



تحلیل عددی جریان و انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه‌ی قطاعی گرم‌شده از کف با استفاده از لایه‌ی متخلخل

فرخ مبادرثانی*، فرداد توکل

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۶

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۷

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۱۵

کلمات کلیدی:

محفظه‌ی دایروی

نانوسیال

لایه‌ی متخلخل

مگنتوهایدرودینامیک

روش دوفازی بونجیورنو

خلاصه: در مقاله‌ی حاضر، جریان آرام و انتقال حرارت نانوسیال $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ آب}$ در یک محفظه‌ی دایروی به صورت عددی و با روش دوفازی بونجیورنو انجام شده است. یک لایه‌ی متخلخل به دیواره‌ی داغ محفظه جاگذاری شده و اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت خارجی موجب ایجاد اثرات مگنتوهایدرودینامیکی در محفظه شده است. تمامی معادلات به صورت بی‌بعد حل شده و توزیع غلظت نانوذررات ارائه شده است. پارامترهای کنترلی در این مطالعه شامل عدد دارسی $10^{-1} \leq \text{Da} \leq 10^{-6}$ زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی $0 \leq \gamma \leq 90$ ، عدد هارتمن $200 \leq \text{Ha} \leq 1000$ ، ضریب انتقال حرارت هدایتی موثر لایه‌ی متخلخل $100 \leq k_{eff} \leq 10$ ، عدد رایلی $10^5 \leq \text{Ra} \leq 10^6$ ، پارامترهای هندسی نظیر ضخامت لایه‌ی متخلخل $0.09 \leq t_{layer} \leq 0.1$ و زاویه‌ی مرکزی محفظه $90 \leq \theta \leq 0$ می‌باشد. نتایج بدست‌آمده از بررسی‌های انجام‌شده به صورت نمودار، کانتور و همچنین خطوط جریان، وابستگی عدد ناسلت به پارامترهای کنترلی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست‌آمده، با تغییر عدد دارسی، عدد ناسلت میانگین تغییر یافته و مقدار مشخصی از عدد دارسی وجود دارد که کمتر از آن مقدار، جاگذاری لایه‌ی متخلخل موجب کاهش انتقال حرارت می‌گردد. با این وجود، با افزایش عدد هارتمن که موجب اعمال نیروی لورنتس می‌شود، عدد ناسلت کاهش خواهد یافت زیرا مومنوم جریان سیال و بنابراین انتقال حرارت جابجایی در داخل محفظه کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

بسته انجام گرفته که به صورت تاریخچه ارائه شده است [۷]. دیویس [۵] جابجایی طبیعی در یک حفره مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی در دو دمای متفاوت و ثابت را به صورت عددی بررسی کرد. در سال ۲۰۰۹، وو و چینگ [۸] جابجایی طبیعی در یک حفره مربعی حاوی هوا با وجود مانع در دیواره‌ی بالایی را بررسی کردند. مطالعات آن‌ها در شرایط عایق‌بودن دیواره‌ی بالایی نشان داد که وجود تیغه باعث بوجود آمدن گردابه و جدایش جریان در پشت مانع می‌شود و شکل جریان گردابه به محل قرارگیری تیغه و دمای دیواره‌ی بالایی بستگی دارد. در سال ۲۰۰۳، شی و خدادادی [۹] انتقال حرارت جابجایی طبیعی را به صورت عددی در یک حفره مربعی با یک تیغه‌ی نازک در دیواره‌ی سمت چپ

انتقال حرارت جابجایی آزاد به واسطه‌ی کاربردهای گسترده‌ی آن در فرآیندهای مهندسی از قبیل خنک‌کاری الکتریکی، تهویه‌ی مطبوع، عایق‌بندی راکتورها، کالکتورهای خورشیدی، سیستم‌های اطفاع حریق، مبدل‌های حرارتی و غیره [۱-۴] مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. مطالعات عددی و تجربی زیادی بر روی کاربردهای مختلف انتقال حرارت جابجایی در حفره انجام گرفته است. در میان این پژوهش‌ها می‌توان به آزمایشات دیویس [۵] و همینطور گیوا و همکاران [۶] اشاره کرد. همچنین مطالعات زیادی در خصوص افزایش انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: f.mobadersani@mee.uut.ac.ir



آن بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که قراردادن تیغه روی دیواره‌ی سمت چپ باعث چرخش گردابه‌ها به صورت ساعتگرد می‌شود و همچنین نرخ جریان در اعداد رایلی بزرگ، بدون توجه به محل قرارگیری تیغه افزایش می‌یابد. سیواسانکاران و کانداسوامی [۱۰] انتقال حرارت جابجایی طبیعی در داخل یک حفره با موانع داغ را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش ارتفاع موانع، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد و همچنین محل قرارگیری موانع تاثیر زیادی بر روی حرکت سیال و عدد ناسلت دارد. پارک و همکاران [۱۱] جابجایی طبیعی جریان آرام را بر روی یک محفظه‌ی بسته‌ی شیب‌دار با یک مانع استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش زاویه‌ی شیب حفره، عدد ناسلت متوسط در امتداد دیواره‌ی بالایی و پایینی حفره به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. پارک و همکاران [۱۲، ۱۳] جابجایی طبیعی در داخل یک حفره مربعی با چند استوانه‌ی دایره‌ی داغ در داخل آن را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها دریافتند که در اعداد رایلی پایین، توزیع خطوط دماتاب و خطوط جریان به میزان زیادی به فاصله‌ی میان استوانه‌ها و دیواره حفره بستگی دارد. وانگ و همکاران [۱۴]، پارک و همکاران [۱۵] و دای و همکاران [۱۶] جابجایی طبیعی در جریان آرام را در یک محفظه‌ی بسته‌ی دو بعدی شامل یک جفت میکرولوله‌ی افقی سرد و داغ بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که محل قرارگیری استوانه‌های سرد و داغ تاثیر زیادی بر روی عدد ناسلت متوسط دارد. چوی و همکاران [۱۷] تاثیر محل قرارگیری استوانه‌ی دایره‌ی در انتقال حرارت جابجایی طبیعی را در یک محفظه‌ی لوزی‌شکل بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با تغییر موقعیت استوانه‌ی داغ از نیمه‌ی پایینی محفظه به نیمه‌ی بالایی، میانگین عدد ناسلت به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان اقدام به استفاده از نانوسیال به عنوان یکی از راه‌های افزایش انتقال حرارت کرده‌اند. نانوسیالات نوعی از سیالات انتقال حرارتی می‌باشند که شامل مقدار اندکی ذره در ابعاد نانو می‌باشند که هدایت گرمایی بالاتری نسبت به سیال پایه دارند. اطلاعات جامعی در مورد رسانایی گرمایی نانوسیال و تاثیر آن بر ویسکوزیته‌ی دینامیکی و افزایش افت فشار ناشی از این ذرات به صورت تاریخچه موجود می‌باشد [۱۸]، [۱۹]. موضوع نانوسیالات بخشی از علم مکانیک سیالات است که در آن به بررسی نمونه‌ای از سیالات انتقال حرارتی که از مخلوط همگن

سیالات شناخته‌شده نظیر آب و اتیلن گلیکول و ذرات با اندازه‌ی نانو به وجود می‌آیند و با توجه به خواص ویژه‌ی این ذرات نظیر رسانایی حرارتی بالا و خاصیت فرومغناطیس، این سیالات خواص منحصر به فردی دارند که منجر به استفاده از آن‌ها در کاربردهای متنوع از قبیل کاربردهای مهندسی عمران، مکانیکی و شیمیایی، دستگاه‌های ذخیره سازی انرژی حرارتی، مبدل‌های حرارتی، سیستم‌های آب زیرزمینی، خنک‌کننده الکترونیکی، دیگ‌های بخار، تلفات گرما از لوله، استخراج نفت خام، و غیره شده است. همچنین لازم به ذکر است که برخی از سیالات در طبیعت مانند خون که دارای گلبول‌های قرمز حاوی آهن می‌باشند و رفتار مغناطیسی از خود نشان می‌دهند نیز به عنوان فروسیال بیولوژیکی شناخته می‌شوند. رفتار این دسته از سیال‌ها در حضور میدان مغناطیسی امروزه توجه زیادی را به خود جلب کرده و تحقیقات قابل توجهی روی آن‌ها صورت گرفته است [۲۰-۲۴]. بلجین [۲۵] جابجایی طبیعی در یک حفره مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی هم‌دما با وجود یک تیغه باریک چسبیده به دیواره را به صورت عددی بررسی کرد. وی با تغییر طول بی‌بعد تیغه از ۰/۱ تا ۰/۹، تغییر موقعیت بی‌بعد تیغه از ۰ تا ۰/۹ و اعمال سایر تغییرات دریافت که با افزایش عدد رایلی عدد ناسلت افزایش می‌یابد و با افزایش طول تیغه و نسبت رسانایی حرارتی روند کاهشی دارد. بن نهی و چمخا [۲۶] جابجایی طبیعی در یک محفظه‌ی مربعی با یک تیغه نازک شیب‌دار که طول آن ثابت نگه داشته شده است را به صورت عددی بررسی کردند. در این پژوهش فین شیب‌دار به دیواره‌ی عمودی سمت چپ که دیواره‌ی داغ می‌باشد، چسبیده است و بقیه دیواره‌ها سرد می‌باشند که در نتیجه‌ی آن اثرات زاویه‌ی شیب و طول تیغه و رسانایی حرارتی دیواره‌ی‌های سرد بر روی خطوط جریان و کانتورهای دما در داخل محفظه بررسی شده‌اند. خانافر و الامیری [۲۷] جابجایی طبیعی جریان آرام را در داخل یک حفره مربعی با وجود یک تیغه نازک متخلخل که به دیواره‌ی داغ چسبیده است به صورت عددی تحت شرایط پایا بررسی کردند. در این پژوهش که تیغه متخلخل به دیواره‌ی داغ که در سمت چپ قرار دارد چسبیده و دیواره‌ی سمت راست در دمای پایین‌تری قرار دارد، تغییر پارامترهای مختلف نظیر عدد رایلی، عدد دارسی، زاویه‌ی شیب تیغه، طول و محل قرارگیری تیغه بررسی شده و نتایج بدست‌آمده حاکی از این است که وجود تیغه متخلخل عدد ناسلت میانگین را افزایش می‌دهد

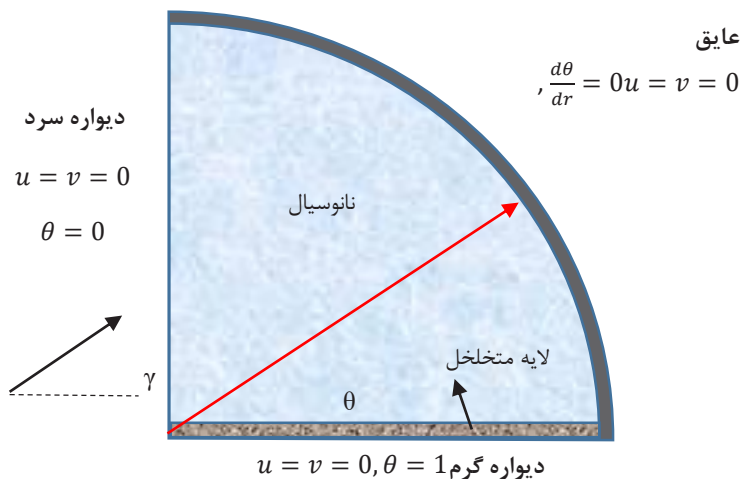
یک محفظه با استفاده از دو گرمکن نیم‌دایره‌ای در دیواره‌ی پایینی مطالعه کردند. نتایج بدست‌آمده نشان داد که مومنتوم المان‌های سیال با افزایش عدد هارتمن کاهش می‌یابد؛ و این یعنی اعمال میدان مغناطیسی و تقویت آن منجر به کاهش انتقال حرارت خواهد شد. سلیم افندی گیل و همکاران [۳۴] انتقال حرارت و جریان نانوسیال داخل یک حفره‌ی زاویه‌دار با افق را تحت تاثیر میدان مغناطیسی بررسی کردند. ایشان علاوه بر گزارش تغییرات عدد ناسلت، تغییرات آنتروپی را نیز ارائه نموده‌اند.

همانطور که اشاره گردید، حفره‌ها با هندسه‌های گوناگون کاربردهای مختلفی در سیستم‌های تهویه مطبوع، انرژی‌های تجدیدپذیر، مبدل‌های حرارتی و غیره دارد و به دلیل عملکرد حرارتی ضعیف سیالات معمولی، استفاده از نانوسیالات موجب بهبود عملکرد حرارتی داخل این حفره‌ها می‌گردد. بدیهی است که بررسی هرگونه هندسه و یا امکان دیگری که موجب بهبود عملکرد حرارتی و یا سیالاتی داخل حفره‌ها گردد، دارای اهمیت خواهد بود. با بررسی‌های فراوانی که نویسندگان این مقاله انجام داده‌اند، تاکنون تحقیقی درباره‌ی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات به صورت دوفازی در حفره‌های ربع دایره و یا قطاع دایره تحت تاثیر اثرات مگنتوهیدرودینامیک صورت نگرفته است. در مقاله‌ی حاضر، بررسی پدیده‌های فوق به همراه یک ناحیه‌ی متخلخل، که می‌تواند بخشی از یک لایه‌ی کامپوزیت باشد، انجام گرفته است.

