

کابرد روش شبکه بولتزمن در شبیه سازی عددی جابجایی طبیعی نانوسیال در یک محفظه مربعی با مانع گرم

احمدرضا رحمتی^{۱*}، علی اکبر طاهری^۲

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، ایران

^۲ کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی، مجلسی، ایران

دریافت: بهار ۹۷ پذیرش: پائیز ۹۸

چکیده

در کار حاضر انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال اطراف مانع گرم درون یک محفظه مربعی با دیوارهای چپ و راست سرد، بالا عایق و پایین گرم با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه سازی می شود. جریان، آرام و تراکم ناپذیر و نانوسیال مورد مطالعه آب- اکسید تیتانیم است، برای محاسبه سرعت جریان و دمای سیال از مدل شبکه D2Q9 استفاده می شود. بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال اطراف مانع گرم درون یک محفظه مربعی و تاثیر عدد رایلی، کسر حجمی نانوسیال، ابعاد مانع، ابعاد محاسبه ضریب لزجت و ضریب هدایت حرارتی و شکل نانوذره بر عدد ناسلت از اهداف این تحقیق می باشد و برای اولین بار در این تحقیق انجام شد. نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی، متوسط عدد ناسلت افزایش می یابد. با اضافه شدن ابعاد مانع تا نصف ابعاد محفظه، متوسط عدد ناسلت افزایش یافته، سپس تا ۰/۷۰ ابعاد محفظه، کم می شود. در حالت ۰/۸۰ ابعاد محفظه ایجاد گردابهای باعث افزایش انتقال حرارت می شود. انتقال حرارت با دو برابر شدن عرض مانع نسبت به وقتی که طول مانع دو برابر شود بهتر است. با دو برابر شدن طول محفظه متوسط عدد ناسلت به شدت افزایش می یابد و با دو برابر شدن عرض محفوظه به شدت کاهش می یابد، متوسط عدد ناسلت در مدل بریکمن بیشتر از مدل وانگ است و در هر دو مدل ماسکول- گارنر و همیلتون- کروزر در صورتی که نسبت سطح برابر یک باشد با هم برابر است. با کم شدن نسبت سطح متوسط عدد ناسلت زیاد می شود.

* عهدهدار مکاتبات: ar Rahmati@ kashanu.ac.ir

کلمات کلیدی: جابجایی طبیعی، نانوسیال، ضریب لزجت، ضریب هدایت حرارتی، روش شبکه بولتزمن.

Application of lattice Boltzmann method for simulation of nanofluid natural convection in a square cavity with a hot obstacle

Ahmad Reza Rahmati ^{1*}, Ali Akbar Tahery ²

1- Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, University of Kashan, Kashan, Iran

2- Department of Mechanic, Faculty of Engineering, Majlesi branch, Islamic azad University, Majlesi, Iran

Abstract

In this paper natural convection of nanofluid around a hot obstacle simulates in a square cavity with east and west cool walls and an adiabatic wall in north and a hot wall in south by Lattice Boltzmann Method. Flow is quiet and non-compressible and nanofluid is water-Tio2. We use D2Q9 LBM for velocity and fluid temperature. The purpose of this study is investigation of heat transfer around a hot obstacle in a square cavity and the effect of Rayleigh number, obstacle dimension, volume fraction of nanofluid, cavity dimensions, surface ratio and various models of computing heat transfer conductivity coefficient and viscosity coefficient on Nusselt number. This investigat is done for the first time. The results show that, by increasing of Rayleigh number and volume fraction, average of Nusselt number will increase. The average of Nusselt number will increase when obstacle dimensions increase to 0.5L but it will decrease when the obstacle dimensions increase to 0.7L. Vortexes will create in 0.8L and it causes to increase of heat transfer.

By reduplicating the obstacle width heat transfer is better than reduplicating the obstacle length. The average of Nusselt number increases by increasing of cavity's length and it will decrease by increasing of cavity's wide. All results are equal in Hamilton-crosser and Maxwell- Garnett model when the surface ratio is one. But heat transfer will increase by decreasing surface ratio. The average of Nusselt Number in Wang model is less than Nusselt Number in Brinkman model.

Keywords: Natural convection, Nanofluid, viscosity coefficient, conductivity coefficient, Lattice Boltzmann Method.

طبيعي هوا را در يك حفره مربعی به طور عددی با استفاده از روش شبکه بولتزمن مطالعه کردند. آنها تاثیر عدد رایلی و زاویه شبکه بر انتقال حرارت بررسی کردند. پاشایی و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۳ عدد ناسلت را در جابجایی ترکیبی در طول دیواره موجی شکل يك محفظه شبکه دار دو بعدی با درجه متحرک بررسی کردند. یانگ هو و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۳ روش شبکه بولتزمن را برای جابجایی طبیعی بین يك سیلندر بیرونی مرغی و يك سیلندر داخلی مدور هم مرکز شبیه سازی کردند. آنها از روش مرز شناور برای حل میدان جریان و میدان دما استفاده کردند. خزاپی و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۳ انتقال حرارت جابجایی طبیعی و اجرایی را با استفاده از روش شبکه بولتزمن در هندسه‌های پیچیده و در اعداد رایلی مختلف و در شبکه‌های مختلف بررسی کردند. عشوری نژاد و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۳ روش شبکه بولتزمن را برای جابجایی طبیعی آب نمک در يك سیلندر دور افقی تحت میدان مغناطیسی به کار برند. آنها تاثیر میدان مغناطیسی را بر جریان و انتقال حرارت بررسی کردند. عشوری نژاد و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۳ جابجایی طبیعی نانوسیال را در دو حلقه هم مرکز با استفاده از روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. عبدالوالی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۳ روش شبکه بولتزمن را برای شبیه‌سازی جابجایی طبیعی نانو سیال آب- اکسیدمیس در يك محفظه مربعی شبکه دار به کار برند. در دو دیواره روبروی این محفظه يكی به اندازه نصف طول دیواره از وسط گرم و دیگری به همین اندازه سرد است. سجادی و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۳ روش شبکه بولتزمن را برای شبیه‌سازی جابجایی طبیعی جریان مشوش نانوسیال آب- مس در يك محفظه مربعی بررسی کردند. کفایتی [۹] در سال ۲۰۱۳ تاثیر میدان مغناطیسی بر روی جابجایی طبیعی نانوسیال در يك محفظه را با استفاده از روش شبکه بولتزمن بررسی کرد. او تاثیر عدد رایلی و کسر حجمی نانو ذره و عدد هارتمن را بر روی انتقال حرارت مطالعه کرد. محمد ابو طاهر و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۳ جریان سیال و انتقال حرارت نانو سیال آب- مس را در يك محفظه مربعی با استفاده از روش شبکه بولتزمن و مدل شبکه D2Q9 بررسی کردند. کفایتی [۱۱] در سال ۲۰۱۳ تاثیر میدان مغناطیسی بر جابجایی طبیعی را در يك محفظه باز دارای نانوسیال آب- اکسیدآلومینیم با روش شبکه بولتزمن بررسی کرد. داش و لی [۱۲] در سال ۲۰۱۴ جابجایی طبیعی اطراف يك سیلندر مربعی شبکه دار گرم درون يك محفظه سرد را با استفاده از روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار دادند. گوکهال و فرناندس [۱۳] در سال ۲۰۱۴ روش شبکه بولتزمن را برای شبیه‌سازی جریان سیال در مواد متخلخل در يك محفظه مربعی به کار برند. سجادی و کفایتی [۱۴] در سال ۲۰۱۴ روش شبکه بولتزمن را برای شبیه‌سازی جابجایی طبیعی مشوش در يك محفظه بلند به کار برند. ژنگ لی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۴ جابجایی طبیعی را با ترکیب روش شبکه بولتزمن و روش حجم محدود در يك محفظه مربعی شبیه‌سازی کردند. آنها عده‌های رایلی مختلف را بررسی کردند و این روش را با روش شبکه بولتزمن

- ۱- مقدمه

یکی از مسائل مهمی که در صنعت و مهندسی قابل حل است، شبیه سازی انتقال حرارت و جریان سیال است. راههای زیادی برای افزایش انتقال حرارت وجود دارد؛ مثل اضافه کردن پره‌ها، مشوش کردن جریان، افزایش ضربی رسانایی سیال، استفاده از مواد متخلخل، استفاده از نانوسیال و غیره. جابجایی طبیعی نوعی از انتقال حرارت است که در آن حرکت سیال فقط توسط اختلاف چگالی در سیال که عامل آن گرادیان دما است، تامین می‌شود نه توسط يك منبع خارجی مثل پمپ و یا فن و دستگاه‌های مکش. در جابجایی طبیعی سیال منبع گرم را احاطه کرده و گرمدازی را از بدین صورت چگالی سیال پایین می‌آید و سیال سرد جای آن را می‌گیرد و گرم می‌شود و این چرخه ادامه پیدا می‌کند. این عملکرد انرژی حرارتی را از سلول پایینی به بالا هدایت می‌کند. نیروی راننده برای جابجایی طبیعی همان اختلاف چگالی بین سیال گرم و سرد است. جابجایی طبیعی در سالهای اخیر به دلیل موجود بودن آن در طبیعت و نیز کاربردهای آن در مهندسی مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت، استفاده از نانوسیال است که از مخلوط کردن سیال هایی نظری آب، اتیلن گلیکول و روغن به عنوان سیال پایه و ذرات ابعاد نانومتری، حاصل می‌شود. برای انتقال حرارت در تجهیزاتی نظیر مبدل های حرارتی، سیال هایی مانند هوا، آب، روغن و اتیلن گلیکول استفاده می‌شود. با افزایش رفتار جهانی در صنایع مختلف و نقش انرژی در هزینه‌ی تولید، این صنایع به شدت به سمت توسعه سیال های پیشرفته و جدید با شاخص های حرارتی بالا پیش می‌روند. یکی از خواص مهم نانوذرات نسبت سطح به حجم بالای این مواد است که در تکنولوژی نانو اولین اثر کاهش اندازه ذرات، افزایش سطح است. افزایش نسبت سطح به حجم نانوذرات باعث می‌شود که اتم های واقع در سطح، اثر بسیار بیشتری نسبت به اتم‌های درون حجم ذرات، بر خواص فیزیکی ذرات داشته باشند. این ویژگی واکنش‌پذیری نانوذرات را بهشدت افزایش می‌دهد، علاوه بر این افزایش سطح ذرات فشار سطحی را تغییر داده و منجر به تغییر فاصله بین ذرات یا فاصله بین اتم‌های ذرات می‌شود.

