

مطالعه عددی تاثیر عوامل مختلف بر نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه دوبعدی با درپوش متحرک به روش شبکه بولتزمن حرارتی

علی گل‌مکانی^۱، علیرضا تیمورتاش^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

*نویسنده مسئول: teymourtash@um.ac.ir

خلاصه

هدف از پژوهش حاضر، مطالعه عددی جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال در یک محفظه دوبعدی شیب‌دار با حضور سیلندر استوانه‌ای چرخان به روش شبکه بولتزمن حرارتی است. در این شبیه‌سازی تحت عدد رینولدز $Re = 100$ ، اثر تغییر عدد ریچاردسون به‌عنوان شاخص کنترل‌کننده سهم جابه‌جایی اجباری و آزاد در ایجاد جابه‌جایی ترکیبی، تحت بازه $0.1 \leq Ri \leq 10$ مورد تحلیل قرار گرفته و به ازای هر سه مکانیزم انتقال حرارت همرفت ذکرشده، تاثیر پارامترهای مختلفی بر نرخ انتقال گرما از محفظه بررسی شده‌است که عبارتند از: تغییر زاویه شیب محفظه در بازه $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$ ، افزودن نانوذرات مس به سیال پایه آب در کسرهای حجمی مختلف محدود به $0 \leq \phi \leq 0.05$ بر مبنای رویکرد تک‌فاز، تاثیر حضور سیلندر استوانه‌ای در حالت ساکن و متحرک، تغییر جهت چرخش و نیز تغییر قطر و مکان سیلندر. به ازای جمیع مقادیر عدد Ri در بازه فوق، افزودن سیلندر استوانه‌ای به محفظه تحت هر وضعیتی برای سیلندر، موجب افزایش چشمگیر عدد ناسلت (Nu_m) و نرخ انتقال حرارت در مقایسه با محفظه فاقد سیلندر می‌شود. در $Ri = 0.1$ با قرار دادن سیلندر ساکن در مرکز محفظه به قطر $d_s = H/6$ در شرایط $\gamma = 60^\circ$ و $\phi = 5\%$ ، مقدار عدد ناسلت میانگین در مقایسه با عدد ناسلت محفظه فاقد سیلندر به میزان ۶۵٫۵ درصد بهبود یافته و افزایش محسوس نرخ انتقال حرارت را به دنبال دارد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش قطر سیلندر عدد ناسلت بهبود می‌یابد. همچنین هنگامی که سیلندر در نزدیکی درپوش محفظه قرار دارد، بیشترین نرخ انتقال گرما حاصل خواهد شد.

کلمات کلیدی: شبکه بولتزمن حرارتی، محفظه، جابه‌جایی ترکیبی، سیلندر استوانه‌ای، محفظه شیب‌دار، نانوسیال

۱. مقدمه

در صنایع و دستگاه‌هایی با توان خروجی بسیار زیاد که در آن‌ها جابه‌جایی اجباری یا طبیعی برای دفع تمام گرمای لازم کافی نیست، اغلب از انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی* استفاده می‌شود [۱، ۲] که از جمله کاربردهای آن می‌توان به

* Mixed Convection

رکتورهای هسته‌ای [۲]، دستگاه‌های میکروساختار [۳]، کلکتورهای خورشیدی و خنک‌کننده‌های تجهیزات الکترونیکی [۳، ۲] اشاره کرد. به‌عنوان مثال، وجود هر کدام از عوامل نیروی برشی و گرادیان فشار، در حضور میدان جاذبه به‌ترتیب منجر به ایجاد جریان جابه‌جایی ترکیبی در هندسه‌هایی نظیر محفظه* و کانال می‌گردد.

به‌منظور بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی از عدد بی‌بعد ریچاردسون† به‌عنوان شاخص کنترل‌کننده سهم جابه‌جایی اجباری و آزاد استفاده می‌شود. به‌طوری که اگر عدد ریچاردسون $1 \gg Ri$ باشد، جابه‌جایی طبیعی مکانیزم غالب انتقال گرما است. در صورتی که عدد ریچاردسون $1 \ll Ri$ باشد، جابه‌جایی اجباری مکانیزم غالب انتقال حرارت خواهد بود و اگر عدد ریچاردسون $1 \approx Ri$ باشد، سهم هر دو مکانیزم جابه‌جایی یکسان و به‌عبارت دیگر، انتقال گرما از نوع جابه‌جایی ترکیبی است [۴].

یکی از هندسه‌های پرکاربرد صنعتی در انتقال حرارت جابه‌جایی، محفظه است. محققین بسیاری در سال‌های اخیر به بررسی محفظه تحت شرایط حرارتی و کاری متفاوت پرداخته و به کمک روش‌های مختلف درصد افزایش، کاهش و به‌طور کلی کنترل نرخ انتقال گرما از محفظه برآمده‌اند که در ادامه بیان خواهند شد. پژوهش حاضر نیز در همین راستا به مطالعه عددی تاثیر عوامل مختلف بر نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در محفظه با درپوش متحرک‡ به روش شبکه بولتزمن§ می‌پردازد.

صلاحی و همکاران [۵] به مطالعه جابه‌جایی ترکیبی جریان نانوسیال در یک محفظه شیب‌دار با درپوش متحرک پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در عدد ریچاردسون ۰٫۱، به ازای هر مقداری برای کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط به آرامی با زاویه شیب محفظه افزایش می‌یابد، اما برای عدد ریچاردسون ۱۰، این افزایش با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. خانافر و ایتال [۶] تاثیر یک سیلندر استوانه‌ای با شرایط مرزی مختلف بر انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه مربعی با درپوش متحرک را بررسی کرده و با قرار دادن سیلندر در نزدیکی دیواره پایین، به انتقال حرارت بهینه دست یافتند. بر طبق نتایج آن‌ها به ازای جمیع مقادیر عدد ریچاردسون، با افزایش شعاع سیلندر، عدد ناسلت متوسط بهبود می‌یابد. گانگاوین و گوپتا [۷] جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه حاوی یک بلوک بیضوی گرم‌شده را شبیه‌سازی کرده و دریافتند که در مقایسه با یک سیلندر استوانه‌ای، استفاده از یک بلوک بیضوی منجر به افزایش بیشتر نرخ انتقال حرارت می‌شود.

السبری و همکاران [۸] به مطالعه انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال آب-آلومینیوم در یک محفظه با دیواره فوقانی موج‌دار و دیواره‌های جانبی متحرک، در حضور یک سیلندر استوانه‌ای، پرداختند. در این پژوهش از یک مدل مبتنی بر رویکرد دوفاز برای نانوسیال استفاده شده‌است. نتایج حاکی از آن است که افزایش قطر سیلندر منجر به تغییر شکل میدان جریان و کاهش نرخ انتقال حرارت می‌شود. علاوه بر این، تغییر جهت حرکت دیواره‌های متحرک سبب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌گردد.

سپیانی و همکاران [۴] در مقاله خود به‌صورت عددی و به روش اختلاف محدود، انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی ناشی از حضور یک تیغه چرخان در یک محفظه مربعی حاوی نانوسیال آب-آلومینیوم را مطالعه کردند. در پژوهش آن‌ها دیواره‌های چپ و راست محفظه به‌ترتیب گرم و سرد و هر دو دیواره افقی، عایق هستند. همچنین ضخامت تیغه ناچیز

* Cavity

† Richardson Number

‡ Lid driven cavity

§ Lattice Boltzmann Method (LBM)

ششمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و هوافضا

فرض شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش طول تیغه منجر به چرخش سریع‌تر سیال و بهبود نرخ انتقال گرما می‌شود. افزون بر این، استفاده از تیغه چرخان در مقایسه با سیلندر چرخان، نرخ انتقال حرارت را بیشتر افزایش می‌دهد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات، باعث بهبود نرخ انتقال حرارت می‌شود.

بولاهیا و همکاران [۹] به روش حجم محدود به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و ترکیبی نانوسیال در یک محفظه مربعی حاوی سیلندره‌های دایروی چرخان گرم و سرد پرداختند. این محققین تاثیر قطر و موقعیت قرارگیری سیلندرها را به ازای بازه وسیعی از اعداد ریچاردسون، رایلی و کسر حجمی نانوذرات بر نرخ انتقال گرما مورد مطالعه قرار داده و نتیجه گرفتند که با تغییر جهت سیلندرها از وضعیت افقی به عمودی، نرخ انتقال حرارت بهبود می‌یابد.

ژو و همکاران [۱۰] از روش شبکه بولتزن به منظور شبیه‌سازی جریان نانوسیال آب-آلومینیوم در یک محفظه سه‌بعدی با دو دیواره جانبی متحرک استفاده کردند. در این تحقیق تاثیر کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدز و عدد ریچاردسون بر انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی بررسی و مشاهده شد که بهترین انتقال حرارت در حرکت رو به پایین دیواره سرد و حرکت رو به بالای دیواره گرم رخ می‌دهد. علاوه بر این؛ آن‌ها نتیجه گرفتند که رفتارهای مختلف منبع گرمایی مانند رفتار خطی یا سینوسی، به نحوه قابل توجهی بر میزان دما و عدد ناسلت تاثیر می‌گذارد.

