

# بررسی تأثیر جهت حرکت دیواره بر انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی درون محفظه متخلخل با جذب/تولید حرارت و میدان مغناطیسی

محمد سفید<sup>\*۳</sup>  
دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه یزد

هاجر محمدزاده<sup>۲</sup>  
دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه علم و صنعت ایران

محمد نعمتی<sup>۱</sup>  
دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه یزد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۴)

## چکیده

در مطالعه حاضر، برای اولین بار، اثر جهت حرکت دیواره‌های محفظه ربع دایره‌ای شکل متخلخل بر انتقال حرارت جابه‌جایی 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 می‌گردد. جابه‌جایی ترکیبی بر اثر حرکت دیواره‌ها در جهات مختلف به وجود می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد ریچاردسون، عدد هارتمن، ضریب جذب/تولید حرارت و کاهش ضریب تخلخل سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌شود. 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 می‌شود. پریودیک اعمال کردن میدان مغناطیسی در مقایسه با اعمال یکنواخت، حدود ۳۰ درصد انتقال حرارت بیشتری را منجر می‌شود. افزایش ضریب تخلخل، اثر عدد هارتمن و زاویه اعمال سرعت را افزایش می‌دهد. افزایش هم‌زمان ضریب جذب/تولید حرارت و عدد هارتمن، کاهش بیشتر عدد ناسلت متوسط را در پی دارد.

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

## 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° 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.

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

۲- دانشجوی دکتری: h\_mohamadzade@mecheng.iust.ac.ir

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

## فهرست علائم و اختصارات

ضریب وزنی	$\omega$	قدرت میدان مغناطیسی	<b>B</b>
<b>زیر نویس ها</b>		سرعت گسسته شبکه	<b>c</b>
سرد	<b>c</b>	عدد دارسی	<b>Da</b>
گرم	<b>h</b>	تابع توزیع جریان	<b>f</b>
شماره لینک مدل شبکه	<b>i</b>	تابع توزیع تعادلی جریان	$f^{eq}$
		نیروی خارجی	<b>F</b>
		تابع توزیع دما	<b>g</b>
		شتاب جاذبه	<b>g</b>
		تابع توزیع تعادلی دما	$g^{eq}$
		عدد گرافش	<b>Gr</b>
		شعاع محفظه	<b>H</b>
		عدد هارتمن	<b>Ha</b>
		ضریب نفوذپذیری	<b>K</b>
		عدد ناسلت	<b>Nu</b>
		فشار	<b>p</b>
		عدد پرانتل	<b>Pr</b>
		ضریب بی بعد جذب/تولید حرارت	<b>q</b>
		عدد رینولدز	<b>Re</b>
		عدد ریچاردسون	<b>Ri</b>
		دما	<b>T</b>
		سرعت در جهات شبکه	<b>u(u,v)</b>
		سرعت حرکت دیواره	<b>U<sub>o</sub></b>
		مختصات شبکه	<b>x(x,y)</b>
		<b>علائم یونانی</b>	
		ضریب پخش حرارتی	$\alpha$
		زاویه اعمال سرعت	$\delta$
		ضریب تخلخل	$\varepsilon$
		تعداد موج نوسان	$\kappa$
		ویسکوزیته دینامیکی	$\mu$
		دمای بی بعد	$\theta$
		چگالی	$\rho$
		زمان آسایش میدان سرعت	$\tau_1$
		زمان آسایش میدان دما	$\tau_2$
		ویسکوزیته سینماتیکی	$\nu$

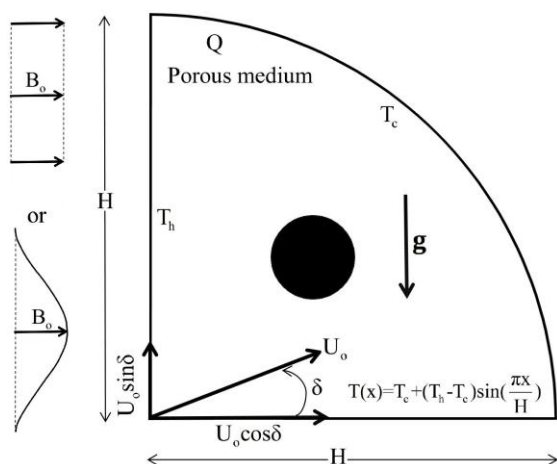
## ۱- مقدمه

شبیه سازی انتقال حرارت جابجایی اجباری و طبیعی در هندسه های مختلف، کاربردهای گسترده ای در زمینه های مهندسی و صنعتی دارد. از جمله این کاربردها می توان به افزایش میزان انتقال حرارت، خنک کاری قطعات الکترونیکی، فناوری های مربوط به روانکاری، تولید شیشه شناور، انتقال حرارت در حوضچه های خورشیدی، رآکتورهای هسته ای، صنایع غذایی و بسیاری از موارد دیگر اشاره نمود [۱-۳]. جریان جابجایی ترکیبی درون محفظه با دیواره متحرک از دو عامل ناشی می شود. 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 جابجایی ترکیبی نانوسیال درون محفظه مربعی شکل را در حالتی که دیواره های عمودی محفظه در جهات مختلف حرکت کرده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، عدد ریچاردسون و جهت حرکت دیواره نقش قابل توجهی بر میدان جریان و میزان انتقال حرارت دارد. قاسمی و امین الساداتی [۷] به بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون یک محفظه مثلثی شکل حاوی نانوسیال با تغییر جهت حرکت دیواره پرداختند. دیواره پایینی 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 آن ها 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 نیز افزایش می یابد. مسأله انتقال حرارت جابجایی درون محفظه حاوی سیال هادی جریان الکتریسیته تحت تأثیر میدان مغناطیسی

