.5}}{Nu^{K_{TCR}=0.5}} \right| \text{ Difference}$$

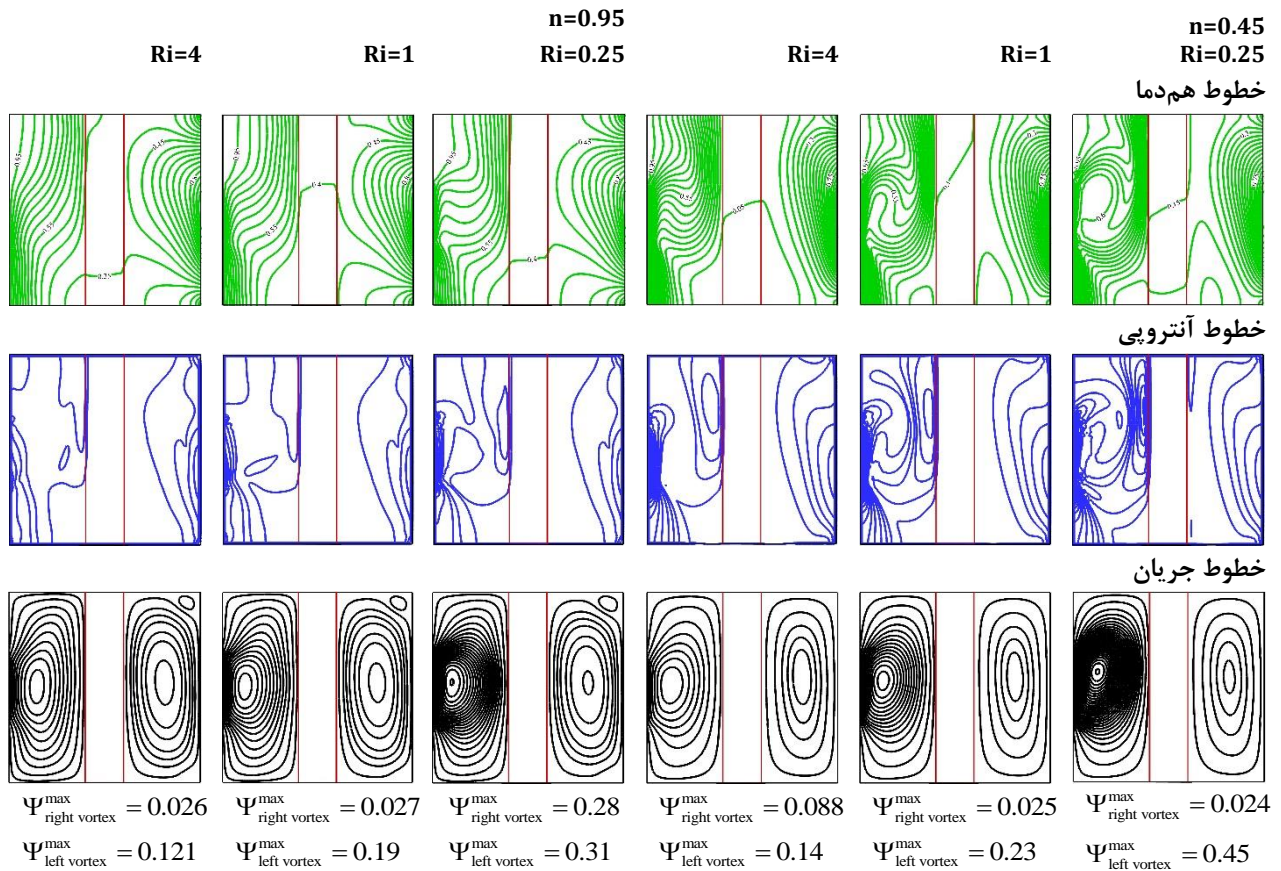
در حدود ۵۵ درصد، ۶ درصد و ۴/۵ درصد برای $D=0.2H$ ، $D=0.5H$ و $D=0.8H$ افزایش می یابد. نکته مهم دیگر، افزایش اثر میدان مغناطیسی در کاهش ناسلت با افزایش نسبت هدایت حرارتی و به ازای مقدار بزرگتر پارامتر D است (با بررسی شیب نمودارها در شکل ۹)؛ زیرا در این حالتها با توجه به شکل ۸، فرآیند جابجایی قوی تری وجود



