بررسی تأثیر جہت حرکت دیوارہ بر انتقال حرارت جابہجایی ترکیبی درون محفظہ متخلخل یا جذب/تولید حرارت و میدان مغناطیسی

محمد سفید ^{۳*} دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه یزد **هاجر محمدزاده^۲** دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران (تاریخ دریافت: ۱۹۹۹/۰۵/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۹) **محمد نعمتی'** دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه یزد

چکیدہ

در مطالعه حاضر، برای اولین بار، اثر جهت حرکت دیوارههای محفظه ربع دایرهای شکل متخلخل بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی با وجود جذب/تولید حرارت یکنواخت به روش شبکه بولتزمن بررسی شده است. میدان مغناطیسی به دو صورت یکنواخت و پریودیک بر محفظه اعمال می گردد. جابجایی ترکیبی بر اثر حرکت دیوارهها در جهات مختلف به وجود می آید. نتایج نشان می دهد که افزایش عدد ریچاردسون، عدد هارتمن، ضریب جذب/تولید حرارت و کاهش ضریب تخلخل سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می شود. با ثابت ماندن تمامی پارامترها، بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط مربوط به زاویه اعمال سرعت ۹۰ درجه است که در این حالت عدد ناسلت متوسط می شود. با ثابت ماندن تمامی پارامترها، بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط مربوط به زاویه اعمال سرعت ۹۰ درجه است که در این حالت عدد ناسلت متوسط در حدود ۲۵ درصد بیشتر است. همچنین افزایش عدد ریچاردسون سبب کاهش تأثیر اعمال میدان مغناطیسی می شود. پریودیک اعمال کردن میدان مغناطیسی در مقایسه با اعمال یکنواخت، حدود ۳۰ درصد انتقال حرارت بیشتری را منجر می شود. افزایش ضریب تخلخل، اثر عدد هارتمن و زاویه اعمال سرعت را افزایش می دهد. افزایش همزمان ضریب جذب/تولید حرارت و عدد هارتمن، کاهش بیشتر عدد ناسلت متوسط در در در در

واژههای کلیدی: جابجایی ترکیبی، جذب/تولید حرارت یکنواخت، روش شبکه بولتزمن، زاویه اعمال سرعت، محیط متخلخل، میدان مغناطیسی یریودیک.

Investigation the Effect of Direction of Wall Movement on Mixed Convection in Porous Enclosure with Heat Absorption/Generation and Magnetic Field

M. Nemati

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran H. Mohamadzade

Department of Mechanical Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran

M. Sefid

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 19/August/2020 ; Accepted:24/November/2020)

ABSTRACT

In this paper for the first time, the effect of direction of wall movement on mixed convection in circle quarter porous enclosure with heat absorption/generation is investigated by LBM. The magnetic field is applied to the enclosure in uniform and periodic forms. Mixed convection is caused by the movement of walls at different angles. The results show that increasing the Richardson number, Hartmann number, heat absorption/generation coefficient and decrease the porosity coefficient reduce the average Nusselt number. With fixed all parameters the maximum value of the average Nusselt number is related to the 90 $^{\circ}$ velocity angle, in which case the average Nusselt number is about 25% higher. Increasing the Richardson number reduces the effect of the magnetic field. Periodic applied of a magnetic field results in about 30% more than uniform applied. Increasing the porosity coefficient also increases the effect of the Hartmann number and the angle of wall movement. It is observed that the simultaneous increase of the heat absorption/generation coefficient and the Hartmann number lead to a further decrease of the average Nusselt number.

Keywords: Uniform Heat Absorption/Generation, Mixed Convection, Lattice Boltzmann Method, Direction of Wall Movement, Porous Medium, Periodic Magnetic Field.

۳- دانشجوی دکتری : mohammadnemati@stu.yazd.ac.ir

h_mohamadzade@mecheng.iust.ac.ir - دانشجوی دکتری:

۳- استاد (نویسنده پاسخگو): mhsefid@yazd.ac.ir

٩٩

دوفصلنامه علمی مکانیک سیالات و آیرودینامیک، جلد ۹، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۹

ضریب وزنی	ω
زيرنويسها	
سرد	с
گرم	h
شمارہ لینک مدل شبکہ	i

۱– مقدمه

شبیه سازی انتقال حرارت جابجایی اجباری و طبیعی در هندسههای مختلف، کاربردهای گستردهای در زمینههای مهندسی و صنعتی دارد. از جمله این کاربردها می توان به افزایش میزان انتقال حرارت، خنک کاری قطعات الکترونیکی، فناوریهای مربوط به روانکاری، تولید شیشه شناور، انتقال حرارت در حوضچههای خورشیدی، رآکتورهای هستهای، صنایع غذایی و بسیاری از موارد دیگر اشاره نمود [۳-۱]. جریان جابجایی ترکیبی درون محفظه با دیواره متحرک از دو عامل ناشی میشود. عامل اول، جریان برشی ایجاد شده ناشی از حرکت دیواره و عامل دوم، نیروی شناوری ایجاد شده ناشی از شرایط مرزی دمایی محفظه است. با توجه به جهت حرکت دیواره(ها)، این دو عامل می توانند منجر به تضعیف و یا تقویت یکدیگر شوند [۴، ۵]. تیواری و داس [۶] انتقال حرارت جابجايي تركيبي نانوسيال درون محفظه مربعی شکل را در حالتی که دیوارههای عمودی محفظه در جهات مختلف حركت كرده را مورد بررسي قرار دادند. نتايج نشان داد، عدد ریچاردسون و جهت حرکت دیواره نقش قابل توجهی بر میدان جریان و میزان انتقال حرارت دارد. قاسمی و امين الساداتي [٧] به بررسي انتقال حرارت جابجايي ترکیبی درون یک محفظه مثلثی شکل حاوی نانوسیال با تغيير جهت حركت ديواره پرداختند. ديواره پاييني محفظه عایق و دیواره سرد عمودی آن دارای حرکت به سمت بالا و پایین و دیواره مورب محفظه مثلثی در دمای ثابت گرم قرار دارد. نتایج حاصل از کار آنها نشان داد با حرکت دیواره قائم به سمت پایین، چرخش در جریان قدرت می گیرد و میزان انتقال حرارت افزایش می یابد. همچنین با کاهش عدد ریچاردسون و به تبع آن افزایش سرعت حرکت دیواره، میزان انتقال حرارت نيز افزايش مييابد. مسأله انتقال حرارت جابجایی درون محفظه حاوی سیال هادی جریان الكتريسييته تحصت تصأثير ميصدان مغناطيسي

و اختصارات	فهرست علائم
قدرت ميدان مغناطيسي	В
سرعت گسسته شبکه	с
عدد دارسی	Da
تابع توزيع جريان	f
تابع توزيع تعادلي جريان	f^{eq}
نيروى خارجى	F
تابع توزيع دما	g
شتاب جاذبه	g
تابع توزيع تعادلى دما	g^{eq}
عدد گراشف	Gr
شعاع محفظه	Н
عدد هارتمن	На
ضريب نفوذپذيرى	К
عدد ناسلت	Nu
فشار	р
عدد پرانتل	Pr
ضريب بيبعد جذب/توليد حرارت	q
عدد رينولدز	Re
عدد ریچاردسون	Ri
دما	Т
سرعت در جهات شبکه	u (u,v)
سرعت حركت ديواره	U _o
مختصات شبكه	x (x,y)
علائم يونانى	
ضريب پخش حرارتي	α
زاویه اعمال سرعت	δ
ضريب تخلخل	3
تعداد موج نوسان	κ
ويسكوزيته ديناميكى	μ
دمای بیبعد	θ
چگالی	ρ
زمان آسایش میدان سرعت	$ au_1$
زمان آسایش میدان دما	τ_2
ويسكوزيته سينماتيكي	υ

۱۰۱

بررسی تأثیر جهت حرکت دیواره بر انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی ...