پریودیک را به روش عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که زاویه اعمال میدان مغناطیسی پریودیک، تأثیر 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 بررسی‌های دقیق، به منظور بهبود بخشیدن به سامانه‌های مهندسی حاوی مواد متخلخل و بالا بردن کیفیت و کارایی آن‌ها می‌باشد [۱۹-۱۶]. عاشوری‌نژاد و همکاران [۲۰] جابجایی طبیعی درون محفظه مستطیلی شکل تحت اثر میدان مغناطیسی را به روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش قدرت میدان مغناطیسی و ضریب تخلخل به ترتیب منجر به کاهش و افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود. موجمر و همکاران [۲۱] به بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون محفظه متخلخل L شکل پرداختند. نتایج نشان داد که کاهش ضریب نفوذپذیری و ضریب تخلخل به سبب کاستن از سرعت حرکت سیال درون محفظه، انتقال حرارت را به‌طور چشم‌گیری تحت تأثیر قرار می‌دهد و سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌شود. نظری و همکاران [۲۲] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی سیال غیرنیوتنی درون محفظه مربعی شکل را با جهات مختلف حرکت دیواره‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد با افزایش عدد ریچاردسون و تغییر سازوکار انتقال حرارت به سمت جابجایی طبیعی، مقدار انتقال حرارت کم می‌شود. همچنین زمانی که دیواره گرم به سمت بالا حرکت می‌کند، انتقال حرارت بیشتری نسبت به حالتی که دیواره گرم به سمت پایین حرکت می‌کند وجود خواهد داشت. از موارد کاربرد مطالعات فوق می‌توان به عایق کاری ساختمان‌ها، مبدل‌های زیرزمینی برای ذخیره انرژی، بازیابی و کنترل دمای راکتورها اشاره نمود. جذب/تولید حرارت نقش بسیار مهمی در پدیده‌های مختلفی چون انرژی هسته‌ای و مدل‌سازی احتراق دارد. از جمله روش‌هایی 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 می‌توان به مطالعه محمودی و همکاران [۲۷] اشاره نمود. آن‌ها به مطالعه انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه نیمه‌باز تحت اثر میدان مغناطیسی با وجود جذب/تولید حرارت پرداختند. عباسی و همکاران [۲۸]

(مگنتوهیدرودینامیک)<sup>۱</sup> با توجه به کاربردهای فراوان در صنایع مهندسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۸-۱۰]. از جمله این کاربردها می‌توان به رشد کریستال‌ها در سیال، خنک‌کاری راکتورهای هسته‌ای، استخراج انرژی زمین گرمایی و صنایع پلیمر و متالورژی اشاره کرد. بنابراین با استفاده از جریان طبیعی مگنتوهیدرودینامیک به راحتی می‌توان بر ویژگی‌های انتقال حرارت و جریان تأثیر گذاشت و آن را تحت کنترل درآورد. شبیه‌سازی جریان مگنتوهیدرودینامیک با روش‌های مختلفی از جمله روش شبکه بولتزمن، تفاضل محدود و المان محدود صورت گرفته است. کفایتی و همکاران [۱۱] به بررسی 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 می‌گردد. چامخا و اسماعیل [۱۲] تأثیر میدان مغناطیسی بر روی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال درون محفظه دوزنقه شکل با دیواره متحرک را به روش عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش عدد هارتمن موجب کاهش سرعت سیال به خصوص در مجاورت دیواره‌ها و عدد ناسلت متوسط می‌شود. همچنین جهت حرکت دیواره پارامتر تعیین‌کننده‌ای بر میزان انتقال حرارت است. با مروری بر مطالعات قبلی انجام شده، مشاهده می‌شود اکثر مطالعات پیرامون تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر جریان‌های جابجایی بوده است و بررسی‌های 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 همکاران [۸] به تحلیل انتقال حرارت و تولید آنتروپی نانوسیال درون محفظه مربعی شکل در حضور میدان مغناطیسی پریودیک پرداختند. نتایج نشان داد که هرگاه میدان مغناطیسی پریودیک اعمال شود، انتقال حرارت و قدرت جریان در مقایسه با اعمال یکنواخت، بیشتر است. ایزدی و همکاران [۱۵] جابجایی طبیعی نانوسیال درون محفظه مربعی شکل متخلخل تحت تأثیر میدان مغناطیسی

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  $0.4H$  است.  $U_0$  سرعت حرکت دیواره است که با دیواره افقی زاویه  $\delta$  می‌سازد و به صورت پادساعتگرد سنجیده می‌شود.



شکل (۱): هندسه مسأله مورد بررسی

در این محفظه جذب/تولید حرارت یکنواخت به قدرت  $Q$  وجود دارد. هدف از کار حاضر، بررسی تأثیر عدد هارتمن  $(0, 25, 50)$ ، ضریب جذب/تولید حرارت  $(-5, 0, +5)$ ، عدد ریچاردسون  $(1, 10, 100)$ ، ضریب تخلخل  $(0.45, 0.65)$  و زاویه اعمال سرعت  $(0, 30, 45, 60, 90)$  (درجه) و نوع اعمال میدان مغناطیسی (یکنواخت و پریودیک) بر مشخصات جریان و انتقال حرارت جابجایی است. در کار حاضر عدد پراتنل، عدد دارسی و عدد گراشف به ترتیب  $0.71, 0.01$  و  $10^4$  در نظر گرفته شده است. تمامی مرزهای جریان، غیرقابل نفوذ بوده و لغزشی روی 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 تشعشی نیز صرف نظر شده است. عبارت به کاررفته برای میدان مغناطیسی پریودیک به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته شده است که در آن دامنه  $\kappa$  و تعداد موج نوسان می‌باشد.

$$B = \frac{B_0}{2} (1 - \cos \frac{2\kappa y}{H}) \quad (1)$$

انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال تحت اثر میدان 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/تولید حرارت تأثیر چشمگیری بر شکل جریان و انتقال حرارت دارد به نحوی که افزایش ضریب جذب/تولید 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 می‌باشد. روش شبکه بولتزمن یکی از روش‌های به‌روز و مؤثر در زمینه بررسی عددی پدیده‌هاست که محدودیت پیوستگی جریان بر آن اعمال نمی‌شود [۲۹]. با توجه به ماهیت روش شبکه بولتزمن، تمامی محاسبات به صورت صریح صورت می‌گیرد. 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 جریان‌های چند فاز مناسب است [۳۰-۳۲]. 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 پرداختند.