شکل ۸: خطوط همدمای به ازای $Ri=1$, $n=0.7$, CASE2, $\phi=0.05$, R_1



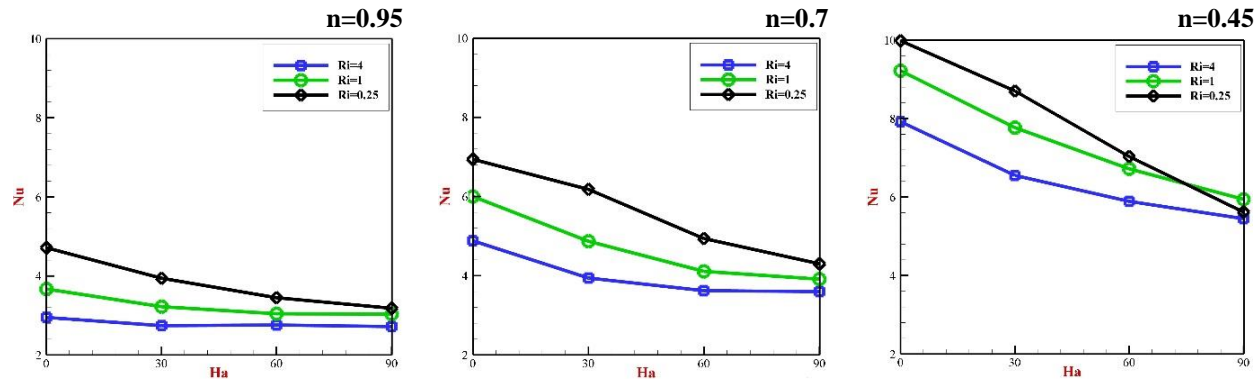
شکل (۹): عدد ناسلت متوسط به ازای $Ri=1, n=0.7, CASE2, \varphi=0.05, R_1$



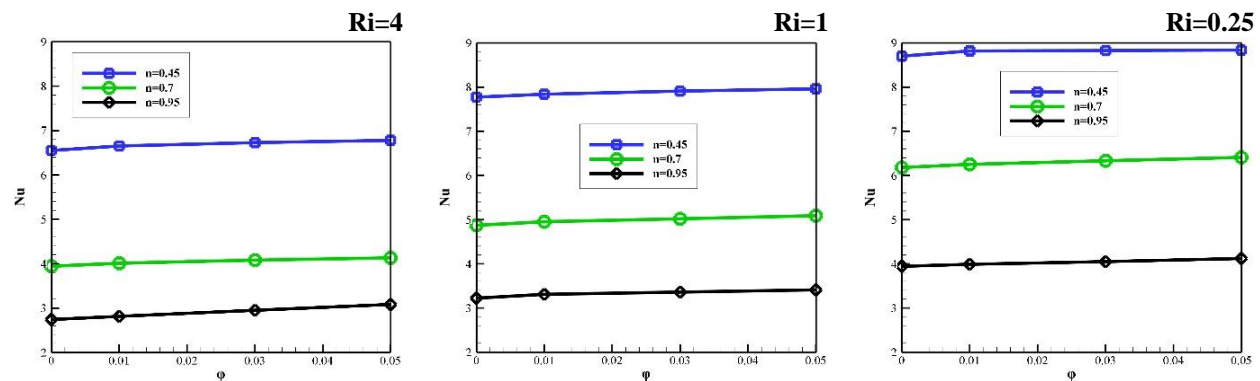
شکل (۱۰): خطوط جریان، خطوط هم‌دما و خطوط آنتروپی به ازای $K_{TCR}=10, Ha=0, CASE2, \varphi=0.05, R_2, D=0.5H$

جدول (۵): مقدار آنتروپی تولیدشده و عدد بجان به ازای $Ri=1, n=0.7, CASE2, \varphi=0.05, Ha=0, R_1$