روشهای زیادی برای مدل‌سازی مسایل مختلف وجود دارد که محققان برای حل مسایل از آنها استفاده می‌کنند. از بین این روش‌ها روش شبکه بولتزمن در دهه گذشته در محدوده وسیعی از مسایل مربوط به جریان سیال و انتقال حرارت در مهندسی مکانیک به کار برده شده است.

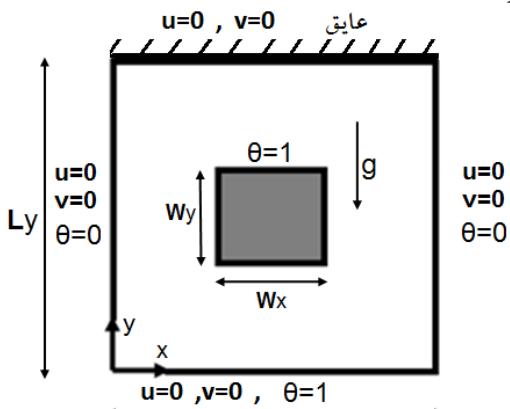
از دلایل استفاده از این روش می‌توان به کاربرد راحت، توانایی شبیه سازی جریان های چندفاری و با هندسه پیچیده و سادگی الگوریتم حل، امکان اعمال نیروهای بین ذره ای در سیالات دو یا چندجزی، توانایی استفاده از محاسبات موازی و درنهایت بی نیازی از استفاده از معادله پواسون برای بدست آوردن فشار اشاره کرد. معادله بولتزمن یک معادله آماری از حرکت و برخورد ذرات است که در واقعیت خصوصیات میکروسکوپیک مولکول‌ها را بررسی می‌کند. هولسز و ریچمن [۱۶] در سال ۲۰۱۳ انتقال حرارت جابجایی

ضریب لزجت و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در محاسبه متوسط عددنالست تاثیر دارد. کارآیی روش شبکه بولتزمن با توجه به اینکه روش کاپربردی و جدید است در بررسی این گونه جریان‌ها در این تحقیق مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

برای حل این مساله با استفاده از روش شبکه بولتزمن از زبان برنامه نویسی فرتون ۹۰ و برای نمایش نمودارها و کانتورها از نرم‌افزار تک پلات ۱۰ استفاده شده است.

۳- روش شبکه بولتزمن

روش شبکه بولتزمن برخلاف روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی رایج که خواص مکروسکوپیک سیال را بیان می‌کند، رفتار سیال را در سطح مzoskoپیک تعیین می‌نماید. روش شبکه بولتزمن از ماشین سلوی شبکه گاز استخراج شد، اولین بار روش شبکه گاز توسط فریش^۱ و همکاران^[۲۱] در سال ۱۹۸۶ ارایه شد و مک‌نامارا و زانتی^[۲۲] نخستین بار در سال ۱۹۸۸ به منظور فایق آمدن بر مشکلات شبکه گاز روش شبکه بولتزمن را پیشنهاد دادند. در این روش فرض بر این است که درجات آزادی ذرات تشکیل دهنده محیط در جهات مشخصی و فقط در موقعیت‌های نقاط شبکه قرار دارند.



شکل ۱ هندسه مساله مورد نظر

۳- معادله جریان شبکه بولتزمن

در روش شبکه بولتزمن برای توصیف ذرات از یک متغیر به نام تابع توزیع ذرات به شکل زیر استفاده می‌شود^[۲۳]:

$$f_i(\vec{x} + \vec{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\vec{x}, t) + \Omega_i(f) \quad (1)$$

که (f) عملگر برخورد است. این معادله شامل دو مرحله عمده برخورد و انتشار است. در مرحله برخورد تابع توزیع در هر گره با هم برخورد می‌کنند و مرحله انتشار تابع توزیع ذره از یک گره به گره مجاور منتقل می‌شوند. عملگر برخورد با استفاده از تقریب بی-جی-کی به صورت زیر است^[۲۳]:

$$\Omega_i = -\frac{1}{\tau_v}(f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)) \quad (2)$$

که در آن f_i^{eq} تابع توزیع تعادلی و τ_v ضریب تخفیف بدون بعد است. بنابراین معادله بولتزمن را می‌توان به صورت زیر نوشت^[۲۳]:

$$\tilde{f}_i(\vec{x} + \vec{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\vec{x}, t) - \frac{1}{\tau_v}[f_i - f_i^{eq}] + F_i \Delta t \quad (3)$$

و روش حجم محدود مقایسه کردند که نتایج قابل قبولی به دست آمد. مجری و همکاران^[۱۶] در سال ۲۰۱۴ انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون یک محفظه مربعی شبکه بولتزمن با نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در معرض میدان مغناطیسی را با استفاده از روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. کفایتی^[۱۷] در سال ۲۰۱۴ تاثیر اتلاف حرارت سیال فرومغناطیسی را بر جابجایی طبیعی در یک محفظه شبکه بولتزمن بر از نانوسیال نفت-کوبالت با استفاده از روش شبکه بولتزمن بررسی کرد. شیخ‌الاسلامی و همکاران^[۱۸] در سال ۲۰۱۴ روش شبکه بولتزمن را برای بررسی انتقال حرارت جابجایی طبیعی جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در بین دایره‌های هم مرکز با استفاده از نانوسیال آب-مس به کار برداشتند. کلته و حسنی^[۱۹] در سال ۲۰۱۴ انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال را در یک محفظه ال‌شکل با استفاده از روش شبکه بولتزمن شیوه سازی کردند. کفایتی^[۲۰] در سال ۲۰۱۴ تاثیر اتلاف حرارت سیال مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی در یک محفظه پر از نانوسیال نفت-کوبالت با توزیع دمای خطی در حضور میدان مغناطیسی با استفاده از روش شبکه بولتزمن بررسی کرد.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در گذشته روش شبکه بولتزمن برای بررسی انتقال حرارت جابجایی طبیعی در یک محفظه باز یا بسته با استفاده از نانوسیال‌های مختلف و همچنین بدون استفاده از نانوسیال به کار گرفته شده است، اما این روش برای شرایط مزی مورد نظر و ایجاد مانع گرم در مرکز و تغییر ابعاد مانع و بعد محفظه همراه با نانوسیال آب-اکسید تیتانیم تاکنون به کار گرفته نشده است، که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین اثر نسبت سطح، اثر تغییر عدد رایلی و کسر حجمی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ضمن با تغییر مدل‌های مختلف محاسبه ضریب هدایت حرارتی و ضریب لزجت نانوسیال، تاثیر این مدل‌ها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- شرح مساله

در این تحقیق مساله انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال اطراف یک مانع گرم درون یک محفظه مربعی با استفاده از روش شبکه بولتزمن بصورت دو بعدی مورد مطالعه عددی قرار می‌گیرد. در هندسه این مساله (شکل ۱) دیواره‌های سمت چپ و راست سرد، بالا عایق و پایین گرم است و یک مانع مربعی گرم در وسط محفظه قرار دارد. جریان آرام و تراکم ناپذیر و سیال مورد مطالعه نانوسیال آب-اکسید تیتانیم در نظر گرفته شده است. دیواره‌های محفوظه بدون حرکت است و برای محاسبه سرعت جریان و دمای سیال از مدل شبکه D2Q9 استفاده می‌شود. تغییر پارامترهایی از قبیل عدد رایلی، کسر حجمی نانوسیال، ابعاد مانع، ابعاد محفظه، نسبت سطح (نسبت سطح کره هم حجم با نانوذره به سطح نانوذره) و مدل‌های مختلف محاسبه ضریب هدایت حرارتی و ضریب لزجت، تاثیرات مهمی بر جریان و انتقال حرارت در هندسه مورد نظر می‌گذارد که این موضوع می‌تواند در خیلی از کاپربردهای مهندسی از قبیل خنک کاری تجهیزات الکترونیکی، هسته‌ای و راکتورهای شیمیایی، سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارت و غیره تاثیر گذارد باشد. و به همین دلیل در این تحقیق تاثیر تغییر این پارامترها مورد بررسی قرار می‌گیرد. با تغییر ابعاد مانع و ابعاد محفظه می‌توان وضعیت محفوظه را برای انتقال حرارت بهتر به دست آورد و با تغییر عدد رایلی و کسر حجمی می‌توان انتقال حرارت را بهبود بخشید. شکل نانوذرات که به نسبت سطح بستگی دارد نیز در انتقال حرارت بهتر موثر است. همچنین مدل محاسبه