شیخ‌الاسلامی و همکاران [۱۱] با استفاده از روش شبکه بولتزن به مطالعه جابه‌جایی طبیعی نانوسیالات مختلفی نظیر: آب و ذرات نقره، مس، اکسید آلومینیوم و تیتانیوم دی‌اکسید در یک محفظه مربعی شامل یک سیلندر چرخان پرداخته و از مدل‌های برینکمن و ماکسول-گارتنس به ترتیب به منظور محاسبه لزجت و ضریب هدایت حرارتی موثر استفاده کردند. بر اساس نتایج بدست‌آمده از این تحقیق، در بین نانوذرات بیان‌شده، مس منجر به حصول بیشترین نرخ انتقال حرارت می‌گردد. علاوه بر این؛ بیشترین بهبود عملکرد حرارتی به ازای عدد رایلی 10^6 ، هنگامی رخ می‌دهد که طول ضلع محفظه ۲٫۵ برابر قطر سیلندر باشد.

دورازبو و همکاران [۱۲] به کمک روش شبکه بولتزن حرارتی، جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه مستطیلی شیب‌دار با درپوش متحرک تحت شار حرارتی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد؛ در اعداد ریچاردسون بزرگ که جابه‌جایی طبیعی مکانیزم غالب انتقال حرارت است، میزان انتقال گرما با زیاد شدن زاویه شیب محفظه به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

کریمی‌پور و همکاران [۱۳] با استفاده از روش شبکه بولتزن حرارتی به بررسی جریان آرام جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال آب-مس در یک محفظه شیب‌دار با درپوش متحرک پرداختند. در این تحقیق، دیواره فوقانی با سرعت ثابت حرکت کرده و در دمای بیشتری نسبت به دیواره ساکن پایینی قرار دارد. سایر دیواره‌ها نیز ساکن و عایق هستند. بر طبق نتایج بدست‌آمده، حرکت درپوش محفظه در عدد ریچاردسون ۰٫۱ (حاکمیت جابه‌جایی اجباری) نسبت به ریچاردسون ۱ (جابه‌جایی ترکیبی) و ریچاردسون ۱۰ (حاکمیت جابه‌جایی آزاد)، تاثیر بیشتری بر روی نانوسیال دارد. همچنین به ازای زاویه شیب ۰ تا ۹۰ درجه، عدد رینولدز ۱۰۰ و عدد ریچاردسون ۰٫۱، افزودن ۴ درصد نانوذره مس به سیال پایه منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط به میزان ۵۰ درصد می‌گردد. شایان ذکر است؛ این مطالعه توانایی فوق‌العاده روش شبکه بولتزن در شبیه‌سازی مسائل مختلف از جمله جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیالات را ثابت می‌کند.

نظر به پیشینه تحقیق ارائه‌شده، به‌رغم تلاش‌های گسترده‌ای که طی سال‌های اخیر جهت بررسی اثر عوامل مختلفی نظیر: مانع، نانوسیال، زاویه شیب محفظه و ... بر نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در محفظه صورت گرفته است، مطالعات انجام‌شده به روش شبکه بولتزن در این زمینه نسبتاً محدود بوده و شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال در محفظه شیب‌دار با حضور سیلندر استوانه‌ای چرخان به روش شبکه بولتزن، به‌خصوص روش شبکه بولتزن حرارتی، در محدوده مقالات مورد بررسی در روند انجام این پژوهش مشاهده نشده است.

۲. روش حل و معادلات حاکم

از جمله معروفترین روشهای مبنا ذره‌ای در تحلیل جریان سیال می‌توان به روش شبکه بولتزمن اشاره کرد. روش شبکه بولتزمن به‌عنوان یکی از شاخه‌های مکانیک آماری، یک روش مبنا ذره در مقیاس مزوسکوپیک* و واسطه‌ای بین جهان مولکولی و مقیاس ماکروسکوپیک محسوب می‌شود. این روش مبتنی بر تئوری جنبشی گازها بوده که اساس آن بر حرکت ذرات مجازی در مسیرهای مشخص و برخورد آن‌ها در محل گره‌های شبکه استوار است. جهت انجام شبیه‌سازی حاضر، برنامه‌ای رایانه‌ای به زبان فرترن و به روش شبکه بولتزمن حرارتی تهیه شده که معادلات آن در ادامه بیان می‌شوند:

مشخصات شبکه بولتزمن استفاده‌شده (D_2Q_9) [۱۴، ۱۵]:

$$\bar{c}_k = \begin{cases} \left[\cos\left((k-1)\frac{\pi}{2}\right), \sin\left((k-1)\frac{\pi}{2}\right) \right] c & k = 1, 2, 3, 4 \\ (0, 0) c & k = 0 \\ \sqrt{2} \left[\cos\left((k-5)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right), \sin\left((k-5)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \right] c & k = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (۱)$$

$$w_k = \begin{cases} \frac{1}{9} & k = 1, 2, 3, 4 \\ \frac{4}{9} & k = 0 \\ \frac{1}{36} & k = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (۲)$$

$$c_s = \frac{c}{\sqrt{3}} \quad (۳)$$

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (۴)$$

در روابط فوق، \bar{c}_k ، c_s ، c و w_k به ترتیب بیانگر سرعت‌های مزوسکوپیک گسسته‌شده، سرعت صوت شبکه، سرعت مشخصه و ضرایب وزنی هستند. Δx ، Δy و Δt نیز گام‌های مکانی و زمانی شبکه می‌باشند.

معادلات شبکه بولتزمن هیدرودینامیکی [۱۴]:

$$\frac{\partial f_k}{\partial t} + \bar{c}_k \cdot \bar{\nabla}_r f_k + \vec{G} \cdot \bar{\nabla}_c f_k = -\frac{1}{\lambda_f} (f_k - f_k^{eq}) \quad (۵)$$

در این معادله f_k ، تابع توزیع احتمال چگالی ذرات بوده و \vec{G} به‌عنوان بردار نیروی شناوری بر واحد جرم، بر مبنای تقریب خطی بوزینسک برابر با $\vec{G} = \beta \vec{g}(T - T_m)$ است که در آن β ، ضریب انبساط حرارتی و \vec{g} بردار شتاب گرانش می‌باشد.

* Mesoscopic scale

سایر کمیات از جمله: زمان آرامش هیدرودینامیکی (λ_f) و تابع توزیع تعادل (f_k^{eq}) به ترتیب از روابط (۶) و (۷) بدست می‌آیند:

$$v = \lambda_f RT \quad (6)$$

$$f_k^{eq} = w_k \rho \left[1 + \frac{\bar{c}_k \cdot \bar{V}}{c_s^2} + \frac{(\bar{c}_k \cdot \bar{V})^2}{2c_s^4} - \frac{\bar{V} \cdot \bar{V}}{2c_s^2} \right] \quad (7)$$

که در آن‌ها v, R و T به ترتیب بیانگر لزجت سینماتیکی در شبکه بولتزمن، ثابت گازها و دما می‌باشند. پس از محاسبه تابع توزیع چگالی از معادله (۵)، کمیات ماکروسکوپیک جریان از جمله چگالی (ρ) و سرعت (\bar{V}) از روابط زیر استخراج می‌گردند:

$$\rho = \sum_{k=0}^8 \bar{f}_k \quad (8)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{\rho} \sum_{k=0}^8 \bar{c}_k \bar{f}_k + 0.5 \bar{G} \Delta t \quad (9)$$

معادلات شبکه بولتزمن حرارتی [۱۴]:

$$\frac{\partial g_k}{\partial t} + \bar{c}_k \cdot \bar{\nabla}_r g_k = -\frac{1}{\lambda_g} (g_k - g_k^{eq}) - f_k q_k \quad (10)$$

در معادله فوق، g_k تابع توزیع انرژی داخلی بوده و λ_g, q_k و g_k^{eq} به‌عنوان تلفات گرمایی لزج، زمان آرامش حرارتی و تابع توزیع تعادل انرژی داخلی، به ترتیب از روابط (۱۱) الی (۱۳) حاصل می‌گردند:

$$q_k = (\bar{c}_k - \bar{V}) \cdot \left[\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{c}_k \cdot \bar{\nabla}_r) \bar{V} \right] \quad (11)$$

$$\alpha = 2\lambda_g RT \quad (12)$$

$$g_k^{eq} = -\frac{2}{3} \rho e \left[\frac{\bar{V} \cdot \bar{V}}{c^2} \right] \quad k = 0$$

$$g_k^{eq} = \frac{\rho e}{9} \left[1.5 + 1.5 \frac{\bar{c}_k \cdot \bar{V}}{c^2} + 4.5 \frac{(\bar{c}_k \cdot \bar{V})^2}{c^4} - 1.5 \frac{\bar{V} \cdot \bar{V}}{c^2} \right] \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

$$g_k^{eq} = \frac{\rho e}{36} \left[3 + 6 \frac{\bar{c}_k \cdot \bar{V}}{c^2} + 4.5 \frac{(\bar{c}_k \cdot \bar{V})^2}{c^4} - 1.5 \frac{\bar{V} \cdot \bar{V}}{c^2} \right] \quad k = 5, 6, 7, 8$$

که در آن‌ها، α ضریب نفوذ گرمایی و e انرژی داخلی مخصوص است که پس از محاسبه آن از رابطه (۱۴) و نظر به معلوم بودن تابع توزیع انرژی داخلی از معادله (۱۰)، کمیت دما از معادله (۱۵) بدست می‌آید:

$$\rho e = \sum_{k=0}^8 \bar{g}_k - 0.5 \Delta t \sum_{k=0}^8 f_k q_k \quad (14)$$

$$T = \frac{e}{R} \quad (15)$$

لازم به ذکر است؛ در معادلات ارائه شده، \bar{f} و \bar{g} معرف توابع توزیع چگالی و انرژی داخلی اصلاح شده هستند که به جهت خارج نمودن معادلات (۵) و (۱۰) پس از گسسته‌سازی از حالت ضمنی، مطابق زیر تعریف می‌شوند [۱۴]:

$$\bar{f}_k = f_k + \frac{\Delta t}{2\lambda_f} (f_k - f_k^{eq}) - \frac{\Delta t}{2} \left((\vec{G} \cdot (\vec{c}_k - \vec{V})) / c_s^2 \right) f_k^{eq} \quad (16)$$

$$\bar{g}_k = g_k + \frac{\Delta t}{2\lambda_g} (g_k - g_k^{eq}) + \frac{\Delta t}{2} f_k q_k \quad (17)$$