۲- مدل‌سازی ریاضی و تعریف مسئله

در این مقاله، جریان تراکم‌ناپذیر، پایا و دو بعدی بر اثر جابجایی طبیعی در داخل یک محفظه‌ی دایروی گرم‌شده از کف که بر روی دیواره‌ی گرم آن یک لایه‌ی متخلخل نصب گردیده، بررسی شده است. هندسه‌ی مسئله‌ی مورد نظر به همراه شرایط مرزی در شکل ۱ ارائه گردیده است. شعاع محفظه‌ی دایروی مورد نظر بوده و شرایط مرزی در این مسئله که هندسه‌ی آن به صورت یک چهارم دایره می‌باشد، به صورت دمای گرم در کف محفظه و دمای سرد در دیوار‌های سمت چپ آن می‌باشد و همچنین کمان حفره به صورت آدیاباتیک می‌باشد. بایستی توجه کرد که مقادیر دمای گرم و سرد بگونه‌ای فرض می‌شود که سیال تغییر فاز نداده، بتوان از تغییرات خواص فیزیکی (به‌غیر از چگالی) سیال پایه نسبت به دما صرف‌نظر

و بهترین موقعیت برای تیغه نزدیک به سطح زیرین یا در وسط حفره می‌باشد. کفایتی [۲۸] انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام نانوسیال غیرنیوتنی در حضور میدان مغناطیسی افقی خارجی در یک حفره مربعی به روش اختلاف محدود شبکه‌ی بولتزمن بررسی کرد. در پژوهش موردنظر تغییرات پارامترهایی نظیر عدد رایلی، اندیس پاورلاو، عدد هارتمن و درصد حجمی نانوذره بررسی شده و نتایج بدست‌آمده حاکی از کاهش انتقال حرارت با افزایش اندیس پاورلاو در غیاب میدان مغناطیسی و افزایش آن در حضور میدان مغناطیسی می‌باشد و همچنین با افزایش درصد حجمی نانوذره و کاهش عدد هارتمن انتقال حرارت افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال آب در داخل یک محفظه‌ی دایروی با زوایای مرکزی متفاوت به صورت عددی توسط میر عابدیان و فرهادی [۲۹] انجام گرفت. در این شبیه‌سازی که به کمک روش المان محدود انجام گرفت، اثرات عدد رایلی بر روی نرخ انتقال حرارت با توجه به عدد ناسلت متوسط مطالعه شده و نتایج بدست‌آمده حاکی از افزایش عدد ناسلت متوسط با کم‌شدن زاویه‌ی مرکزی محفظه‌ی دایروی بود. همچنین یک رابطه برای نرخ انتقال حرارت با توجه به اثر زاویه‌ی بین دو سطح محفظه و عدد رایلی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی میر عابدیان و فرهادی بدست آمد. کاکراناس و همکاران [۳۰]، انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال تحت میدان مغناطیسی را در یک محفظه‌ی استوانه‌ای عمودی با دمای سینوسی دیواره‌ی بالایی بررسی کردند. نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی عددی آن‌ها نشان داد که افزایش عدد هارتمن موجب کاهش حرکت سیال شده و انتقال حرارت هدایتی به طور مداوم بیش از انتقال حرارت جابجایی می‌شود. اثر میدان مغناطیسی استاتیک بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی در یک محفظه استوانه‌ای افقی پر شده با نانوسیال با استفاده از روش شبکه‌ی بولتزمن توسط آشورنژاد و همکاران انجام شد [۳۱]. آن‌ها دریافتند با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رایلی، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد، درحالی‌که با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. روادیا و همکاران [۳۲] اثر میدان مغناطیسی بر روی جابجایی طبیعی در یک محفظه مستطیلی را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که اعمال میدان مغناطیسی باعث کاهش میزان انتقال حرارت خواهد شد. همچنین از توپ و همکاران [۳۳] جابجایی طبیعی مگنتوهیدرودینامیک را در



شکل ۱: هندسه و شرایط مرزی مسئله

Fig. 1. Geometry and boundary conditions

توزیع نانوذرات با معادلات اساسی کوپل شده است [۳۷]:

۱-۲- ناحیه‌ی نانو سیال

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

معادلات مومنتوم در جهت‌های X و Y:

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial X} \quad (2)$$

$$+ \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} - Ha^2$$

$$\text{Pr} \left(\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} \right) (B_y^2 U - B_x B_y V)$$

معادله‌ی بقاء انرژی:

$$\left(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = A \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

$$+ N_b \left(\frac{\partial \phi}{\partial X} \frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\partial \phi}{\partial Y} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)$$

$$+ N_t \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)^2 \right]$$

نموده و همینطور پایداری نانوسیال کاهش نیابد. محفظه حاوی نانوسیال Fe_3O_4 - آب بوده و همچنین یک لایه‌ی متخلخل مطابق شکل با ضخامت بی بعد در کف محفظه چسبیده به دیواره‌ی گرم قرار دارد. فرض می‌شود که سطح نانوذرات با سرفوکتانت پوشش داده شده که مانع ته‌نشینی آن‌ها در دیواره‌ی جامد ناحیه‌ی متخلخل و یا چسبیدن آن‌ها به یکدیگر می‌شود [۳۵, ۳۶]. لازم به ذکر است که وجود و عدم وجود این لایه و همچنین ضخامت بی‌بعد آن جزء پارامترهای کنترلی مسئله و متغیر می‌باشند. در ناحیه‌ی متخلخل، تعادل حرارتی محلی فرض شده و از رابطه‌ی توسعه یافته‌ی داری (فورچه‌ایمر-برینکمن) استفاده شده است. شار مغناطیسی یکنواخت B با زاویه‌ی γ به میدان سیال القاء می‌شود که منجر به اعمال نیروی لورنتس (نیروی مگنتوهیدرودینامیک) بر المان‌های سیال می‌گردد. قطر نانوذرات Fe_3O_4 ، ۱۰ نانومتر و عدد پراوتل سیال پایه برابر ۶/۹۷ در نظر گرفته شده است. تمامی خواص نانوسیال به غیر از چگالی ثابت در نظر گرفته شده و فرض می‌شود که تغییرات چگالی نیز تنها تابعی از دما بوده و از رابطه‌ی بوزینسک پیروی می‌کند. از طرف دیگر، با استفاده از مدل بونجیورنو توزیع نانوذرات داخل محفظه محاسبه شده است.

معادلات حاکم بر مسئله شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی در ناحیه‌ی نانوسیال و در ناحیه‌ی متخلخل می‌باشد. همچنین معادله‌ی بونجیورنو داخل ناحیه‌ی نانوسیال و متخلخل به منظور محاسبه‌ی

معادله‌ی توزیع نانوذرات:

$$(U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y}) = \frac{1}{Le} (\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2}) + \frac{N_t}{Le N_b} (\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}) \quad (5)$$

معادله‌ی بقاء انرژی:

$$B(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y}) = \frac{k_{eff}}{k_{nf}} (\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}) + N_b (\frac{\partial \phi}{\partial X} \frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\partial \phi}{\partial Y} \frac{\partial \theta}{\partial Y}) + N_t \left[(\frac{\partial \theta}{\partial X})^2 + (\frac{\partial \theta}{\partial Y})^2 \right] \quad (9)$$

۲-۲- ناحیه‌ی متخلخل:

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (6)$$

معادله‌ی توزیع نانوذرات:

$$(U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y}) = \frac{\varepsilon}{Le} (\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2}) + \frac{N_t \varepsilon}{Le N_b} (\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}) \quad (10)$$

معادلات مومنوم به ترتیب در جهت‌های X و Y:

در معادلات فوق F، ضریب درگ فورچهایمر می‌باشد که به صورت $(F = 1.75 / \sqrt{150 \varepsilon^3})$ تعریف می‌شود. همینطور ضریب هدایت موثر متخلخل به صورت $k_{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_s$ تعریف شده و پارامترهای زیر برای استخراج معادلات بی‌بعد فوق تعریف شده‌اند:

$$X = \frac{x}{L} \quad Y = \frac{y}{L} \quad U = \frac{uH}{\alpha_f} \quad V = \frac{vH}{\alpha_f} \quad P = \frac{p}{\rho_f \left(\frac{\alpha_f}{L} \right)} \quad \theta = \frac{(T - T_H)}{(T_H - T_c)} \quad (11)$$

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \frac{1}{\varepsilon^2} (U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y}) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{Pr}{\varepsilon} (\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}) \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} - \frac{Pr}{Da} U \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \right) - \frac{F}{\sqrt{Da}} |V| U - Ha^2 Pr \left(\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} \right) (B_y^2 U - B_x B_y V) \quad (7)$$

$$Ra = \frac{g \beta_f \Delta T H^3}{\alpha_f \nu_f} \quad \phi = \frac{c}{c_0} \quad N_b = \frac{D_T \Delta T}{\alpha_{nf} T_c} \quad Le = \frac{\alpha_{nf}}{D_B} \quad Da = \frac{K}{H^2} \quad B = \frac{\varepsilon (\rho c_p)_{nf} + (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_s}{\varepsilon (\rho c_p)_f + (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_s} \quad A = \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \left(\frac{(\rho c_p)_f}{(\rho c_p)_{nf}} \right)$$

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \frac{1}{\varepsilon^2} (U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y}) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{Pr}{\varepsilon} (\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}) \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} - \frac{Pr}{Da} V \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \right) - \frac{F}{\sqrt{Da}} |V| V - Ha^2 Pr \left(\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} \right) (B_x^2 V - B_x B_y U) + Ra Pr \left(\frac{\beta_{nf}}{\beta_f} \right) \left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \right) \theta \quad (8)$$

روابط زیر برای بدست‌آوردن خواص نانوسیال بعد از حل معادلات (۵) و (۱۰) و بدست‌آوردن توزیع نانوذرات داخل میدان مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

می‌شود. بنابراین در سطح مشترک نانوسیال و تیغه شرایط مرزی زیر را خواهیم داشت:

$$U_{Nanofluid} = U_{porous}, \quad V_{Nanofluid} = V_{porous} \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_{fluid} = \frac{1}{\varepsilon} \left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_{porous}, \quad \left. \frac{\partial V}{\partial n} \right|_{fluid} = \frac{1}{\varepsilon} \left. \frac{\partial V}{\partial n} \right|_{porous}$$

$$\theta_{Nanofluid} = \theta_{porous}, \quad \phi_{fluid} = \phi_{porous}$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{fluid} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{porous}$$

در دیواره‌ها نیز اصل عدم لغزش حاکم بوده و در دیواره‌های عمودی انتقال انرژی صورت گرفته ولیکن در دیواره‌های افقی گرادیان دما برابر صفر خواهد بود. لازم بذکر است که در مورد شرایط مرزی معادله‌ی توزیع نانوذرات بر روی دیواره‌ها، بایستی مقدار شار جرمی نانوذرات بر روی دیواره‌ها برابر صفر باشد.

$$\rho_{nf} = (1-c)\rho_f + c\rho_p$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-c)(\rho c_p)_f + c(\rho c_p)_p$$

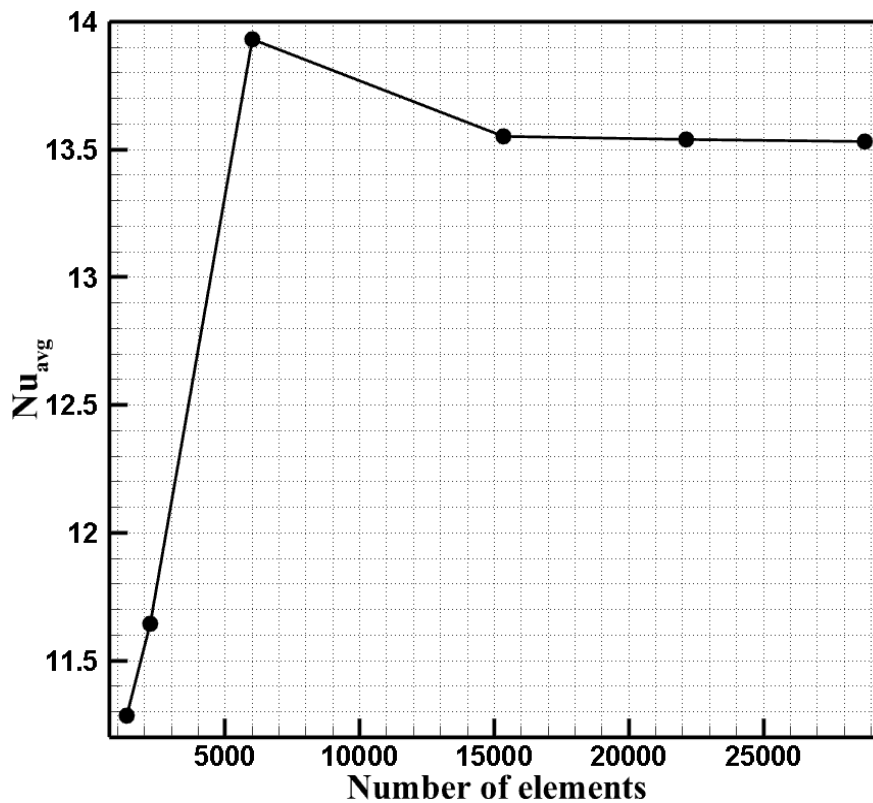
$$(\rho \beta)_p)_{nf} = (1-c)(\rho \beta)_f + c(\rho \beta)_p$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-c)^{2.5}} \quad (12)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{-2(k_f - k_p)c + 2k_f + k_p}{(k_f - k_p)c + 2k_f + k_p}$$

۳-۲- شرایط مرزی

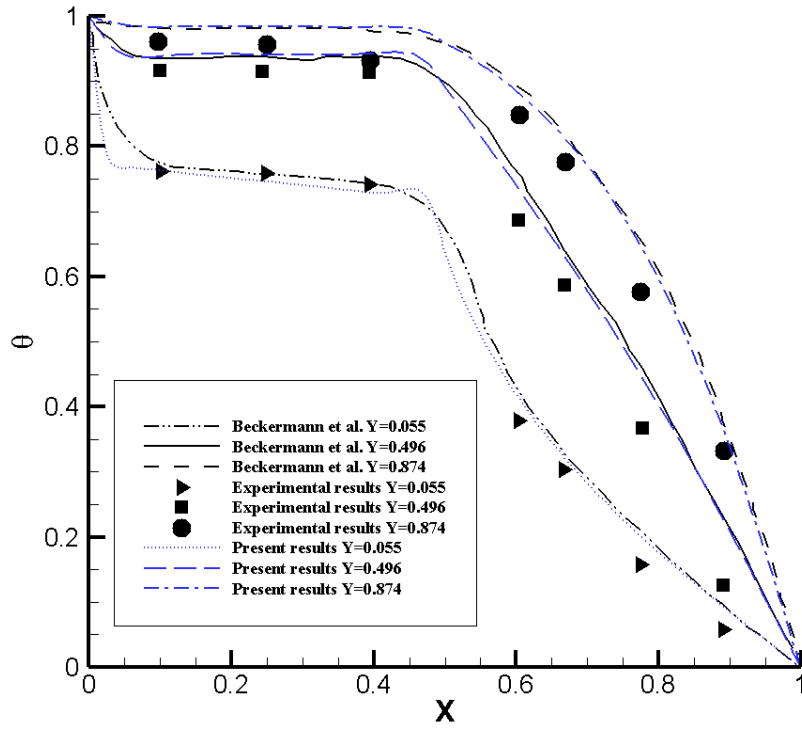
با فرض پیوسته‌بودن سرعت‌ها و گرادیان آن‌ها و همینطور دما در سطح تماس ناحیه‌ی نانوسیال و متخلخل می‌توان شرایط مرزی را در سطح مشترک نانوسیال و محیط متخلخل نوشت. همینطور می‌توان پیوستگی توزیع نانوذرات را در ناحیه‌ی نانوسیال و تیغه در نظر گرفت، چراکه از هرگونه ته‌نشینی نانوذرات در محیط متخلخل صرف‌نظر



شکل ۲: مقدار ناسلت متوسط بر حسب تعداد المان‌های مش و با فرضیات:

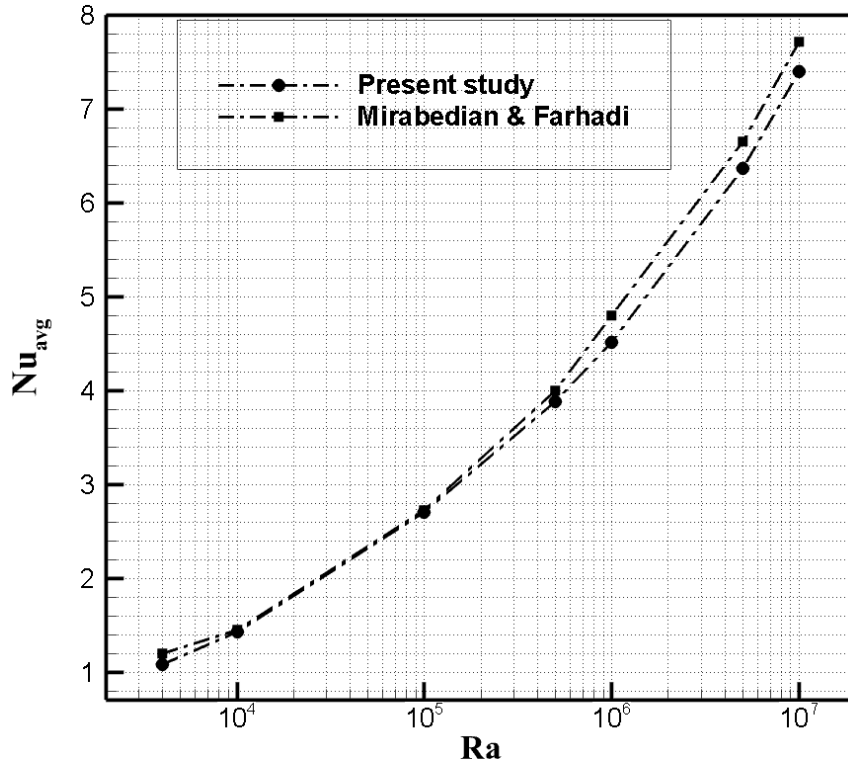
$$Ra=1E5, Da=5E-5, Ha=30, \gamma=45, keff=10$$