که φ کسر حجمی نانو ذره و زیرنویس^f مربوط به سیال، s مربوط به ماده جامد و n_f مربوط به نانوسیال می‌باشد. لزجت نانوسیال که شامل یک سوپرانسیون رقیقی از ذرات کروی جامد است با استفاده از رابطه بریکمن [۲۶] به دست می‌آید:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (20)$$

وانگ و موجومدار [۲۷] برای محاسبه ضریب لزجت نانوسیال از رابطه زیر استفاده کردند:

$$\mu_{nf} = \mu_f (123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \quad (21)$$

ضریب هدایت گرمایی نانوسیال با فرض یک شکل و کروی بودن نانوذرات توسط روش ماکسول-گارنت [۲۸] به صورت زیر به دست می‌آید:

$$k_{nf} = k_f \left(\frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)} \right) \quad (22)$$

برای مخلوط‌های جامد-مایع که در آن نسبت هدایت دو فاز بزرگتر از ۱۰۰ باشد می‌توان از رابطه همیلتون-کروز [۲۹] استفاده کرد که انحراف از کروی بودن ذرات را نیز در نظر می‌گیرد:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \left(\frac{k_s + (n-1)k_f + (n-1)\varphi(k_f - k_s)}{k_s + (n-1)k_f + \varphi(k_f - k_s)} \right) \quad (23)$$

$$n = \frac{3}{\Psi}, \quad 0.5 < n < 6$$

که در آن n فاکتور شکل تجربی است و Ψ به صورت نسبت سطح کره هم حجم با ذره به سطح ذره تعريف می‌شود. برای ذرات کروی $1 = \Psi$ است.

عدد ناسلت محلی [۱۶]:

$$Nu = -\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{L}{\Delta T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (24)$$

عدد ناسلت متوسط [۱۶]:

$$Nu_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_y dy \quad (25)$$

خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال آب-اکسید تیتانیم در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال آب-اکسید تیتانیم

| μ (Kg/ms) | β (1/k) | k (W/mk) | c_p (J/Kg.m) | ρ (Kg/m ³) | ماده |
|------------------|---------------------|---------------|-------------------|--------------------------------|------------------|
| ۱ | 21×10^{-5} | ۰/۸۱۳ | ۴۱۷۹۰ | ۹۹۷/۱ | آب |
| - | 9×10^{-5} | ۸/۹۵۳۸ | ۶۸۶/۲ | ۴۲۵۰/۰ | اکسید تیتانیم |

۴- تفسیر و تحلیل نتایج

در این بخش مساله انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید تیتانیم در یک محفظه مربعی اطراف یک مانع گرم با روش شبکه بولترمن بررسی می‌شود. دیواره‌های چپ و راست سرد، پایین گرم و بالا عایق است. جریان آرام و تراکم ناپذیر و دیواره‌های محفوظه بدون حرکت است برای محاسبه سرعت جریان و دمای سیال از مدل شبکه بولترمن نه سرعته استفاده می‌شود. ابتدا برای صحت سنگی برنامه کامپیوتری نتایج انتقال حرارت جابجایی طبیعی در یک محفظه مربعی مانع دار با سیال آب شبیه سازی و با نتایج راگوئی و همکاران [۳۰] مقایسه شد. مستقل بودن نتایج از شبکه حل نیز بررسی خواهد شد و سپس نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نانوسیال در هندسه و شرایط مورد بررسی، همراه با نانوسیال آب-اکسید تیتانیم ارایه خواهد شد.

۴-۱ اعتبارسنجی

که F_i معرف نیروی خارجی وارد بر ذرات است و می‌توان در مسایل انتقال حرارت جابجایی طبیعی در روش شبکه بولترمن به صورت $3\rho w_i c_{y_i} g \beta \Delta T$ در نظر گرفت. با داشتن معادله بولترمن کمیات ماکروسکوپیک چگالی، بردار سرعت و انرژی داخلی را می‌توان محاسبه نمود [۲۴]:

$$\rho(\vec{x}, t) = \int f(\vec{x}, \vec{c}, t) d\vec{c} \quad (4)$$

$$\rho \vec{u}(\vec{x}, t) = \int \vec{c} f(\vec{x}, \vec{c}, t) d\vec{c} \quad (5)$$

$$\rho \epsilon(\vec{x}, t) = \int \vec{c}^2 f(\vec{x}, \vec{c}, t) d\vec{c} \quad (6)$$

که در آن، \vec{u} بردار سرعت ماکروسکوپیک و \vec{c} سرعت ذرات می‌باشد. همچنین انرژی داخلی سیستم را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۲۳]:

$$e = \frac{3 k_B T}{2 m} \quad (7)$$

که T دما، m جرم مولکولی و k_B ثابت بولترمن می‌باشد.

در کار حاضر از روش شبکه بولترمن D2Q9 استفاده شد کهتابع توزیع تعادلی برای این شبکه به صورت زیر است [۲۳]:

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left[1 + \frac{1}{c_s^4} \vec{c}_i \cdot \vec{u} + \frac{1}{2c_s^4} (\vec{c}_i \cdot \vec{u})^2 - \frac{1}{2c_s^2} \vec{u}^2 \right] \quad (8)$$

که سرعت صوت در این مدل، $c_s = c/\sqrt{3}$ است و w_i ضرایب وزنی به صورت

$$D2Q9 = 1/36 \text{ و } w_{5,6,7,8} = 1/9 \text{ و } w_{1,2,3,4} = 4/9 \quad (9)$$

هستند. بردارهای سرعت به صورت زیر است [۲۵]:

$$\vec{c}_i = \begin{cases} (0,0) & i = 0 \\ \vec{c} \left(\cos \left[(i-1) \frac{\pi}{2} \right], \sin \left[(i-1) \frac{\pi}{2} \right] \right) & i = 1-4 \\ \sqrt{2} \vec{c} \left(\cos \left[(2i-9) \frac{\pi}{4} \right], \sin \left[(2i-9) \frac{\pi}{4} \right] \right) & i = 5-8 \end{cases} \quad (10)$$

که \vec{c} می‌باشد، δx طول المان‌های شبکه و δt مرحله زمانی می‌باشد. همچنین چگالی و سرعت‌های ماکروسکوپیک از روابط زیر به دست می‌آیند [۲۳]:

$$\rho = \sum_{i=0}^8 f_i \quad (11)$$

$$\rho \cdot u = \sum_{i=0}^8 \vec{c}_i f_i \quad (12)$$

با استفاده از بسط چاپمن-انزکوگ رابطه بین لزجت و ضریب تخفیف به صورت زیر است [۲۲]:

$$v = c_s^2 \Delta t (\tau_v - 0.5) \quad (13)$$

فشار از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$p = c_s^2 \rho \quad (14)$$

۲-۱- معادله گرمایی شبکه بولترمن

تابع توزیع گرمایی به صورت زیر است [۲۳]:

$$g_i(\vec{x} + \vec{c}_i \Delta t, t + \Delta t) - g_i(\vec{x}, t) = -\frac{1}{\tau_h} (g_i - g_i^{eq}) \quad (15)$$

که τ_h ضریب تخفیف مربوط به دما است و g_i^{eq} تابع توزیع تعادلی مربوط به

دما است که از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$g_i^{eq} = T w_i \left(1 + \frac{\vec{c}_i \cdot \vec{u}}{c_s^2} \right) \quad (16)$$

دما و ضریب پخش گرمایی از روابط زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$T = \sum_{i=0}^8 g_i \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{(4x)^2}{3\Delta t} (\tau_h - 0.5) \quad (18)$$

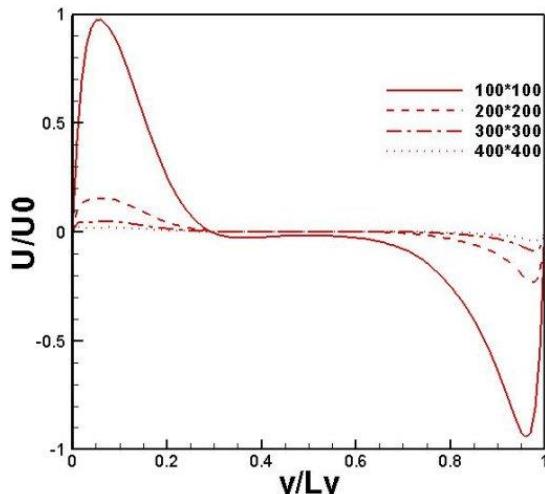
۳-۱- مدل سازی نانوسیال

خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال بجز چگالی که با استفاده از تقریب بوزینسک به دست می‌آید، ثابت فرض می‌شوند، که در جدول ۱ آمده است.