با توجه به مطالعات معتبر قبلی، مشاهده می‌شود 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

### ۳- معادلات حاکم و روش حل عددی

با فرض غیرقابل تراکم بودن جریان، معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در روابط (۲) تا (۷) ارائه شده است [۲۱].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{1}{\rho} \left( -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right) - \frac{\nu \varepsilon u}{K} - \frac{F_x \varepsilon^2 u^2}{K^{0.5}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{1}{\rho} \left( -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right) - \frac{\nu \varepsilon v}{K} - \frac{F_x \varepsilon^2 v^2}{K^{0.5}} + F_y \quad (4)$$

$$F_y = \varepsilon \beta g (T - T_c) - \frac{\mu \varepsilon Ha^2}{H^2} v \quad (5)$$

$$F_x = \frac{1.75}{\sqrt{150 \varepsilon^{1.5}}} \quad (6)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{\rho c_p} (T - T_c) \quad (7)$$

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

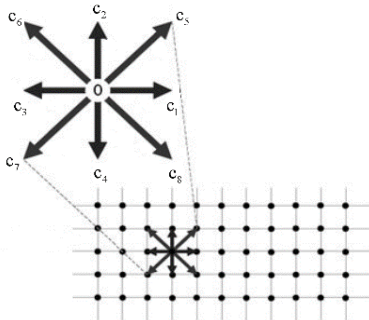
$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{U_0}, V = \frac{v}{U_0}, Da = \frac{K}{H^2}, Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, Ha = BH \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}, Gr = \frac{\rho \beta g (T_h - T_c) H^3}{\nu^2}, \quad (8)$$

$$Re = \frac{U_0 H}{\nu}, P = \frac{p}{\rho U_0^2}, q = \frac{QH^2}{\rho c_p \alpha}, Ri = \frac{Gr}{Re^2}$$

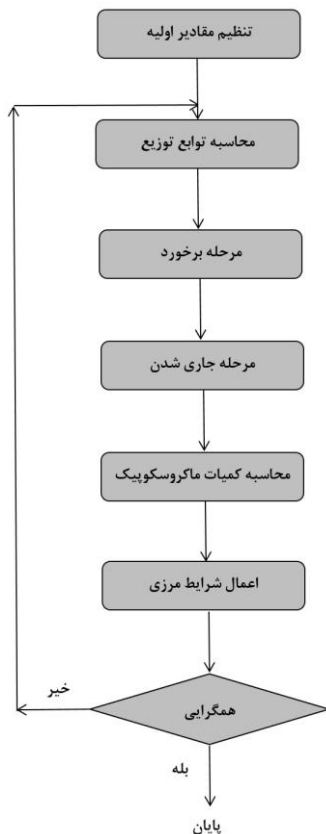
در کار حاضر از روش شبکه بولتزن با دو تابع توزیع برای میدان جریان و دما استفاده شده است که معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی را در مقیاس ماکروسکوپیک ارضا می‌کنند. برای هر دو میدان ذکر شده، آرایش شبکه  $D_2Q_9$  به کار گرفته شده است. این روش، یک روش صریح است، به این مفهوم که در مراحل انتشار و برخورد با استفاده از مقادیر معلوم گام زمانی قبلی، مقادیر مجهول توابع توزیع در گام زمانی بعدی به دست می‌آیند. در این روش به جای حل معادلات ناویر استوکس، معادله گسسته شده بولتزن حل می‌شود. شبکه بولتزن دارای دیدگاهی مزوسکوپیک است [۲۹]. در شکل ۲ آرایش این نوع شبکه نشان داده شده است. جزئیات این آرایش شبکه و مزیت‌های آن در

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



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

معادله شبکه بولتزن با استفاده از تقریب بی‌جی-کی [۳۵] با وجود نیروی خارجی برای میدان جریان به صورت روابط (۹) تا (۱۳) و برای میدان دما به صورت رابطه (۱۴) بیان می‌شود. تابع توزیع تعادلی در مدل  $D_2Q_9$  برای میدان جریان و دما به ترتیب به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) و کمیات ماکروسکوپیک به صورت رابطه (۱۷) بیان می‌شوند.



شکل (۳): مراحل انجام الگوریتم روش شبکه بولتزن

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

$$Nu = \frac{1}{H_0} \int_0^1 -\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{X=0} dY \quad (21)$$

$$v = \frac{0.1H}{\sqrt{3Gr}} \quad (22)$$

جهت مدل نمودن شرایط مرزی سرعت برای دیواره های مسطح، از روش کمانه کردن استفاده می شود [۳۴]. به عنوان 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 روش های ارائه شده توسط لیو و همکاران [۳۷] استفاده شده است.

$$f_2 = f_4, f_3 = f_7, f_6 = f_8 \quad (23)$$

$$g_2 = \sin\left(\frac{\pi x}{H}\right) \times (\omega_2 + \omega_4) T_h - g_4,$$

$$g_5 = \sin\left(\frac{\pi x}{H}\right) \times (\omega_5 + \omega_7) T_h - g_7, \quad (24)$$

$$g_6 = \sin\left(\frac{\pi x}{H}\right) \times (\omega_6 + \omega_8) T_h - g_8$$

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

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |T^{n+1} - T^n|}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |T^n|} \leq 10^{-7} \quad (25)$$

در رابطه (۲۵)، n و n+1 مراحل زمانی قدیم و جدید، χ نشان دهنده خطای مجاز و N و M به ترتیب تعداد گره ها در راستای x و y را نشان می دهند.