Fig. 2. Average Nusselt number according to the number of mesh elements considering $Ra=1E5, Da=5E-5, Ha=30, \gamma=45, keff=10$



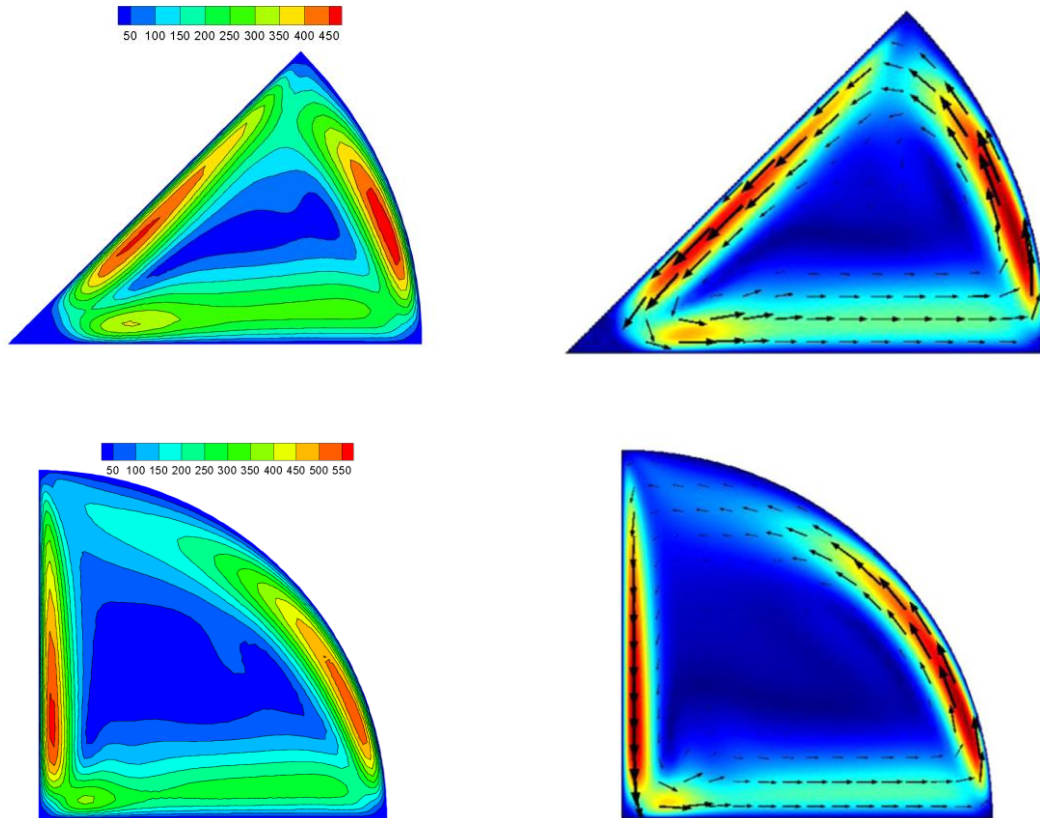
شکل ۳: مقایسه‌ی نتایج دمای بی‌بعد کد حاضر با نتایج بکرمن و همکاران [۳۸]

Fig. 3. Comparison the dimensionless results of the present code with the results of Beckerman et al. [38]



شکل ۴: مقایسه‌ی نتایج عدد ناسلت در اعداد رایلی مختلف مطالعه‌ی حاضر با نتایج میرعابدیان و فرهادی [۲۹]

Fig. 4. Comparison of Nusselt number in different Rayleigh numbers between the present study and those of Mirabedian and Farhadi [29]



شکل ۵: مقایسه‌ی نتایج کد حاضر (سمت چپ) تاثیر زاویه‌ی قطاع بر روی کانتور سرعت در داخل محفظه در مقایسه با نتایج میرعابدیان و فرهادی [۲۹] (سمت راست)

Fig. 5. Comparison of the results of present code (left side) the effect of angle of enclosure on the velocity contour (inside the cavity with results of Mirabedian and Farhadi (right side)

متغیرهای میدانی محاسبه شده و حداقل نمودن آن‌ها به وسیله‌ی توابع وزنی انجام می‌گیرد:

$$\int_{\Omega} wf(x) R d\omega = 0 \quad (15)$$

که در آن wf, R, ω و Ω به ترتیب متغیر مکانی، باقی‌مانده، تابع وزنی و کل دامنه می‌باشد. با استفاده از روش باقی‌مانده، مشتقات جزئی حاکم به معادلات انتگرالی تبدیل گردیده و با استفاده از روش تکراری نیوتن-رفسون حل می‌شوند. خطای عددی برای هر متغیر میدانی بایستی شرط زیر را ارضاء نماید:

$$\left| \frac{\Gamma^{n+1} - \Gamma^n}{\Gamma^{n+1}} \right| < 10^{-5} \quad (16)$$

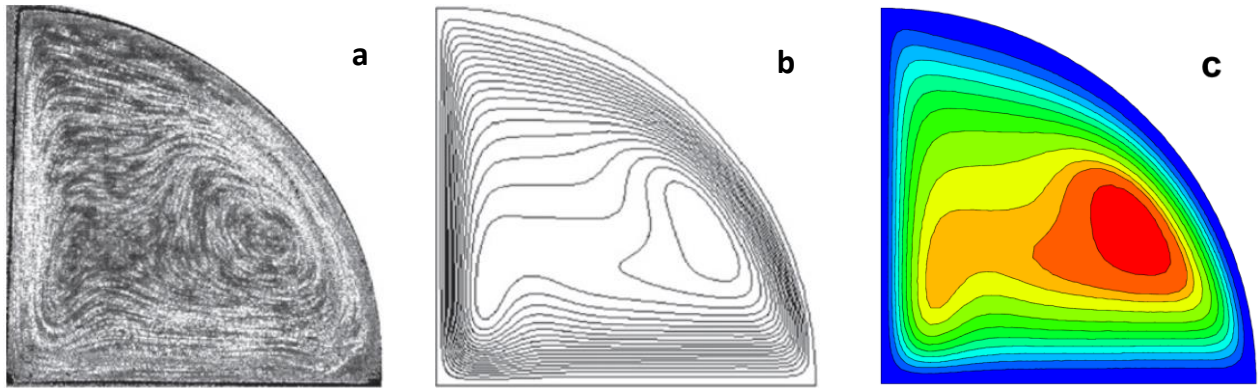
که در آن n نشان‌دهنده‌ی هر گام می‌باشد. از المان محدود لاگرانژی به روش ۱P - ۲P برای گسسته‌سازی مولفه‌های سرعت و فشار

بنابراین شرایط مرزی بر روی دیواره‌های حفره برای هر دو محیط نانوسیال و متخلخل به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} U(0,Y) = V(0,Y) = 0, \quad \theta(0,Y) = 1 \\ \theta(\sqrt{X^2 + Y^2} = 1) = 0, \quad N_b \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_{\sqrt{X^2 + Y^2} = 1} \\ + N_t \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_{\sqrt{X^2 + Y^2} = 1} = 0 \\ U(\sqrt{X^2 + Y^2} = 1) = V(\sqrt{X^2 + Y^2} = 1) = 0 \\ U(X,0) = V(X,0) = 0, \quad \frac{\partial \phi(X,0)}{\partial Y} = \frac{\partial \phi(X,1)}{\partial Y} \end{aligned} \quad (14)$$

۳- اعتبارسنجی و استقلال نتایج از مش

روش باقی‌مانده‌های وزنی گالری بر مبنای المان محدود برای حل معادلات کوپل حاکم مورد استفاده قرار گرفته است. تصحیح



شکل ۶: مقایسه‌ی خطوط جریان در محفظه‌ی دایروی در (a) مطالعات آزمایشگاهی و (b) شبیه‌سازی عددی انجام‌گرفته توسط آیدین و یسیلوز [۳۹] و (c) مطالعه‌ی حاضر

Fig. 6. Comparison of stream lines in a circular enclosure in (a) laboratory studies (b) Numerical simulation performed by Aydin and Yesiloz [39] and (c) present study

حدود ۰/۰۳٪ می‌باشد. بنابراین با ۱۵۳۶۰ المان عدم وابستگی نتایج شبیه‌سازی به اندازه‌ی المان‌ها بدست می‌آید. به منظور صرفه‌جویی در زمان محاسبات و همینطور رسیدن به دقت قابل قبول در نتایج، این تعداد المان در تمامی نتایج این مقاله در نظر گرفته شده است.

۳-۲- اعتبارسنجی نتایج

به منظور بررسی صحت محاسبات انجام‌گرفته در این کار، عملکرد حرارتی و سیالاتی سیال داخل یک حفره‌ی مربعی و حفره‌ی قطاعی شبیه‌سازی شده و با نتایج دیگران مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا مسئله‌ی بکرمن و همکاران [۳۸] که یک حفره‌ی مربعی بوده و نصف آن محیط متخلخل می‌باشد، شبیه‌سازی شده است. نتایج با فرض $Da=7/354$ ، $Pr=6/97$ ، $Ra_3=10^7/0.28$ و $\varepsilon=0.36$ استخراج شده و مقایسه‌ی دمایی بی‌بعد در ارتفاع‌های بی‌بعد مختلف حاصل از کد حاضر با نتایج تجربی و عددی در شکل ۳ ارائه گردیده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که اختلاف مابین نتایج محاسبه‌شده از طریق کد حاضر و نتایج ارائه‌شده توسط بکرمن و همکاران حداکثر ۲٪ بوده که نشان‌دهنده‌ی تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی حاضر و نتایج تجربی و عددی بکرمن و همکاران می‌باشد.

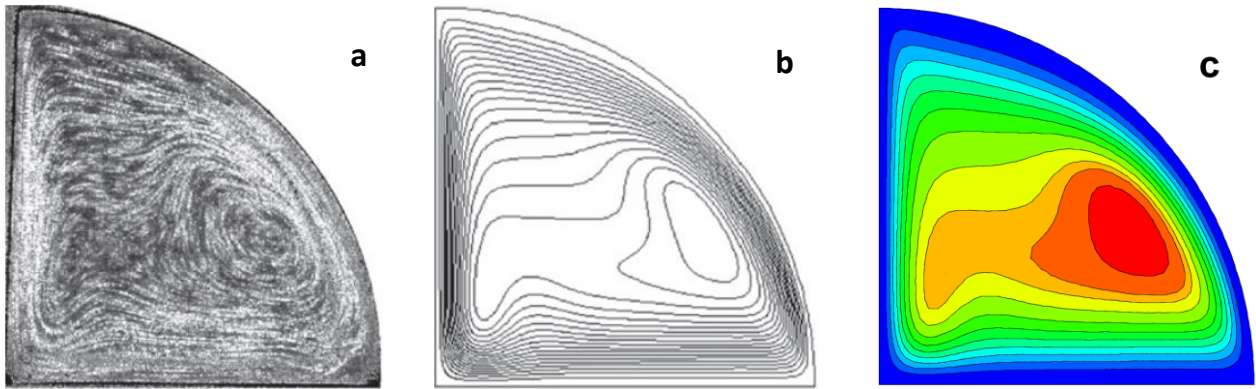
همچنین صحت نتایج شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی در قطاع دایروی به کمک نتایج میرعابدیان و فرهادی [۲۹] بررسی شده است. شبیه‌سازی مطالعه‌ی صورت‌گرفته توسط میرعابدیان و فرهادی، در قطاع با زاویه‌ی مرکزی ۹۰ درجه و در اعداد رایلی مختلف

استفاده شده و یک شبکه‌ی نامنظم مثلثی به منظور مش‌بندی دامنه استفاده گردیده است. این شبکه در نزدیکی دیواره‌ها به منظور محاسبه‌ی گرادیان‌های شدیدتر، دارای تراکم بیشتری می‌باشد.

تمامی شبیه‌سازی‌های ارائه‌شده در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار کامسول نسخه ۵،۴ انجام گرفته است. بدین ترتیب که با در نظر گرفتن حدس اولیه، معادلات (۹)–(۱) به همراه شرایط مرزی آن حل شده و نتایج آن به منظور بدست‌آوردن توزیع نانوذرات ذخیره می‌گردد. پس از بدست‌آمدن توزیع اولیه‌ی نانوذرات از طریق حل معادله‌ی (۱۰) به همراه شرایط مرزی، معادلات (۱۲) حل شده و خواص فیزیکی نانو سیال در هر المان محاسباتی می‌شود. گام اول با مقایسه‌ی اختلاف نتایج با مقدار تله‌رانس مورد قبول خاتمه یافته و در صورت عدم ارضاء شرایط همگرایی، نتایج گام اول به عنوان حدس اولیه‌ی گام دوم در نظر گرفته می‌شود. حل این مسئله بر روی رایانه‌ای با رم ۸ گیگ انجام شده و هر شبیه‌سازی در حدود ۲۱۰۰ ثانیه زمان نیاز دارد. برای ترسیم نتایج نیز از نرم‌افزار تک پلات ۳۶۰ استفاده گردیده است.