چگالی نانوسیال، ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال به صورت زیر است [۲۵]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_s \quad (19)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_s \quad (20)$$



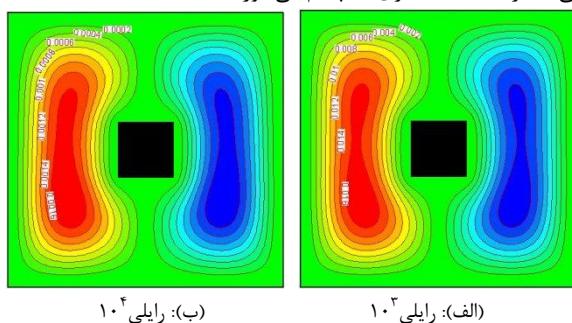
شکل ۴ توزیع عمودی مولفه X سرعت در عدد رایلی 10^3 و اندازه‌های شبکه مختلف

۴-۳- انتقال حرارت جابجایی طبیعی در یک محفظه مربعی با مانع گرم همراه با نانوسیال

در این بخش برای حل مساله مورد نظر تحقیق به هندسه مساله نانوسیال آب-اکسید تیتانیم اضافه کرده و تأثیر تغییر عدد رایلی، کسر حجمی نانوسیال، ابعاد مانع و ابعاد محفظه، تغییر مدل محاسبه ضریب لزجت و ضریب هدایت حرارتی و نیز تغییر نسبت سطح بر خطوط جریان، خطوط هم‌دما، انتقال حرارت و عدد ناسلت، بررسی خواهد شد. شبکه حل ۳۰۰x۳۰۰ است و مدل‌های همیلتون-کروزر [۲۹] و ماکسول-گارن特 [۲۸] و محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و مدل‌های وانگ [۲۷] و بریکمن [۲۶] برای محاسبه ضریب لزجت نانوسیال با هم مقایسه شدند.

۴-۳-۱- اثر تغییر عدد رایلی

در این قسمت کسر حجمی نانوسیال برابر 4×10^{-4} و ابعاد مانع 2×1 طول محفظه مربعی فرض شد. با توجه به شکل ۵ با افزایش عدد رایلی خطوط جریان به نقاط مرزی محفظه نزدیک می‌شوند و این مساله در اعداد رایلی بزرگ‌تر بیشتر به چشم می‌خورد. با توجه به شکل ۶ با افزایش عدد رایلی سهم جابجایی بیشتر شده، خطوط هم‌دما از حالت عمودی به حالت افقی تبدیل می‌شود و گرادیان دما در نزدیک دیواره‌ها بیشتر می‌شود. با توجه به شکل ۷ عدد ناسلت متوسط در دیواره سمت راست با افزایش عدد رایلی زیاد می‌شود که علت آن را می‌توان افزایش سهم جابجایی دانست و این افزایش در اعداد رایلی کمتر با شبیه‌بیشتری به چشم می‌خورد.



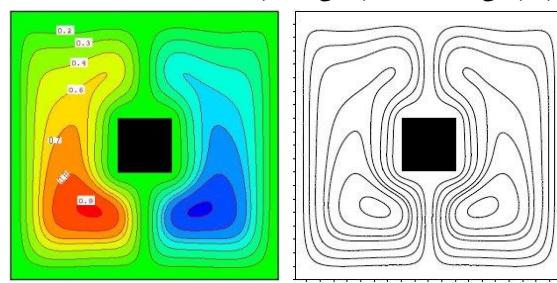
(ب): رایلی 10^4

(الف): رایلی 10^3

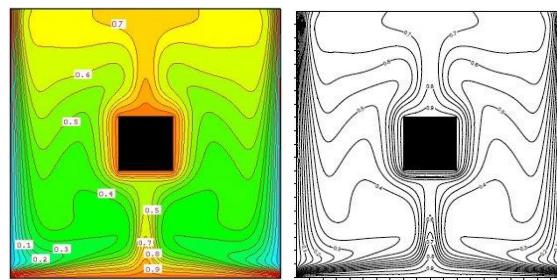
برای اعتبارسنجی برنامه کامپیوتی انقال حرارت جابجایی طبیعی در یک محفظه مربعی با مانع گرم حل شد. دیوارهای سمت چپ و راست سرد، دیواره پایین گرم و دیواره بالایی عایق می‌باشد. عدد پرانتل ۷ و در رایلی 10^3 با نتایج مقاله راگوبی و همکاران [۳۰] مقایسه شد. در شکل‌های ۲ و ۳ خطوط جریان و خطوط هم‌دما در کار حاضر با نتایج مقاله راگوبی و همکاران [۳۰] مقایسه شد. همانطور که مشاهده می‌شود خطوط جریان و خطوط هم‌دما تطابق خوبی با نتایج کار راگوبی و همکاران [۳۰] دارد.

۴-۲- استقلال نتایج از شبکه حل

نتایج مولفه X بردار سرعت در انقال حرارت جابجایی طبیعی در یک محفظه مربعی مانع دار در عدد رایلی 10^3 و با اندازه‌های مختلف 100×100 و 200×200 و 300×300 و 400×400 باهم مقایسه شد، این مقایسه نشان داد که نتایج در شبکه‌بندی ریزتر دقیق‌ترند و در شبکه‌بندی درشت وابسته به شبکه حل است. شکل ۴ توزیع عمودی مولفه X سرعت را در اندازه‌های شبکه مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل می‌توان دید نتایج در شبکه‌های 200×200 و 300×300 و 400×400 اختلاف ناچیزی باهم دارند. لذا شبکه‌بندی 300×300 شبکه‌ای مناسب است.

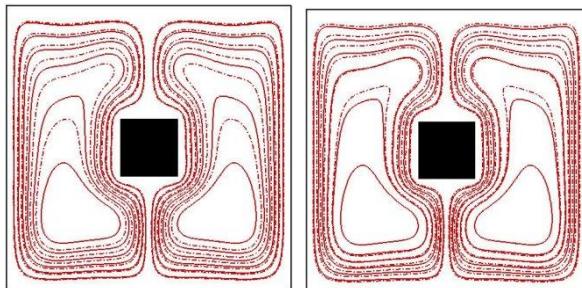


شکل ۲ خطوط جریان در مقاله راگوبی [۳۰] (سمت راست) و خطوط جریان کار حاضر (سمت چپ) در عدد رایلی 10^3



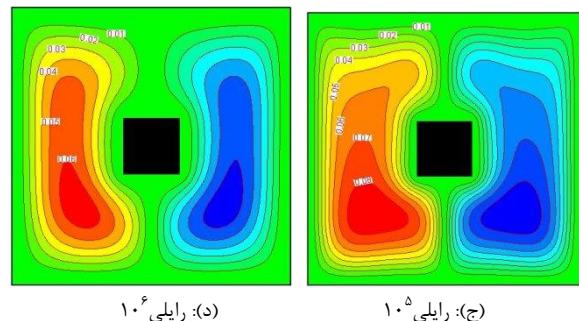
شکل ۳ خطوط هم‌دما در مقاله راگوبی [۳۰] (سمت راست) و خطوط هم‌دما کار حاضر (سمت چپ) در عدد رایلی 10^3

مقایسه شد. با افزایش کسر حجمی نانو سیال خطوط جریان به مرازهای محفظه نزدیک می‌شوند. شکل ۹ خطوط هم دما را در عدد رایلی 10^6 و ابعاد 0.06×0.02 طول محفظه نشان می‌دهد. کسر حجمی‌های 0.02 و 0.04 و 0.06 با کسر حجمی 0.0 مقایسه شد. با توجه به شکل ۹ با افزایش کسر حجمی گرادیان دما در نزدیک دیوارهای بیشتر می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ عدد ناسلت متوسط در دیواره سمت راست با افزایش کسر حجمی زیاد می‌شود که این افزایش به صورت خطی است.

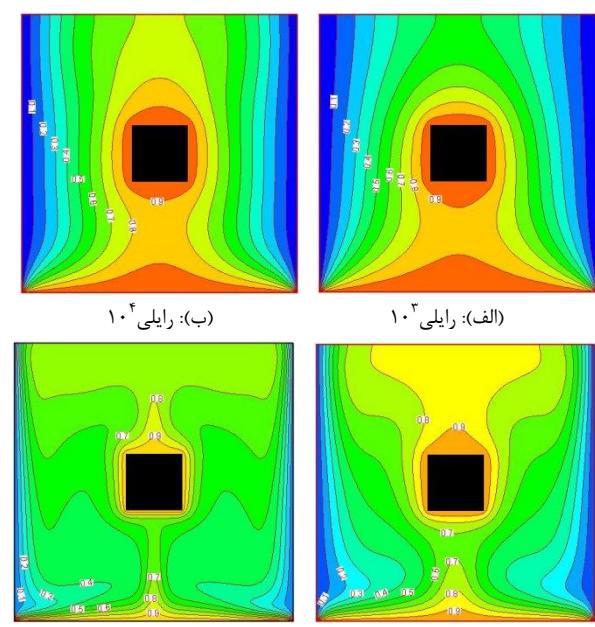


شکل ۸ خطوط جریان در عدد رایلی 10^6 و کسر حجمی مختلف
 (الف): $\varphi = 0.0$ (—) و $\varphi = 0.02$ (— · —)
 (ب): $\varphi = 0.0$ (—) و $\varphi = 0.04$ (— · —)
 (ج): $\varphi = 0.0$ (—) و $\varphi = 0.06$ (— · —)