به منظور شبیه‌سازی شرایط مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی دیواره‌های محفظه به روش شبکه بولتزن، به ترتیب از مدل‌های جهش به عقب [۱۵] و مدل به کار رفته در مراجع [۱۳، ۱۶] بر مبنای اعمال رویکرد لغزش معکوس به انرژی داخلی و جهت اعمال شرایط مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی سیلندر استوانه‌ای از مدل مرز منحنی مبتنی بر برون‌یابی غیرتعدالی [۱۷] استفاده شده است. مدل‌های پتل [۱۸] و برینکمن [۱۹] نیز بر مبنای رویکرد تک‌فاز (همگن) به ترتیب برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی و لزجت نانوسیال آب-مس مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

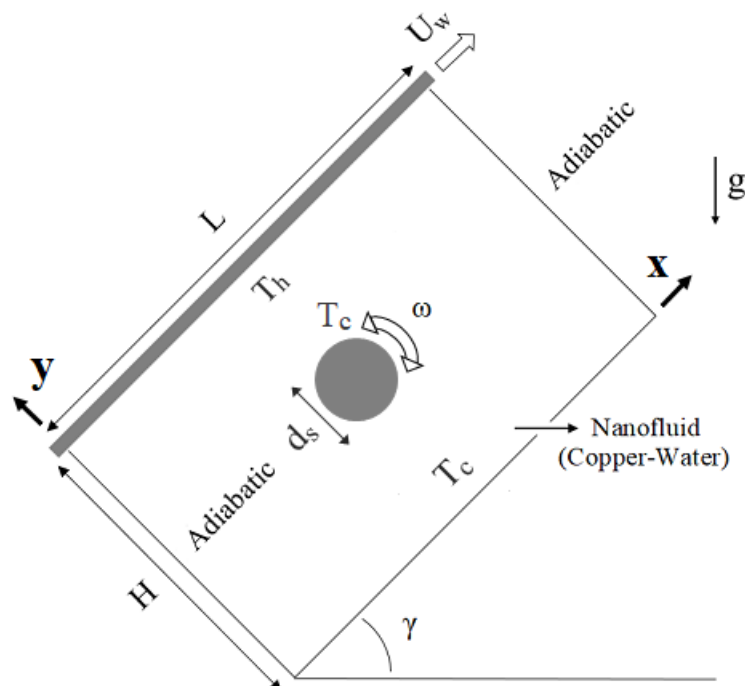
لازم به توضیح است؛ شبکه بولتزن به عنوان یک دیدگاه مستقل نسبت به دیدگاه مکانیک سیالات کلاسیک، دارای واحدهای اختصاصی خود برای کمیت‌ها می‌باشد این واحدها عبارتند از: طول (*lattice unit*)، جرم (*mass unit*)، زمان (*time step*) و دما (*temperature unit*). بدیهی است؛ واحد تمام کمیات دیگر از طریق کمیات اصلی بیان شده ساخته می‌شود. به عنوان مثال واحد فشار و سرعت در شبکه بولتزن به ترتیب $mu/(lu \cdot ts)^2$ و lu/ts است.

به دلیل این که تبدیل واحد بین آحاد شبکه بولتزن و آحاد فیزیکی رایج نیست، غالباً شبکه بولتزن به شکل بی بعد فرمول بندی شده و نیز استخراج نتایج آن به صورت بی بعد انجام می‌گیرد. از این رو مقایسه نتایج بین دو دیدگاه در حالت بی بعد صورت خواهد گرفت. این بی بعدسازی به سبب مقادیر مرجع شبکه بولتزن (طول، سرعت و چگالی مرجع) انجام می‌شود. بنابراین تمامی کمیات و روابط مربوط به شبکه بولتزن در پژوهش حاضر یا ماهیتاً بی بعد بوده یا با استفاده از مقادیر مرجع ذکر شده بی بعد شده‌اند.

۳. تعریف مسئله

پژوهش حاضر به مطالعه عددی جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال در یک محفظه دوبعدی شیب‌دار با حضور سیلندر استوانه‌ای چرخان به روش شبکه بولتزن حرارتی می‌پردازد. شکل ۱، یک محفظه دوبعدی مستطیلی با نسبت ابعادی $AR_H = L/H = 2$ را نشان می‌دهد که به صورت مایل قرار گرفته و درپوش بالایی آن با سرعت ثابت U_w

حرکت می‌کند. محفظه از نانوسیال آب-مس در دمای 300 K تحت خواص حرارتی-فیزیکی گزارش شده در جدول ۱ پر شده است و شامل یک سیلندر استوانه‌ای چرخان در مرکز $(0.5L, 0.5H)$ به قطر پیش فرض $d_s = H/6$ و سرعت خطی $V_r = U_w$ می‌باشد که به صورت پادساعتگرد در حال دوران است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد؛ درپوش محفظه، داغ، دیواره پایین و سیلندر، سرد و دیواره‌های جانبی عایق هستند. مطابق شکل، حرکت درپوش در حضور میدان گرانش، منجر به ایجاد جریان جابه‌جایی ترکیبی در محفظه می‌شود. از آن‌جا که مسئله حاکم در عدد رینولدز $Re = 100$ شبیه‌سازی خواهد شد، تغییرات عدد ریچاردسون به‌عنوان معیار کنترل سهم جابه‌جایی اجباری و آزاد ($Ri = Gr/Re^2$)، صرفاً منجر به تغییر عدد گراش (Gr) شده و بدین صورت سهم جابه‌جایی اجباری و آزاد کنترل می‌گردد.



شکل ۱- طرح شماتیک یک محفظه شیب‌دار با درپوش متحرک در حضور سیلندر استوانه‌ای چرخان

جدول ۱- خواص حرارتی-فیزیکی آب و مس در دمای 300 کلوین [۲۰]

	$\rho (\text{kg/m}^3)$	$C_p (\text{J/kg}\cdot\text{K})$	$k (\text{W/m}\cdot\text{K})$	$\mu (\text{kg/m}\cdot\text{s})$	$d (\text{m})$
Water	997.1	4179	0.613	855×10^{-6}	0.275×10^{-9}
Copper (Cu)	8933	385	401	-	100×10^{-9}

پارامترهای مورد بررسی در نرخ انتقال حرارت از این محفظه عبارتند از:

- تغییر عدد ریچاردسون در بازه $0.1 \leq Ri \leq 10$
- تغییر زاویه شیب محفظه در بازه $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$
- افزودن نانوذره (مس) به سیال پایه (آب) در کسرهای حجمی مختلف محدود به $0 \leq \phi \leq 0.05$
- تاثیر حضور سیلندر در وضعیت ساکن و متحرک و نیز تغییر جهت چرخش، قطر و مکان سیلندر

۴. استقلال از شبکه

جهت بررسی استقلال شبیه‌سازی صورت‌گرفته از شبکه گره‌ای، محفظه مورد مطالعه (شکل ۱) در حالت افقی، بدون سیلندر و حاوی آب خالص (بر اساس اطلاعات جدول ۱)، به ازای $Ri = 0.1$ (همرفت اجباری) مدل می‌شود. در جدول ۲، نتایج حاصل از مدل‌سازی مذکور در قالب سرعت و دمای بی‌بعد مرکز محفظه و نیز عدد ناسلت میانگین در پوش برای چهار شبکه 500×250 ، 560×280 ، 600×300 و 640×320 ارائه شده‌است.