Be			S			
$K_{TCR}=10$	$K_{TCR}=1$	$K_{TCR}=0.5$	$K_{TCR}=10$	$K_{TCR}=1$	$K_{TCR}=0.5$	
۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۸۸	۴۲/۴۵	۴۲/۸۵	۴۳/۱۵	D=0.2H
۰/۷۲	۰/۷۹	۰/۸۵	۴۰/۹۵	۴۱/۱۵	۴۱/۶۵	D=0.5H
۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۸۱	۳۹/۰۴	۳۹/۲۵	۴۰/۱۵	D=0.8H



شکل (۱۱): عدد ناسلت متوسط به ازای R_2 , $\varphi=0.05$, $K_{TCR}=10$, $D=0.5H$, CASE2.



شکل (۱۲): عدد ناسلت متوسط به ازای R_2 , $K_{TCR}=10$, $Ha=30$, CASE2, $D=0.5H$.

جدول (۶): مقدار آنتروپی تولیدشده و عدد بجان به ازای R_2 , CASE2, $K_{TCR}=10$, $\varphi=0.05$, $Ha=0$, $D=0.5H$.

Be			S			
Ri=4	Ri=1	Ri=0.25	Ri=4	Ri=1	Ri=0.25	
۰/۷۸	۰/۶۶	۰/۵۵	۳۷/۱۵	۳۹/۶۵	۴۶/۵۵	n=0.45
۰/۸۴	۰/۶۹	۰/۶۱	۳۶/۸۵	۳۷/۵۵	۴۲/۰۵	n=0.7
۰/۹۱	۰/۸۲	۰/۷۱	۳۵/۷۵	۳۶/۱۵	۴۰/۱۵	n=0.95

دارد. با توجه به شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که کمترین مقدار عدد ناسلت متعلق به عدد ریچاردسون ۴ و برای $n=0.95$ است؛ زیرا در این حالت کمترین اثرات جابجایی وجود دارد. نکته حائز اهمیت این است که به ازای $n=0.95$ ، اعمال میدان مغناطیسی به ازای $Ri=4$ تقریباً بی‌اثر و برای $Ri=1$ به ازای $Ha>30$ کم اثر است. اثر میدان مغناطیسی به ازای افزایش شاخص کاهش و به ازای افزایش عدد ریچاردسون، افزایش می‌یابد. مطابق با جدول ۶، کمترین مقدار آنتروپی تولیدشده متعلق به بیشترین شاخص توانی و

بیشتر بودن قدرت جریان شکل‌گرفته به ازای کاهش شاخص توانی ناشی از کم شدن ویسکوزیته سیال با توجه به معادلات (۲) و (۳) است؛ زیرا در این حالت حرکت سیال روان‌تر است. بیشتر بودن قدرت جریان نانوسیال ناشی از افزایش نیروهای شناوری نتیجه کاهش عدد ریچاردسون است؛ زیرا در این حالت سرعت حرکت دیواره بیشتر است و نیروی برشی بیشتری به سیال مجاور دیواره وارد می‌شود. در هر دو مقدار شاخص توانی، بیشترین تراکم خطوط آنتروپی و جریان در مرکز دیواره وجود دارد، جایی که دیواره سرعت