۳-۱- استقلال نتایج از مش

در این مسئله برای تأیید صحت شبیه‌سازی انجام‌شده، ابتدا عدم وابستگی این تحلیل به اندازه‌ی مش بررسی شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مسئله در شش اندازه‌ی المان مختلف و در شرایط کاملاً یکسان بررسی شده است که مطابق آن، اختلاف عدد ناسلت میانگین محاسبه‌شده با ۱۵۳۶۰ المان و ۲۸۹۰۰ مش تنها در



شکل ۷: مقایسه‌ی خطوط درصد حجمی ثابت نانوذرات مابین نتایج عددی کد حاضر (سمت راست) و نتایج ارائه شده توسط طهماسبی و همکاران [۴۰] (سمت چپ) با شرایط:

$$Pr=5 \text{ and } Nb=6-10, Nt=1e-6, Ra=1e4, Da=1e-3, Le=1000,$$

Fig. 7. Comparison of nanoparticle iso-concentration lines between the present numerical results (right side) and the results provided by Tahmasebi et al. [40] (left side) with the assumptions of

$$Pr=5 \text{ and } Nb=6-10, Nt=1e-6, Ra=1e4, Da=1e-3, Le=1000,$$

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی آب و اکسید آهن

Table 1. Thermo-physical properties of water and iron oxide

ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	k (W/m.K)	d_p (nm)	σ ($\Omega.m$) ⁻¹	
۹۹۷/۱	۴۱۷۹	۰/۶۱۳	—	۰/۰۵	آب خالص
۵۲۰۰	۶۷۰	۶	۱۰	۲۵۰۰۰	Fe ₃ O ₄

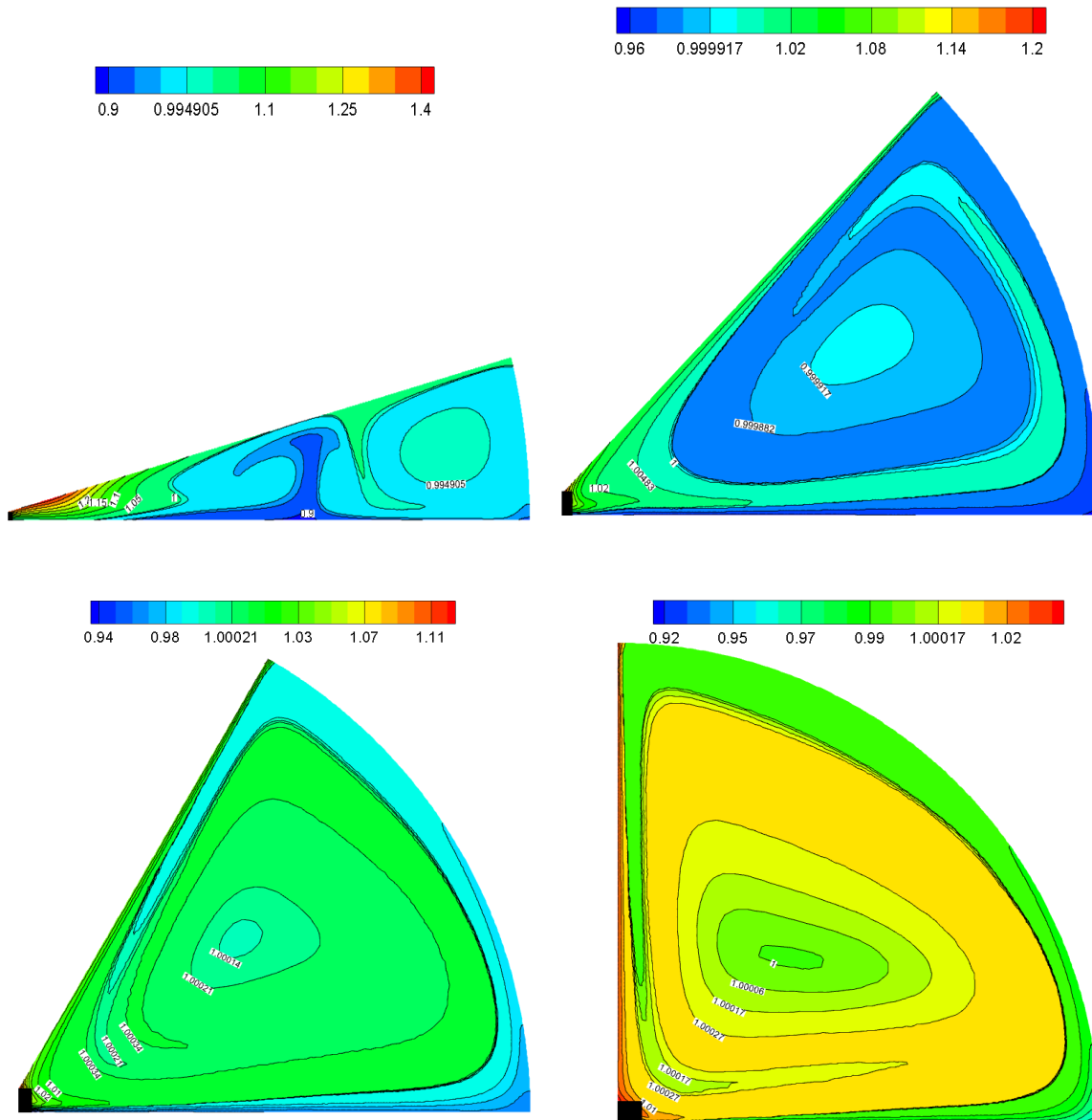
گردیده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، این مقایسه نیز صحت نتایج شبیه‌سازی کد مورد استفاده در تحلیل جریان جابجایی آزاد را تایید می‌کند.

در نهایت به منظور بررسی صحت نتایج مدل‌سازی توزیع نانوذرات در دامنه‌ی محاسباتی توسط کد حاضر، مسئله‌ی ارائه‌شده توسط طهماسبی و همکاران [۴۰] با استفاده از کد حاضر شبیه‌سازی شده و مقایسه‌ای ما بین نتایج توزیع نانوذرات انجام گرفته است. انتقال حرارت و جریان سیال نانوسیال داخل یک حفره‌ی مربعی در مسئله‌ی طهماسبی و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. دیواره‌ی سمت چپ حفره در دمای گرم و دیواره‌ی سمت راست در دمای سرد ثابت نگه داشته شده و در نزدیکی دیواره‌ی گرم یک لایه‌ی جامد و در همسایگی آن یک لایه‌ی متخلخل قرار گرفته است. شکل ۷ مقایسه‌ی

در شکل ۴ نمایش داده شده است و طبق این شکل و با توجه به اینکه حداکثر اختلاف مابین نتایج ۸٪ می‌باشد، تطابق مابین نتایج به وضوح تایید می‌شود.

به منظور مقایسه‌ی آشکارتر نتایج شبیه‌سازی و نتایج پیشین، کانتورهای سرعت جریان جابجایی آزاد بدست‌آمده توسط کد حاضر در قطاع با زوایای مختلف با نتایج بدست‌آمده از مطالعات میرعابدیان و فرهادی [۲۹] در شرایط ذکرشده در شکل ۵ مقایسه گردیده است. طبق این شکل، هماهنگی محل تشکیل سرعت‌های حداکثر و ساختار جریان در هر دو شبیه‌سازی مشاهده می‌گردد.

از طرف دیگر، خطوط جریان بدست‌آمده از مطالعات آزمایشگاهی (a) و تحلیل عددی (b) انجام‌گرفته توسط آیدین و یسیلوز [۳۹] و مطالعه‌ی حاضر در شرایط یکسان شبیه‌سازی، در شکل ۶ ارائه



شکل ۸: توزیع نانوذرات در داخل محفظه بر حسب زاویه‌ی قطاع. با شرایط: $Ha=30$, $Ra=5E6$, $Da=5E-5$, $\theta=10$, $Le=100$

Fig. 8. Distribution of nanoparticles inside the cavity according to the angle of enclosure considering $Ha=30$, $Ra=5E6$, $Da=5E-5$, $\theta=10$, $Le=100$

مگنتوهیدرودینامیک) به صورت دوفازی می‌باشد. داخل قطاع پر از نانوسیال آب O_3Fe+ می‌باشد. خواص مورد استفاده آب و اکسید آهن در جدول ۱ ارائه گردیده است. عمق محفظه‌ی مورد نظر به حدی بزرگ در نظر گرفته شده که بتوان نتایج را به صورت دو بعدی بررسی نمود. پارامترهای کنترلی در نظر گرفته شده در این مسئله شامل عدد دارسی، عدد هارتمن، عدد رایلی، زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی، ضریب هدایت حرارتی لایه‌ی متخلخل، ضخامت آن و

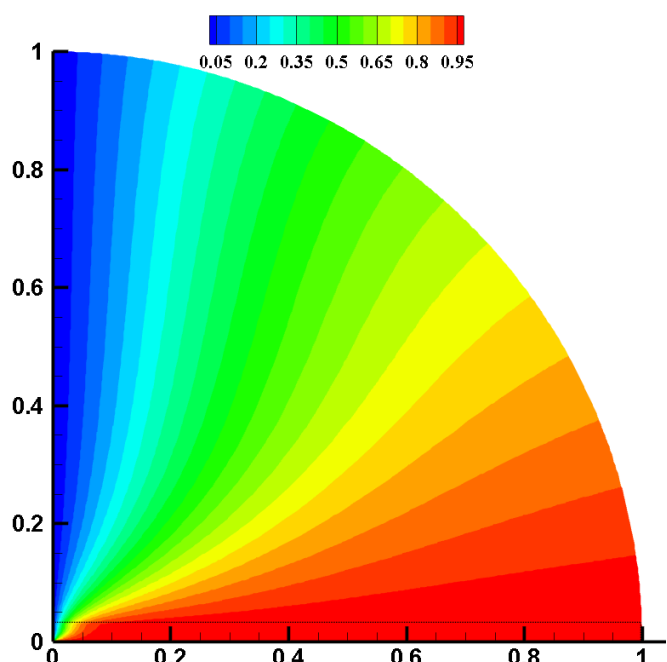
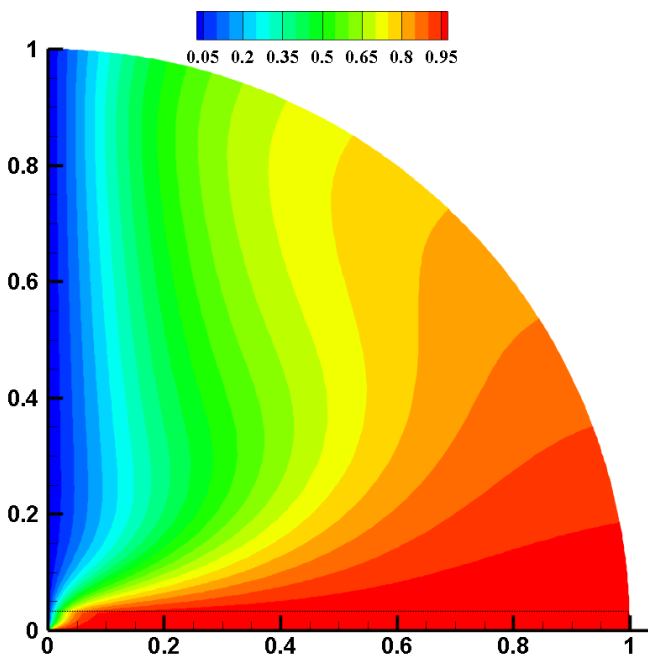
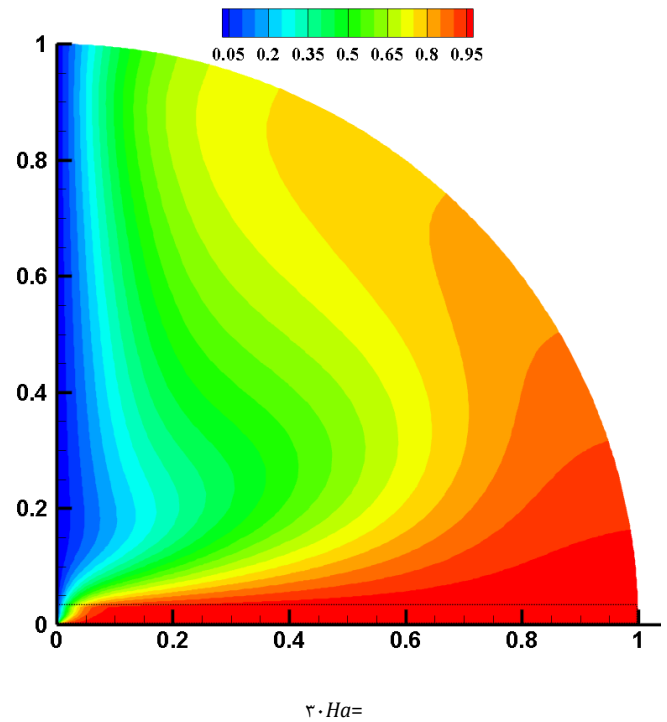
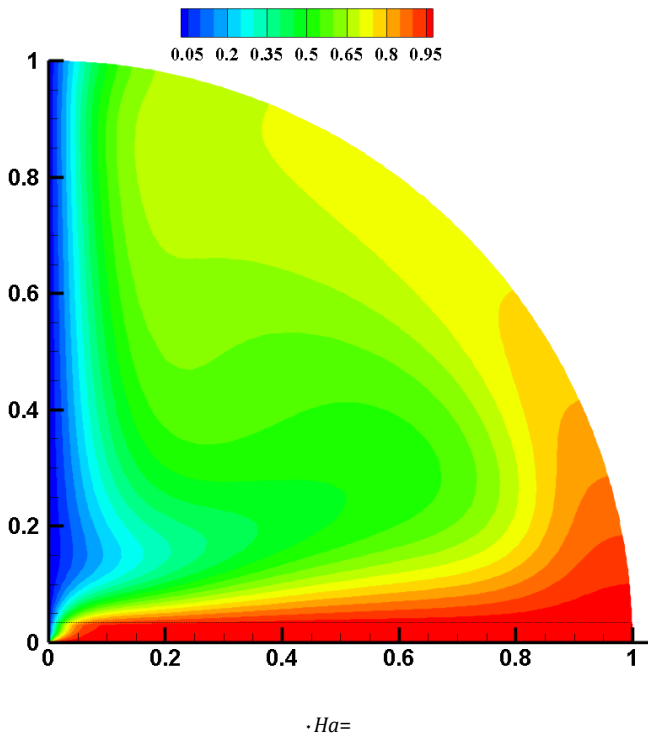
مابین نتایج را نشان می‌دهد و همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، تطابق بسیار خوبی مابین نتایج توزیع نانوذرات داخل حفره وجود دارد.

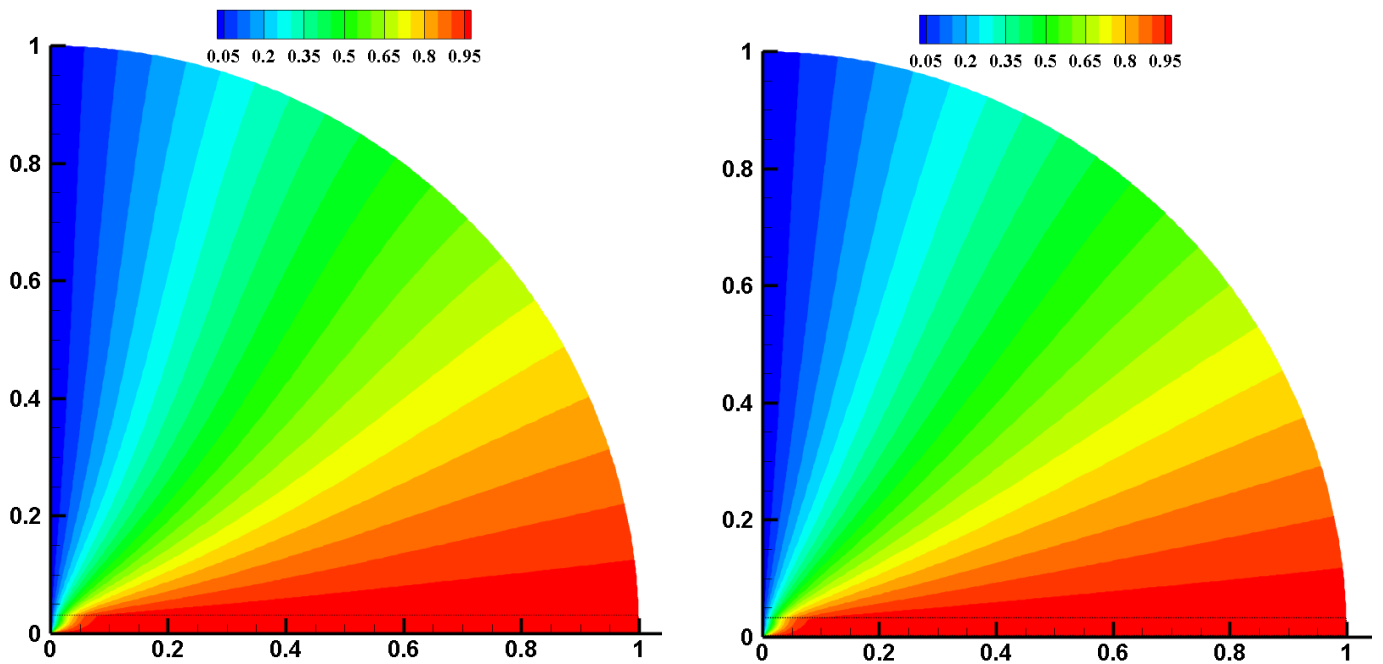
۴- نتایج و بحث

هدف این مقاله، بررسی جریان و انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال داخل قطاع دایروی تحت تاثیر نیروی لورنتس (نیروی