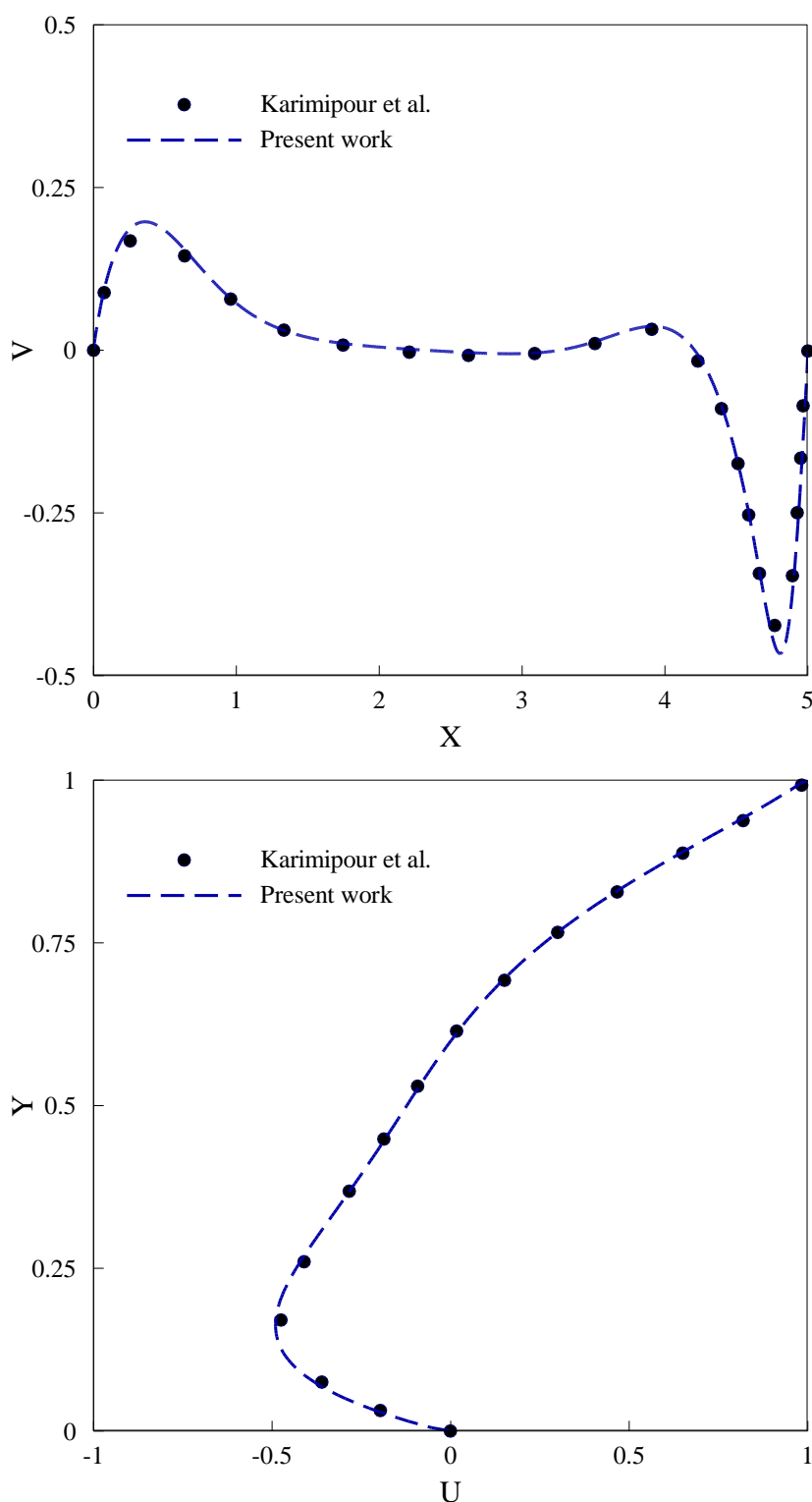
جدول ۲- مقایسه سرعت و دمای بی‌بعد در مرکز محفظه و ناسلت میانگین در پوش
به ازای شبکه‌های مختلف در $\gamma = 0$ ، $\phi = 0$ ، $Ri = 0.1$ و $Re = 100$

	Grid size			
	500×250	560×280	600×300	640×320
U	-0.195	-0.196	-0.196	-0.196
V	0.164	0.164	0.164	0.164
T	0.985	0.981	0.979	0.976
Nu_m	2.763	2.861	2.923	2.981

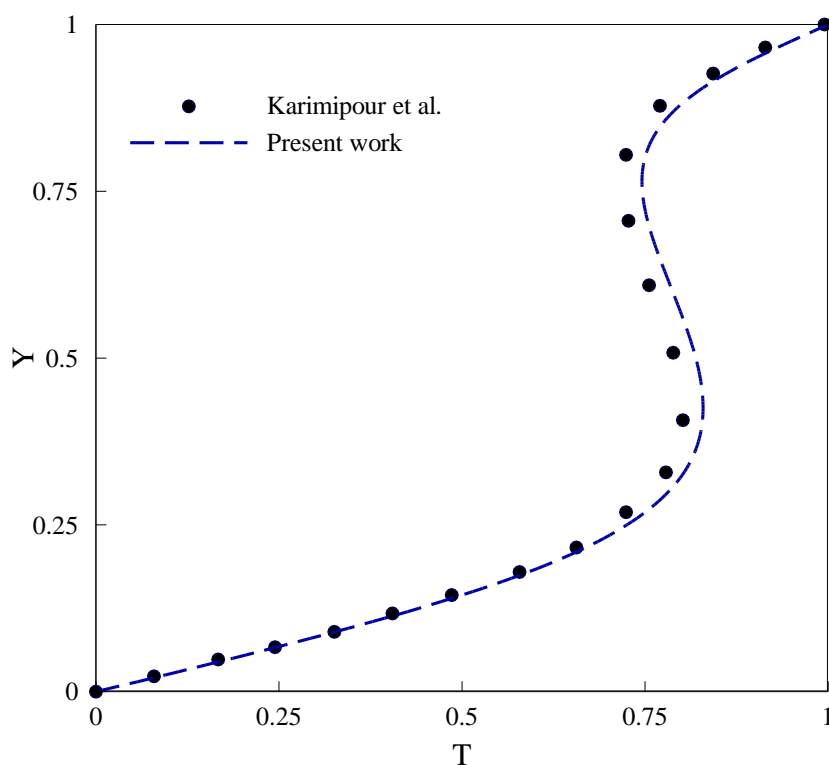
با توجه به جدول ۲، نتایج حاصل از دو شبکه 600×300 و 640×320 دارای اختلاف بسیار جزئی با یکدیگر هستند. لذا به منظور حل تعداد معادلات کمتر و کاهش زمان محاسبات، شبکه 600×300 به‌عنوان شبکه مناسب برای پژوهش حاضر انتخاب می‌شود.

۵. اعتبارسنجی

به منظور ارزیابی صحت عملکرد برنامه رایانه‌ای تهیه‌شده، یک مسئله به‌طور نمونه شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن با نتایج پژوهش سایر محققین مقایسه شده‌است. مسئله جهت اعتبارسنجی تحقیق حاضر، بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال در یک محفظه مستطیلی شیب‌دار با نسبت ابعادی $AR_H = L/H = 5$ به روش شبکه بولتزمن می‌باشد که توسط کریمی‌پور و همکاران [۱۳] مطالعه شده‌است. در این شبیه‌سازی، درپوش متحرک فوقانی، داغ، دیواره پایین، سرد و سایر دیواره‌ها عایق هستند. قطر نانوذرات نیز ۱۰ نانومتر در نظر گرفته شده‌است. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب نمودار سرعت و دمای بی‌بعد در خطوط مرکزی محفظه را برای نانوسیال آب-مس با کسر حجمی $\phi = 0.04$ تحت شرایط $Re = 100$ و $Ri = 1$ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ نتایج با دقت مطلوبی بر یکدیگر منطبق هستند.



شکل ۲- مقایسه نمودار سرعت افقی و عمودی بی بعد در خطوط مرکزی $X = 2.5$ و $Y = 0.5$ از یک محفظه مستطیلی با نتایج کریمی پور و همکاران [۱۳] به ازای $Re = 100$, $Ri = 1$, $\phi = 0.04$ و $\gamma = 60^\circ$



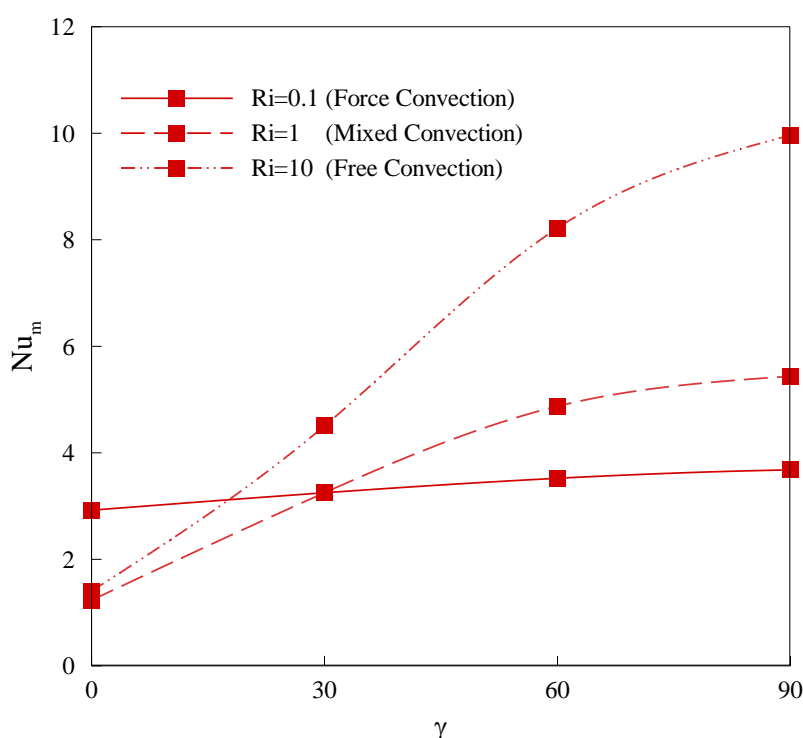
شکل ۳- مقایسه نمودار دمای بی بعد در خط مرکزی عمودی $X = 2.5$ از یک محفظه مستطیلی با نتایج کریمی پور و همکاران [۱۳] به ازای $Re = 100$, $Ri = 1$, $\gamma = 60^\circ$ و $\phi = 0.04$

۶. نتایج و بحث

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه سازی ارائه می شود و مورد بحث و ارزیابی قرار می گیرد. بدین منظور ابتدا اثر تغییر عدد ریچاردسون تحت مقادیر $Ri = 0.1$, $Ri = 1$ و $Ri = 10$ به ترتیب برای جابه جایی اجباری، آزاد و ترکیبی، زاویه شیب محفظه تحت مقادیر $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ و نیز غلظت نانوذرات در سه کسر حجمی $\phi = 0$ (آب خالص)، $\phi = 0.03$ و $\phi = 0.05$ بر نرخ انتقال حرارت جابه جایی بررسی می گردد. سپس در یک زاویه شیب و کسر حجمی ثابت ($\phi = 0.05$ و $\gamma = 60^\circ$)، تاثیر پارامترهای مختلف سیلندر استوانه ای بر نرخ انتقال گرما به ازای مقادیر ذکر شده برای عدد ریچاردسون مورد مطالعه قرار می گیرد. این پارامترها عبارتند از:

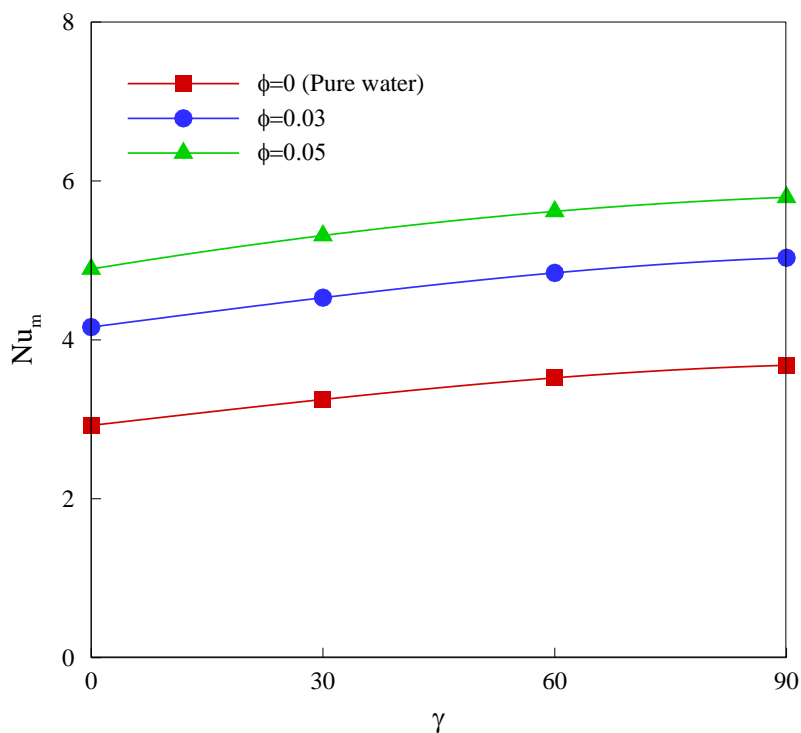
- حالت متحرک (پیش فرض) و ساکن سیلندر ($V_r = U_w, V_r = 0$)
- جهت چرخش (از حالت مفروض پادساعتگرد به ساعتگرد)
- افزایش قطر سیلندر از مقدار مفروض $d_s = H/6$ تا $d_s = H/4$ و کاهش آن تا $d_s = H/8$
- تغییر مکان سیلندر از موقعیت پیش فرض مرکزی ($X = 1, Y = 0.5$) تا نزدیک درپوش و دیواره پایین

در شکل ۴ نمودار عدد ناسلت میانگین درپوش محفظه برحسب زاویه شیب برای هر سه رژیم انتقال حرارت جابه‌جایی رسم شده‌است. با توجه به نمودار، صرف‌نظر از نوع جابه‌جایی حاکم، با زیاد شدن γ عدد ناسلت افزایش می‌یابد؛ اما شیب این تغییرات در رژیم‌های مختلف متفاوت است. در جابه‌جایی اجباری جریان به‌وجود آمده تنها در اثر تنش برشی ناشی از حرکت درپوش محفظه بوده و تغییرات زاویه شیب محفظه اثر چشمگیری بر توزیع سرعت و دما ندارد. بنابراین مطابق نمودار، افزایش شیب محفظه تاثیر بسیار کمی بر بهبود عدد ناسلت و نرخ انتقال حرارت دارد. در حالی که با رشد عدد Ri و به دنبال آن عدد گراشف و در نتیجه افزایش سهم نیروی‌های شناوری و جابه‌جایی طبیعی، تغییرات عدد ناسلت با γ قابل ملاحظه می‌شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت؛ هر چه Ri بیشتر باشد، افزایش γ تاثیر بیشتری در بهبود Nu_m دارد.

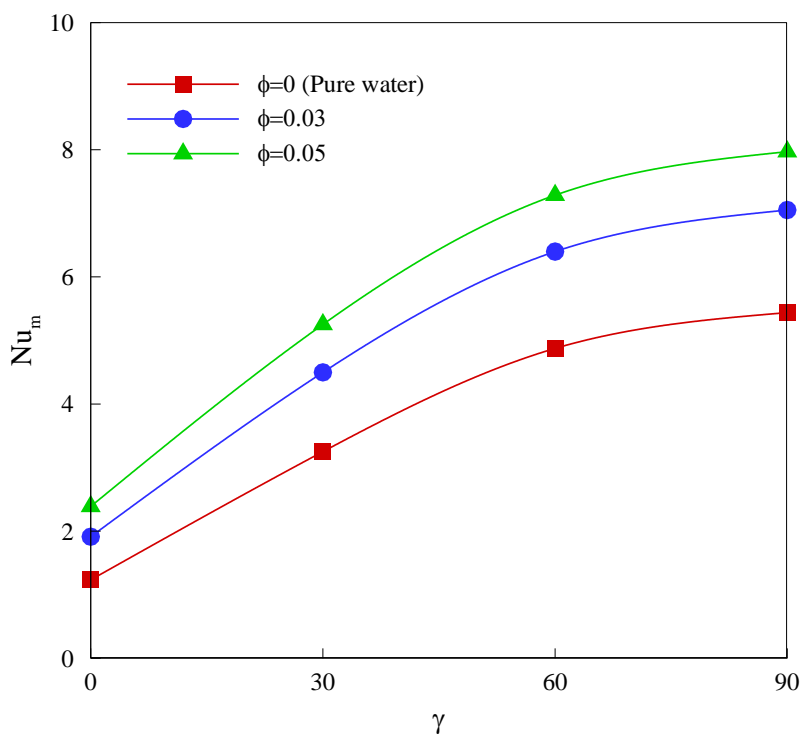


شکل ۴ - نمودار عدد ناسلت میانگین درپوش برحسب زاویه شیب در $\phi = 0$ و مقادیر مختلف Ri

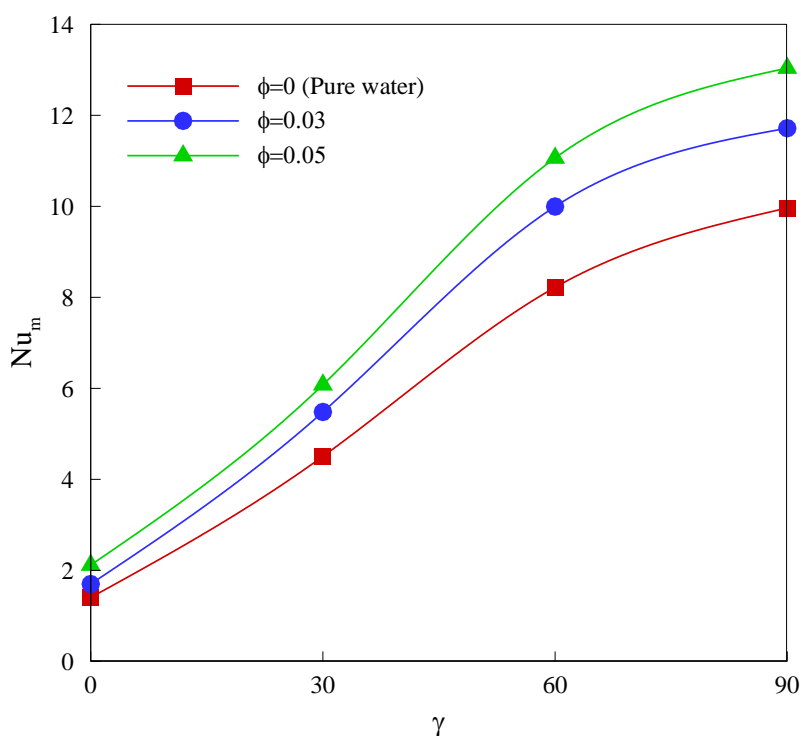
شکل‌های ۵ الی ۷ نمودار Nu_m برحسب γ را برای آب خالص و نانوسیال آب-مس در غلظت‌های مختلف تحت نشان $Ri = 0.1, 1, 10$ نشان می‌دهند. در این نمودارها تاثیر افزودن نانوذره به سیال در بهبود عدد ناسلت و نرخ انتقال گرما به خوبی نمایان است. به‌طوری‌که افزایش کسر حجمی نانوذرات منجر به افزایش حرکت براونی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و به دنبال آن بهبود عدد ناسلت می‌گردد. به‌عنوان مثال در جابه‌جایی اجباری مطابق شکل ۵، با افزایش کسر حجمی نانوذره مس از $\phi = 0$ به $\phi = 5\%$ ، مقدار عدد ناسلت میانگین به ازای جمیع زوایای شیب محفظه از وضعیت افقی تا قائم، بیش از ۵۵ درصد زیاد می‌شود. نکته قابل توجه این‌که هر چه γ زیادتر شود، تاثیر افزایش کسر حجمی مس بر بهبود Nu_m و نرخ انتقال حرارت بیشتر می‌شود؛ به بیان دیگر هر چه شیب محفظه بیشتر باشد، افزایش غلظت نانوذرات تاثیر بیشتری در بهبود عدد ناسلت دارد. این مسئله در اعداد ریچاردسون بالا ($Ri = 1, 10$) محسوس‌تر است.