#### ۴- استقلال حل از شبکه انتخابی و صحت سنجی

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 منظور شده، ۱۰۰×۱۰۰ 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

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, t+1) = f_i(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau_1} [(f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)) + \mathbf{c}_i F_i] \quad (9)$$

$$F_i = F_i^M + F_i^B + F_i^P \quad (10)$$

$$F_i^M = -3\rho\epsilon\omega_i \frac{Ha^2\mu}{H^2} v \quad (11)$$

$$F_i^B = 3\rho\beta\epsilon\omega_i g(T - 0.5) \quad (12)$$

$$F_i^P = -\omega_i \left[ 9 \frac{v\epsilon}{K} (uc_x + vc_y) + \frac{1.75}{\sqrt{150\epsilon K}} (uc_x \sqrt{u^2 + v^2} + vc_y \sqrt{u^2 + v^2}) \right] \quad (13)$$

$$g_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, \Delta t, t+1) = g_i(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau_2} (g_i(\mathbf{x}, t) - g_i^{eq}(\mathbf{x}, t)) + \frac{Q}{\rho c_p} (T - T_c) \quad (14)$$

$$f_i^{eq} = \omega_i \left[ 1 + 3(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u}) - \frac{3}{2\epsilon} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \frac{9}{2\epsilon} (\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2 \right] \quad (15)$$

$$g_i^{eq} = \omega_i T [1 + 3(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})] \quad (16)$$

$$\rho = \sum_i f_i, \rho \mathbf{u} = \sum_i \mathbf{c}_i f_i, T = \sum_i g_i \quad (17)$$

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 سرعت های گسسته نیز به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) می باشد [۳۶].

$$\omega_0 = 4/9, \omega_i = 1/9 \text{ for } i=1,2,3,4, \quad (18)$$

$$\omega_i = 1/36 \text{ for } i=5,6,7,8$$

$$c_0 = 0$$

$$c_i = \left[ \cos\left(\frac{(i-1)\pi}{2}\right), \sin\left(\frac{(i-1)\pi}{2}\right) \right] \text{ for } i=1,2,3,4 \quad (19)$$

$$c_i = \sqrt{2} \left[ \cos\left(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right), \sin\left(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \text{ for } i=5,6,7,8$$

ویسکوزیته و ضریب پخش حرارتی از روابط (۲۰) بر حسب زمان آسایش مربوط به میدان جریان و میدان دما به دست می آید.

$$\tau_1 = 3v + 0.5, \tau_2 = 3\alpha + 0.5 \quad (20)$$

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

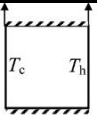
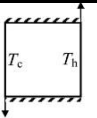
روی دیواره گرم در جدول ۴ و خطوط جریان در شکل ۴ مقایسه شده است. همچنین مقایسه‌ای بین خطوط هم‌دمای کار حاضر با مرجع [۷] برای جریان جابجایی ترکیبی درون محفظه مثلثی شکل و عدد ریچاردسون ۱ صورت گرفته است که در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به صحت‌سنجی‌های ارائه شده، مشاهده می‌شود دقت شبیه‌سازی‌های صورت گرفته توسط کد نوشته‌شده حاضر به زبان فرترن، بسیار بالاست و می‌توان از درستی کد نوشته‌شده اطمینان حاصل کرد و به ارائه نتایج پرداخت.

شده است. شبیه‌سازی برای محفظه‌ی مربعی که دیواره‌های افقی آن ثابت و دیواره‌های عمودی آن در جهات مختلف حرکت می‌کنند، مقایسه شده است. به‌عنوان صحت‌سنجی دیگر، کار حاضر با مراجع [۳۸] و [۳۹] در جدول ۳ در عدد رایلی  $10^4$  مقایسه شده است. این مقایسه برای انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه مربعی شکل متخلخل با دیواره‌های عمودی آدیاباتیک و دیواره‌های عمودی دما ثابت صورت گرفته است. به‌عنوان راستی‌آزمایی دیگر، کار حاضر با مرجع [۴۰] به‌صورت عدد ناسلت متوسط

جدول (۱): عدد ناسلت متوسط به ازای ابعاد مختلف شبکه در  $\delta=45^\circ$  و  $q=-5$ ,  $\kappa=1$ ,  $Ri=1$ .

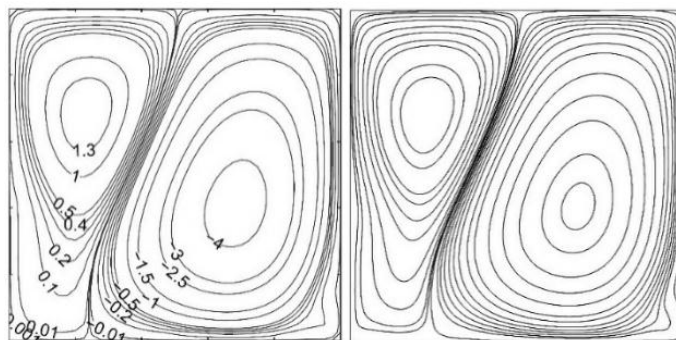
ابعاد شبکه	Nu					
	Ha=0		Ha=25		Ha=50	
	$\varepsilon=0.45$	$\varepsilon=0.85$	$\varepsilon=0.45$	$\varepsilon=0.85$	$\varepsilon=0.45$	$\varepsilon=0.85$
۶۰×۶۰	۱۰/۷۲۱	۱۱/۳۷۲	۱۰/۲۸۵	۱۰/۸۳۵	۹/۷۶۸	۹/۲۶۸
۸۰×۸۰	۱۰/۸۸۵	۱۱/۵۹۶	۱۰/۴۶۱	۱۱/۰۳۳	۹/۹۳۹	۹/۴۰۸
۱۰۰×۱۰۰	۱۱/۰۴۱	۱۱/۷۳۵	۱۰/۵۹۹	۱۱/۱۸۹	۱۰/۰۸۱	۹/۵۵۱
۱۲۰×۱۲۰	۱۱/۱۴۲	۱۱/۸۴۲	۱۰/۶۹۱	۱۱/۲۲۴	۱۰/۱۶۶	۹/۶۴۴

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

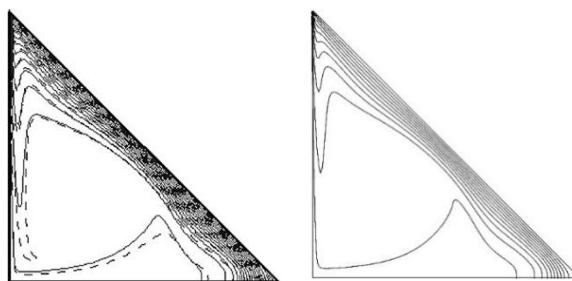
						
	مرجع [۶]	کار حاضر	درصد خطا	مرجع [۶]	کار حاضر	درصد خطا
Ri=1 (Re=100)	۶/۶۵۵	۶/۵۱۲	۲/۱۵۲	۱۷/۹۶۲	۱۷/۵۳۳	۲/۴۴۸
Ri=10 (Re=31.623)	۴/۱۴۶	۴/۰۷۱	۱/۸۴۱	۱۰/۱۹۱	۹/۹۷۱	۲/۲۰۶