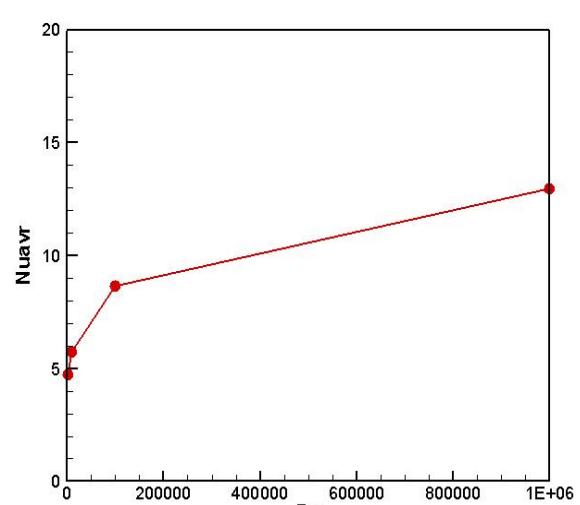
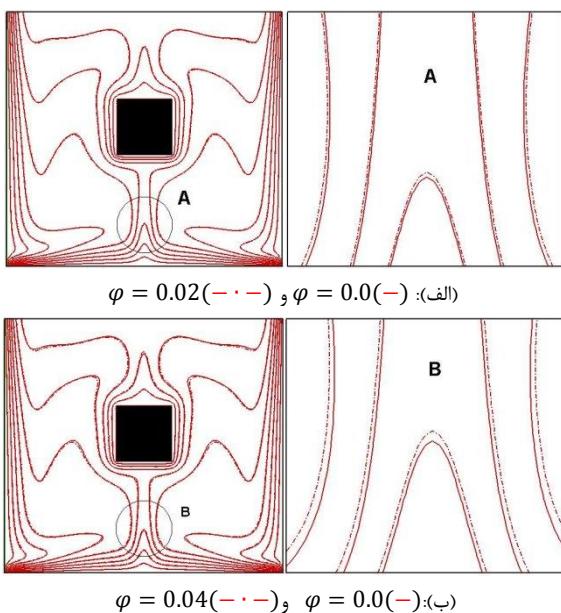
شکل ۸ خطوط جریان در عدد رایلی 10^6 و کسر حجمی مختلف



شکل ۹ خطوط جریان در $\varphi = 0.04$ و عدد رایلی مختلف



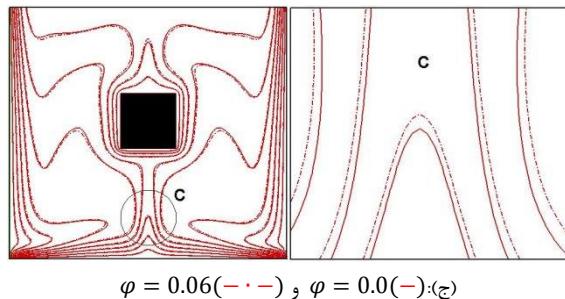
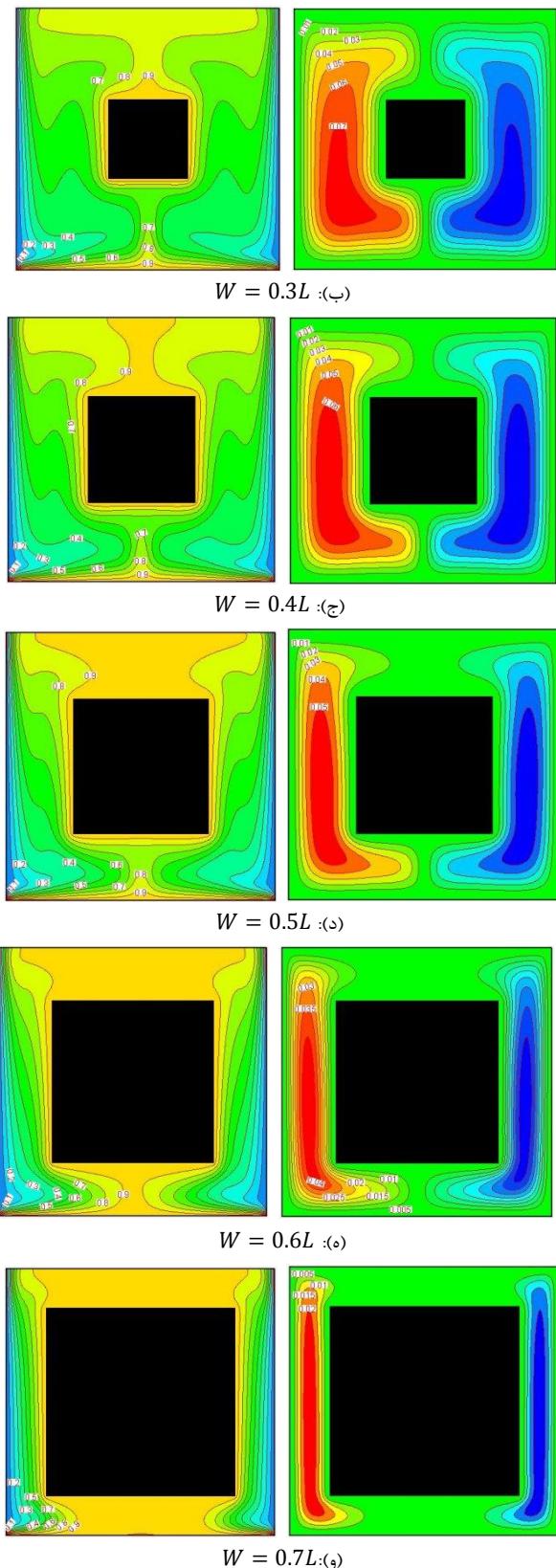
شکل ۱۰ خطوط هم دما در $\varphi = 0.04$ و عدد رایلی مختلف



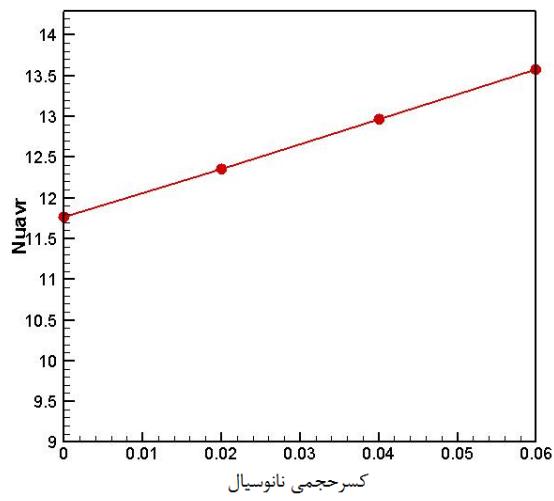
شکل ۱۲ تغییر عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رایلی در کسر حجمی 0.04

۴-۲-۳-۴ اثر تغییر کسر حجمی نانو سیال

شکل ۸ خطوط جریان را در عدد رایلی 10^6 و ابعاد 0.06×0.02 طول محفظه نشان می‌دهد. کسر حجمی‌های 0.02 و 0.04 و 0.06 با کسر حجمی 0.0 .



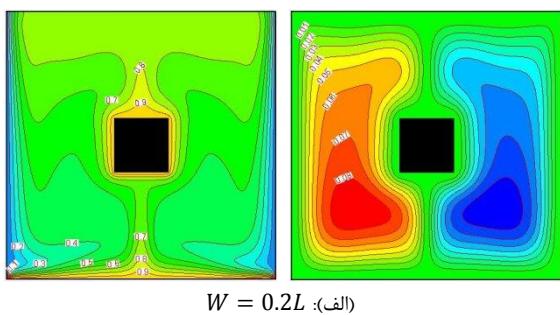
شکل ۹ خطوط هم‌دما در عدد رایلی 10^6 و کسر حجمی مختلف

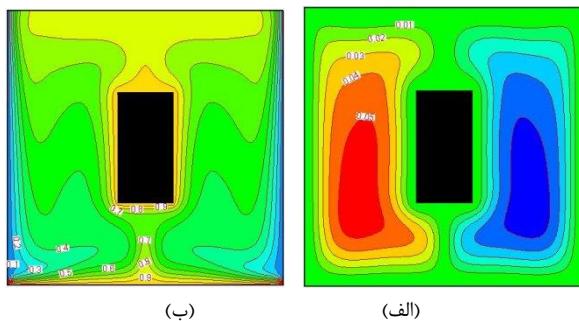


شکل ۱۰ تغییر عدد ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی در عدد رایلی 10^6

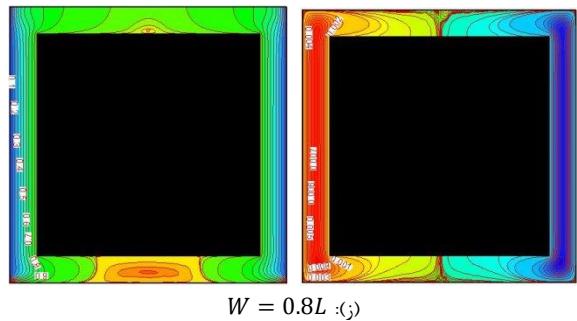
۳-۴-۳-۴-۴ اثر تغییر ابعاد مانع

در این بخش عدد رایلی برابر 10^6 و کسر حجمی نانوسیال نیز برابر $0/04$ فرض شد. ابعاد مانع به ترتیب در $0/2$ و $0/3$ و $0/4$ و $0/5$ و $0/6$ و $0/7$ و $0/8$ ابعاد محفظه مربعی است. با توجه به شکل ۱۱ با افزایش ابعاد مانع خطوط جریان کشیده تر شده و خطوط هم‌دما از حالت افقی به حالت عمودی در می‌آیند. درحالی که ابعاد مانع $0/8$ ابعاد محفظه هست گردابه‌هایی ایجاد می‌شوند که باعث افزایش انتقال حرارت می‌شوند. با توجه به شکل ۱۲ با اضافه شدن ابعاد مانع تا نصف ابعاد محفظه متوسط عدد ناسلت زیاد می‌شود و از آن به بعد تا $0/7$ ابعاد محفظه متوسط عدد ناسلت کم می‌شود. و پس از آن دوباره تا $0/8$ ابعاد محفظه متوسط عدد ناسلت زیاد می‌شود. پس بهترین عدد ناسلت متوسط وقتی است که ابعاد مانع نصف طول محفظه باشد یعنی $W = 0.5L$.