شکل ۵ - نمودار عدد ناسلت میانگین در پوش بر حسب زاویه شیب در $Ri = 0.1$ و مقادیر مختلف ϕ



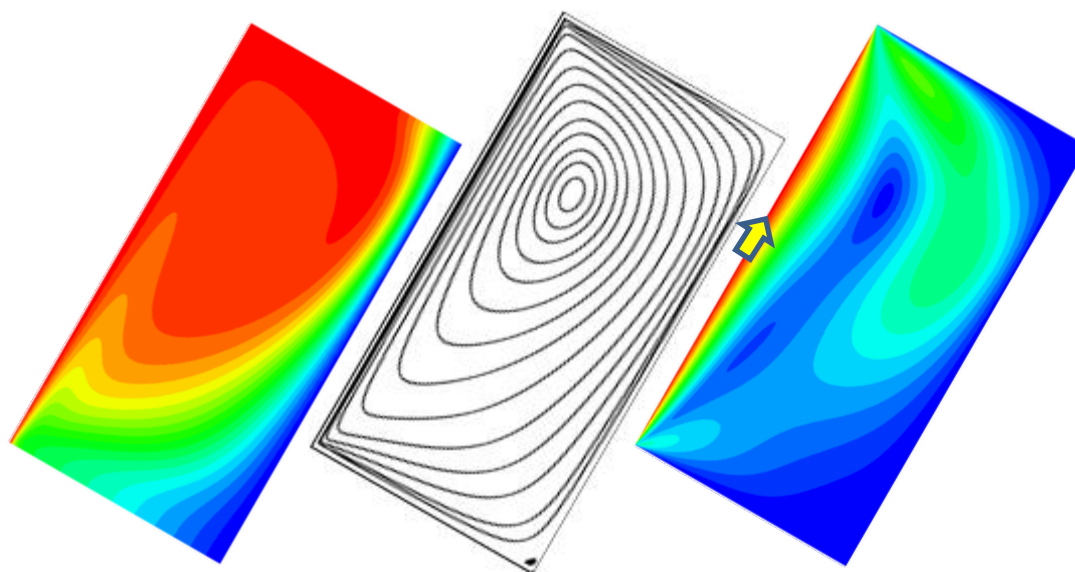
شکل ۶ - نمودار عدد ناسلت میانگین در پوش بر حسب زاویه شیب در $Ri = 1.0$ و مقادیر مختلف ϕ



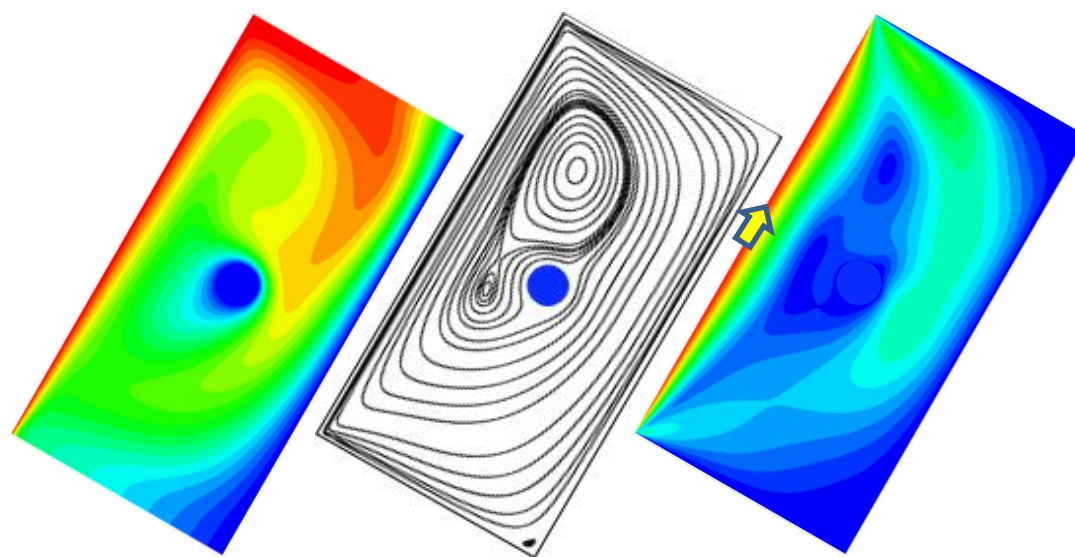
شکل ۷ - نمودار عدد ناسلت میانگین درپوش بر حسب زاویه شیب در $Ri = 10$ و مقادیر مختلف ϕ

شکل ۸ خطوط جریان و نیز توزیع سرعت و دمای بی‌بعد جریان داخل محفظه را برای حالت فاقد سیلندر (شکل (a)) و حاوی سیلندر ساکن مرکزی به قطر پیش فرض $d_s = H/6$ (شکل (b)) در $\gamma = 60^\circ$ و $\phi = 0.05$ نشان می‌دهد. با توجه به حاکمیت جابه‌جایی اجباری و مطابق کانتور سرعت، در هر دو حالت، جریان به‌وجود آمده تنها در اثر تنش برشی ناشی از حرکت درپوش محفظه می‌باشد. بنابراین سرعت جریان در مجاورت درپوش از سایر نقاط بیشتر است. با حرکت درپوش داغ به‌طرف دیواره جانبی راست همان‌طور که در کانتورهای دما مشاهده می‌شود؛ لایه‌های نانوسیال مجاور با درپوش گرم شده و پس از برخورد با دیواره راست، با یک سرعت کندشونده به‌طرف پایین و به‌سوی مرکز محفظه حرکت می‌کنند. این حرکت سبب تشکیل یک جریان چرخشی ساعتگرد بزرگ در طرف راست محفظه با تراکم بالای خطوط جریان و به دنبال آن انتقال حرارت به بخش قابل توجهی از محفظه خواهد شد. به‌طوری که همه فضای محفظه را در برگرفته و با حرکت به‌طرف چپ به تدریج از سرعت و تراکم خطوط آن کاسته می‌شود. تا آن‌جا که در هر دو مورد (a) و (b) در همسایگی مرز پایین به‌خصوص در گوشه‌ها، لایه‌های سیال تاثیر چندانی از حرکت درپوش نپذیرفته و سرعت جریان در این مناطق بسیار کم است.

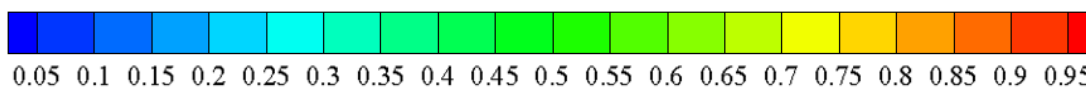
در شکل (b) تغییرات شدید دما در محل درپوش و دیوار پایین بیانگر ضخامت ناچیز لایه مرزی گرمایی در مجاورت مرز بالا و پایین می‌باشد. در این شکل علاوه بر حلقه ساعتگرد ناشی از حرکت درپوش، وجود سیلندر موجب تغییر الگوی جریان و تشکیل دو جریان چرخان ساعتگرد با اندازه‌های مختلف در نیمه بالایی سیلندر می‌گردد. در این حالت جریان نانوسیال اطراف سیلندر و بخش اعظمی از محفظه متأثر از دمای سرد سیلندر شده و در نتیجه اختلاف دمای بین درپوش و حوزه جریان در مقایسه با شکل (a) بیشتر است. همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو مورد، لایه‌های نانوسیال مجاور دیوار تحتانی و نیمه پایینی مرز چپ، تحت تاثیر دیواره سرد پایین قرار گرفته و دمای کمتری نسبت به سایر نواحی دارند.