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

	مرجع [۳۸]	مرجع [۳۹]	کار حاضر
$\varepsilon=0.4$	۱/۴۰۸	۱/۳۹۳	۱/۴۰۱
$\varepsilon=0.6$	۱/۵۳۱	۱/۵۲۲	۱/۵۲۸
$\varepsilon=0.9$	۱/۶۴۲	۱/۶۵۹	۱/۶۶۲



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)

حرارتی در این ناحیه است. به ازای  $\delta=30^\circ$  و  $\delta=60^\circ$  مشاهده می‌شود یک گردابه پادساعتگرد نزدیک دیواره افقی و یک گردابه ساعتگرد در مجاورت دیواره عمودی درون محفظه شکل می‌گیرد. زیرا در این حالت سرعت به دو مخلفه در دو راستا تجزیه شده و هم‌زمان دیواره افقی و عمودی به حرکت در می‌آیند. سیال گرم شده در مجاورت دیواره عمودی با حرکت به سمت بالا و پس از برخورد با دیواره سرد، گردابه ساعتگرد را به وجود می‌آورد. لازم به ذکر است با افزایش  $\delta$ ، از قدرت گردابه افقی کاسته می‌شود و به قدرت گردابه عمودی افزوده می‌شود.

برای  $\delta=90^\circ$  چون فقط دیواره عمودی در جهت بالا حرکت می‌کند، یک گردابه ساعتگرد درون محفظه شکل می‌گیرد. با توجه به خطوط هم‌دما دیده می‌شود که با افزایش زاویه اعمال سرعت، تراکم خطوط هم‌دما در مجاورت دیواره منحنی و سرد محفظه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش  $\delta$ ، انحنای خطوط هم‌دما در مجاورت دیواره عمودی محفظه افزایش می‌یابد و در زاویه  $90^\circ$  درجه بیشترین انحنای مشاهده می‌شود که نشان از بیشتر بودن میزان جابجایی دارد.

جدول (۴): مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و مرجع [۴۰] برای عدد رایلی  $10^5$

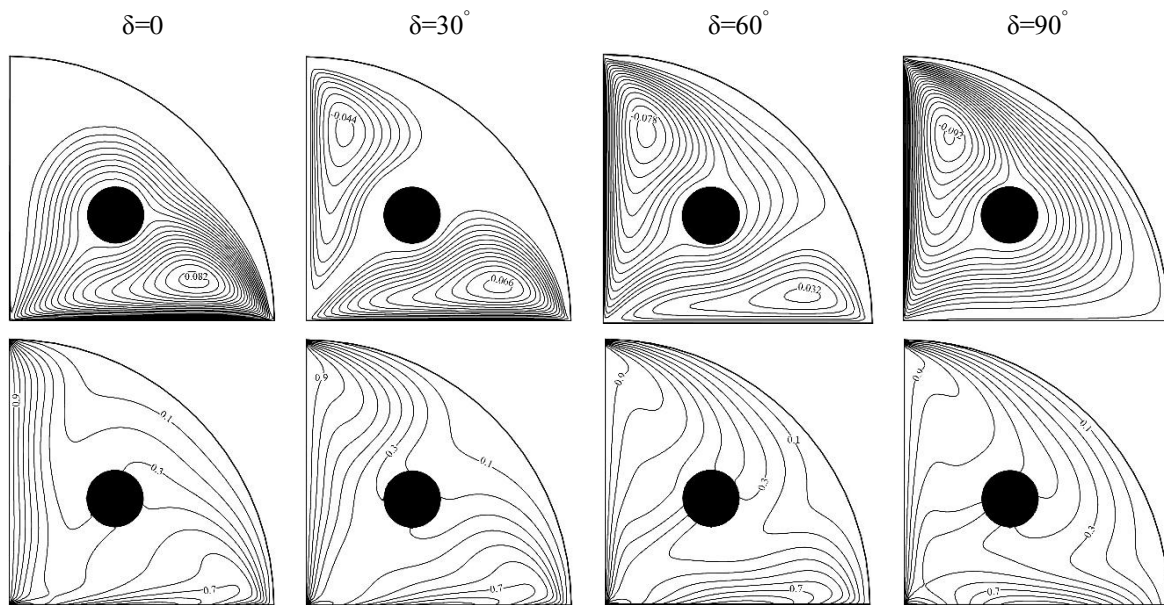
Nu		مرجع [۴۰]	Ha
درصد اختلاف	کار حاضر		
۰/۹۸	۱۲/۳۵	۱۲/۲۳	۰
۲/۰۴	۱۳/۰۵	۱۲/۷۵	۵۰
۳/۱۱	۱۳/۵۳	۱۳/۱۸	۱۰۰

## 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  $\delta=0$ ، 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

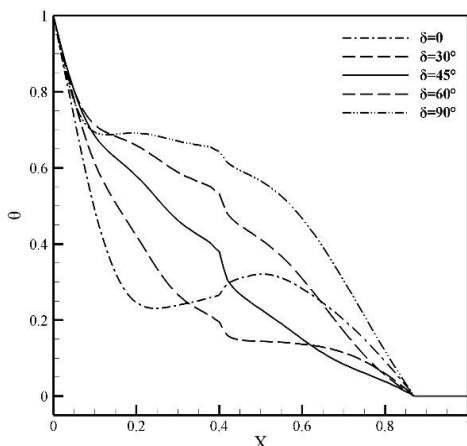




شکل (۶): خطوط جریان (ردیف بالا) و خطوط هم‌دما (ردیف پایین) در  $Ri=1$ ,  $Ha=0$ ,  $q=0$  و  $\epsilon=0.45$

آن منجر به کاهش اثرات جابجایی و میزان انتقال حرارت می‌شود. 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 می‌شود که با افزایش عدد ریچاردسون، اثر عدد هارتمن کمتر می‌شود. بعلاوه افزایش عدد هارتمن سبب کاهش گرادینان دمایی در مجاورت دیواره سرد محفظه می‌شود.