شکل ۱۴ خطوط جریان (الف) و خطوط هم دما (ب) در اندازه مانع با $W_y = 2W_x$



شکل ۱۱ خطوط جریان (سمت راست) و خطوط هم دما (سمت چپ) در محفظه با اندازه موانع مختلف

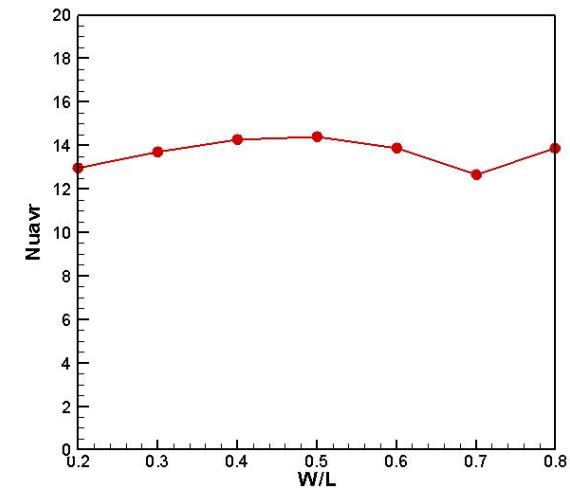
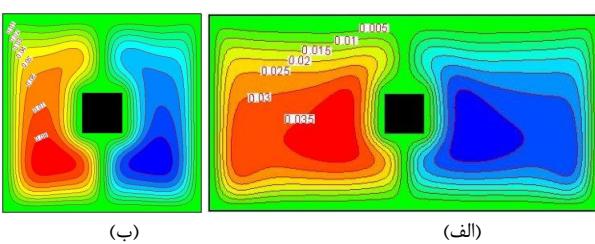
جدول ۲ تأثیر ابعاد مانع در عدد ناسلت متوسط

| اعداد ناسلت متوسط در دیوار سرد | ابعاد مانع |
|--------------------------------|--------------|
| ۱۳/۲۲۱ | $W_x = 2W_y$ |
| ۱۳/۳۴۹ | $W_y = 2W_x$ |
| ۱۲/۹۶۵ | مربعی |
| ۱۳/۷۲۱ | $W = 0.3L$ |
| ۱۴/۲۶۰ | مربعی |
| ۱۴/۴۲۱ | $W = 0.4L$ |
| ۱۳/۸۵۹ | مربعی |
| ۱۲/۶۵۶ | $W = 0.5L$ |
| ۱۳/۸۹۸ | $W = 0.6L$ |
| | مربعی |
| | $W = 0.7L$ |
| | مربعی |
| | $W = 0.8L$ |

۴-۳-۴- اثر تغییر ابعاد محفظه بر خطوط جریان و خطوط هم دما و عدد ناسلت

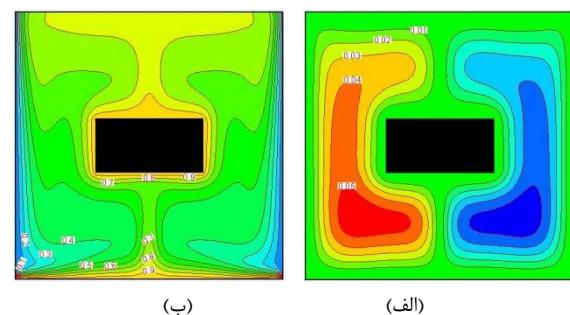
شکل ۱۵ و ۱۶ تأثیر اضافه شدن طول محفظه بر خطوط جریان و خطوط هم دما را نشان می دهد. عدد رایلی 10^6 و کسر حجمی نانو سیال 0.004 است. در شکل (ب) ابعاد محفظه برابر و به شکل مریع است و در شکل (الف) طول محفظه دو برابر عرض محفظه و به صورت افقی است. با توجه به شکل ۵ خطوط جریان در محفظه مربعی نسبت به محفظه افقی کشیده تر هستند. در شکل ۶ گرادیان دما نزدیک دیواره های محفظه در محفظه افقی بیشتر از محفظه مربعی است.

در شکل ۱۷ و ۱۸ تأثیر اضافه شدن عرض محفوظه بر خطوط جریان و خطوط هم دما را نشان می دهد. عدد رایلی 10^6 و کسر حجمی نانو سیال 0.004 است. در شکل (الف) ابعاد محفوظه برابر و به شکل مریع است و در شکل (ب) عرض محفوظه دو برابر طول محفوظه و به صورت عمودی است. با توجه به شکل ۱۷ خطوط جریان در محفوظه عمودی در سمت چپ و راست محفوظه به دو قسمت تقسیم شده است. در شکل ۱۸ گرادیان دما نزدیک دیواره پایین محفوظه در محفوظه عمودی کمتر از محفوظه مربعی است.



شکل ۱۲ تغییر عدد ناسلت بر حسب ابعاد مانع

با توجه به شکل ۱۳ با دو برابر شدن طول مانع خطوط جریان در مانع نسبت به مانع مربعی کشیده تر شده و گرادیان دما نزدیک دیواره های محفظه بیشتر از مانع مربعی است. با توجه به شکل ۱۴ با دو برابر شدن عرض مانع خطوط جریان نسبت به مانع مربعی کشیده تر شده و گرادیان دما نزدیک دیواره های محفوظه بیشتر از مانع مربعی است. در جدول ۲ تأثیر اضافه شدن طول یا عرض مانع در عدد ناسلت متوسط در دیواره سمت راست با توجه به شکل ۱۳ با دو برابر شدن طول مانع خطوط جریان در مانع نسبت به مانع مربعی کشیده تر شده و گرادیان دما نزدیک دیواره های محفوظه مشخص شده است. اعداد نشان می دهند که با دو برابر شدن طول یا عرض مانع عدد ناسلت متوسط در دیواره سمت راست افزایش می یابد و این افزایش وقتی عرض مانع افزایش یابد بیشتر است.

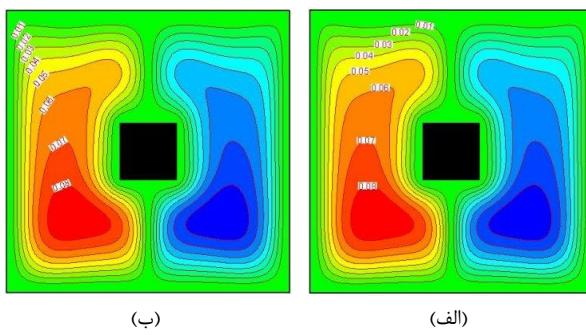


شکل ۱۱ خطوط جریان (سمت راست) و خطوط هم دما (سمت چپ) در اندازه مانع با $W = 0.8L$

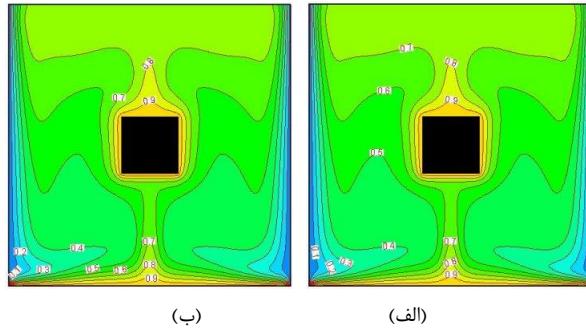
بریکمن [۲۶] برای محاسبه ضریب لزجت نانوسیال با هم مقایسه شدند. نانوسیال مورد مطالعه آب-اکسید تیتانیم، عدد رایلی 10^6 ، کسر حجمی $0.04/0$ و ابعاد مانع $0.1/0.2$ بود. محفوظه مربعی در نظر گرفته شد. شکل ۱۹ مقایسه خطوط جریان و شکل ۲۰ مقایسه خطوط همدما در مدل‌های همیلتون [۲۹] و ماکسول [۲۸] را نشان می‌دهد. در این مساله نسبت سطح برابر یک و مدل محاسبه لزجت نانوسیال مدل بریکمن [۲۶] در نظر گرفته شد، بنابراین چون شکل نانو ذرات به صورت کروی است، هم خطوط جریان و هم خطوط همدما منطبق بر مدل ماکسول-گارنت [۲۸] می‌شود و می‌توان گفت زمانی که نسبت سطح برابر یک باشد نتایج دقیقاً منطبق بر مدل ماکسول-گارنت [۲۸] است.