پریودیک را به روش عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد کے زاویے اعمال میدان مغناطیسے پریودیک، تاثیر چشمگیری بر میزان انتقال حرارت و جریان جابجایی دارد. در سالیان اخیر به علت کاربرد وسیع و روز افزون محیط متخلخل، نیاز به مطالعات اساسی درباره چگونگی انتقال جرم و حرارت در محیط متخلخل وجود داشته است، چرا که این بررسی های دقیق، به منظور بهبود بخشیدن به سامانه های مهندسی حاوی مواد متخلخل و بالا بردن کیفیت و کارایی آنها میباشد [۱۹–۱۶]. عاشورینژاد و همکاران [۲۰] جابجايي طبيعي درون محفظه مستطيلي شكل تحت اثر ميدان مغناطيسي را به روش شبكه بولتزمن بررسي كردنـد. نتایج نشان داد افزایش قدرت میـدان مغناطیسے و ضـریب تخلخل به ترتيب منجر به كاهش و افزايش ميزان انتقال حرارت می شود. موجمر و همکاران [۲۱] به بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون محفظه متخلخل L شکل پرداختند. نتایج نشان داد که کاهش ضریب نفوذیدیری و ضریب تخلخل به سبب کاستن از سرعت حرکت سیال درون محفظه، انتقال حرارت را بهطور چشم گیری تحت تأثير قرار میدهد و سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می شود. نظری و همکاران [۲۲] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی سیال غیرنیوتنی درون محفظه مربعی شکل را با جهات مختلف حركت ديوارهها مورد بررسى قرار دادند. نتايج نشان داد با افزایش عدد ریچاردسون و تغییر سازوکار انتقال حرارت به سمت جابجایی طبیعی، مقدار انتقال حرارت کم می شود. همچنین زمانی که دیواره گرم به سمت بالا حرکت مے کند، انتقال حرارت بیشتری نسبت به حالتی که ديواره گرم به سمت پايين حركت مىكند وجود خواهد داشت. از موارد کاربرد مطالعات فوق می توان به عایق کاری ساختمانها، مبدلهای زیرزمینی برای ذخیره انرژی، بازیابی و کنترل دمای رآکتورها اشاره نمود. جذب/تولید حرارت نقش بسیار مهمی در پدیدههای مختلفی چون انرژی هستهای و مدلسازی احتراق دارد. از جمله روش هایی که محققین در تقویت عملکرد حرارتی سامانههای انرژی به کار گرفتهاند، انتقال حرارت در محفظه تحت اثر میدان مغناطیسی با جذب/تولید حرارت است [۲۶-۲۳]. از جمله این مطالعات می توان به مطالعه محمودی و همکاران [۲۷] اشاره نمود. آنها به مطالعه انتقال حرارت جابجايي طبيعي درون محفظه نیمهباز تحت اثر میدان مغناطیسی با وجود جذب/تولید حرارت پرداختند. عباسی و همکاران [۲۸] (مگنتوهیدرودینامیک) ابا توجه به کاربردهای فراوان در صنايع مهندسي بسيار مورد توجه قرار گرفته است [۱۰-۸]. از جمله این کاربردها می توان به رشد کریستالها در سیال، خنک کاری رآکتورهای هستهای، استخراج انرژی زمین گرمایی و صنایع پلیمر و متالورژی اشاره کرد. بنابراین با استفاده از جريان طبيعي مگنتوهيدروديناميک بهراحتي می توان بر ویژگیهای انتقال حرارت و جریان تأثیر گذاشت و آن را تحت کنترل درآورد. شبیهسازی جریان مگنتوهیدرودینامیک با روش های مختلفی از جمله روش شبكه بولتزمن، تفاضل محدود و المان محدود صورت گرفته است. كفايتي و همكاران [١١] به بررسي انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون محفظه مربعی شکل با توزیع دمای خطی دیواره در حضور میدان مغناطیسی به روش شبکه بولتزمن پرداختند. نتایج نشان داد افزایش عدد هارتمن در تمامی مقادیر عدد ریچاردسون سبب کاهش عدد ناسلت متوسط و سرعت سیال داخل محفظه می گردد. چامخا و اسماعیل [۱۲] تاثیر میدان مغناطیسی بر روی انتقال حرارت جابجايي تركيبي نانوسيال درون محفظه ذوزنقه شکل با دیوارہ متحرک را بے روش عددی بررسے کردند. نتایج نشان داد که افزایش عدد هارتمن موجب کاهش سرعت سیال به خصوص در مجاورت دیوارهها و عدد ناسلت متوسط می شود. همچنین جهت حرکت دیواره پارامتر تعیین کنندهای بر میزان انتقال حرارت است. با مروری بر مطالعات قبلي انجام شده، مشاهده مي شود اكثر مطالعات پیرامون تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر جریانهای جابجایی بوده است و بررسی های اندکی در مورد اثر اعمال پریودیک میدان مغناطیسی بر میدان جریان و دما صورت گرفته است [۱۳]. حسین و همکاران [۱۴] جابجایی ترکیبی نانوسیال را تحت تأثیر میدان مغناطیسی پریودیک با دو دیواره متحرک را به روش عددی بررسی کردند. مهریان و همكاران [۸] به تحليل انتقال حرارت و توليد آنتروپي نانوسیال درون محفظه مربعی شکل در حضور میدان مغناطیسی پریودیک پرداختند. نتایج نشان داد که هرگاه ميدان مغناطيسي پريوديک اعمال شود، انتقال حرارت و قدرت جریان در مقایسه با اعمال یکنواخت، بیشتر است. ایزدی و همکاران [۱۵] جابجایی طبیعی نانوسیال درون محفظه مربعي شكل متخلخل تحت تأثير ميدان مغناطيسي

¹⁻ Magnetohydrodynamics



پریودیک بر آن اعمال میشود. دیواره منحنی و عمودی محفظه به ترتیب در دمای ثابت سرد و گرم قرار دارند و دیواره افقی دارای توزیع دمای سینوسی است. مانعی دایروی و آدیاباتیک به شعاع 0.1H در داخل محفظه تعبیه شده است که فاصله مرکز آن از دیواره افقی و عمودی U.4H است. U_0 سرعت حرکت دیواره است که با دیواره افقی زاویه δ میسازد و بهصورت پادساعتگرد سنجیده میشود.



در این محفظه جذب/تولید حرارت یکنواخت به قدرت Q وجود دارد. هدف از کار حاضر، بررسی تأثیر عدد هارتمن (۰، ۲۵، ۵۰)، ضریب جذب/تولید حرارت (۵-، ۰ و ۵+)، عدد ریچاردسون (۱، ۱۰ و ۱۰۰)، ضریب تخلخل (۰/۴۵، ۰/۶۵ و ۰/۸۵)، زاویه اعمال سرعت (۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) و نوع اعمال میدان مغناطیسی (یکنواخت و پریودیک) بر مشخصات جریان و انتقال حرارت جابجایی است. در کار حاضر عدد پرانتل، عدد دارسی و عدد گراشف به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۷۱ و ۲۰۱ در نظر گرفته شده است. تمامی مرزهای جريان، غيرقابل نفوذ بوده و لغزشي روى سطوح وجود ندارد. جریان سیال نیوتنی، آرام و پایا و رژیم جریان غیرقابل تراکم بوده و از تقریب بوزینسک استفاده شده است. از اتلاف لزجی و انتقال حرارت تشعشعی نیز صرف نظر شده است. عبارت به کاررفته برای میدان مغناطیسی پریودیک بهصورت رابطه (۱) در نظر گرفته شده است که در آن B_o دامنه و κ تعداد موج نوسان میباشد.