می‌کند و بیشترین اثر افزایش عدد هارتمن در کاهش عدد ناسلت زمانی وجود دارد که سرعت هم موقعیت میدان مغناطیسی وجود داشته باشد. (۴) با تغییر فاصله دیواره رسانا از دیواره متحرک، بر مقدار عدد ناسلت افزوده می‌شود و به ازای بالاترین مقدار نسبت هدایت حرارتی علاوه بر دستیابی به بیشترین مقدار عدد ناسلت، بیشترین اثر اعمال میدان مغناطیسی نیز مشاهده می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Abderrahmane A, Younis O, Al-Khaleel M, Laidoudi H, Akkurt N, Guedri K, Marzouki R. 2D MHD mixed convection in a zigzag trapezoidal thermal energy storage system using NEPCM. *Nanomaterials*. 2022 Sep 20;12(19):3270.
- [2] Prabakaran R, Eswaramoorthi S, Loganathan K, Sarris IE. Investigation on thermally radiative mixed convective flow of carbon nanotubes/Al 2 O 3 nanofluid in water past a stretching plate with joule heating and viscous dissipation. *Micromachines*. 2022 Aug 29;13(9):1424.
- [3] Tian XY, Gao W, Li BW, Zhang ZH, Leng XY. Mixed convection of nanofluid by two-phase model in an inclined cavity with variable aspect ratio. *Chinese Journal of Physics*. 2022 Jun 1;77:57-72.
- [4] Ishak MS, Alsabery AI, Hashim I, Chamkha AJ. Entropy production and mixed convection within trapezoidal cavity having nanofluids and localised solid cylinder. *Scientific reports*. 2021 Jul 19;11(1):1-22.
- [5] Ebrahimi D, Yousefzadeh S, Akbari OA, Montazerifar F, Rozati SA, Nakhjavani S, Safaei MR. Mixed convection heat transfer of a nanofluid in a closed elbow-shaped cavity (CESC). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021 Jun;144(6):2295-316.
- [6] Shah SS, Haq RU, Al-Kouz W. Mixed convection analysis in a split lid-driven trapezoidal cavity having elliptic shaped obstacle. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021 Jul 1;126:105448.
- [7] Sreedevi P, Reddy PS. Effect of magnetic field and thermal radiation on natural convection in a square cavity filled with TiO₂ nanoparticles using Tiwari-Das nanofluid model. *Alexandria Engineering Journal*. 2022 Feb 1;61(2):1529-41.

عدد ریچاردسون است، جایی که گرادیان‌های سرعت و دما که ایجادکننده آنتروپی هستند، کمترین است. ولی در عوض، سهم انتقال حرارت در تولید آنتروپی در این موارد بیشترین است. بر طبق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش کسر حجمی در تمامی حالات، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد؛ زیرا افزایش این پارامتر، ضریب هدایت حرارتی را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه به ازای افزایش عدد ریچاردسون و شاخص توانی سیال قدرت جابجایی کم می‌شود، اثربخشی افزودن نانو ذرات به سیال پایه بیشتر است. به ازای $n=0.45$ و $Ri=0.25$ ، افزودن نانو ذرات به مقدار کسر حجمی بیشتر از $0.3/0$ تأثیر چندانی بر عدد ناسلت ندارد درحالی‌که به ازای $n=0.95$ و $Ri=4$ ، افزایش کسر حجمی تا $0.5/0$ منجر به افزایش عدد ناسلت در حدود $12/5$ درصد می‌شود.

۵- جمع‌بندی

به‌منظور بررسی عواملی که بر مقدار آنتروپی ناشی از انتقال حرارت مزدوج ناشی نانوسیال غیرنیوتنی اثر می‌گذارد، جابجایی ترکیبی درون محفظه مربعی شکل حاوی دیواره رسانا در معرض میدان مغناطیسی یکنواخت موردبررسی قرار گرفت. این شبیه‌سازی عددی که با استفاده از روش شبکه بولتزن انجام شد، برای طراحی ذخیره‌سازهای انرژی و خنک‌کننده‌های الکترونیکی کاربرد دارد. نوآوری کار حاضر در تغییر موقعیت اعمال میدان مغناطیسی و تغییر موقعیت مکانی حرکت دیواره است که تاکنون مورد تحلیل قرار نگرفته است. مهم‌ترین نتایج عبارت‌اند از:

- (۱) با تغییر موقعیت اعمال میدان مغناطیسی و تغییر ناحیه اعمال سرعت دیوار علاوه بر کنترل مقدار انتقال حرارت و آنتروپی، قدرت جریان شکل‌گرفته نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد.
- (۲) اگرچه افزودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم به سیال پایه همواره منجر به افزایش عدد ناسلت می‌شود، این اثر با افزایش شاخص توانی سیال افزایش می‌یابد.
- (۳) با تغییر ناحیه اعمال سرعت روی دیواره، شکل جریان، نرخ انتقال حرارت و مقدار آنتروپی تغییر