با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که دمای سیال داخل محفظه با افزایش زاویه اعمال سرعت، افزایش می‌یابد و در  $\delta=90^\circ$  بیشترین دما مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش  $\delta$ ، اثر هدایت حرارتی در مجاورت دیواره عمودی، در فاصله کمتری از دیوار کاهش می‌یابد. مثلاً به ازای  $\delta=0$ ، در  $X=0.2$  پروفیل دما انحنادار می‌شود در حالی که این اثر برای  $\delta=90^\circ$  در  $X=0.1$  رخ می‌دهد. خطی بودن پروفیل دما نشان از غالب بودن هدایت حرارتی و کم بودن اثرات جابجایی دارد.



شکل (۷): دما در قسمت میانی محفظه در  $Ha=0$ ,  $Ri=1$  و  $\epsilon=0.45$  و  $q=0$

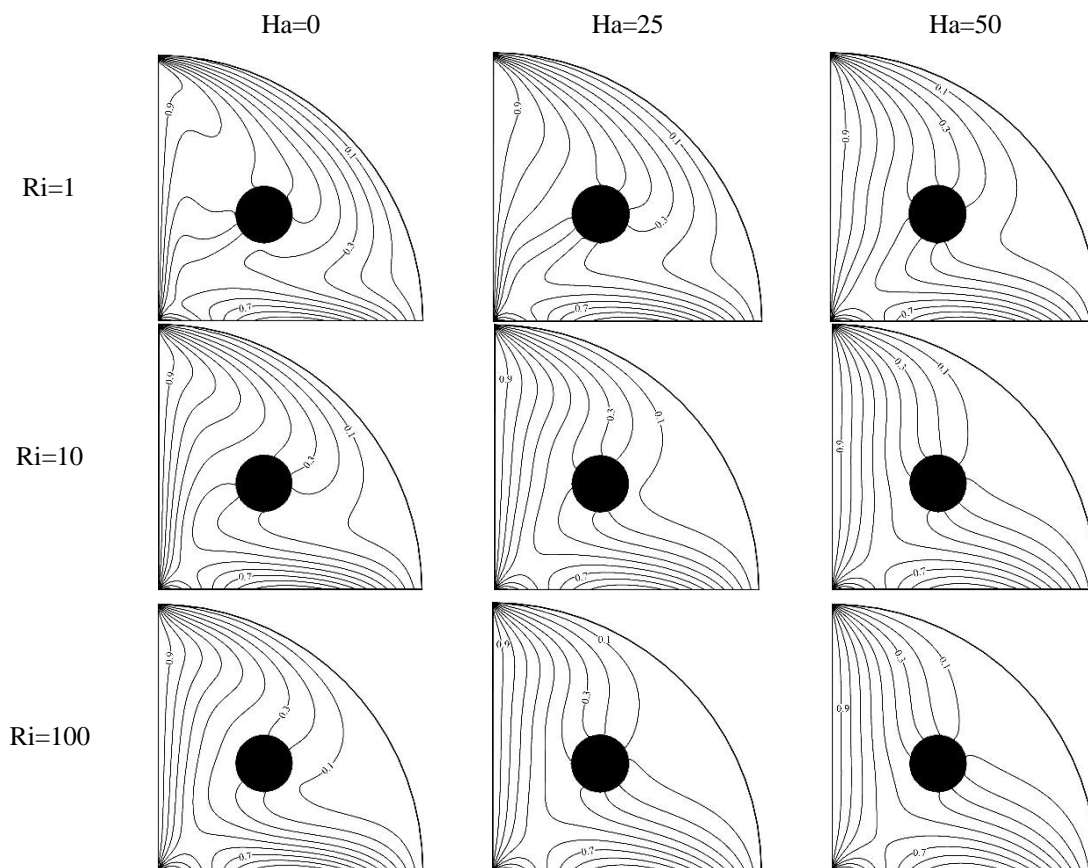
### ۵-۲- اثر عدد هارتمن و عدد ریچاردسون بر جریان و انتقال حرارت

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 انحنای 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

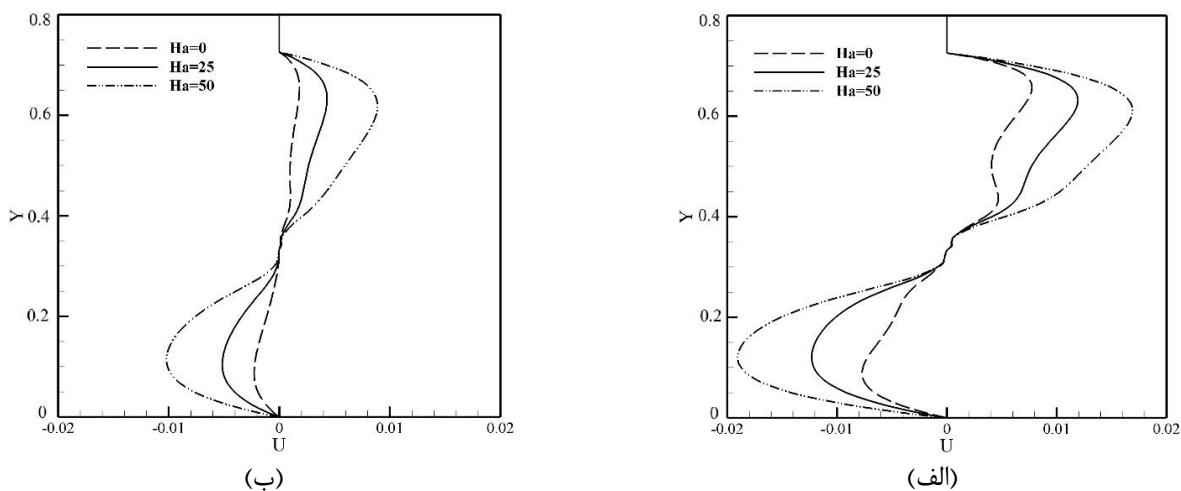
شکل ۹ تغییرات سرعت افقی در قسمت میانی محفظه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با افزایش عدد ریچاردسون

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 سرعت برای  $Ri=1$  و  $Ri=100$  می‌شود.