$$B = \frac{B_o}{2} (1 - \cos \frac{2\kappa \pi y}{H})$$
(1)

انتقال حرارت جابجايي طبيعي نانوسيال تحت اثر ميدان مغناطیسی درون محفظه مربعی با دیواره دارای توزیع دمای خطی با جذب/تولید حرارت را بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش قدرت میدان مغناطیسی سبب کاهش میزان سرعت و انتقال حرارت شده و تغییرات ضریب جذب/تولیـد حرارت تأثیر چشمگیری بر شکل جریان و انتقال حرارت دارد به نحوى كه افزايش ضريب جذب/توليد حرارت سبب افزایش بیشینه مقدار خطوط جریان میشود. یکی از کاربردهای مهم انتقال حرارت در محیط متخلخل با تولید حرارت داخلی، در صنعت فناوری هستهای میاشد. روش شبکه بولتزمن یکی از روش های بهروز و مؤثر در زمینه بررسی عددی پدیده هاست که محدودیت پیوستگی جریان بر آن اعمال نمی شود [۲۹]. با توجه به ماهیت روش شبکه بولتزمن، تمامی محاسبات به صورت صریح صورت می گیرد. به همین دلیل قابلیت موازیسازی در این روش بسیار بالاست و یکی از مزایای این روش به شمار میآید. همچنین این روش برای شبیهسازی شرایط مرزی پیچیده، جریانهای ریز مقیاس، دینامیک فصل مشترک و تحلیل جریان های چند فازی مناسب است [۳۲–۳۲]. رحمتی و همکاران [۳۳] با استفاده از روش شبکه بولتزمن، به بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال درون محفظه مربعی شکل با درپوش متحرک و دیوارههای دارای توزیع دمای سینوسی یر داختند.

با توجه به مطالعات معتبر قبلی، مشاهده می شود که تاکنون اثر همزمان نوع اعمال میدان مغناطیسی و جذب/تولید حرارت بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون محفظه متخلخل صورت نگرفته است. همچنین برای اولین بار، تأثیر زاویه اعمال سرعت در حرکت دیوارههای محفظه ربع دایرهای شکل بررسی شده است.

مطالعه حاضر میتواند در طراحی تجهیزات صنعتی و مهندسی برای انتقال حرارت بهینه و مورد نیاز، از جمله خنککاری دستگاههای الکترونیکی در محفظه با شکل خاص مورد استفاده قرار گیرد.

۲– بیان مسأله

مطابق شکل ۱، هندسه مسأله شامل محفظهای ربع دایره شکل و متخلخل با شعاع H است که میدان مغناطیسی از چپ به راست و عمود بر گرانش به دو صورت یکنواخت و

١٠٢

بررسی تأثیر جهت حرکت دیواره بر انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی ...

مراجع مختلفی چون [۳۴] ذکر شده است. الگوریتم حل مسأله به روش شبکه بولتزمن در شکل ۳ نشان داده شده است.



 D_2Q_9 شکل (۲): بردارهای سرعت گسسته شده مدل (۲)

معادله شبکه بولتزمن با استفاده از تقریب بی-جی-کی [۳۵] با وجود نیروی خارجی برای میدان جریان به صورت روابط (۹) تا (۱۳) و برای میدان دما به صورت رابطه (۱۴) بیان می شود. تابع توزیع تعادلی در مدل D_2Q برای میدان جریان و دما به ترتیب به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) و کمیات ماکروسکوپیک به صورت رابطه (۱۷) بیان می شوند.



شکل (۳): مراحل انجام الگوریتم روش شبکه بولتزمن

۳- معادلات حاکم و روش حل عددی

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{y}} = 0 \tag{(Y)}$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{1}{\rho} \left(-\varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right) - \frac{\upsilon \varepsilon u}{K} - \frac{F_{\varepsilon} \varepsilon^2 u^2}{K^{0.5}}$$
(7)

$$\frac{1}{\epsilon} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{1}{\rho} \left(-\epsilon \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right) - \frac{\upsilon \epsilon v}{K} - \frac{F_{\epsilon} \epsilon^2 v^2}{K^{0.5}} + F_{y}$$
(f)

$$F_{y} = \epsilon \beta \mathbf{g} (T - T_{c}) - \frac{\mu \epsilon H a^{2}}{H^{2}} v \qquad (\Delta)$$

$$F_{\varepsilon} = \frac{1.75}{\sqrt{150}\varepsilon^{1.5}} \tag{(6)}$$

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) + \frac{Q}{\rho C_p}(T - T_c)$$
(Y)

پارامترهای بیبعدی که در حل مسأله حاضر مورد استفاده قرار گرفتهاند مطابق رابطه (۸) است. عدد هارتمن (Ha) معیاری از نیروی حجمی لورنتز است و افزایش آن نشان-دهنده افزایش شدت میدان مغناطیسی است.

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{U_{o}}, V = \frac{v}{U_{o}}, Da = \frac{K}{H^{2}}, Pr = \frac{v}{\alpha}$$
$$\theta = \frac{T - T_{c}}{T_{h} - T_{c}}, Ha = BH \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}, Gr = \frac{\rho\beta g(T_{h} - T_{c})H^{3}}{v^{2}}, \qquad (A)$$

$$Re=\frac{U_{o}H}{\upsilon}, P=\frac{p}{\rho U_{o}^{2}}, q=\frac{QH^{2}}{\rho c_{\rho}\alpha}, Ri=\frac{Gr}{Re^{2}}$$

در کار حاضر از روش شبکه بولتزمن با دو تابع توزیع برای میدان جریان و دما استفاده شده است که معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی را در مقیاس ماکروسکوپیک ارضا میکنند. برای هر دو میدان ذکر شده، آرایش شبکه D₂Q₉ به کار گرفته شده است. این روش، یک روش صریح است، به این مفهوم که در مراحل انتشار و برخورد با استفاده از مقادیر معلوم گام زمانی قبلی، مقادیر مجهول توابع توزیع در گام زمانی بعدی به دست میآیند. در این روش بهجای حل معادلات ناویر استوکس، معادله گسسته شده بولتزمن حل میشود. شبکه بولتزمن دارای دیدگاهی مزوسکوپیک است [۲۹]. در شکل ۲ آرایش این نوع شبکه نشان داده شده است. جزئیات این آرایش شبکه و مزیتهای آن در

دوفصلنامه علمی مکانیک سیالات و آیرودینامیک، جلد ۹، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۹

دیواره گرم عمودی محفظه به صورت رابطه (۲۱) تعریف می-شود. با ثابت بودن اعداد گراشف، پرانتل و ماخ، لزجت سینماتیکی طبق رابطه (۲۲) محاسبه می شود [۴]. در کار حاضر عدد ماخ برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

$$Nu = \frac{1}{H} \int_{0}^{1} -\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{X=0} dY$$
(71)

$$v = \frac{0.1 \text{H}}{\sqrt{3 \text{Gr}}} \tag{77}$$

جهت مدل نمودن شرایط مرزی سرعت برای دیوارههای مسطح، از روش کمانه کردن استفاده میشود [۳۴]. بهعنوان نمونه برای دیواره افقی محفظه، شرایط مرزی سرعت و دما به ترتیب طبق روابط (۲۳) و (۲۴) برقرار است. جهت محاسبه سرعت و دما روی مرزهای منحنی از روشهای محاسبه توسط لیو و همکاران [۳۷] استفاده شده است. $f_2=f_4, f_5=f_7, f_6=f_8$

$$g_{2} = \sin(\frac{\pi x}{H}) \times (\omega_{2} + \omega_{4}) T_{h} - g_{4},$$

$$g_{5} = \sin(\frac{\pi x}{H}) \times (\omega_{5} + \omega_{7}) T_{h} - g_{7},$$

$$g_{6} = \sin(\frac{\pi x}{H}) \times (\omega_{6} + \omega_{8}) T_{h} - g_{8}$$
(74)

همچنین لازم به ذکر است که معیار همگرایی در کار حاضر بهصورت رابطه (۲۵) در نظر گرفته شده است.