- Engineering Science and Technology. 2021 Jun;16(3):2378-93.
- [17] Khademi R, Razminia A, Shiryaev VI. Conjugate-mixed convection of nanofluid flow over an inclined flat plate in porous media. *Applied Mathematics and Computation*. 2020 Feb 1;366:124761.
- [18] Borah A, Pati S. Influence of conjugate heat transfer on the minimization of entropy generation for forced convective flow through parallel plate channel filled with porous material. *Heat Transfer*. 2021 Sep;50(6):6401-17.
- [19] Aidaoui L, Lasbet Y, Selimefendigil F. Effect of simultaneous application of chaotic laminar flow of nanofluid and non-uniform magnetic field on the entropy generation and energetic/exergetic efficiency. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022 May;147(10):5865-82.
- [20] Hosseinzadeh K, Mogharrebi AR, Asadi A, Sheikhshahrokhdehkordi M, Mousavisani S, Ganji DD. Entropy generation analysis of mixture nanofluid (H₂O/c₂H₆O₂)-Fe₃O₄ flow between two stretching rotating disks under the effect of MHD and nonlinear thermal radiation. *International Journal of Ambient Energy*. 2022 Dec 31;43(1):1045-57.
- [21] Ijaz Khan M, Alzahrani F. Numerical simulation for the mixed convective flow of non-Newtonian fluid with activation energy and entropy generation. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2021 Jun;44(9):7766-77.
- [22] Rashidi MM, Sadri M, Sheremet MA. Numerical simulation of hybrid nanofluid mixed convection in a lid-driven square cavity with magnetic field using high-order compact scheme. *Nanomaterials*. 2021 Aug 31;11(9):2250.
- [23] Sáčhica D, Salcedo E, Treviño C, Martínez-Suástegui L. Magnetohydrodynamic mixed convection and entropy generation analysis of Al₂O₃-water nanofluid past a confined circular cylinder. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022 Sep 15;230:107542.
- [24] Fu C, Rahmani A, Suksatan W, Alizadeh SM, Zarringhalam M, Chupradit S, Toghraie D. Comprehensive investigations of mixed convection of Fe-ethylene-glycol nanofluid inside an enclosure with different obstacles using lattice Boltzmann method. *Scientific Reports*. 2021 Oct 20;11(1):1-6.
- [25] Aljaloud AS. Hybrid nanofluid mixed convection in a cavity under the impact of the magnetic field by lattice Boltzmann method: [8] Safdar R, Jawad M, Hussain S, Imran M, Akgül A, Jamshed W. Thermal radiative mixed convection flow of MHD Maxwell nanofluid: Implementation of buongiorno's model. *Chinese Journal of Physics*. 2022 Jun 1;77:1465-78.
- [9] Ahmad I, Faisal M, Javed T, Mustafa A, Kiyani MZ. Numerical investigation for mixed convective 3D radiative flow of chemically reactive Williamson nanofluid with power law heat/mass fluxes. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022 Jan 1;13(1):101508.
- [10] Cherif BM, Abderrahmane A, Saeed AM, Qasem NA, Younis O, Marzouki R, Chung JD, Shah NA. Hydrothermal and Entropy Investigation of Nanofluid Mixed Convection in Triangular Cavity with Wavy Boundary Heated from below and Rotating Cylinders. *Nanomaterials*. 2022 Apr 26;12(9):1469.
- [11] Nemati M, Sefid M, Mohammad Sajadi S, Ghaemi F, Baleanu D. Lattice Boltzmann method to study free convection and entropy generation of power-law fluids under influence of magnetic field and heat absorption/generation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022 Mar 16: 147, 10569-10594.
- [12] Zahmatkesh I, Habibi Shandiz MR. MHD double-diffusive mixed convection of binary nanofluids through a vertical porous annulus considering Buongiorno's two-phase model. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022 Jan;147(2):1793-807.
- [13] Nemati M, Sefid M. The application of multiple relaxation time lattice Boltzmann method to simulate the Newtonian and non-Newtonian MHD natural convection in cavity with lozenge barrier. *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*. 2021 May 22;10(1):17-35.
- [14] Nemati M, Sefid M, Rahmati A. Analysis of the effect of periodic magnetic field, heat absorption/generation and aspect ratio of the enclosure on non-Newtonian natural convection. *Journal of Heat and Mass Transfer Research*. 2021 Oct 1;8(2):187-203.
- [15] Dutta S, Bhattacharyya S, Pop I. Effect of hybrid nanoparticles on conjugate mixed convection of a viscoplastic fluid in a ventilated enclosure with wall mounted heated block. *Alexandria Engineering Journal*. 2023 Jan 1;62:99-111.
- [16] Mahmoud MS. Numerical investigation of conjugate combined convective heat transfer for internal laminar flow of AL₂O₃/water nanofluid through tube-flat plate solar collector. *Journal of*