جدول ۳ تأثیر اضافه شدن طول یا عرض محفوظه در عدد ناسلت متوسط سمت راست

| nasalt متوسط دیوار سرد | وضعیت محفوظه |
|------------------------|--------------------------------|
| ۲۵/۴۶۰ | طول محفوظه دو برابر عرض محفوظه |
| ۴/۹۰۰ | عرض محفوظه دو برابر طول محفوظه |
| ۱۲/۹۶۵ | محفظه مربعی |

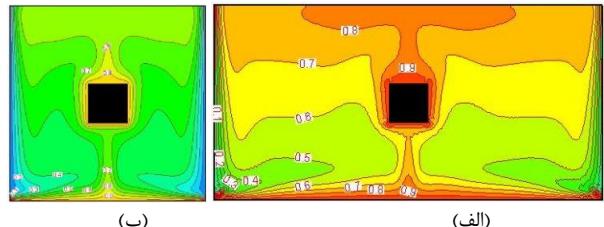


شکل ۱۹ مقایسه خطوط جریان مدل‌های همیلتون [۲۹] (الف) و ماکسول [۲۸] (ب)

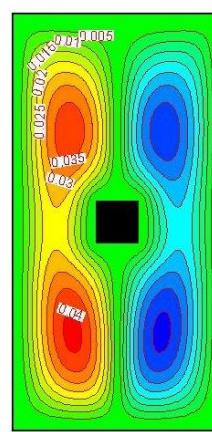


شکل ۲۰ مقایسه خطوط همدما مدل‌های همیلتون [۲۹] (الف) و ماکسول [۲۸] (ب) متوسط عدد ناسلت در دیواره سمت راست نیز در مدل همیلتون [۲۹] و ماکسول [۲۸] در نسبت سطح یک در جدول ۴ مقایسه شده است. که این مقایسه هم به دلیل فوق در دو روش دقیقاً بر هم منطبق است. با توجه به شکل ۲۱ با کم شدن نسبت سطح کره هم حجم با نانوذره به سطح نانوذره، متوسط عدد ناسلت دیواره‌های سرد زیاد می‌شود که دلیل آنرا می‌توان در زیاد شدن سطح تماس نانوذره با سیال پایه دانست. هر چه شکل نانوذره به کره نزدیک تر شود سطح تماس کم شده و در نتیجه متوسط عدد ناسلت کم می‌شود و هرچه از حالت کروی خارج شود سطح تماس زیادتر شده و متوسط عدد ناسلت زیاد می‌شود.

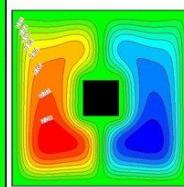
شکل ۱۵ تأثیر اضافه شدن طول محفوظه در جهت خط افق بر خطوط جریان



شکل ۱۶ تأثیر اضافه شدن طول محفوظه در جهت خط افق بر خطوط همدما

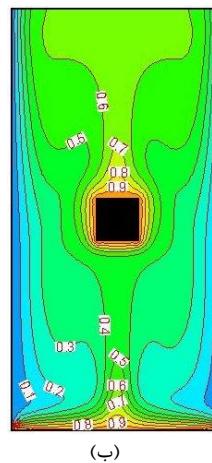


(الف)



(الف)

شکل ۱۷ تأثیر اضافه شدن عرض محفوظه در جهت عمود بر خط افق بر خطوط جریان



(الف)

شکل ۱۸ تأثیر اضافه شدن عرض محفوظه در جهت عمود بر خط افق بر خطوط همدما

در جدول ۳ تأثیر اضافه شدن طول یا عرض محفوظه بر روی عدد ناسلت متوسط در دیواره‌های سرد محفوظه مشخص شده است. اعداد نشان می‌دهند که با دو برابر شدن طول محفوظه متوسط عدد ناسلت در دیواره سمت راست به شدت افزایش می‌یابد و با دو برابر شدن عرض محفوظه متوسط عدد ناسلت در دیواره سمت راست به شدت کاهش می‌یابد.

۳-۴-۵- مقایسه مدل‌های مختلف به دست آوردن ضریب هدایت حرارتی و ضریب لزجت در این بخش مدل‌های همیلتون-کروز [۲۹] و ماکسول-گارنت [۲۸] برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و مدل‌های وانگ [۲۷] و

در این تحقیق انتقال حرارت جابجایی طبیعی اطراف یک مانع گرم درون یک محفظه مربعی با دیواره‌های سمت چپ و راست سرد، دیواره بالا عایق و دیواره پایین گرم با استفاده از روش شبکه بولتزمن بصورت دو بعدی شبیه سازی شد. جریان سیال آرام و تراکم ناپذیر و سیال مورد مطالعه نانوسیال آب-اکسید تیتانیم در نظر گرفته شده است. دیواره‌های محفظه بدون حرکت است و برای محاسبه سرعت جریان و دمای سیال از مدل شبکه D2Q9 استفاده شد. برای محاسبه ضریب لزجت نانوسیال از مدل بربیکمن [۲۶] استفاده شد و این مدل با مدل وانگ [۲۷] مقایسه شد. همچنین برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از مدل ماکسول-گارنت [۲۸] استفاده شد و این مدل با مدل همیلتون-کروزر [۲۹] مقایسه شد. برای اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه‌سازی و نتایج حاصل کار راگویی و همکاران [۳۰] مقایسه شد و کارآیی روش شبکه بولتزمن بررسی شد. تأثیر تغییر عدد رایلی، کسرحجمی نانوسیال، ابعاد مانع، ابعاد محفظه، شکل نانوذرات و مدل‌های مختلف محاسبه ضریب هدایت حرارتی و ضریب لزجت نانوسیال برروی عدد ناسلت و انتقال حرارت جابجایی در اطراف یک مانع گرم درون یک محفظه مربعی بررسی شد. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که:

- الف. با اضافه شدن کسرحجمی در یک عدد رایلی ثابت عدد ناسلت متوسط دیواره سمت راست افزایش می‌یابد.
- ب. در یک کسرحجمی ثابت با افزایش عدد رایلی عدد ناسلت متوسط دیواره سمت راست نیز افزایش پیدا می‌کند.
- ج. با افزایش ابعاد مانع تا نصف ابعاد محفظه متوسط عدد ناسلت دیواره سمت راست زیاد می‌شود و از آن به بعد تا $0.7/0.8$ ابعاد محفظه کم می‌شود و باز تا $0.8/0.9$ ابعاد محفظه زیاد می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که حالت بهینه ابعاد مانع همان نصف طول دیواره محفوظه است.
- د. با اضافه شدن طول یا عرض مانع، متوسط عدد ناسلت نسبت به مانع مربعی افزایش می‌یابد و این افزایش وقتی عرض مانع افزایش یابد بیشتر است.

- ه. روش شبکه بولتزمن به عنوان روشی جدید، مناسب و کارآمد در بررسی جریان سیال و انتقال حرارت است.
- ب. با کاهش نسبت سطح ضریب شکل افزایش یافته و عدد ناسلت متوسط در دیواره‌های سرد زیاد می‌شود.
- و. با دو برابر کردن طول محفظه نسبت به عرض آن متوسط عدد ناسلت در دیواره سمت راست به شدت افزایش می‌یابد ولی با دو برابر کردن عرض محفظه نسبت به طول آن متوسط عدد ناسلت در دیواره سمت راست به شدت کاهش می‌یابد.
- ز. در مدل همیلتون-کروزر [۲۹] برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی وقتی نسبت سطح برابر یک است در یک کسرحجمی و عدد رایلی ثابت متوسط عدد ناسلت نسبت به مدل ماکسول-گارنت [۲۸] برابر است، اما با کاهش نسبت سطح، ضریب شکل افزایش یافته و متوسط عدد ناسلت زیاد می‌شود.

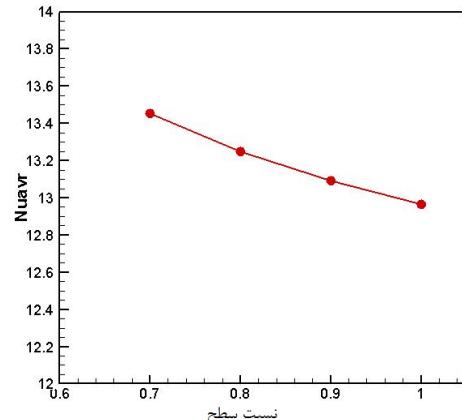
- ح. در مدل وانگ [۲۷] برای به دست آوردن ضریب لزجت نانوسیال متوسط عدد ناسلت در یک کسرحجمی و عدد رایلی ثابت نسبت به مدل بربیکمن [۲۶] کمتر است. پس این دو روش دقیقاً برهم منطبق نیستند و حدود $5/2$ درصد اختلاف دارند.