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \left| T^{n+1} - T^{n} \right|}{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \left| T^{n} \right|} \le 10^{-7}$$
(Ya)

در رابطه (۲۵)، n و n+1 مراحل زمانی قدیم و جدید، x نشاندهنده خطای مجاز و N و M به ترتیب تعداد گرهها در راستای x و y را نشان میدهند.

۴- استقلال حل از شبکه انتخابی و صحتسنجی

به منظور یافتن شبکه مناسبی که منجر به استقلال نتایج از شبکه انتخابی شود، عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در جدول ۱ با ابعاد مختلف به دست آمده و به همراه شرایط منظور شده، ارائه شده است. مشاهده می شود، شبکه با ابعاد ۱۰۰×۰۰۰ مناسب است. نحوه عملکرد شبیه سازی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی توسط کد حاضر با مرجع [۶] که به روش حجم محدود صورت گرفته است، در جدول ۲ ارائه

$$f_{i}(\mathbf{x}+\mathbf{c}_{i},t+1)=f_{i}(\mathbf{x},t)-\frac{1}{\tau_{1}}[(f_{i}(\mathbf{x},t)-f_{i}^{eq}(\mathbf{x},t)]+\mathbf{c}_{i}F_{i} \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_{i} = F_{i}^{M} + F_{i}^{B} + F_{i}^{P}$$
 (1.)

$$F_{i}^{M} = -3\rho\varepsilon\omega_{i}\frac{Ha^{2}\mu}{H^{2}}v$$
 (11)

$$F_{i}^{B} = 3\rho\beta\epsilon\omega_{i}\mathbf{g}(T-0.5) \tag{11}$$

$$F_{i}^{P} = -\omega_{i} \left[9 \frac{\upsilon \varepsilon}{K} (uc_{x} + vc_{y}) + \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon K}} (uc_{x} \sqrt{u^{2} + v^{2}} + vc_{y} \sqrt{u^{2} + v^{2}}) \right]$$
(17)

$$g_{i}(\mathbf{x}+\mathbf{c}_{i}\Delta t,t+1) = g_{i}(\mathbf{x},t) - \frac{1}{\tau_{2}}(g_{i}(\mathbf{x},t) - g_{i}^{eq}(\mathbf{x},t)) + \frac{Q}{2\tau_{2}}(T - T_{c})$$
(14)

$$\mathbf{f}_{i}^{eq} = \omega_{i} [1 + 3(\mathbf{c}_{i} \cdot \mathbf{u}) - \frac{3}{2\varepsilon} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \frac{9}{2\varepsilon} (\mathbf{c}_{i} \cdot \mathbf{u})^{2}] \qquad (1\Delta)$$

 ρc_{p}

$$\mathbf{g}_{i}^{eq} = \omega_{i} T[1 + 3(\mathbf{c}_{i} \cdot \mathbf{u})] \tag{19}$$

$$\rho = \sum_{i} \mathbf{f}_{i}, \rho \mathbf{u} = \sum_{i} \mathbf{c}_{i} \mathbf{f}_{i}, T = \sum_{i} \mathbf{g}_{i}$$
(17)

در روابط فوق، F_i^M، F_i^B و F_i^P به ترتیب نیروی مربوط به میدان مغناطیسی، نیروی شناوری و نیروی مربوط به محیط متخلخل در مدل برینکمن-فورچیمر است [۱۶]. ضرایب وزنی و سرعتهای گسسته نیز بهصورت روابط (۱۸) و (۱۹) میباشد [۳۶].

$$\omega_0 = \frac{4}{9}, \ \omega_i = \frac{1}{9} \text{ for } i=1,2,3,4,$$

 $\omega_i = \frac{1}{36} \text{ for } i=5,6,7,8$
(1A)

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_{0} = 0 \\ \mathbf{c}_{i} = [\cos(\frac{(i-1)\pi}{2}), \sin(\frac{(i-1)\pi}{2})] \\ \text{for } i = 1, 2, 3, 4 \\ \mathbf{c}_{i} = \sqrt{2}[(\cos(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}), \sin(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4})] \\ \text{for } i = 5, 6, 7, 8 \\ \text{for } i = 5, 6, 7, 8 \\ \text{gundet result of the end of the end$$

عدد ناسلت یکی از مهم ترین اعداد بی بعد در تعیین میزان انتقال حرارت است. این مقدار به صورت متوسط، بر روی

بررسی تأثیر جهت حرکت دیواره بر انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی ...

روی دیواره گرم در جدول ۴ و خطوط جریان در شکل ۴ مقایسه شده است. همچنین مقایسهای بین خطوط همدمای کار حاضر با مرجع [۷] برای جریان جابجایی ترکیبی درون محفظه مثلثی شکل و عدد ریچاردسون ۱ صورت گرفته است که در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به صحتسنجیهای ارائه شده، مشاهده میشود دقت شبیه-سازیهای صورت گرفته توسط کد نوشته شده حاضر به زبان فرترن، بسیار بالاست و میتوان از درستی کد نوشته شده اطمینان حاصل کرد و به ارائه نتایج پرداخت. شده است. شبیه سازی برای محفظه ی مربعی که دیواره های افقی آن ثابت و دیواره های عمودی آن در جهات مختلف حرکت می کنند، مقایسه شده است. به عنوان صحت سنجی دیگر، کار حاضر با مراجع [۳۸] و [۳۹] در جدول ۳ در عدد رایلی ^۴ ۱۰ مقایسه شده است. این مقایسه برای انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه مربعی شکل متخلخل با دیواره های عمودی آدیاباتیک و دیواره های عمودی دما ثابت صورت گرفته است. به عنوان راستی آزمایی دیگر، کار حاضر با مرجع [۴۰] به صورت عدد ناسلت متوسط

			Ν	lu		
Ha=0		Ha=25		Ha=50		
	ε=0.45	ε=0.85	ε=0.45	ε=0.85	ε=0.45	ε=0.85
۶۰×۶۰	1 • / 47 1	11/878	۱۰/۲۸۵	۱۰/۸۳۵	٩/٧۶٨	٩/٢۶٨
$\wedge \cdot \times \wedge \cdot$	۱ • /٨٨۵	11/298	1./481	۱۱/۰۳۳	९/९٣९	٩/۴•٨
) • • ×) • •	11/041	۱ ۱/۷۳۵	۱ • /۵۹۹	11/189	۱۰/۰۸۱	٩/۵۵١
17.×17.	11/142	11/144	1 • /89 1	11/774	1.198	9/544

 δ =45° و q=-5 ،κ=1 ،Ri=1 و κ=1 هبکه در γ=-5 κ=1 γ γ=-5 $(\kappa=1 + 1)$

جدول (۲): مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و مرجع [۶]

		$T_{\rm c}$ $T_{\rm h}$			$T_{\rm c}$ $T_{\rm h}$	
	مرجع [۶]	کار حاضر	درصد خطا	مرجع [۶]	کار حاضر	درصد خطا
Ri=1 (Re=100)	81800	8/015	٢/١۵٢	17/985	۱۷/۵۳۳	7/447
Ri=10 (Re=31.623)	4/148	۴/•۷۱	١/٨۴١	۱•/۱۹۱	٩/٩٧١	۲/۲ • ۶

جدول (۳): مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و مرجع [۳۸] و [۳۹]

,			• •
	مرجع [۳۸]	مرجع [۳۹]	کار حاضر
ε=0.4	۱/۴۰۸	١/٣٩٣	۱/۴۰۱
ε=0.6	1/271	1/888	١/۵٢٨
ε=0.9	1/842	١/۶۵٩	1/887