(a) Clear Cavity



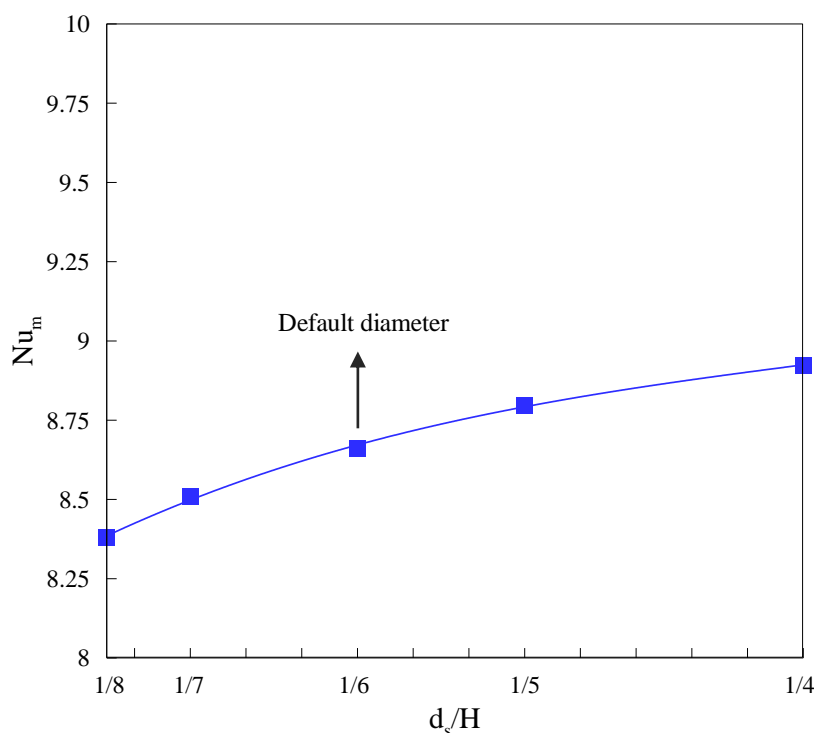
(b) Stationary Cylinder



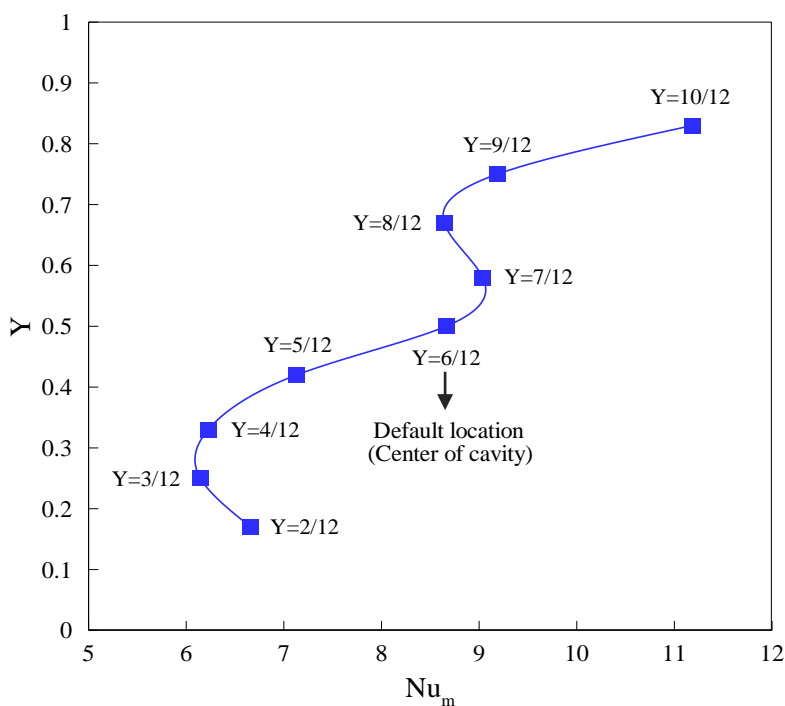
شکل ۸ - توزیع سرعت (راست)، خطوط جریان (وسط) و توزیع دمای بی بعد (چپ) نانوسیال برای محفظه مایل در حالت بدون سیلندر (a) و حاوی سیلندر ساکن (b) به ازای $Ri = 0.1$ ، $\gamma = 60^\circ$ و $\phi = 0.05$

در شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت میانگین برحسب نسبت قطر سیلندر چرخان در مرکز به عرض محفظه (d_s/H) تحت شرایط $Ri = 0.1$ ، $\gamma = 60^\circ$ و $\phi = 0.05$ مشاهده می‌گردد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت؛ افزایش قطر سیلندر موجب بهبود عدد ناسلت و نرخ انتقال گرما می‌شود، زیرا هر چه قطر سیلندر زیادتر شود، تاثیر آن بر الگوی جریان بیشتر خواهد بود. همچنین در شکل ۱۰ و در شرایطی مشابه، نمودار عدد ناسلت متوسط برحسب موقعیت قرارگیری سیلندر چرخان (Y) به قطر پیش فرض $d_s = H/6$ آورده شده‌است. مطابق این نمودار، با تغییر مختصات مکانی سیلندر بر روی خط مرکزی عمودی $X = 1$ ، تغییرات عدد ناسلت از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. با این حال می‌توان نتیجه گرفت؛ هنگامی که سیلندر در نیمه بالایی محفظه قرار دارد، نرخ انتقال حرارت از محفظه به نسبت نیمه پایینی بیشتر است؛ به طوری که بیشترین میزان Nu_m در مجاورت درپوش یعنی $Y = 10/12$ حاصل می‌گردد.

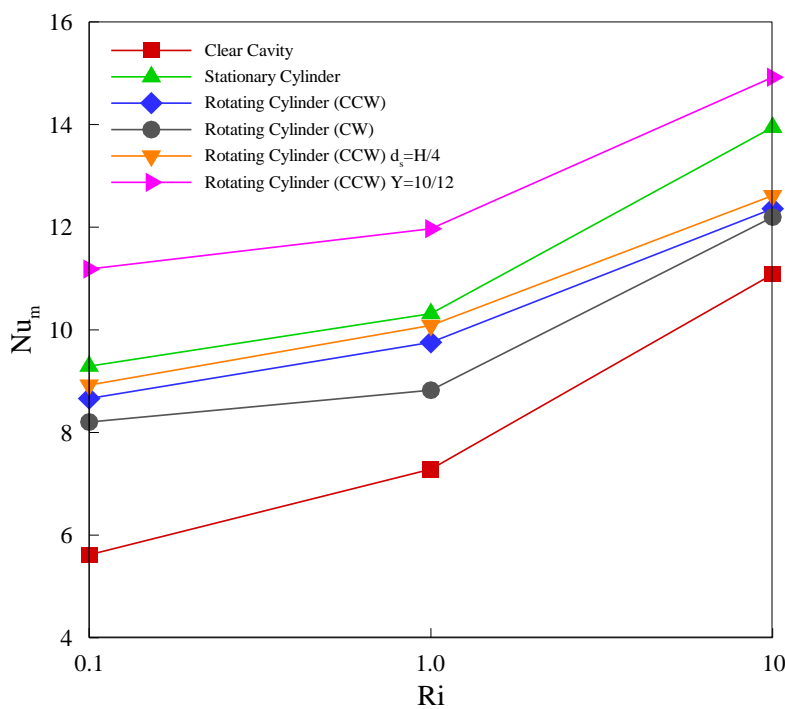
در شکل ۱۱ نمودار عدد ناسلت متوسط درپوش برحسب عدد ریچاردسون برای محفظه بدون سیلندر (نمودار قرمز) و محفظه حاوی سیلندر به ازای حالات مختلف در زاویه شیب و غلظت مفروض ($\phi = 0.05$ و $\gamma = 60^\circ$) رسم شده‌است. پیش از هر چیز ذکر این نکته حائز اهمیت است که تغییرات عدد ناسلت متأثر از پارامتری است که حاکمیت کل حوزه را از منظر تغییر الگوی جریان و توزیع دما در اختیار دارد. از آنجا که در مسئله مورد بررسی سرعت خطی سیلندر و درپوش یکسان می‌باشد، لذا در محفظه حاوی سیلندر چرخان، سهم هر دو عامل ایجاد جابه‌جایی اجباری (حرکت درپوش و سیلندر) در تعیین مقدار عدد ناسلت مساوی است.



شکل ۹ - تغییرات عدد ناسلت میانگین درپوش برحسب نسبت قطر سیلندر چرخان در مرکز به عرض محفظه (d_s/H) در $Ri = 0.1$ ، $\gamma = 60^\circ$ و $\phi = 0.05$



شکل ۱۰ - تغییرات عدد ناسلت میانگین در پوش بر حسب موقعیت قرارگیری سیلندر چرخان بر روی خط مرکزی عمودی $X = 1$ در $Ri = 0.1$ ، $\phi = 0.05$ و $\gamma = 60^\circ$



شکل ۱۱ - نمودار عدد ناسلت میانگین در پوش بر حسب عدد ریچاردسون برای محفظه بدون سیلندر و محفظه حاوی سیلندر در شرایط مختلف به ازای $\phi = 0.05$ و $\gamma = 60^\circ$

ششمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و هوافضا

همان‌طور که مشاهده می‌گردد؛ در تمام وضعیت‌های مختلف سیلندر در داخل محفظه و نیز محفظه فاقد سیلندر، با رشد عدد Ri و به عبارتی افزایش سهم جابه‌جایی طبیعی، مقدار عدد ناسلت میانگین درپوش زیاد می‌شود. اما میزان شیب این تغییرات در هر مورد متفاوت است. در بازه $0.1 \leq Ri \leq 1$ بیشترین شیب تغییرات عدد ناسلت مربوط به محفظه بدون مانع (نمودار قرمز) و کمترین شیب مربوط به محفظه حاوی سیلندر چرخان در مرکز با چرخش ساعتگرد (نمودار خاکستری) است. برای سایر حالات، شدت تغییرات Nu_m در بازه فوق یکسان می‌باشد.

در محدوده $1 \leq Ri \leq 10$ برای هر شش وضعیت، شیب تغییرات نسبت به بازه قبل افزایش یافته‌است، به‌طوری‌که همچنان محفظه بدون سیلندر دارای بیشترین تغییر می‌باشد. در این محدوده برای محفظه حاوی سیلندر چرخان در مرکز با دوران پادساعتگرد (نمودار آبی) و محفظه حاوی سیلندر چرخان پادساعتگرد با قطر $d_s = H/4$ نسبت به حالت مفروض $d_s = H/6$ (نمودار نارنجی)، عدد ناسلت دارای کمترین میزان تغییرات است. سه مورد دیگر نیز وضعیتی مشابه یکدیگر داشته و شیب تغییرات آن‌ها در این بازه تقریباً با هم برابر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در رژیم جریان جابه‌جایی طبیعی ($Ri > 1$) وجود سیلندر استوانه‌ای در محفظه شیب‌دار و تغییر پارامترهای مختلف آن از جمله: حالت ساکن و متحرک، جهت چرخش، قطر و مکان، تاثیر بیشتری بر افزایش عدد ناسلت میانگین و بهبود نرخ انتقال گرما در مقایسه با جابه‌جایی اجباری ($Ri < 1$) دارد.