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



شکل (۸): خطوط هم‌دما در  $\delta=90^\circ$ ,  $q=0$  و  $\varepsilon=0.85$  و میدان مغناطیسی یکنواخت



شکل (۹): سرعت افقی در  $\delta=90^\circ$ ,  $\varepsilon=0.85$  و میدان مغناطیسی یکنواخت (الف)  $Ri=1$  و (ب)  $Ri=100$

### ۳-۵- اثر جذب/تولید حرارت و نوع اعمال میدان

#### مغناطیسی بر میدان جریان و دما

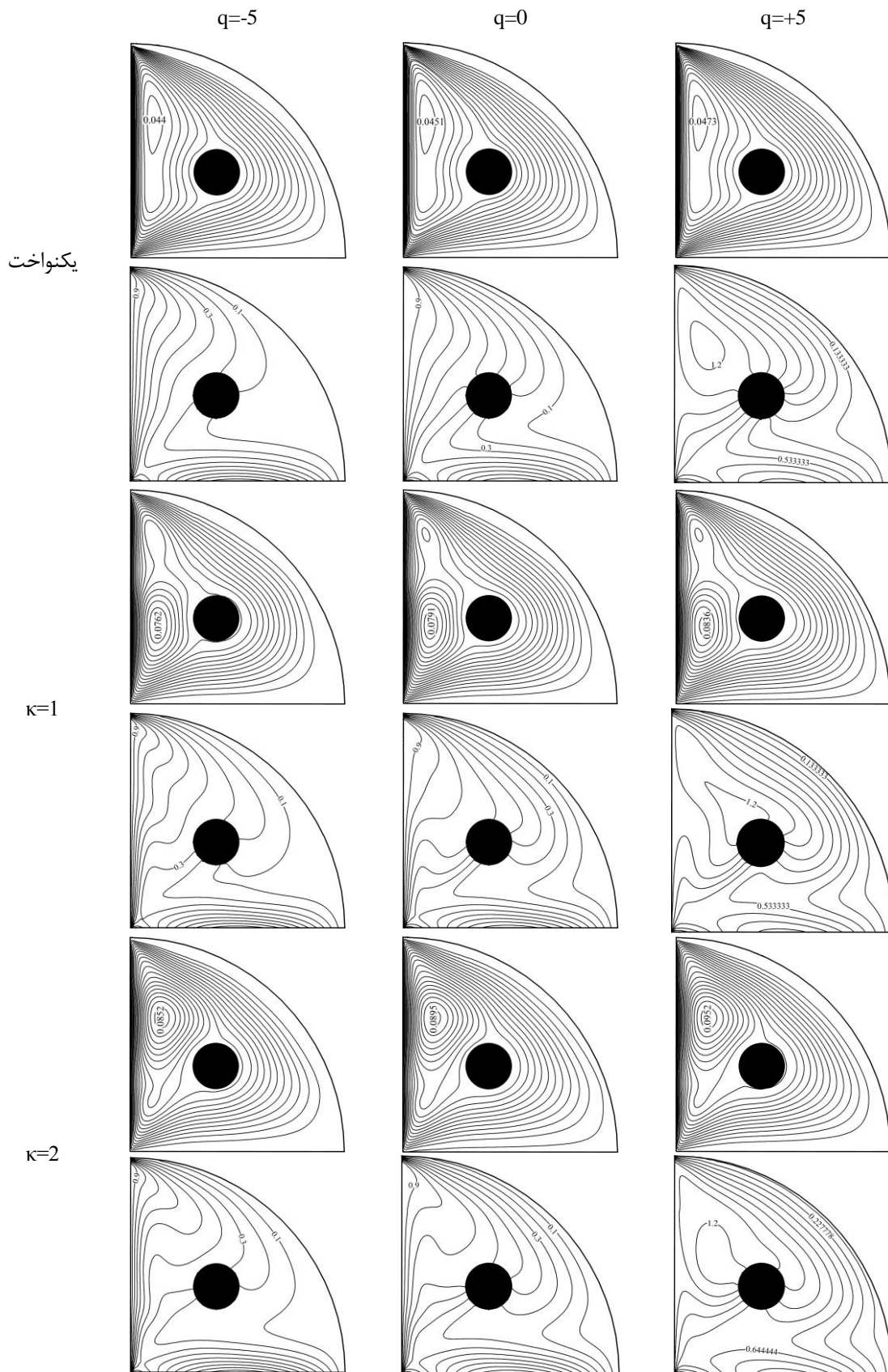
مطابق شکل ۱۰ و بدون در نظر گرفتن چگونگی اعمال میدان مغناطیسی، مشاهده می‌شود زمانی که جذب حرارت وجود دارد ( $q=-5$ )، دمای سیال داخل محفظه به مراتب کمتر از دمای دیواره گرم محفظه بوده و همین امر سبب افزایش تراکم خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره گرم می‌شود. اما وقتی که تولید حرارت وجود دارد ( $q=+5$ )، چون دمای سیال بیشتر از دمای دیواره گرم است، تراکم خطوط در نزدیکی دیواره گرم خیلی کمتر می‌شود و انتقال حرارت از سیال به دیواره صورت می‌گیرد. همان‌طور که مشخص است، بر طبق بقای انرژی، با کم شدن گرادیان دما در نزدیکی دیواره گرم، تراکم خطوط هم‌دما در مجاورت دیواره سرد افزایش می‌یابد. ملاحظه می‌گردد وقتی که میدان مغناطیسی پریودیک اعمال می‌شود، گرادیان نیروی لورنتز در امتداد محور عمودی کاهش می‌یابد و این عامل منجر به افزایش قدرت گردابه‌ها درون محفظه می‌شود. زیرا در این حالت میانگین نیروهای لورنتز اعمال شده، کاهش می‌یابد و این اثر برای  $\kappa=2$  بیشتر از  $\kappa=1$  است. با اعمال پریودیک میدان مغناطیسی، گردابه‌های ایجاد شده در مجاورت دیواره گرم سبب فشردگی خطوط نزدیک دیواره گرم می‌شوند که این عامل منجر به افزایش مقدار انتقال حرارت می‌شود. همچنین بدون در نظر گرفتن چگونگی اعمال میدان مغناطیسی، با افزایش ضریب جذب/تولید حرارت از ۵- به ۵+، قدرت جریان افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد ریچاردسون، چون عدد گراشف ثابت است، عدد رینولدز کاهش می‌یابد. کاهش عدد رینولدز به معنای کم شدن سرعت حرکت دیواره‌ها می‌باشد و این عامل سبب می‌شود اثرات جابجایی اجباری کم و سازوکار انتقال حرارت به سمت جابجایی طبیعی متمایل شود. این اثر در عدد ریچاردسون ۱۰۰ کاملاً مشهود است. زیرا علاوه بر اینکه از قدرت گردابه‌ها به‌طور چشم‌گیری 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 بیان‌شده تسریع می‌یابد. شکل