شکل (۴): مقایسه خطوط جریان بین کار حاضر (سمت راست) و مرجع [۴۰] (سمت چپ)



شکل (۵): مقایسه خطوط همدما بین کار حاضر (سمت راست) و مرجع [۷] (سمت چپ)

بین کار حاضر و مرجع [۴۰] برای عدد رایلی ۱۰ ^۵			
	_		
درصد اختلاف	کار حاضر	مرجع[۴۰]	На
٠/٩٨	17/30	17/73	•
۲/۰۴	۵ • /۳ ۱	17/40	۵۰
٣/١١	13/23	١٣/١٨	۱۰۰

جدول (۴): مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم

۵- نتایج

۵–۱− اثر زاویه اعمال سرعت بر میدان جریان و دما شکل ۶ خطوط جریان و خطوط همدما را به ازای مقادیر مختلف زاویه اعمال سرعت نشان میدهد. برای 0=۵، دیواره افقی به سمت راست حرکت میکند و نتیجه آن تشکیل گردابهای پادساعتگرد درون محفظه است. در این حالت سیال در مجاورت دیواره گرم با سرعت ثابت به دیواره سرد نزدیک شده و باعث ایجاد چرخش میشود. ملاحظه میشود که در نزدیکی دیواره عمودی، خطوط همدما به موازات دیواره قرار دارند و این نشاندهنده غالب بودن هدایت

مشاهده می شود یک گردابه پادساعتگرد نزدیک دیواره افقی و یک گردابه ساعتگرد در مجاورت دیواره عمودی درون محفظه شکل می گیرد. زیرا در این حالت سرعت به دو مخلفه در دو راستا تجزیه شده و همزمان دیواره افقی و عمودی به حرکت در می آیند. سیال گرم شده در مجاورت دیواره عمودی با حرکت به سمت بالا و پس از برخورد با دیواره سرد، گردابه ساعتگرد را به وجود می آورد. لازم به ذکر است با افزایش δ، از قدرت گردابه افقی کاسته می شود و به قدرت گردابه عمودی افزوده می شود.

 $\delta=60^{\circ}$ و $\delta=30^{\circ}$ و $\delta=60^{\circ}$ و $\delta=60^{\circ}$

برای $90^{-\delta} = \delta$ چون فقط دیواره عمودی در جهت بالا حرکت می کند، یک گردابه ساعتگرد درون محفظه شکل می گیرد. با توجه به خطوط همدما دیده می شود که با افزایش زاویه اعمال سرعت، تراکم خطوط همدما در مجاورت دیواره منحنی و سرد محفظه افزایش می یابد. همچنین با افزایش δ ، انحنای خطوط همدما در مجاورت دیواره عمودی محفظه افزایش می یابد و در زاویه ۹۰ درجه بیشترین انحنا مشاهده می شود که نشان از بیشتر بودن میزان جابجایی دارد.





شکل (۶): خطوط جریان (ردیف بالا) و خطوط همدما (ردیف پایین) در Ri=1، Ia=0 و e-0.45 و e-0.45 و

با توجه به شکل **۷** مشاهده می شود که دمای سیال داخل محفظه با افزایش زاویه اعمال سرعت، افزایش می یابد و در $\delta^{=90}$ بیشترین دما مشاهده می شود. همچنین مشاهده می شود با افزایش δ ، اثر هدایت حرارتی در مجاورت دیواره عمودی، در فاصله کمتری از دیوار کاهش می یابد. مثلاً به ازای $\delta^{=3}$ ، در $\Sigma^{=0.2}$ پروفیل دما انحنادار می شود در حالی که این اثر برای $\delta^{00}=\delta$ در $\Sigma^{=0.1}$ رخ می دهد. خطی بودن پروفیل دما نشان از غالب بودن هدایت حرارتی و کم بودن اثرات جابجایی دارد.

۵-۲- اثر عدد هارتمن و عدد ریچاردسون بر جریان و انتقال حرارت

با توجه به شکل ۸ که خطوط همدما را به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و عدد ریچاردسون نشان میدهد، دیده میشود با افزایش عدد ریچاردسون، سازوکار انتقال حرارت به سمت جابجایی طبیعی پیش رفته و اثر حرکت دیواره کم میشود. این عامل سبب میشود که اثرات جابجایی کل کم شده و از انحنا و پراکندگی خطوط همدما کاسته شود. این عامل سبب کاهش میزان انتقال حرارت شود. مشاهده میشود که در هر سه مقدار عدد ریچاردسون، افزایش عدد هارتمن به دلیل افزایش نیروی مقاوم لورنتز در برابر حرکت جریان سیال، سبب کاهش انحنای خطوط همدما و به تبع

آن منجر به کاهش اثرات جابجایی و میزان انتقال حرارت می شود. این اثر در مجاورت دیواره عمودی به ازای عدد هارتمن ۵۰ کاملاً مشهود هست. قرارگیری خطوط به موازات دیواره عمودی نشان از بیشتر بودن سهم هدایت حرارتی نسبت به جابجایی دارد. همچنین ملاحظه می شود که با افزایش عدد ریچاردسون، اثر عدد هارتمن کمتر می-شود. بعلاوه افزایش عدد هارتمن سبب کاهش گرادیان دمایی در مجاورت دیواره سرد محفظه می شود.



شکل (۷): دما در قسمت میانی محفظه در Ri=1، Ra=0،46. و q=0

شکل ۹ تغییرات سرعت افقی در قسمت میانی محفظه را نشان میدهد. ملاحظه میشود با افزایش عدد ریچاردسون

سرعت برای Ri=10 و Ri=100 می شود.

هارتمن در کاهش سرعت برای Ri=1 نسبت به Ri=100

قابل مشاهده است. افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۵۰ به

ترتیب سبب کاهش حدود ۶۰ و ۴۰ درصدی بیشینه مقدار

از ۱ به ۱۰۰ به دلیل رفتن به سمت جابجایی طبیعی، بیشینه مقدار سرعت کم میشود. مثلاً در غیاب میدان مغناطیسی، بیشینه مقدار سرعت در حدود ۵۰ درصد کاهش مییابد. همچنین بیشتر بودن اثر افزایش عدد



شكل (٩): سرعت افقى در q=0، ٥٤=٥، ٤٥=٥، و ميدان مغناطيسى يكنواخت (الف) Ri=1 و (ب) Ri=100

۱۰۸

بررسی تأثیر جهت حرکت دیواره بر انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی ...