$Nt=2/5 \times 10^4$ انجام گرفته، مگر آنکه خلاف آن ذکر شده باشد. توزیع نانوذرات داخل محفظه در شکل ۸ ارائه گردیده است. به منظور بررسی تاثیر زاویه ی قطاع بر توزیع نانوذرات، زوایای ۱۵-۹۰ درجه قطاع در نظر گرفته شده است. تمامی نتایج نشانگر آن است که در اثر خاصیت ترموفورسیس، درصد حجمی نانوذرات در نزدیکی

زاویه ی مرکزی محفظه می باشد. در تمامی شبیه سازی ها، عدد پرانتل و درصد حجمی نانوذرات ثابت در نظر گرفته شده و از روش بونجیورنو برای تحلیل توزیع نانوذرات در داخل محفظه استفاده شده است. لازم بذکر می باشد که تمامی شبیه سازی های این با شرایط: $k_{eff}=10$ ، $Ha=30$ ، $Ra=5 \times 10^6$ ، $Da=5 \times 10^5$ ، $Le=100$ ، $Nb=10^{-6}$ و 10^{-1}





شکل ۹: کانتورهای هم‌دما داخل محفظه بر حسب Ha با شرایط: $Ra=1E5, Da=5E-5, \gamma=30, keff=10$

Fig. 9. Isothermal contours in the cavity according to Hartmann number with conditions of $Ra=1E5, Da=5E-5, \gamma=30, keff=10$

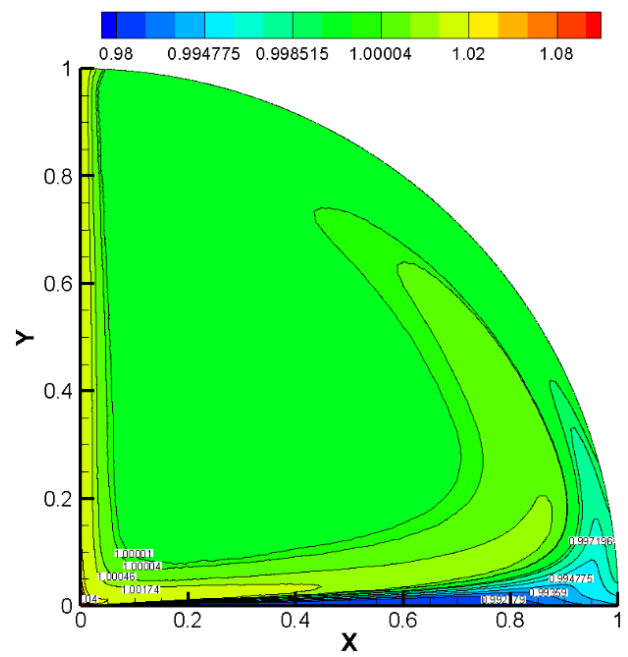
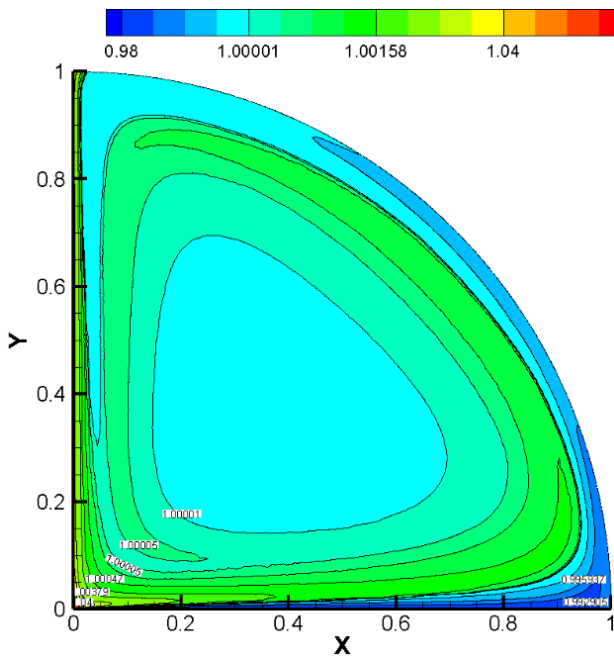
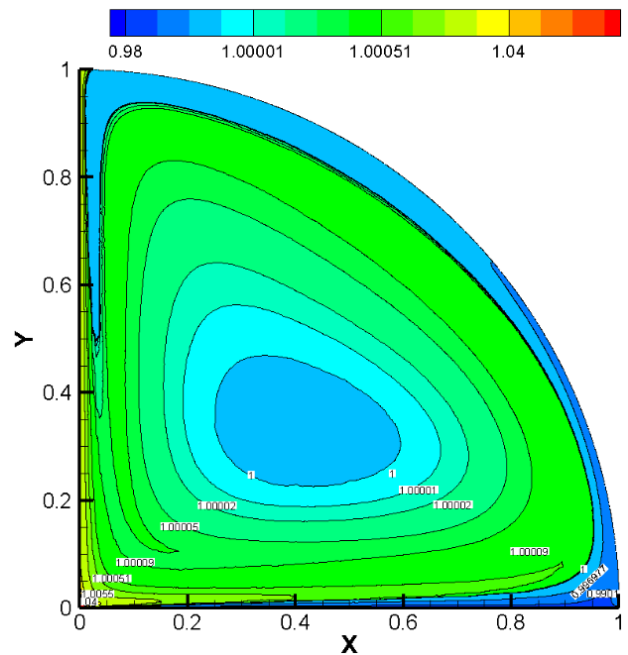
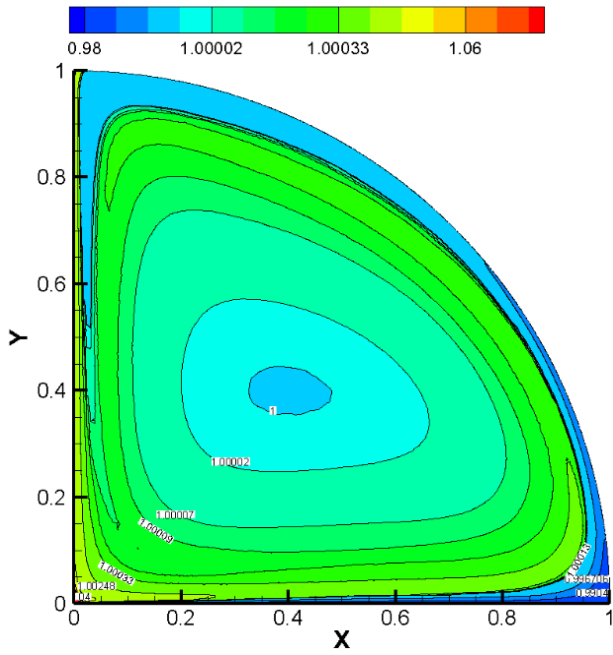
غلظتی بسیار کمتر خواهد بود. با توجه به اینکه اندازه کمیت پخش نانوذرات در مرکز محفظه (دور از سطوح گرم و سرد) دارای کمترین مقدار است، مقدار درصد حجمی بی‌بعد (در زوایای قطاع بزرگ) در مرکز برابر یک می‌باشد. با این وجود، در زاویه‌ی قطاع کوچک (۱۵ درجه)، به علت گردایان دمایی بالاتر، تغییرات توزیع نانوذرات قابل ملاحظه می‌باشد. خاطرنشان می‌شود که در اثر جابجایی سیال داخل محفظه، نانوذرات نیز در جهت خطوط جریان در داخل محفظه توزیع می‌یابند. علاوه بر این طبق این شکل، خطوط درصد حجمی ثابت نانوذرت در قطاع‌های بزرگتر بر روی خطوط جریان گردابه‌ی اصلی گسترش یافته با این وجود در زاویه‌ی ۱۵ درجه، بر روی دو گردابه‌ی قدرتمند ایجاد شده تجمع می‌کنند.

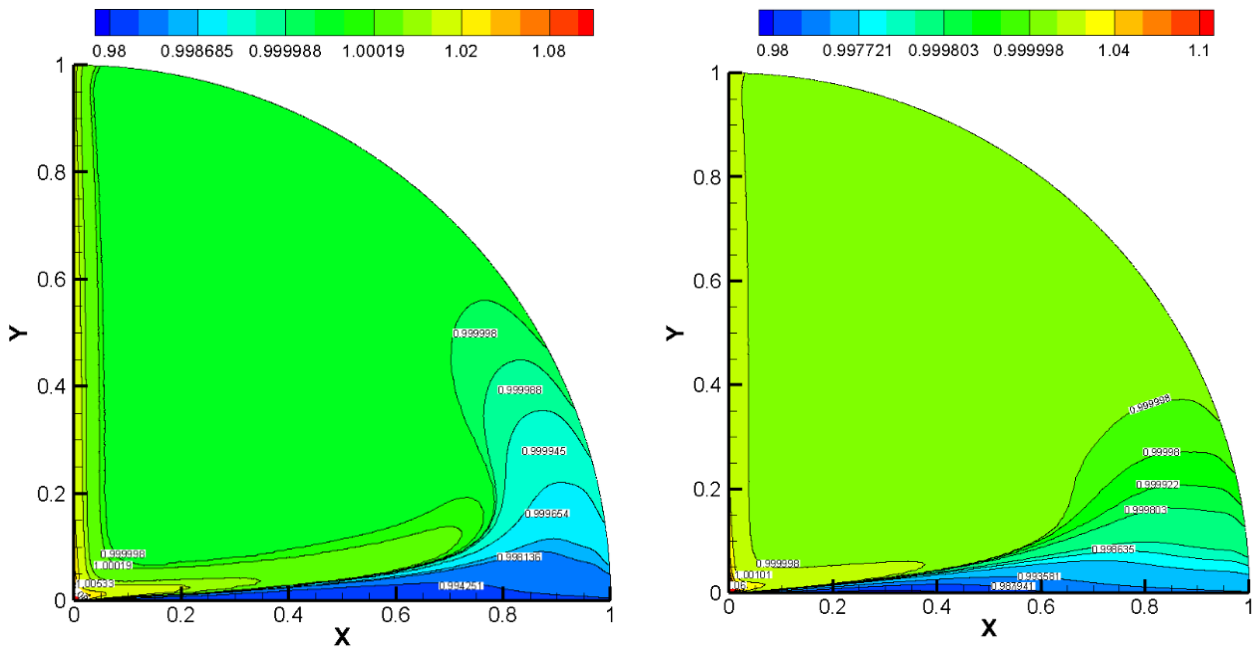
تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر روی خطوط هم‌دما بر حسب اعداد هارتمن مختلف $0 \leq Ha \leq 200$ در شکل ۹ ارائه گردیده است. مطابق این شکل، با افزایش عدد هارتمن، مومنوم جریان سیال کاهش می‌یابد که موجب کاهش ترم پخش حرارتی در محفظه

سطوح گرم دارای کمترین مقدار می‌باشد. از طرف دیگر در نزدیکی سطوح سرد تجمع نانوذرات قابل مشاهده می‌باشد. طبق خطوط درصد حجمی ثابت، لایه‌ی مرزی غلظتی نازکی با گردایان شدید غلظت در نزدیکی دیواره‌ی گرم و دیواره‌ی سرد تشکیل می‌گردد. حال آنکه توزیع نانوذرات در مرکز حفره تقریباً یکنواخت است. دلیل تشکیل یک لایه‌ی مرزی غلظتی نازک، بزرگ‌بودن عدد لوئیس (نسبت پخش حرارتی به ضریب پخش براونی) می‌باشد. ضریب پخش براونی نانوذرات در مقایسه با ضریب پخش حرارتی بسیار کوچک می‌باشد که منجر به بزرگ‌بودن عدد لوئیس می‌گردد. با توجه به پخش حرارتی و پخش نانوذرات، دو نوع لایه‌ی مرزی در نزدیکی دیواره تشکیل می‌گردد که پخش حرارتی معیاری از ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی و پخش نانوذرات معیاری از ضخامت لایه‌ی مرزی غلظتی می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان عدد لوئیس را نسبت ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی به غلظتی دانست. از آنجائیکه لایه‌ی مرزی حرارتی تقریباً ثابت بوده و تابعی از لایه‌ی مرزی هیدرولیکی و نیروی شناوری می‌باشد، به علت بزرگ‌بودن عدد لوئیس، ضخامت لایه‌ی مرزی

شعاعی مشاهده می‌شود. تغییر انحنای خطوط هم‌دما در اثر تضعیف گردابه‌های داخل حفره می‌باشد که با اعمال اثر مگنتوهیدرودینامیک به وجود می‌آید. با تضعیف این گردابه‌ها، ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی بر روی دیواره‌ها افزایش یافته و موجب غلبه‌ی هدایت حرارتی بر ترم جابجایی می‌شود. چراکه اعمال نیروی لورنتس موجب کاهش

می‌گردد. در اعداد هارتمن پایین، خطوط هم‌دما شکل منحنی داشته و نشان‌دهنده‌ی پخش حرارتی در اثر جابجایی المان‌های سیال می‌باشد. در این شرایط سهم ترم جابجایی در مقابل هدایت حرارتی چشمگیر می‌باشد. با این وجود، در اثر نیروی لورنتس بیشتر (اعداد هارتمن بزرگتر) انحنای خطوط هم‌دما کاهش یافته و خطوط مستقیم





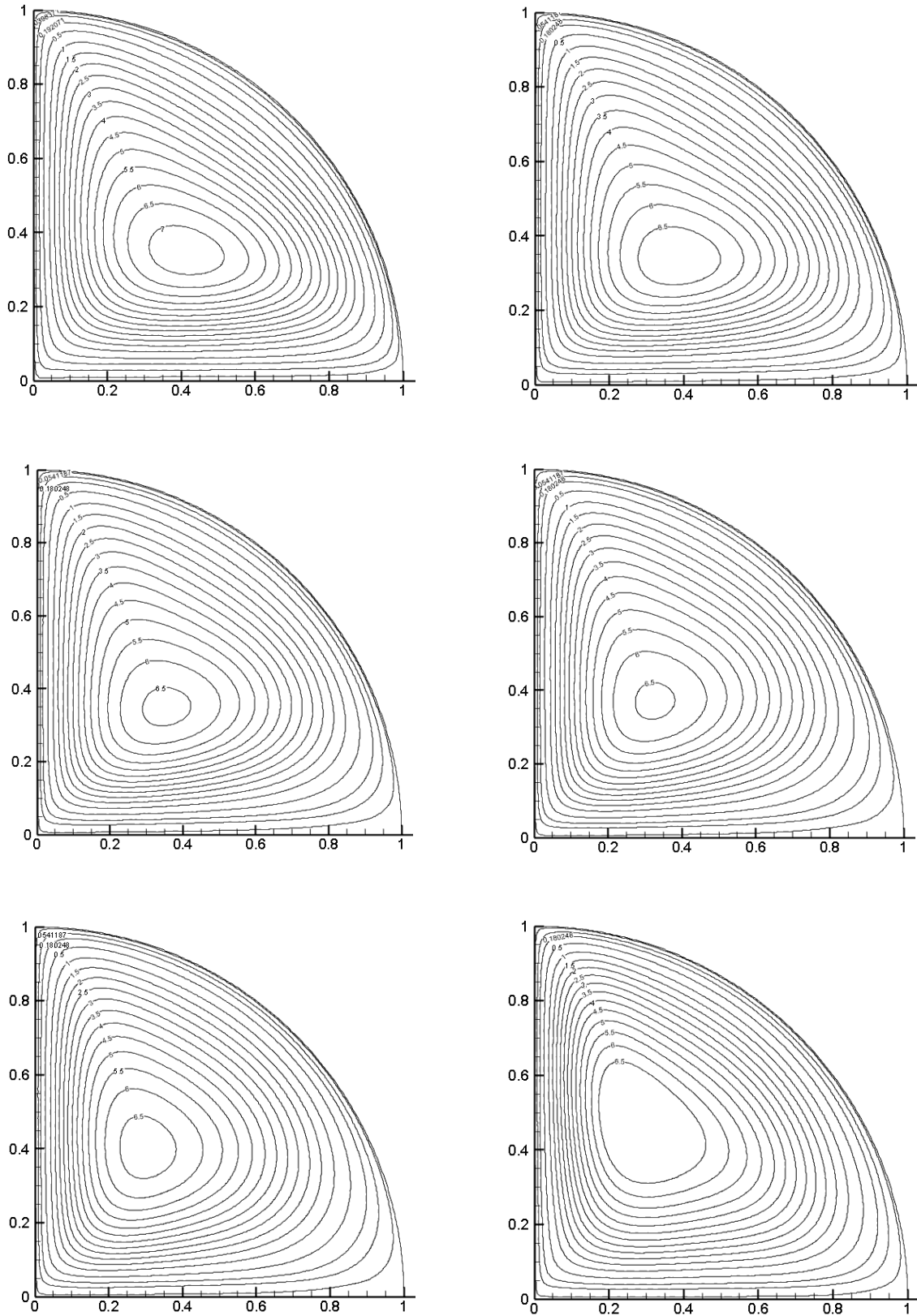
شکل ۱۰: توزیع نانوذرات در داخل محفظه بر حسب عدد هارتمن با شرایط: $Ra=1E5, Da=5E-5, =10, Le=100$