شکل ۲۲ مقایسه خطوط جریان و مقایسه خطوط هم‌دما در مدل بربیکمن [۲۶] و مدل وانگ [۲۷] را نشان می‌دهد. در این مساله روش محاسبه ضریب هدایت حرارتی مدل همیلتون - کروزر [۲۹] در نظر گرفته شد. با توجه به شکل ۲۲ در مدل بربیکمن [۲۶] و مدل وانگ [۲۷] که برای به دست آوردن ضریب لزجت نانوسیال استفاده می‌شوند خطوط جریان و همچنین خطوط هم‌دما بر هم منطبق نبوده و نتایج آنها کمی با هم اختلاف دارند.

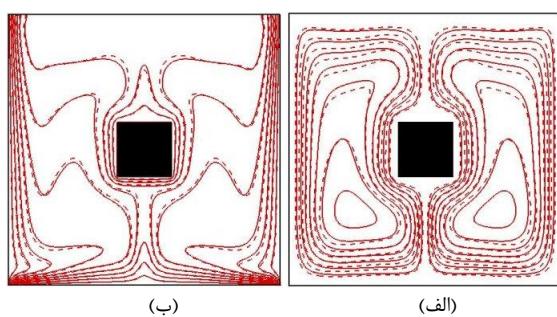
متوسط عدد ناسلت در دیواره‌های سرد نیز در جدول ۵ مقایسه شده است که در مدل بربیکمن [۲۶] بزرگتر از مدل وانگ [۲۷] است.

جدول ۴ مقایسه عدد ناسلت متوسط در دو مدل مختلف و در نسبت سطح برابر یک

| مدل | ناسلت متوسط دیوار سرد |
|--------------------|-----------------------|
| ماکسول-گارنت [۲۸] | ۱۲/۹۶۵ |
| همیلتون-کروزر [۲۹] | ۱۲/۹۶۵ |



شکل ۲۱ تأثیر نسبت سطح بر عدد ناسلت



شکل ۲۲ مقایسه مدل‌های بربیکمن [۲۶] و وانگ [۲۷]، خطوط جریان (الف) و خطوط هم‌دما (ب)

جدول ۵ مقایسه عدد ناسلت متوسط در دو مدل بربیکمن [۲۶] و وانگ [۲۷]

| مدل | ناسلت متوسط دیوار سرد |
|--------------|-----------------------|
| بربیکمن [۲۶] | ۱۲/۹۶۵ |
| وانگ [۲۷] | ۱۲/۲۸۸ |

۵- نتیجه‌گیری

| | | | |
|----------------|-------|---|--|
| حالت تعادل | eq | بالانویس‌ها | ط. روش شبکه بولتزمن به عنوان روشی جدید، مناسب و کارآمد در بررسی جریان سیال و انتقال حرارت است. |
| حالت غیر تعادل | neq | | |
| | | زیرنویس‌ها | |
| سیال | f | | |
| زیرنویس شمارش | i | | ۶- فهرست علائم |
| نانو سیال | nf | | بردار سرعت ($m s^{-1}$) |
| نانوذره | s | | ظرفیت گرمایی ویژه ($J K g^{-1} K^{-1}$) |
| | | | سرعت صوت ($m s^{-1}$) |
| | | | انرژی جنبشی (J) |
| | | | e |
| | | | تابع توزیع چگالی جریان |
| | | | f |
| | | | نیروی خارجی (N) |
| | | | F |
| | | | تابع توزیع چگالی گرما |
| | | | g |
| | | | بردار شتاب گرانش ($m s^{-2}$) |
| | | | \vec{g} |
| | | | ثابت بولتزمن |
| | | | k_B |
| | | | طول محفظه |
| | | | L_x |
| | | | عرض محفظه |
| | | | L_y |
| | | | جرم ملکولی (gr) |
| | | | m |
| | | | فاکتور شکل تجربی |
| | | | n |
| | | | فشار ($K g m^{-1} s^{-2}$) |
| | | | p |
| | | | (دما) T |
| | | | (زمان) t |
| | | | مرحله گسسته زمانی |
| | | | Δt |
| | | | طول مانع |
| | | | W_x |
| | | | عرض مانع |
| | | | W_y |
| | | | تابع وزن |
| | | | w_i |
| | | | بردار مکان (m) |
| | | | \vec{x} |
| | | | مرحله گسسته مکانی |
| | | | Δx |
| | | علایم یونانی | |
| | | ضریب پخش حرارتی ($m^2 s^{-1}$) | α |
| | | ضریب انبساط حرارتی (K^{-1}) | β |
| | | ضریب هدایت گرمایی ($W m^{-1} K^{-1}$) | k |
| | | لزجت دینامیکی ($K g m^{-1} s^{-1}$) | μ |
| | | لزجت ($m^2 s^{-1}$) | ν |
| | | چگالی ($K g m^{-3}$) | ρ |
| | | ضریب تخفیف برخورد بی بعد دما | τ_h |
| | | ضریب تخفیف برخورد بی بعد جریان | τ_v |
| | | کسر حجمی نانوذره (٪) | φ |
| | | نسبت سطح کره هم حجم با نانوذره به سطح نانوذره | Ψ |
| | | عملگر برخورد بی بعد | Ω |

- [22] G. Mc Namara and G. Zanetti, "Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata", *Physics Review Letter*, Vol. 61, pp. 2332–2335, 1988.
- [23] A. A. Mohamad," *Lattice Boltzmann Method*", Springer, Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes , ISBN 978-0-85729-454-8, 2011.
- [24] C. Cercignani, " *The Boltzmann Equation and Its Applications*", Springer, New York, 1998.
- [25] E. Fattah, M. Farhadi, K. Sedighi and H. Nemati, "Lattice Boltzmann simulation of natural convection heat transfer in nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, No.52, pp.137-144, 2012.
- [26] H.C. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions", *Journal Chemistry Physics*, Vol.20, 571,1952
- [27] X.Q. Wang and A.S. Mujumdar,"Heat transfer characters of nanofluids: a review", *Inernationalt Journal Therm Science*, Vol.46, pp.1–19, 2007.
- [28] J. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism unabridged*, Dover, 1954.
- [29] R.L. Hamilton and O.K. Crosser, "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems", *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol.1, pp.182- 191, 1962.
- [30] K. Ragui, Y.k. Benkahla, N. Labsi, and A. Boutra, "Natural Heat Transfer Convection in a Square Cavity Including a Square Heater", *21th Congrès Français de Mécanique, Bordeaux*, 26 au 30 août, 2013.
- [9] GH. R. Kefayati, "Lattice Boltzmann simulation of natural convection in nanofluid-filled 2D long enclosures at presence of magnetic field", *Theoretical and Computational Fluid Dynamic*, No.27, pp.865–883, 2013.
- [10] A. Mohammad, L. Yeon Won and K. Heuy Dong, " Heat Transfer Enhancement of Cu-H₂O Nanofluid with Internal Heat Generation Using LBM", *Open Journal of Fluid Dynamics*, Vol.3, pp.92-99, 2013.
- [11] GH.R. Kefayati, " Effect of a magnetic field on natural convection in an open cavity subjugated to water/alumina nanofluid using Lattice Boltzmann method", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.40, pp. 67–77, 2013.
- [12] S.M. Dash And T.S. lee, "Natural convection from inclined squer cylinder using novel flexible forcing IB-LBM approach", *Engineering Application of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 8, No.1, pp.91-103, 2014.
- [13] M. Y. Gokhale and I. Fernandes, "Mesoscopic simulation of incompressible fluid flow in porous media ", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol.3, No.2, Feb-2014.
- [14] H. Sajjadi and R. Kefayati, "Lattice Boltzmann simulation of turbulent natural convection in tall enclosures", *Thermal Science* 00, 66-66, 2013.
- [15] L. Zheng, Y. Mo and Z. Yuwen, "A coupled lattice Boltzmann and finite volume method for natural convection simulation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, March 2014, pp.864–874, 2014.
- [16] I. Mejri, A. Mahmoudi, M.A. Abbassi and A. Omri," MHD Natural Convection in a Nanofluid-filled Enclosure with Non-uniform Heating on Both SideWalls", *FDMP*, Vol.10, No.1, pp.83-114, 2014.
- [17] GH. R. Kefayati, " Simulation of Ferrofluid Heat Dissipation Effect on Natural Convection at an Inclined Cavity Filled with Kerosene/Cobalt Utilizing the Lattice Boltzmann Method", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, Vol. 65, No.6, pp. 509-530, 2014.
- [18] M. Sheikholeslami, M. Gorji-Bandpy, D.D. Ganji, " Lattice Boltzmann method for MHD natural convection heat transfer using nanofluid", *Powder Technology*, Vol. 254, pp. 82–93, 2014.
- [19] M. Kalteh, H. Hasani, " Lattice Boltzmann simulation of nanofluid free convection heat transfer in an L-shaped enclosure", *Superlattices and Microstructures*, Vol. 66, pp. 112–128, 2014.
- [20] G.H.R. Kefayati, " Natural convection of ferrofluid in a linearly heated cavity utilizing LBM", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, pp. 864–874, 2014.
- [21] U. Frisch, B. Hasslacher and Y. Pameau, "Lattice Gas Automata For Navier-Stokes Equation" , *Physics Review Letter*, Vol. 56, pp. 1505-1508, 1986.