۳–۵– اثر جذب/تولید حرارت و نوع اعمال میدان مغناطیسی بر میدان جریان و دما

مطابق شکل ۱۰ و بدون در نظر گرفتن چگونگی اعمال میدان مغناطیسی، مشاهده می شود زمانی که جذب حرارت وجود دارد (q=-5)، دمای سیال داخل محفظه به مراتب کمتر از دمای دیواره گرم محفظه بوده و همین امر سبب افزایش تراکم خطوط همدما در نزدیکی دیواره گرم می شود. اما وقتى كه توليد حرارت وجود دارد (q=+5)، چون دماى سیال بیشتر از دمای دیواره گرم است، تراکم خطوط در نزدیکی دیواره گرم خیلی کمتر می شود و انتقال حرارت از سیال به دیواره صورت می گیرد. همان طور که مشخص است، بر طبق بقای انرژی، با کم شدن گرادیان دما در نزدیکی دیواره گرم، تراکم خطوط همدما در مجاورت دیواره سرد افزایش می یابد. ملاحظه می گردد وقتی که میدان مغناطیسی پریودیک اعمال می شود، گرادیان نیروی لورنتز در امتداد محور عمودی کاهش می یابد و این عامل منجر به افزایش قدرت گردابهها درون محفظه می شود. زیرا در این حالت میانگین نیروهای لورنتز اعمال شده، کاهش می یابد و این اثر برای κ=2 بیشتر از κ=1 است. با اعمال پریودیک میدان مغناطیسی، گردابههای ایجاد شده در مجاورت دیواره گرم سبب فشرده تر شدن خطوط نزدیک دیواره گرم می-شوند که این عامل منجر به افزایش مقدار انتقال حرارت می شود. همچنین بدون در نظر گرفتن چگونگی اعمال میدان مغناطیسی، با افزایش ضریب جذب/تولید حرارت از ۵- به ۵+، قدرت جریان افزایش می یابد. در شکل ۱۱ مشاهده می شود که با افزایش عدد ریچاردسون، چون عدد گراشف ثابت است، عدد رینولدز کاهش می یابد. کاهش عدد رينولدز به معناي كم شدن سرعت حركت ديوارهها ميباشد و این عامل سبب می شود اثرات جابجایی اجباری کم و سازوكار انتقال حرارت به سمت جابجايي طبيعي متمايل شود. این اثر در عدد ریچاردسون ۱۰۰ کاملاً مشهود است. زیرا علاوه بر اینکه از قدرت گردابهها بهطور چشم گیری کاسته شده است، گردابهای که در مجاورت دیواره افقی قرار دارد، به تدریج از بین میرود. همچنین در حالتی که تولید حرارت وجود دارد، فرآیند بیان شده تسریع می یابد. شکل

۱۲ نشان می دهد با اعمال پریودیک میدان مغناطیسی، سرعت جریان درون محفظه افزایش می یابد و این عامل نشان از قوی تر بودن اثرات جابجایی و افزایش میزان انتقال حرارت دارد. با توجه به شکل **۱۳** مشاهده می شود که کمترین و بیشترین دما داخل محفظه به ترتیب در حالت جذب و تولید حرارت رخ می دهد. همچنین در حالت تولید حرارت بیشینه مقدار دما نزدیک دیواره گرم اتفاق می افتد. که این نشان می دهد انتقال حرارت کمتری از دیواره به سیال رخ می دهد.

۴–۵– اثر پارامترهای مؤثر بر عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم عمودی

شکل ۱۴ عدد ناسلت متوسط را به ازای مقادیر مختلف زاویه اعمال سرعت و ضریب تخلخل نشان میدهد. در تمامی مقادير ضريب تخلخل ديده مى شود كه افزايش زاويه اعمال سرعت سبب افزایش عدد ناسلت متوسط می شود. زیرا با توجه به شکل $\boldsymbol{\beta}$ ، افزایش δ منجر به افزایش اثرات جابجایی و انحنای خطوط همدما در نزدیکی دیواره گرم شده و به تبع آن انتقال حرارت افزایش می یابد. همچنین مشاهده می-شود در یک δ خاص، افزایش ضریب تخلخل، منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می شود. زیرا افزایش ضریب تخلخل سبب سهولت در حرکت سیال داخل محفظه می-شود و موانع حرکتی در مقابل جریان سیال کاهش مییابد و این اثر با افزایش زاویه اعمال سرعت، بیشتر می شود. بهعنوان نمونه افزایش ضریب تخلخل از ۰/۴۵ به ۸۵/۰ $\delta=90^{\circ}$ سبب افزایش حدود ۱۰ و ۴ درصدی به ترتیب برای و $\delta=0$ می شود. با توجه به شکل **۱۵** مشاهده می شود که اثر افزایش عدد هارتمن در کاهش عدد ناسلت متوسط با کاهش ضریب تخلخل کاهش مییابد. به نحوی که افزایش عدد هارتمن از صفر به ۵۰ منجر به کاهش ۱۰ و ۲۲ درصدی عدد ناسلت متوسط به ترتیب برای ضریب تخلخل ۰/۴۵ و ۰/۸۵ می شود. زیرا در این حالت هدایت حرارتی پدیده غالب است و میدان مغناطیسی تأثیر کمتری خواهد داشت.



 $\epsilon=0.65$ و $\delta=45^{\circ}$ ،Ha=50،Ri=1 شکل (۱۰): خطوط جریان (ردیف بالا) و خطوط همدما (ردیف پایین) در Ri=1، $\delta=45^{\circ}$ و





شکل (۱۱): خطوط جریان در β=60[°] ا=4 و E=0.65



q=0 و Ri=1 و Ha=0

با توجه به شکل **۱۶** ملاحظه می شود که در تمامی مقادیر عدد ریچاردسون، افزایش عدد هارتمن سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می شود. زیرا افزایش قدرت میدان مغناطیسی سبب افزایش نیروی مقاوم لورنتز شده و این عامل سبب کاهش سرعت جریان سیال داخل محفظه می-شود و منجر به کاهش اثرات جابجایی می شود که این کاهش سرعت در نزدیکی دیواره ها بیشتر است. همچنین مشاهده می شود که افزایش عدد ریچاردسون سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می شود. زیرا در این حالت سرعت حرکت دیواره ها و اثرات جابجایی اجباری کم شده و جریان



Ri=1 و Ri=1



دوفصلنامه علمی مکانیک سیالات و آیرودینامیک، جلد ۹، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۹



شکل (۱۵): عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی در 6=45° ، Ri=1، q=0 و میدان مغناطیسی یکنواخت



شکل (۱۶): عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی در q=0، ⁶=90 و ε=0.85 و میدان مغناطیسی یکنواخت



ل ۲۲٫۱٬۱۰ هده مست شوست (وی میروی میروی طروی د ε=0.65 و δ=60° ،Ha=0

به سمت جابجایی طبیعی متمایل می شود. بعلاوه با توجه به شکل، با افزایش عدد ریچاردسون، اثر میدان مغناطیسی کمتر می شود. مثلاً افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۵۰ سبب کاهش ۳۰ و ۱۰ درصدی عدد ناسلت متوسط به ترتیب برای عدد ریچاردسون ۱ و ۱۰۰ می شود. شکل ۱۷ عدد ناسلت متوسط را به ازای مقادیر مختلف عدد ریچاردسون و ضريب جذب/توليد حرارت نشان مىدهد. ديده مىشود كه در تمامی مقادیر عدد ریچاردسون، وقتی که جذب وجود دارد (q<0)، دمای سیال داخل محفظه کم، تراکم خطوط همدما در مجاورت دیواره گرم، زیاد و عدد ناسلت متوسط بیشتر از حالتی است که جذب/تولید حرارت نداریم. اما وقتی که تولید حرارت وجود دارد (q>0)، دمای سیال درون محفظه زیاد میشود و به تبع آن حرارت به مراتب کمتری از دیواره به سیال منتقل می شود. لازم به ذکر است که این تأثير با كاهش عدد ريچاردسون بيشتر مىشود زيرا در اين حالت اثرات جابجایی ناشی از بیشتر بودن سرعت حرکت دیواردها، بیشتر است. شکل ۱۸ اثر نوع اعمال میدان مغناطیسی را بر عدد ناسلت متوسط نشان میدهد. مشاهده مى شود وقتى ميدان مغناطيسى به صورت پريوديک اعمال می شود، متوسط نیروی لورنز اعمال شده در جهت عمودی بر جریان سیال، نسبت به حالتی که میدان مغناطیسی یکنواخت اعمال می شود، کمتر است. به همین جهت با کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت سیال، سیال با سهولت بیشتری حرکت کرده و کاهش اثر جابجایی کمتر خواهد بود و با افزایش تعداد موج نوسان، این اثر افزایش مییابد. بهعنوان نمونه برای q=0، عدد ناسلت متوسط در حالتی که میدان مغناطیسی پریودیک با κ=2 باشد، حدود ۲۳ درصد بیشتر از حالتی است که میدان مغناطیسی بهصورت یکنواخت اعمال میشود و این اثر با افزایش ضریب جذب/تولید حرارت بیشتر میشود. با توجه به شکل ۱۹ مشاهده می شود افزایش هم زمان ضریب جذب/تولید حرارت و افزایش عدد هارتمن سبب کاهش بیشتر عدد ناسلت می-شود. زیرا افزایش هر دو پارامتر موجب کاهش عدد ناسلت متوسط مي گردد.