Effects of barrier temperature on heat transfer and entropy. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2023 Feb 1;147:276-91.

[26] Sun C, Zhang Y, Farahani SD, Hu C, Nemati M, Sajadi SM. Analysis of power-law natural conjugate heat transfer under the effect of magnetic field and heat absorption/production based on the first and second laws of thermodynamics for the entropy via lattice Boltzmann method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2022 Nov 1;144:165-84.



Numerical Evaluation via Lattice Boltzmann Method to Analyze of Entropy Generation due to Conjugate Mixed Convection Heat Transfer of Non-Newtonian Nanofluid under the Influence of Magnetic Field

Mohammad Nemati^{1*}, Mohammad Sefid²

¹ Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

² Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

HIGHLIGHTS

- Investigation of the effect of changing the position of applying the magnetic field and the speed of the wall movement
- Increasing the mean Nusselt number by increasing the distance between the conducting wall and the moving wall
- The greater effect of the magnetic field for the lower power-law index and the higher the Richardson number

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2 January 2023

Received in revised form: 9 January 2023

Accepted: 27 January 2023

Available online: 20 February 2023

*Correspondence:

mohammadnemati@stu.yazd.ac.ir

How to cite this article:

M. Nemati, M. Sefid. Numerical evaluation via lattice Boltzmann method to analyze of entropy generation due to conjugate mixed convection heat transfer of non-Newtonian nanofluid under the influence of magnetic field. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(2):113-129.

Keywords:

Conjugate heat transfer

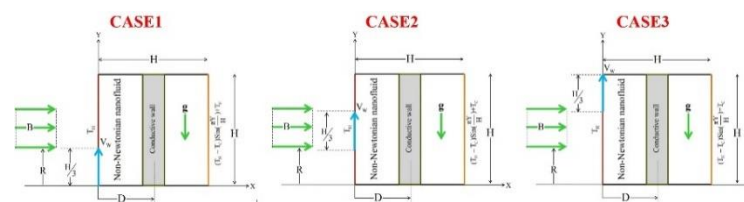
Changing the position of applying magnetic field

Non-Newtonian nanofluid

Entropy generation

Changing the position of applying speed

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

The purpose of this analysis using lattice Boltzmann method (LBM) is to investigate the matter with which strategies can be used to control the amount of heat transfer and entropy formation. For this goal, the mixed convection heat transfer of non-Newtonian nanofluid under the impact of the magnetic field inside the square chamber containing the conductor wall has been analyzed. The results depicted that the flow characteristics and heat transfer are strongly affected by changing the position in these places. If the magnetic field is applied at the same location as the speed application position, the effect of increasing the Hartmann number in reducing the average Nusselt number becomes more evident. In order to have the highest value of Nusselt number, CASE3 should be considered, however, the greatest impact of magnetic field on fluid flow was observed for CASE2. By increasing the distance between the conductive wall and the moving wall, the average Nusselt number increases up to 1.5 times. By decreasing the thermal conductivity ratio from 10 to 0.5, the average Nusselt number decreases to about 55%. The entropy value has a direct/inverse relationship with the Richardson number/power-law index.

* Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Imam Hossein University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