Fig. 10. Distribution of nanoparticles inside the cavity according to Hartmann number with conditions of $Ra=1E5, Da=5E-5, =10, Le=100$

موجب تغییر خواص ترموفیزیکی شامل چگالی، لزجت، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه می‌شود (طبق معادلات ۱۲). بدین ترتیب رفتار هیدرولیکی و حرارتی نانو سیال تابعی از کسر حجمی نانوذرات می‌باشد، چراکه اگر لزجت در نزدیکی دیواره کاهش یابد، موجب کاهش ضخامت لایه‌ی مرزی هیدرولیکی خواهد شد و همینطور در صورت افزایش ضریب هدایت حرارتی در نزدیکی دیواره، میزان شار حرارتی افزایش می‌یابد. توزیع نانوذرات داخل حفره‌ی ۹۰ درجه بر حسب اعداد هارتمن مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، در صورتی که میدان مغناطیسی به سیال اعمال نشود $Ha=0$ ، توزیع نانوذرات تقریباً در تمامی نقاط هندسی حفره انجام می‌گیرد و نانوذرات انتقال یافته از نزدیکی دیواره‌ی گرم، در کل میدان پخش می‌شود. با افزایش عدد هارتمن به ۳۰، به علت کاهش ترم جابجایی و همینطور کاهش انحنای خطوط هم‌دما، توزیع نانوذرات در بخش‌های مرکزی حفره کاهش می‌یابد. طبق این شکل، تمرکز نانوذرات در نزدیکی سطح سرد در اعداد هارتمن بیشتر، شدیدتر می‌شود بگونه‌ای که در $Ha=200$ تقریباً تمامی نقاط مرکزی حفره دارای درصد حجمی بی بعد ۱ بوده و درصد حجمی بزرگی

مومنوم المان‌های سیال شده و جابجایی حرارتی کاهش می‌یابد. بدین ترتیب اعمال نیروی لورنتس بالاتر، موجب کاهش در عدد ناسلت بر روی دیواره‌ی گرم می‌گردد. لازم به ذکر است که بزرگی اثر ترموفورسیس در جریان‌هایی که مکانیزم هدایت حرارتی در آن غالب است، چشمگیر می‌باشد. بنابراین در اعداد هارتمن بزرگتر که گردها تضعیف شده و تاثیر هدایت حرارتی افزایش می‌یابد، گرادیان غلظت نانوذرات در نزدیکی دیواره‌ها افزایش می‌یابد.

با توجه به اینکه توزیع نانوذرات مغناطیسی (با توجه به معادلات (۵) و (۱۰)) تحت تاثیر پارامترهایی مانند حرکت براونی، ترموفورسیس و ترم جابجایی است. اعمال نیروی لورنتس بر میدان سیال منجر به کاهش مومنوم المان‌های سیال شده و نرخ ترم جابجایی میدان را در جهت اعمال نیرو تضعیف می‌کند. از طرف دیگر، تحت تاثیر اثر مگنتوهیدرودینامیک میزان جابجایی حرارتی در میدان سیال کاهش یافته و موجب غالب بودن مکانیزم هدایت در انتقال حرارت می‌شود. بنابراین با افزایش عدد هارتمن تمرکز بیشتر نانوذرات در ناحیه‌ی سرد و کاهش غلظت بر روی دیواره‌ی گرم رخ می‌دهد. بایستی توجه کرد که تغییر کسر حجمی نانوذرات در یک ناحیه از میدان نانو سیال



شکل ۱۱: خطوط جریان داخل محفظه بر حسب زاویه اعمال میدان مغناطیسی. با شرایط:

$Ha=30, Ra=1E5, Da=5E-5, A) \gamma=0$ B) $\gamma=15$ C) $\gamma=30$ D) $\gamma=45$ E) $\gamma=60$ D) $\gamma=90$

Fig. 11. The stream lines inside the cavity according to the angle of application of the magnetic field with conditions

$Ha=30, Ra=1E5, Da=5E-5, A) \gamma=0$ B) $\gamma=15$ C) $\gamma=30$ D) $\gamma=45$ E) $\gamma=60$ D) $\gamma=90$

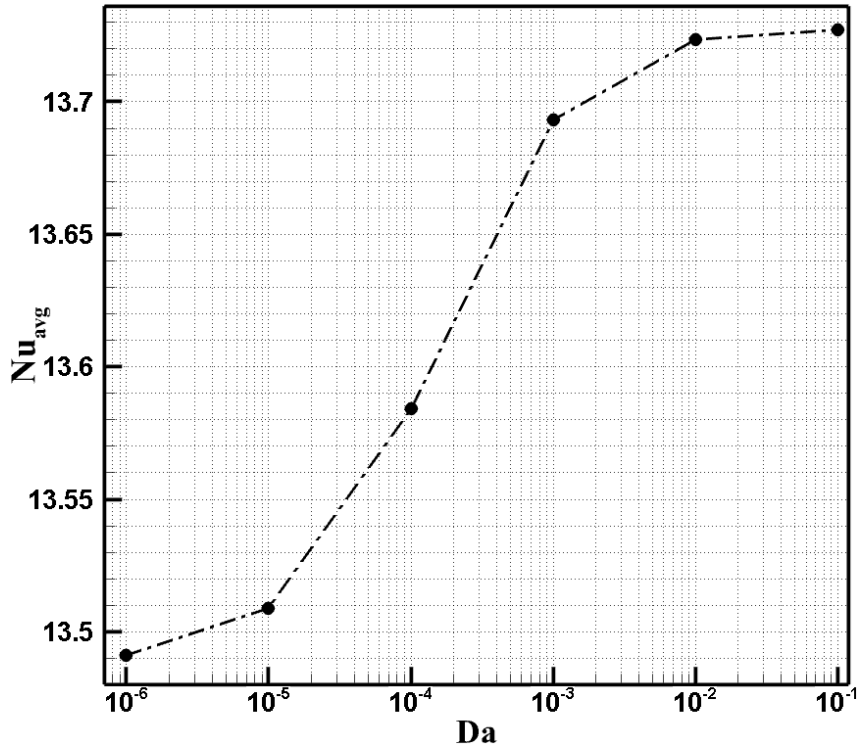
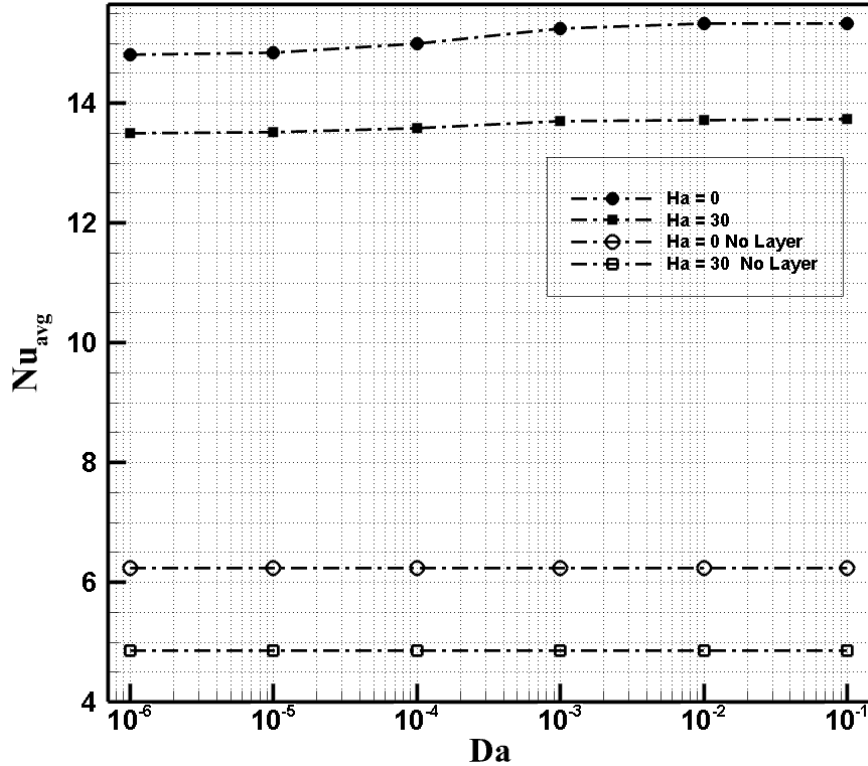


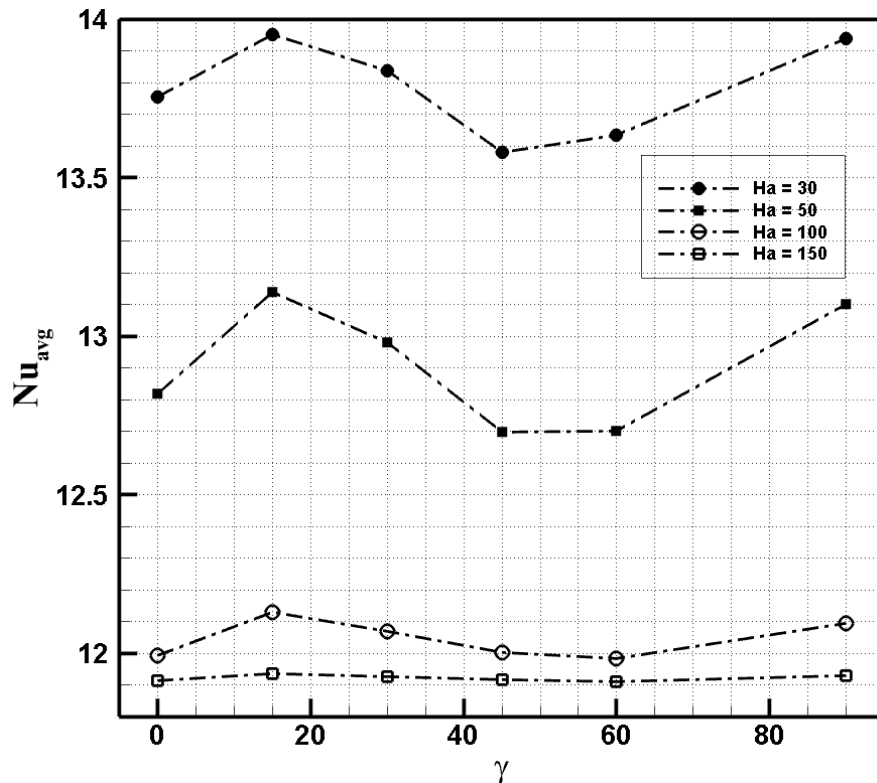
Fig. 12. Variations in the average Nusselt number by Darcy number considering $Ra=1E5$, $Ha=30$, $\gamma=45$, $keff=10$

شکل ۱۲: تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد دارسی و با فرضیات: $Ra=1E5$, $Ha=30$, $\gamma=45$, $keff=10$



شکل ۱۳: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد دارسی در اعداد هارتمن مختلف و بررسی اثر وجود لایه متخلخل و با فرضیات: $Ra=1E5$, $\gamma=45$, $keff=10$

Fig. 13. Variations in the Nusselt number according to the Darcy number in different Hartmann numbers and investigation the effect of porous layer presence considering $Ra=1E5$, $\gamma=45$, $keff=10$



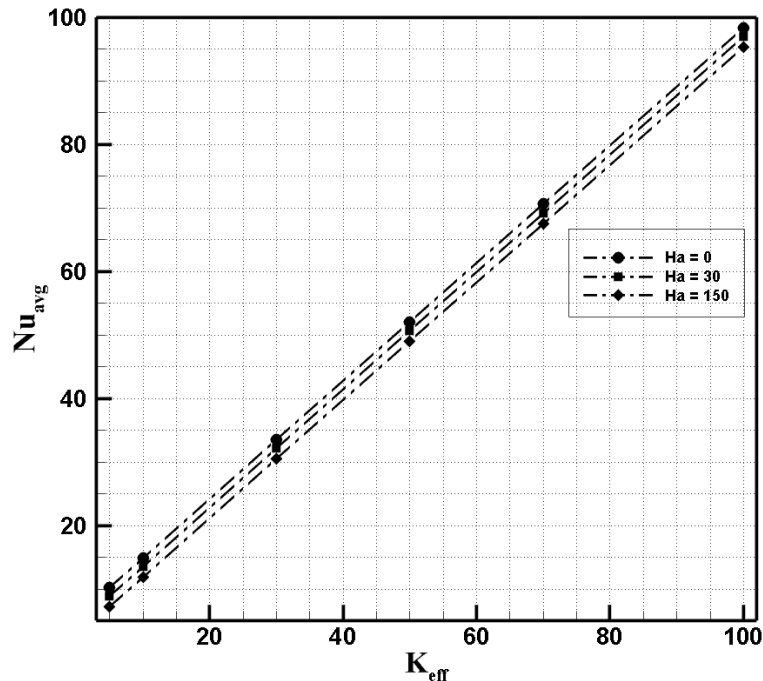
شکل ۱۴: تغییرات عدد ناسلت بر حسب زاویه اعمال میدان مغناطیسی و با فرضیات: $Ra=1E5$, $Da=5E-5$, $keff=10$
 Fig. 14. Variations in the Nusselt number according to the magnetic field applying angle and $Ra=1E5$, $Da=5E-5$, $keff=10$

سیال نیز تغییر کرده و از جهت γ به جهت X تغییر می‌یابد. بدین ترتیب، گردابه‌های ایجاد شده داخل محفظه در جهت X تضعیف شده و کشیدگی آن‌ها در جهت γ خواهد بود. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در حالت $\gamma=0$ گسترش گردابه‌ها در جهت X و در حالت $\gamma=90$ گسترش آن‌ها در جهت γ می‌باشد. علاوه بر اینکه بیشترین مقدار تابع جریان در زاویه‌ی اعمال ۱۵ درجه شکل می‌گیرد.

تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد دارسی در شکل ۱۲ ارائه شده است. مقدار افت فشار و نتیجتاً کاهش مومنتوم المان‌های سیال در عدد دارسی پایین که موجب نفوذپذیری کم محیط متخلخل می‌شود، موجب کاهش جابجایی المان‌های سیال و در نتیجه عدد ناسلت متوسط نیز می‌گردد. لازم بذکر است که قدرت جریان چرخشی داخل حفره با کاهش عدد دارسی تضعیف می‌گردد. این رفتار به این دلیل است که مقاومت هیدرولیکی ناحیه‌ی متخلخل افزایش یافته و افت فشار بیشتری به میدان سیال اعمال می‌شود. همانطور که در نمودار نشان داده شده است با افزایش عدد دارسی و در نتیجه افزایش نفوذپذیری محیط متخلخل و نزدیک شدن رفتار آن به میدان سیال، مقدار عدد ناسلت افزایش می‌یابد. بایستی توجه کرد که وجود لایه‌ی

از نانوذرات منتقل شده از دیواره‌ی گرم، بر روی دیواره‌ی سرد قرار گرفته‌اند. لازم بذکر است در صورتی که میدان مغناطیسی به صورت یکنواخت در نظر گرفته نشود، بایستی اثرات گرادیان میدان مغناطیسی در شار جرمی، به صورت ترم مگنتوفورسیس، در معادلات (۵) و (۱۰) اعمال گردد.

به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر نیروی لورنتس و زاویه‌ی اعمال آن بر جابجایی المان‌های سیال، خطوط جریان داخل محفظه بر حسب زاویه‌ی اعمال نیروی مغناطیسی در شکل ۱۱ ارائه شده است. طبق معادلات ارائه شده، نیروی لورنتس در جهت عمود بر میدان مغناطیسی و در جهت خلاف حرکت المان‌های سیال وارد می‌شود بگونه‌ای که موجب کاهش مومنتوم حرکتی المان‌ها می‌گردد. در شکل ۱۱ نشان داده شده است که در صورت اعمال میدان مغناطیسی در جهت محور X ، نیروی لورنتس در جهت γ به المان‌های سیال نیروی کاهنده‌ی سرعت وارد می‌کند که موجب تضعیف گردابه‌های کشیده شده در جهت γ می‌شود. بنابراین در این حالت گردابه‌های کشیده شده در جهت X دارای توان بیشتری خواهند بود (شکل A). با تغییر زاویه‌ی γ از صفر به سمت ۹۰ درجه، جهت نیروی لورنتس وارده بر المان‌های



شکل ۱۵: تغییرات عدد ناسلت بر حسب ضریب هدایت حرارتی فین متخلخل در اعداد هارتمن مختلف و با فرضیات $Ra=1E5$, $Da=5E-5$, $\gamma=45$

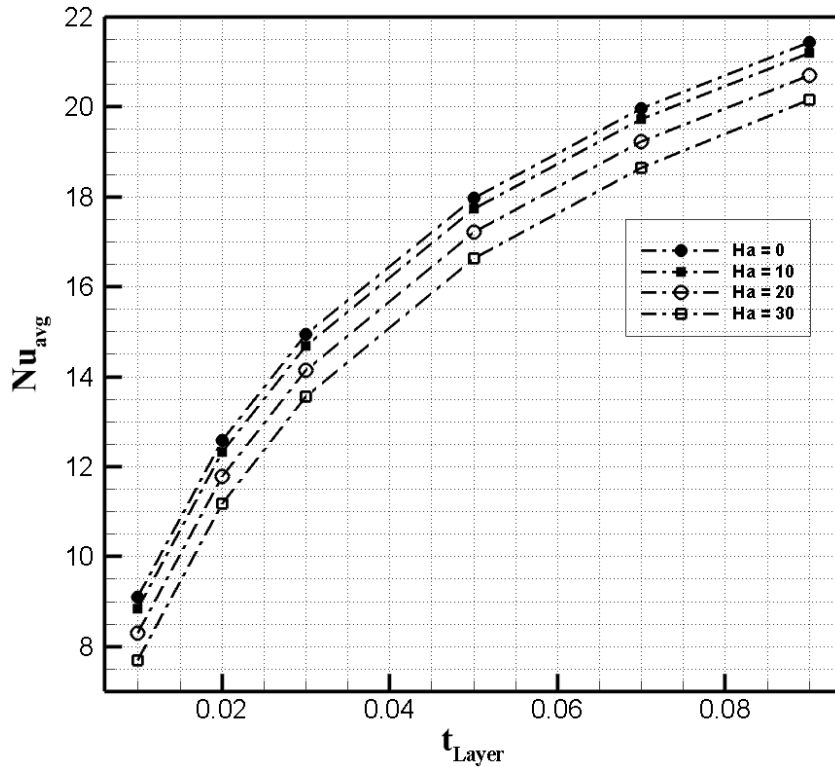
Fig. 15. Variations in the Nusselt number according to the porous fin conduction heat transfer in different Hartmann numbers considering: $Ra=1E5$, $Da=5E-5$, $\gamma=45$

را در داخل محفظه آشکار می‌کند. نتایج بدست‌آمده از تحقیقات پیشین نظیر مطالعات انجام‌گرفته توسط کاکراناس و همکاران [۳۰]، رودیا و همکاران [۳۲] و اوزتوپ و همکاران [۳۳] نیز موید این موضوع می‌باشند. از طرف دیگر، در اثر استفاده از لایه‌ی متخلخل و با فرض $Ha=0$ عدد ناسلت متوسط افزایش محسوسی داشته و بیشترین مقدار آن در $Da=10^{-1}$ مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی عدد ناسلت متوسط با و بدون لایه‌ی متخلخل نشان‌دهنده‌ی افزایش بیش از دوبرابری انتقال حرارت می‌باشد. طبق این شکل، تاثیر جاگذاری لایه‌ی متخلخل در افزایش انتقال حرارت به وضوح آشکار می‌شود. در حالت $Ha=30$ با لایه‌ی متخلخل نیز، عدد ناسلت رشد بیش از سه برابری با فرض $Da=0/1$ خواهد داشت. این نتیجه علاوه بر این که نقش لایه‌ی متخلخل را در بهبود عملکرد حرارتی نشان می‌دهد، تایید می‌کند که نواحی متخلخل در مومنتوم‌های پایین سیال نقش پررنگتری داشته و عملکرد حرارتی را به مراتب بهبود می‌دهند.

علاوه بر شدت میدان مغناطیسی، زاویه‌ی اعمال میدان γ نیز پارامتر تاثیرگذاری بر رفتار حرارتی- سیالاتی نانوسیال می‌باشد. زاویه‌ی گاما برابر صفر نشان‌دهنده‌ی در راستای X بودن میدان

متخلخل در شرایطی موجب بهبود عملکرد حرارتی جریان سیال می‌گردد که مومنتوم جریان پایین بوده و وجود ناحیه‌ی متخلخل با ضریب هدایت حرارتی بالاتر، انتقال حرارت به صورت هدایت را افزایش دهد. مقایسه‌ی نتایج بدست‌آمده در اعداد دارسی مختلف در شرایط ذکرشده نشان می‌دهد که با تغییر عدد دارسی از $Da=10^{-6}$ تا $Da=10^{-1}$ تغییر عدد ناسلت متوسط چشمگیر می‌باشد. با این وجود در اعداد دارسی بسیار پایین، ناسلت متوسط تقریباً مستقل از میزان نفوذپذیری لایه‌ی متخلخل می‌باشد.

علاوه بر وجود ناحیه‌ی متخلخل، اعمال نیروی لورنتس نیز موجب تغییر در الگوی جریان و انتقال حرارت داخل محفظه می‌گردد. در شکل ۱۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد دارسی در اعداد هارتمن مختلف ارائه شده و همچنین اثر وجود یا عدم وجود فین بر افزایش انتقال حرارت به صورت تابعی از عدد دارسی و عدد هارتمن بررسی شده است. در صورت عدم وجود لایه‌ی متخلخل و همینطور با فرض $Ha=0$ عدد ناسلت متوسط در حدود $6/35$ می‌باشد که در صورت اعمال میدان مغناطیسی و فرض $Ha=30$ ، این عدد به حدود $4/81$ کاهش می‌یابد. این مقایسه، کاهش انتقال حرارت در اثر ترم جابجایی



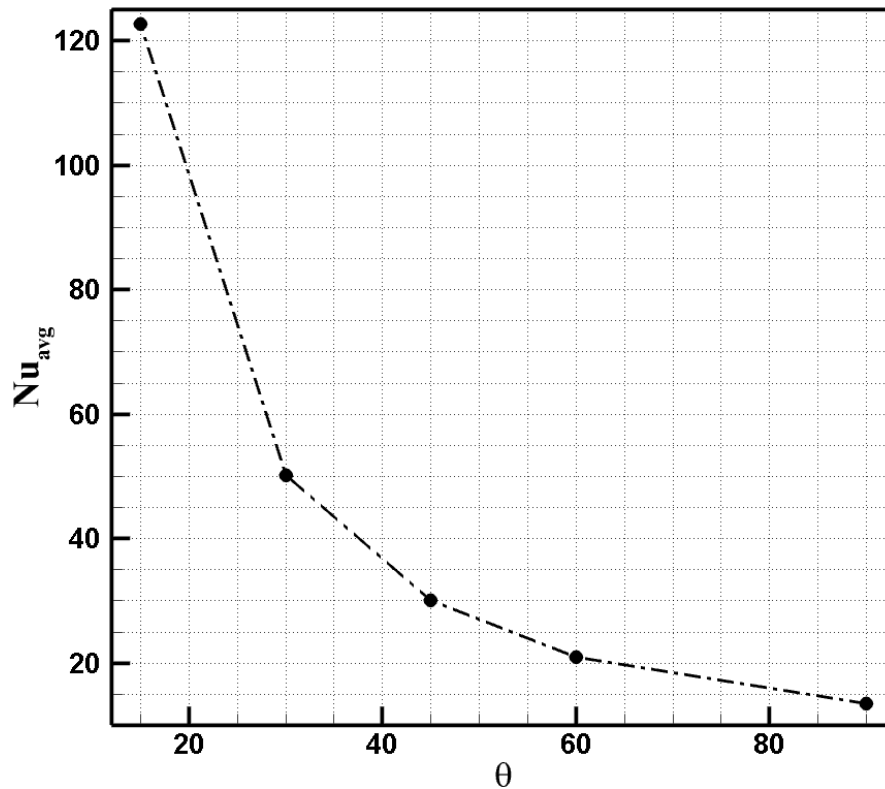
شکل ۱۶: تغییرات عدد ناسلت بر حسب ضخامت فین متخلخل در اعداد هارتمن مختلف و با فرضیات: $\gamma=45$, $Da=5e5$, $Ra=1e5$ and $keff=10$

Fig. 16. Variations in Nusselt number according to the porous fin thickness in different Hartmann numbers considering $\gamma=45$, $Da=5e5$, $Ra=1e5$ and $keff=10$

این شکل بار دیگر، تاثیر نیروی لورنتس بر کاهش عملکرد حرارتی نانوسیال قابل مشاهده است. علاوه بر آن، عملکرد حرارتی در شدت میدان‌های بزرگتر مستقل از زاویه‌ی اعمال میدان عمل کرده و باعث تضعیف شدید گردابه‌ها می‌شود.

مزیت اصلی به‌کاربردن محیط متخلخل بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی نسبت به سیال و در نتیجه افزایش انتقال حرارت هدایتی به علت بالارفتن ضریب هدایت حرارتی کل سیستم می‌باشد. بنابراین ضریب هدایت حرارتی لایه‌ی متخلخل تاثیر بسزایی در انتقال حرارت نانوسیال خواهد داشت. در شکل ۱۵ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب ضریب هدایت حرارت لایه‌ی متخلخل بر روی انتقال حرارت ارائه شده است. در این شکل، تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر ضریب هدایت لایه‌ی متخلخل از ۱۰ به ۱۰۰ در سه عدد هارتمن $Ha=0$ (بدون نیروی لورنتس)، $Ha=30$ و $Ha=150$ بررسی شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب هدایت حرارتی لایه، عدد ناسلت متوسط به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود

مغناطیسی و زاویه‌ی ۹۰ به مفهوم در راستای محور Y بودن میدان است. تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی γ و همچنین تاثیر کاهشی عدد هارتمن بر روی انتقال حرارت در شکل ۱۴ ارائه شده است. در صورتی که زاویه‌ی گاما صفر درجه باشد، نیروی لورنتس در جهت Y (عمود بر آن) اعمال خواهد شد که موجب تضعیف گردابه‌های توسعه‌یافته در آن جهت می‌گردد ولی تاثیری بر گردابه‌های گسترش‌یافته در جهت X نخواهد داشت. به عبارت دیگر، زاویه‌ی صفر گاما باعث کاهش مومنتوم المان‌های سیال در جهت Y می‌شود. از آنجاییکه نیروی شناوری در جهت Y اعمال شده و نیروی حجمی وارده بر سیال در این جهت می‌باشد، تقریباً بیشترین عدد ناسلت متوسط در تمامی موارد (مستقل از Ha) در حالت $\gamma=90$ اتفاق می‌افتد. چراکه نقشی در تضعیف مومنتوم در جهت Y نخواهد داشت. همین‌طور کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط نیز در حدود $\gamma=45$ اتفاق می‌افتد. به این دلیل که موجب کاهش تکانه‌ی المان‌های سیال در هر دو جهت X و Y می‌گردد. مطابق



شکل ۱۷: تغییرات عدد ناسلت بر حسب زاویه‌ی مرکزی حفره و با فرضیات:

$$Ra=1E5, Da=5E-5, Ha=30, \gamma=45, \gamma=10$$

Fig. 17. Variations in the Nusselt number according to the central angle of cavity considering

$$Ra=1E5, Da=5E-5, Ha=30, \gamma=45, \gamma=10$$

ناحیه‌ی متخلخل خواهد شد. از طرف دیگر، در ضخامت‌های بالاتر ناحیه‌ی متخلخل، تضعیف گردابه‌ها در اثر افزایش افت فشار داخل حفره نیز موجب کاهش انتقال حرارت جابجایی خواهد شد. کاهش عدد ناسلت با افزایش عدد هارتمن نیز در این شکل ارائه شده و همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت بدون نیروی لورنتس $Ha=0$ بیشترین عدد ناسلت رخ می‌دهد.

تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب زاویه‌ی مرکزی محفظه در شکل ۱۷ ارائه شده است. زاویه‌ی θ برابر ۹۰ درجه نشان‌دهنده‌ی یک ربع دایره است. همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود با کاهش زاویه‌ی مرکزی محفظه در اعداد رایلی ثابت، عدد ناسلت متوسط مرتباً افزایش می‌یابد که این امر به واسطه‌ی ایجاد گردابه‌ها با توان بالاتر در زوایای کوچکتر است. تغییر زاویه‌ی قطاع موجب نزدیک و یا دور شدن سطوح گرم و سرد به یکدیگر و همچنین تغییر در فضای تشکیل گردابه‌ها می‌شود. بدیهی است که اگر گردابه‌ای با توان ثابت در فضایی کوچکتر عمل کند باعث ایجاد خطوط جریان با مقدار تابع جریان (مومنوم) بالاتر خواهد بود. از طرف دیگر با کاهش زاویه‌ی

که در اعداد هارتمن بالاتر و با افزایش نیروی لورنتس، تغییرات عدد ناسلت کمتر می‌شود بگونه‌ای که می‌توان گفت در اعداد هارتمن بالا نتایج به طور تقریبی بر هم منطبق می‌شوند.

تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب ضخامت لایه‌ی متخلخل در اعداد هارتمن مختلف در شکل ۱۶ ارائه شده است. همانطور که اشاره شد، استفاده از محیط متخلخل منجر به افزایش انتقال حرارت هدایتی می‌گردد. با وجود اینکه افزایش ضخامت لایه‌ی متخلخل موجب افزایش تلفات لزجی می‌شود ولی همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، با افزایش ضخامت بی‌بعد لایه‌ی متخلخل از ۰/۰۱ تا ۰/۰۹، عدد ناسلت متوسط بطور پیوسته افزایش می‌یابد که این امر با توجه به افزایش کسر حجمی ناحیه‌ی متخلخل در میدان و بالا رفتن ضریب انتقال حرارت هدایتی مجموعه قابل توجیه می‌باشد. ضخامت بالاتر ناحیه‌ی متخلخل موجب ارتباط حرارتی گسترده مابین دامنه‌ی جامد متخلخل و میدان نانوسیال می‌گردد. بنابراین دمای نانوسیال افزایش یافته و اختلاف دمای بین نانوسیال و دیواره‌ی گرم کاهش می‌یابد. این امر موجب کاهش عدد ناسلت متوسط در ضخامت‌های بالاتر

جدول ۲: بررسی عدد ناسلت متوسط و در سه حالت مختلف بدون فین، فین متخلخل و کاملاً متخلخل و فرضیات:
 $Ra=1E5$, $Da=5E-5$, $Ha=30$, $\gamma=45$ and $keff=10$

Table 2. Investigation of average and maximum values of Nusselt number in three different cases of: without fin, with porous fin and completely porous considering $Ra=1E5$, $Da=5E-5$, $Ha=30$, $\gamma=45$ and $keff=10$

$ \psi _{max}$	Nu_{avg}	حالت مورد بررسی
۶/۶۴۹۰	۴/۸۶۳۸	بدون فین
۶/۶۰۵۰	۱۳/۵۵۳	فین دار
۰/۱۸۴۴۳	۳۲/۰۱۶	کاملاً متخلخل

می‌دهد که:

- افزودن نانوذرات به سیال پایه موجب افزایش میزان انتقال حرارت در حفره می‌شود.
- توزیع نانوذرات در نزدیکی دیواره‌ی گرم کاهش و در نزدیکی دیواره‌ی سرد افزایش دارد.
- با کاهش زاویه‌ی قطاع، گردابه‌های قدرتمندی تشکیل می‌شود که باعث ایجاد گردادیان‌های توزیع نانوذرات در داخل محفظه شده و از طرف دیگر انتقال حرارت را افزایش می‌دهد.
- افزایش عدد هارتمن موجب کاهش مومنتوم المان‌های سیال شده و در نتیجه میزان انتقال حرارت را بطور محسوسی کاهش می‌دهد.
- با تغییر زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی از صفر تا ۹۰ درجه، اثر ترمزی نیروی لورنتس نیز از محور y به محور x تغییر یافته و جهت گسترش گردابه‌های ایجادشده داخل محفظه نیز به صورت معکوس تغییر می‌کند.
- میزان انتقال حرارت تابعی از مقدار عدد دارسی بوده، بگونه‌ای که با افزایش عدد دارسی از مقدار مشخصی، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد.
- در صورت اعمال نیروی لورنتس، مکانیزم اصلی انتقال حرارت به صورت هدایت خواهد بود.
- در محفظه‌های با سطح مقطع کوچک، وجود سطوح متخلخل میزان انتقال حرارت را کاهش می‌دهد.

فهرست علائم

B	میدان مغناطیسی
B_x, B_y	مولفه‌های میدان مغناطیسی

مرکزی حفره، تعداد سلول‌های رایلی- بنارد افزایش پیدا کرده و این سلول‌ها می‌تواند موجب افزایش گردش سیال داخل حفره شود. بنابراین لایه‌های سرد و گرم سیال به خوبی با یکدیگر در تماس قرار می‌گیرند. این گردش پیوسته‌ی لایه‌های سیال در نقاطی از حفره که فضای کافی برای گردش گردابه‌ها وجود ندارد، موجب افزایش انتقال حرارت داخل حفره در رایلی ثابت می‌شود.

در جدول ۲ عدد ناسلت متوسط در شرایط یکسان و برای سه حالت بدون فین، فین دار و کاملاً متخلخل به دست آمده است و همانطور که مشاهده می‌شود وجود فین متخلخل عامل اثرگذار مثبت در انتقال حرارت بوده و موجب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود. همچنین با متخلخل کردن محفظه به طور کامل نیز عدد ناسلت متوسط به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و از بین سه حالت فوق بیشترین میزان عدد ناسلت را دارا می‌باشد. با این وجود، با متخلخل کردن تمام هندسه‌ی مسئله، مومنتوم جریان سیال به شدت کاهش می‌یابد که افت شدید مقدار ψ در محفظه حاکی از آن است.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله‌ی حاضر جریان سیال و انتقال حرارت نانوسیال داخل یک قطاع با لایه‌ی متخلخل به روش دوفازی تحلیل شده است. علاوه بر آن میدان مغناطیسی یکنواختی با زاویه‌ی متغیر بر میدان سیال اعمال گردیده که موجب ایجاد تاثیرات مگنتوهیدرودینامیک شده است. با بررسی شبیه‌سازی‌های مختلف می‌توان پارامترهای تاثیرگذار در این مسئله را بدست آورد که شامل: زاویه‌ی قطاع (در اعداد هارتمن کوچک)، عدد هارتمن، زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی، ضخامت بی‌بعد لایه‌ی متخلخل و عدد دارسی (در اعداد هارتمن کوچک) و ضریب هدایت حرارتی ناحیه‌ی متخلخل می‌باشند. بررسی نتایج نشان

			گرمای ویژه در فشار ثابت	c_p
			درصد حجمی نانوذرات	c
			عدد دارسی	Da
			ضریب پخش براونی، $\frac{k_B T}{3\pi\mu d_p}$	D_B
			ضریب پخش ترموفورسیس، $0.26 \frac{k}{2k + k_p} \frac{\mu}{\rho} \phi$	D_T
			ارتفاع حفره	H
			عدد هارتمن	Ha
			ضریب رسانایی حرارتی	k
			نفوذپذیری	K
			ضخامت فین متخلخل	t_{Layer}
			عدد لوئیس، $\frac{\alpha_{nf}}{D_B}$	Le
			عدد ناسلت	Nu
			فرم بی بعد ترم براونی، $\frac{D_B c_0}{\alpha_f}$	N_b
			فرم بی بعد ترم ترموفورسیس، $\frac{D_T \Delta T}{\alpha_{nf} T_c}$	N_t
			راستای عمود بر سطح	n
			فشار	P
			عدد پرانتل	Pr
			عدد رایلی	Ra
			دما	T
			مولفه‌های بدون بعد سرعت	U, V
			مولفه‌های بی‌بعد مکان	X, Y
				علائم یونانی
			نفوذپذیری حرارتی	α
			ضریب انبساط حرارتی	β
			زاویه میدان مغناطیسی با افق	γ
			تخلخل	ε
			دمای بدون بعد	θ
			ویسکوزیته دینامیکی	μ
			ویسکوزیته سینماتیکی	ν
			چگالی	ρ

مراجع

- [1] M. Sheikholeslami, & Rashidi, M. M. , Effect of space dependent magnetic field on free convection of Fe3O4–water nanofluid, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 15-6 (2015) 56.
- [2] M.M. Rashidi, Momoniat, E., Ferdows, M., & Basiriparsa, A. , Lie group solution for free convective flow of a nanofluid past a chemically reacting horizontal plate in a porous media, Mathematical Problems in Engineering, , (2014).
- [3] F. Garoosi, Jahanshaloo, L., Rashidi, M. M., Badakhsh, A., & Ali, M. E. , Numerical simulation of natural convection of the nanofluid in heat exchangers using a Buongiorno model, Applied Mathematics and Computation, 254 203-183 (2015).
- [4] R. Loni, Asli-Areh, E. A., Ghobadian, B., Kasaeian, A. B., Gorjian, S., Najafi, G., & Bellos, E.). Research and review study of solar dish concentrators with different nanofluids and different shapes of cavity receiver: Experimental tests, Renewable Energy, 804-783 (2020) 145.
- [5] G. de Vahl Davis, Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution, International Journal for numerical methods in fluids, 264-249 (1983) 3.
- [6] S.O. Giwa, Sharifpur, M., & Meyer, J. P. , Experimental study of thermo-convection performance of hybrid nanofluids of Al2O-3MWCNT/water in a differentially

- vertical locations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122-115 (2012) 95.
- [16] C.S. Dai, Li, M., Lei, H. Y., & Wang, S. X. , Numerical simulation of natural convection between hot and cold microtubes in a cylinder enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, 122-115 (2015) 95.
- [17] C. Choi, Jeong, S., Ha, M. Y., & Yoon, H. S. , Effect of a circular cylinder's location on natural convection in a rhombus enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73-60 (2014) 77.
- [18] S.M. Vanaki, Ganesan, P., & Mohammed, H. A. , Numerical study of convective heat transfer of nanofluids: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54 1239-1212 (2016).
- [19] K.H. Solangi, Kazi, S. N., Luhur, M. R., Badarudin, A., Amiri, A., Sadri, R. & Teng, K. H. , A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids, *Energy*, 1086-1065 (2015) 89.
- [20] L.P. Aoki, Schulz, H. E., & Maunsell, M. G. , An MHD Study of the Behavior of an Electrolyte Solution using 3D Numerical Simulation and Experimental results, *Comsol Conference* (2013).
- [21] M. Afrand, Karimipour, A., Nadooshan, A. A., & Akbari, M. , The variations of heat transfer and slip velocity of FMWNT-water nano-fluid along the micro-channel in the lack and presence of a magnetic field, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, -474 (2016) 84 481.
- [22] K.M. Isaac, Sen, D., Leventis, N., & Fritsch, I. , Simulation of electrochemical MHD induced flow in a microfluidic cell without channels, *6th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference*, (3392 (2011).
- [23] A. Karimipour, Nezhad, A. H., D'Orazio, A., Esfe, M. H., Safaei, M. R., & Shirani, E. , Simulation of copper-water nanofluid in a microchannel in slip flow regime using the lattice Boltzmann method, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 99-89 (2015) 49.
- [24] S.K. Das, Choi, S. U., Yu, W., & Pradeep, T. , *Nanofluids: science and technology* John Wiley & Sons, 2007.
- heated square cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 119072 (2020) 148.
- [7] A. Baïri, Zarco-Pernia, E., & De Marfa, J. M. G. , A review on natural convection in enclosures for engineering applications. The particular case of the parallelogrammic diode cavity, *Applied Thermal Engineering*, (2014) (1)63 322-304.
- [8] W. Wu, & Ching, C. Y. , Laminar natural convection in an air-filled square cavity with partitions on the top wall, *Heat Transfer Summer Conference collocated with the InterPACK09 and 3rd Energy Sustainability Conferences*, (2009, January) 414-399.
- [9] X. Shi, & Khodadadi, J. M. , Laminar natural convection heat transfer in a differentially heated square cavity due to a thin fin on the hot wall, *Journal of Heat Transfer*, (4)125 634-624 (2003).
- [10] S. Sivasankaran, & Kandaswamy, P. K. , Double diffusive convection of water in a rectangular partitioned enclosure with temperature dependent species diffusivity, *International Journal of Fluid Mechanics Research*, (4)33 2006)).
- [11] H.K. Park, Ha, M. Y., Yoon, H. S., Park, Y. G., & Son, C. , A numerical study on natural convection in an inclined square enclosure with a circular cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 314-295 (2013) 66.
- [12] Y.G. Park, Ha, M. Y., & Park, J. , Natural convection in a square enclosure with four circular cylinders positioned at different rectangular locations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 511-490 (2015) 81.
- [13] Y.G. Park, Ha, M. Y., Choi, C., & Park, J. , Natural convection in a square enclosure with two inner circular cylinders positioned at different vertical locations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (2014) 77 518-501.
- [14] Q.X. Wang, Lei, H. Y., Wang, S. X., & Dai, C. S., Natural convection around a pair of hot and cold horizontal microtubes at low Rayleigh numbers, *Applied Thermal Engineering*, , 119-114 (2014) (1)72.
- [15] Y.G. Park, Yoon, H. S., & Ha, M. Y. , Natural convection in square enclosure with hot and cold cylinders at different

- natural convection in an enclosure from two semi-circular heaters on the bottom wall., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1854-1844 (2012) ,(8-7)55.
- [34] F. Selimefendigil, & Öztop, H. F. , Effects of conductive curved partition and magnetic field on natural convection and entropy generation in an inclined cavity filled with nanofluid, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 123004 (2020) 540.
- [35] D.A. Nield, & Kuznetsov, A. V. , The Cheng–Minkowycz problem for natural convective boundary-layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, -5792 (2009) (26-25)52 5795.
- [36] H. Zargartalebi, Noghrehabadi, A., Ghalambaz, M., & Pop, I., Natural convection boundary layer flow over a horizontal plate embedded in a porous medium saturated with a nanofluid: case of variable thermophysical properties, *Transport in Porous Media*, -153 (2015) (1)107 170.
- [37] J. Buongiorno, Convective transport in nanofluids, *Journal of heat transfer*, 250-240 (2006) (3)128.
- [38] C. Beckermann, Ramadhyani, S., & Viskanta, R. , Natural convection flow and heat transfer between a fluid layer and a porous layer inside a rectangular enclosure, *Journal of heat transfer*, 370-363 (1987) (2)109.
- [39] G. Yesiloz, & Aydin, O. () . . , . Natural convection in an inclined quadrantal cavity heated and cooled on adjacent walls, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 6-35 1176-1169 (2011).
- [40] A. Tahmasebi, Mahdavi, M., & Ghalambaz, M., Local thermal nonequilibrium conjugate natural convection heat transfer of nanofluids in a cavity partially filled with porous media using Buongiorno's model, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 276-254 (2018) 4-73.
- [25] E.I.J.o.H.a.M.T. Bilgen, Natural convection in cavities with a thin fin on the hot wall., 3505-3493 (2005) 48.
- [26] A. Ben-Nakhi, and Ali J. Chamkha. “” *International journal of thermal sciences Conjugate natural convection in a square enclosure with inclined thin fin of arbitrary length*, 478-467 (2007) 46.
- [27] K. Khanafer, AlAmiri, A., & Bull, J., Laminar natural convection heat transfer in a differentially heated cavity with a thin porous fin attached to the hot wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70-59 (2015) 87.
- [28] G.R. Kefayati, Simulation of heat transfer and entropy generation of MHD natural convection of non-Newtonian nanofluid in an enclosure., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1089-1066 (2016) 92.
- [29] S.M. Mirabedin, & Farhadi, F., Natural convection in circular enclosures heated from below for various central angles, *Case Studies in Thermal Engineering*, (2016) 8 329-322.
- [30] S.C. Kakarantzas, Sarris, I. E., Grecos, A. P., & Vlachos, N. S., Magnetohydrodynamic natural convection in a vertical cylindrical cavity with sinusoidal upper wall temperature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (2-1)52 259-250 (2009).
- [31] H.R. Ashorynejad, Mohamad, A. A., & Sheikholeslami, M. , Magnetic field effects on natural convection flow of a nanofluid in a horizontal cylindrical annulus using Lattice Boltzmann method, *International Journal of Thermal Sciences*, 250-240 (2013) 64.
- [32] N. Rudraiah, Barron, R. M., Venkatachalappa, M., & Subbaraya, C. K., Effect of a magnetic field on free convection in a rectangular enclosure, *International Journal of Engineering Science*, 1084-1075 (1995) (8)33.
- [33] H.F. Öztop, Rahman, M. M., Ahsan, A., Hasanuzzaman, M., Saidur, R., Al-Salem, K., & Rahim, N. A. , MHD

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Mobadersani¹, F. Tavakkol. Numerical analysis of flow and natural convection heat transfer in a circular enclosure heated from bottom utilizing porous layer. *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(special issue 3) (2021). 1937-1962.

DOI: [10.22060/mej.2020.17242.6546](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17242.6546)