علاوه بر این با توجه به شکل می‌توان چنین نتیجه گرفت؛ در هر سه مقدار $Ri = 0.1, 1, 10$ ، فارغ از وضعیت‌های مختلف سیلندر از منظر تغییر جهت چرخش (نمودارهای آبی و خاکستری)، افزایش قطر (نمودار نارنجی) و تغییر موقعیت قرارگیری (نمودار صورتی)، افزودن سیلندر استوانه‌ای به محفظه مایل موجب افزایش محسوس عدد ناسلت متوسط درپوش و در نتیجه بهبود چشمگیر انتقال گرما در مقایسه با محفظه بدون سیلندر (نمودار قرمز) می‌شود. مثلاً برای $Ri = 0.1$ ، با قرار دادن سیلندر ساکن در مرکز محفظه به قطر پیش‌فرض $d_s = H/6$ (نمودار سبز)، مقدار عدد ناسلت متوسط در مقایسه با عدد ناسلت محفظه بدون سیلندر (نمودار قرمز)، به‌دلیل تغییر الگوی جریان، به میزان ۶۵٫۵ درصد بهبود یافته و افزایش محسوس نرخ انتقال گرما را به دنبال دارد. این در حالی است که با چرخش سیلندر در مرکز محفظه به‌صورت پادساعتگرد (نمودار آبی)، مقدار عدد ناسلت نسبت به سیلندر ساکن (نمودار سبز) ۶٫۸ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین برخلاف آن‌چه انتظار می‌رود، چرخش سیلندر منجر به کاهش عدد ناسلت و نرخ انتقال گرما می‌گردد. دلیل این امر ممکن است به دمای سرد سیلندر مرتبط باشد. گفتنی است؛ این مقدار کاهش، در چرخش ساعتگرد (نمودار خاکستری) بیشتر و برابر ۱۱٫۷ درصد است. به‌عبارت دیگر در چرخش پادساعتگرد، مقدار Nu_m دریافتی نسبت به حالت ساعتگرد بیشتر است. افزایش قطر سیلندر به میزان ۵۰ درصد از مقدار مفروض $d_s = H/6$ به $d_s = H/4$ (نمودارهای آبی و نارنجی) موجب بهبود ناچیز عدد ناسلت به اندازه ۳ درصد خواهد شد. اما تغییرات ناسلت با تغییر موقعیت قرارگیری سیلندر قابل ملاحظه است؛ به‌طوری‌که با تغییر مکان سیلندر از مرکز محفظه ($X = 1, Y = 0.5$) به نقطه ($X = 1, Y = 10/12$) و قرارگیری آن در مجاورت درپوش (نمودارهای آبی و صورتی)، عدد ناسلت میانگین به میزان ۲۹٫۱ درصد افزایش خواهد یافت. برای $Ri = 1$ و $Ri = 10$ نیز با توجه به شکل ۱۱، تحلیل کیفی نتایج مشابه $Ri = 0.1$ است؛ با این تفاوت که در هر کدام از این اعداد، درصد افزایش یا کاهش عدد ناسلت برای وضعیت‌های مختلف سیلندر فرق دارد.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تحت عدد رینولدز $Re = 100$ ، تاثیر عوامل مختلفی از قبیل: تغییر زاویه شیب، افزودن نانوذره به سیال و وجود مانع در شرایط مختلف، بر نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی از یک محفظه دوبعدی مستطیلی به نسبت ابعادی $AR_H = L/H = 2$ با درپوش متحرک به روش شبکه بولتزمن حرارتی بررسی شد. مهم‌ترین دستاوردهای حاصل از شبیه‌سازی صورت‌گرفته به شرح زیر است:

- (۱) هر چه زاویه شیب محفظه زیادتر شود، تاثیر افزایش کسر حجمی مس بر بهبود عدد ناسلت و نرخ انتقال حرارت بیشتر می‌شود؛ به بیان دیگر هر چه شیب محفظه بیشتر باشد، افزایش غلظت تاثیر بیشتری در بهبود عدد ناسلت دارد. این مسئله در اعداد ریچاردسون بالا ($Ri = 1, 10$) محسوس‌تر است. بنابراین بیشترین نرخ انتقال حرارت برای محفظه بدون سیلندر، در بالاترین مقادیر عدد ریچاردسون، زاویه شیب و غلظت نانوذرات ($\phi = 5\%$ ، $\gamma = 90^\circ$ ، $Ri = 10$) حاصل خواهد شد.
- (۲) فارغ از مقدار Ri ، افزودن سیلندر استوانه‌ای به محفظه مایل تحت هر وضعیتی برای سیلندر، موجب بهبود چشمگیر Nu_m و نرخ انتقال حرارت نسبت به محفظه فاقد سیلندر می‌شود. به‌عنوان مثال در $Ri = 0.1$ با قرارگیری سیلندر ساکن به قطر $d_s = H/6$ در مرکز محفظه، نرخ انتقال گرما ۶۵٫۵ درصد افزایش می‌یابد.
- (۳) برخلاف انتظار، نرخ انتقال حرارت از محفظه در حالت سیلندر چرخان نسبت به سیلندر ساکن کمتر است.
- (۴) نظر به حرکت درپوش محفظه در جهت مثبت، با تغییر جهت چرخش سیلندر از حالت پیش‌فرض پادساعتگرد به ساعتگرد، نرخ انتقال گرما کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر در صورتی که حرکت درپوش و سیلندر در خلاف جهت هم باشد، به‌دلیل تغییر الگوی جریان، مقدار Nu_m دریافتی نسبت به حالت هم جهت بیشتر است.
- (۵) افزایش قطر سیلندر چرخان منجر به افزایش عدد ناسلت و نرخ انتقال گرما می‌شود.
- (۶) با قرارگیری سیلندر چرخان در موقعیت‌های مختلف بر روی خط مرکزی عمودی محفظه، بیشترین نرخ انتقال حرارت هنگامی حاصل می‌گردد که سیلندر در نزدیکی درپوش محفظه قرار دارد.

۸. مراجع

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_forced_and_natural_convection
- [2] A. A. A. Al-Rashed, K. Kalidasan, L. Kolsi, R. Velkennedy, A. Aydi, A. K. Hussein and E. H. Malekshah, Mixed convection and entropy generation in a nanofluid filled cubical open cavity with a central isothermal block, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 135, pp. 362-375, 2018.
- [3] F. Selimefendigil and H. F. Öztop, Mixed convection of nanofluids in a three dimensional cavity with two adiabatic inner rotating cylinders, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 117, pp. 331-343, 2018.
- [4] M. Sepyani, A. Shateri and M. Bayareh, Investigating the mixed convection heat transfer of a nanofluid in a square chamber with a rotating blade, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 135, No. 1, pp. 609-623, 2019.
- [5] H. Salahi, M. A. R. Sharif and S. Rasouli, Laminar Mixed Convective Heat Transfer in a Shallow Inclined Lid-Driven Cavity Filled With Nanofluid, *Journal of*

- Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 7, No. 4, 2015.
- [6] K. Khanafer and S. M. Aithal, Laminar mixed convection flow and heat transfer characteristics in a lid driven cavity with a circular cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, pp. 200-209, 2013.
- [7] K. M. Gangawane and S. Gupta, Mixed convection characteristics in rectangular enclosure containing heated elliptical block: Effect of direction of moving wall, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 130, pp. 100-115, 2018.
- [8] A. I. Alsabery, M. A. Sheremet, A. J. Chamkha and I. Hashim, Impact of nonhomogeneous nanofluid model on transient mixed convection in a double lid-driven wavy cavity involving solid circular cylinder, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 150, pp. 637-655, 2019.
- [9] Z. Boulaiah, A. Wakif, A. J. Chamkha and R. Sehaqui, Numerical study of natural and mixed convection in a square cavity filled by a Cu–water nanofluid with circular heating and cooling cylinders, *Mechanics & Industry*, Vol. 18, No. 5, pp. 502, 2017.
- [10] W. Zhou, Y. Yan, X. Liu, H. Chen and B. Liu, Lattice Boltzmann simulation of mixed convection of nanofluid with different heat sources in a double lid-driven cavity, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 97, pp. 39-46, 2018.
- [11] M. Sheikholeslami, M. Gorji-Bandpy and G. Domairry, Free convection of nanofluid filled enclosure using lattice Boltzmann method (LBM), *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 34, No. 7, pp. 833-846, 2013.
- [12] A. D’Orazio, A. Karimipour, A. H. Nezhad and E. Shirani, Lattice Boltzmann method with heat flux boundary condition applied to mixed convection in inclined lid driven cavity, *Meccanica*, Vol. 50, No. 4, pp. 945-962, 2015.
- [13] A. Karimipour, M. Hemmat Esfe, M. R. Safaei, D. Toghraie Semiromi, S. Jafari and S. N. Kazi, Mixed convection of copper–water nanofluid in a shallow inclined lid driven cavity using the lattice Boltzmann method, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 402, pp. 150-168, 2014.
- [14] X. He, S. Chen and G. D. Doolen, A Novel Thermal Model for the Lattice Boltzmann Method in Incompressible Limit, *Journal of Computational Physics*, Vol. 146, No. 1, pp. 282-300, 1998.
- [15] A. A. Mohamad, *Lattice Boltzmann Method; Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes*, 1st ed., Springer-Verlag London, 2011.
- [16] A. D’Orazio and S. Succi, Simulating two-dimensional thermal channel flows by means of a lattice Boltzmann method with new boundary conditions, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 20, No. 6, pp. 935-944, 2004.
- [17] Z. Guo, C. Zheng and B. Shi, An extrapolation method for boundary conditions in lattice Boltzmann method, *Physics of fluids*, Vol. 14, No. 6, pp. 2007-2010, 2002.
- [18] H. E. Patel, T. Sundararajan, T. Pradeep, A. Dasgupta, N. Dasgupta and S. K. Das, A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids, *Pramana*, Vol. 65, No. 5, pp. 863-869, 2005.
- [19] H. C. Brinkman, The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 4, pp. 571-581, 1952.
- [20] T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt and A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 7th ed., John Wiley & Sons, 2011.