شکل (۱۸): عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی در

Ri=1، °δ=90 و ε=0.85 و Ri=1



شکل (۱۹): عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی در ε=0.65 و ε=45° ،Ri=1

۶- نتیجهگیری

در کار حاضر برای اولین بار، انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون محفظه ربع دایرهای شکل متخلخل با وجود جذب/تولید حرارت یکنواخت به روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار گرفت. در این شبیهسازی میدان مغناطیسی به دو صورت یکنواخت و پریودیک بهصورت افقی بر محفظه اعمال میشود. جابجایی ترکیبی بهوسیله حرکت دیوارههای محفظه با سرعت ثابت و تحت زوایای مختلف به وجود می-آید. در این مطالعه عددی، تأثیر عدد هارتمن، ضریب جذب/تولید حرارت، نوع اعمال میدان مغناطیسی، ضریب تخلخل، عدد ریچاردسون و زاویه اعمال سرعت حرکت دیوارهها بررسی شد. کار حاضر با مراجع معتبر اعتبارسنجی

شد و دقت بالای شبیهسازی، صحت اطلاعات بهدستآمده را تأیید نمود. خلاصه نتایج بهدستآمده را میتوان در چند مورد زیر خلاصه نمود:

 با افزایش عدد ریچاردسون، سرعت حرکت دیوارهها کاهش یافته و جریان انتقال حرارت به سمت جابجایی طبیعی متمایل می شود. این عامل منجر به کاهش قدرت گردابههای شکل گرفته درون محفظه و عدد ناسلت متوسط می شود.

 با ثابت ماندن تمامی پارامترها، افزایش عدد هارتمن به دلیل ایجاد نیروی مقاوم قویتر در برابر حرکت سیال و کاستن از سرعت، منجر به کاهش قدرت گردابهها و انتقال حرارت میشود. نکته حائز اهمیت این است که تأثیر ذکر شده، با کاهش عدد ریچاردسون، افزایش مییابد.

 افزایش ضریب تولید/جذب حرارت علاوه بر افزایش قدرت گردابههای شکل گرفته درون محفظه، به دلیل افزایش دمای سیال، سبب کاهش تراکم خطوط همدما روی دیواره گرم و عدد ناسلت متوسط میشود. افزایش همزمان عدد هارتمن و ضریب جذب/تولید حرارت، عدد ناسلت متوسط کمتری را نتیجه میدهد.

 افزایش زاویه اعمال سرعت و تغییر جهت حرکت دیواره پارامتر تأثیرگذاری بر مشخصات جریان و میزان انتقال حرارت است، به نحوی که افزایش آن عدد ناسلت متوسط بیشتری را نتیجه میدهد. بیشترین عدد ناسلت متوسط به ازای زاویه ۹۰ درجه حاصل میشود.

 کاهش ضریب تخلخل به دلیل کم کردن سرعت حرکت سیال منجر به کاهش اثرات جابجایی و کم شدن مقدار عدد ناسلت متوسط می شود. همچنین کاهش این ضریب سبب کاهش اثر میدان مغناطیسی می شود. افزایش همزمان زاویه اعمال سرعت و ضریب تخلخل، انتقال حرارت بیشتری را سبب می شود.

 اعمال نمودن میدان مغناطیسی بهصورت پریودیک در مقایسه با اعمال یکنواخت، به سبب کاهش نیروی لورنتز اعمالی منجر به افزایش قدرت گردابههای شکل گرفته درون محفظه و عدد ناسلت متوسط میشود. همچنین در حالتی که تعداد موج نوسان میدان مغناطیسی پریودیک برابر ۲ باشد، بهطور میانگین عدد ناسلت نسبت به حالتی که میدان مغناطیسی یکنواخت اعمال میشود حدود ۳۰ درصد بیشتر است.

Nanoparticles in a Non-Newtonian Blood Flow under Influence of Magnetic Field", Fluid Mech. Aerodynamics J., Vol. 7, no. 2, pp. 19-31, 2019. (In persian)

- Kefayati, G. R., Gorji-Bandpy, M., Sajjadi, H., and Ganji, D., "Lattice Boltzmann Simulation of MHD Mixed Convection in a Lid-Driven Square Cavity with Linearly Heated Wall", Scientia Iranica. Vol. 19, pp. 1053-1065, 2012.
- Chamkha, A. J., and Ismael, M. A., "Magnetic Field Effect on Mixed Convection in Lid-Driven Trapezoidal Cavities Filled with a Cu–Water Nanofluid with an Aiding or Opposing Side Wall", J. Thermal Sci. Eng. App., Vol. 8, pp. 310-319, 2016.
- Arifuzzaman, S. M., Biswas, P., Al-mamun, A., Ahmmed, S. F., and, Khan, M. S., "Analysis of Unsteady Boundary Layer Viscoelastic Nanofluid Flow Through a Vertical Porous Plate with Thermal Radiation and Periodic Magnetic Field", J. Nanofluids., Vol. 7, pp. 1122-1129, 2018.
- Husssain, S., Ahmed, S. E., and, Saleem, F., "Impact of Periodic Magnetic Field on Entropy Generation and Mixed Convection", J. Thermophysics Heat Tran., Vol. 32, pp. 999-1012, 2018.
- Izadi, M., Shermet, M. A., and Mehrian, S. A. M., "Natural Convection of a Hybrid Nanofluid Affected by an Inclined Periodic Magnetic Field within a Porous Medium", Chinese. J. Physics., Vol. 65, pp. 447-458, 2020.
- Kiwan, S., "On the Natural Convection Heat Transfer from an Inclined Surface with Porous Fins", Transport in Porous Media., Vol. 127, pp. 295-307, 2019.
- Alizadeh, R., Karimi, N., Arjmandzadeh, R., and Mehdizadeh, A., "Mixed Convection and Thermodynamic Irreversibilities in MHD Nanofluid Stagnation-Point Flows Over a Cylinder Embedded in Porous Media", J. Thermal Analysis Calorimetry., Vol. 135, pp. 489-506, 2019.
- Ghalambaz, M., Groşan, T., and Pop, I., "Mixed Convection Boundary Layer Flow and Heat Transfer Over a Vertical Plate Embedded in a Porous Medium Filled with a Suspension of Nano-Encapsulated Phase Change Materials", J. Molecular Liquids., Vol. 293, p. 111432, 2019.
- He, B., Lu, S., Gao, D., Chen, W., and Lin, F., "Lattice Boltzmann Simulation of Double Diffusive Natural Convection in Heterogeneously Porous Media of a Fluid with Temperature-Dependent Viscosity", Chinese. J. Physics., Vol. 63, pp. 186-200, 2020.

- Sheremet, M. A., Pop, I., and Mahian, O., "Natural Convection in an Inclined Cavity with Time-periodic Temperature Boundary Conditions using Nanofluids: Application in Solar Collectors", Int. J. Heat Mass Tran. Vol. 116, pp. 751-761, 2018.
- Mehryan, S. A. M., Saffarian, M. R., Namazian, Z., Namazian, and Moradi Kashkooli, F., "Numerical Study of the Mixed Convection and the Entropy Generation in a Rhombic Enclosure Filled with the Cu-Water Nanofluid with the Heat Absorption/ Generation", J. Mech Eng. Vol. 48, pp. 289-298, 2019.
- Chamkha, A. J., Selimefendigil, F., and Oztop, H. F., "Effects of a Rotating Cone on the Mixed Convection in a Double Lid-Driven 3D Porous Trapezoidal Nanofluid Filled Cavity under the Impact of Magnetic Field", Nanomaterials. Vol. 10, p. 449, 2020.
- Nemati, M., Rahmati, A. R., "Investigation of Magnetic Field Effect on Nanofluid Mixed Convection inside Lid-Driven K-shaped Enclosure Using Lattice Boltzmann Method", J. Solid Fluid Mech. Vol. 8, pp. 211-126, 2018. (In persian)
- Çolak, E., Öztop, H. F., and Ekici, Ö., "MHD Mixed Convection in a Chamfered Lid-Driven Cavity with Partial Heating", Int. J. Heat Mass Tran. Vol. 156, pp. 119-129, 2020.
- Tiwari, R. K., and Das, M. K., "Heat Transfer Augmentation in a Two-Sided Lid-Driven Differentially Heated Square Cavity Utilizing Nanofluids", Int. J. heat Mass tran. Vol. 50, pp. 2002-2018, 2007.
- Ghasemi, B., and Aminossadati, S., "Mixed Convection in a Cid-Driven Triangular Enclosure Filled with Nanofluids", Int. Commun. Heat Mass Tran. Vol. 37, pp. 1142-1148, 2010.
- Mehryan, S., Izadi, M., Chamkha, A. J., and Sheremet, M. A., "Natural Convection and Entropy Generation of a Ferrofluid in a Square Enclosure under the Effect of a Horizontal Periodic Magnetic Field", J. Molecular Liquids. Vol. 263, pp. 510-525, 2018.
- Nemati, M., Sefid, M., Rahmati, A. R., "The Effect of Changing the Position of the Hot Wall and Increasing the Amplitude and Number of Oscillations of Wavy Wall on the Flow and Heat Transfer of Nanofluid Inside the Channel in the Presence of Magnetic Field", J. Solid Fluid Mech. Vol. 10, pp. 219-236, 2020. (In persian)
- 10. Keyhanpour, M., and Ghasemi, M., " Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer of Magnetic

۷-مراجع

۱۱۵

بررسی تأثیر جهت حرکت دیواره بر انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی ...

Magnetic Field Effects on Nanofluid Natural Convection in a Semicircular Enclosure", Fluid Mech Aerodynamics J., Vol. 6, no. 2, pp. 45-59, 2017. (In persian)

- Liang, H., Li, Y., Chen, J., and Xu, J., "Axisymmetric Lattice Boltzmann Model for Multiphase Flows with Large Density Ratio", Int. J. Heat Mass. Tran., Vol. 130, pp. 1189-1205, 2019.
- 32. Liu, Z., Mu, Z., and Wu, H., "A New Curved Boundary Treatment for LBM Modeling of Thermal Gaseous Microflow in the Slip Regime", Microfluidics Nanofluidics, Vol. 23, pp. 27-37, 2019.
- 33. Rahmati, A. R., Roknabadi, A. R., and Abbaszadeh, M., "Numerical Simulation of Mixed Convection Heat Transfer of Nanofluid in a Double Lid-Driven Cavity Using Lattice Boltzmann Method", Alexandria Eng,. J. Vol. 55, pp. 3101-3114, 2016.
- 34. Mohamad, A. A., "Lattice Boltzmann Method: Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes", Springer Science & Business Media, 2011.
- Bhatnagar, P. L., Gross, E. P., and Krook, M., "A Model for Collision Processes in Gases", Physical review, Vol. 94, pp. 511-525, 1954.
- 36. Ghasemi, K., and Siavashi, M., "Lattice Boltzmann Numerical Simulation and Entropy Generation Analysis of Natural Convection of Nanofluid in a Porous Cavity with Different Linear Temperature Distributions on Side Walls", J. Molecular Liquids, Vol. 233, pp. 415-430, 2017.
- Liu, S., Zhou, T., Tao, S., Wu, Z., and Yang, G., "Lattice Boltzmann simulation of particle-laden flows using an improved curved boundary condition", Int. J. Modern Physics, Vol. 30, pp. 1-21, 2019.
- Nithiarasu, P., Seetharamu, K., and Sundararajan, T., "Natural Convective Heat Transfer in a Fluid Saturated Variable Porosity Medium", Int. J. Heat Mass Tran., Vol. 40, pp. 3955-3967, 1997.
- Takeshi, S., Takegoshi, E., Kitano, K., and Kenichi, O., "Thermal Lattice Boltzmann Model for Incompressible Flows Through Porous Media", J. Thermal Sci. Technology, Vol. 1, pp. 90-100, 2010.
- 40. Sathiyamoorthy, M., and Chamkha, A., "Effect of Magnetic Field on Natural Convection Flow in a Liquid Gallium Filled Square Cavity for Linearly Heated Side Wall (s) ", Int. J. Thermal Sci., Vol. 49, pp. 1856-1865, 2010.

- Ashorynejad, H. R., Mohamad, A. A., and Sheikholeslami, M., "Magnetic Field Effects on Natural Convection Flow of a Nanofluid in a Horizontal Cylindrical Annulus using Lattice Boltzmann Method", Int. J. Thermal Sci., Vol. 64, pp. 240-250, 2013.
- S. Mojumder, S., Saha, M., and Ibrahim, T. A., "Numerical Study on Mixed Convection Heat Transfer in a Porous L-Shaped Ccavity", Eng. Sci Technology, Vol. 20, pp. 272-282, 2017.
- Nazari, S., Ellahi, R., Sarafraz, M., Akbari, O. A., "Numerical Study on Mixed Convection of a Non-Newtonian Nanofluid with Porous Media in a Two Lid-Driven Square Cavity", J. Therm. Analysis Calorimetry., Vol. 138, pp. 1-25, 2019.
- 23. Eid, M. R., and Mahn, K. L., "Unsteady MHD Heat and Mass Transfer of a Non-Newtonian Nanofluid Flow of a Two-Phase Model Over a Permeable Stretching Wall with Heat Generation/Absorption", Advanced Powder Technology, Vol. 28, pp. 3063-3073, 2017.
- Sheikholeslami, M., Kataria, H. R., and Mittal, A. S., "Effect of Thermal Diffusion and Heat-Generation on MHD Nanofluid Flow Past an Oscillating Vertical Plate Through Porous Medium", J. Molecular Liquids, Vol. 257, pp. 12-25, 2018.
- 25. Selimefendigil, F., and Öztop, H. F., "MHD Mixed Convection of Nanofluid in a Flexible Walled Inclined Lid-Driven L-Shaped Cavity Under the Effect of Internal Heat Generation", Physica A., Vol. 534, p. 122144, 2019.
- 26. Mishra, A., Pandey, A. K., Chamkha, A. J., and Kumar, M., "Roles of Nanoparticles and Heat Generation/Absorption on MHD Flow of Ag– H₂O Nanofluid via Porous Stretching/Shrinking Convergent/Divergent Channel", J. Egyptian Mathematical Sci., Vol. 28, pp. 1-18, 2020.
- Mahmoudi, A., Mejri, I., Abbassi, M. A., and Omri, A., "Analysis of MHD Natural Convection in a Nanofluid-Filled Open Cavity with Non Uniform Boundary Condition in the Presence of Uniform Heat Generation/Absorption", Powder Technology, Vol. 269, pp. 275-289, 2015.
- Abbassi, M. A., Mliki, B., Omr, A., and Zeghmati, B., "Augmentation of Natural Convective Heat Transfer in Linearly Heated Cavity by Utilizing Nanofluids in the Presence of Magnetic Field and Uniform Heat Generation/Absorption", Powder Technology, Vol. 284, pp. 312-325, 2015.
- 29. Sukop, M. C., and Thorne, D. T., "Lattice Boltzmann Modeling", Springer, 2006.
- 30. Alinejad, J., Esfahani, J. A., "Lattice Boltzmann Simulation and Taguchi Optimization of