۱۲ نشان می‌دهد با اعمال پریودیک میدان مغناطیسی، سرعت جریان درون محفظه افزایش می‌یابد و این عامل نشان از قوی‌تر بودن اثرات جابجایی و افزایش میزان انتقال حرارت دارد. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که کمترین و بیشترین دما داخل محفظه به ترتیب در حالت جذب و تولید حرارت رخ می‌دهد. همچنین در حالت تولید حرارت بیشینه مقدار دما نزدیک دیواره گرم اتفاق می‌افتد. که این نشان می‌دهد انتقال حرارت کمتری از دیواره به سیال رخ می‌دهد.

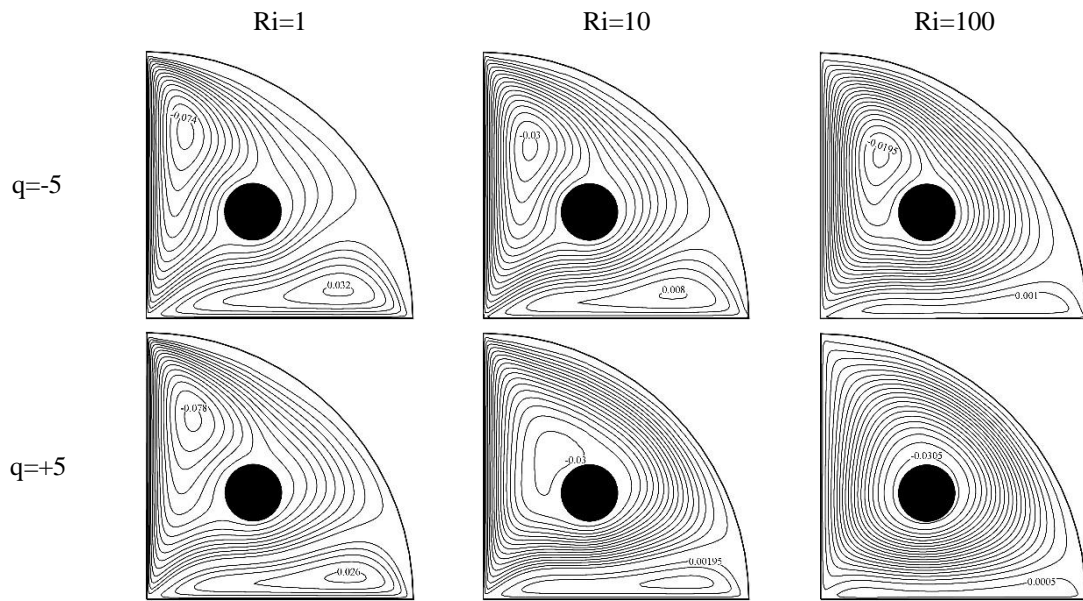
### ۴-۵- اثر پارامترهای مؤثر بر عدد ناسلت متوسط

#### روی دیواره گرم عمودی

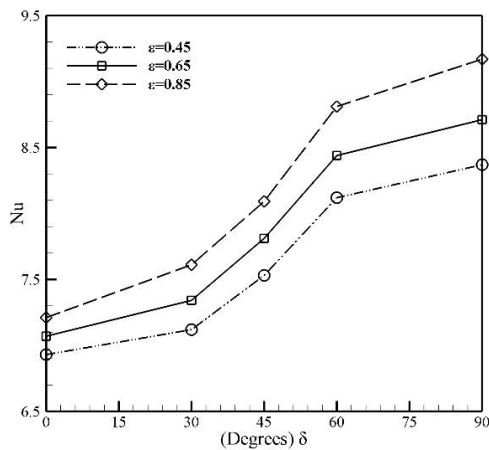
شکل ۱۴ عدد ناسلت متوسط را به ازای مقادیر مختلف زاویه اعمال سرعت و ضریب تخلخل نشان می‌دهد. در تمامی مقادیر ضریب تخلخل دیده می‌شود که افزایش زاویه اعمال سرعت سبب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود. زیرا با توجه به شکل ۶، افزایش  $\delta$  منجر به افزایش اثرات جابجایی و انحنای خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره گرم شده و به تبع آن انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود در یک  $\delta$  خاص، افزایش ضریب تخلخل، منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود. زیرا افزایش ضریب تخلخل سبب سهولت در حرکت سیال داخل محفظه می‌شود و موانع حرکتی در مقابل جریان سیال کاهش می‌یابد و این اثر با افزایش زاویه اعمال سرعت، بیشتر می‌شود. به‌عنوان نمونه افزایش ضریب تخلخل از ۰/۴۵ به ۰/۸۵ سبب افزایش حدود ۱۰ و ۴ درصدی به ترتیب برای  $\delta=90^\circ$  و  $\delta=0$  می‌شود. با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود 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 می‌شود. زیرا در این حالت هدایت حرارتی پدیده غالب است و میدان مغناطیسی تأثیر کمتری خواهد داشت.



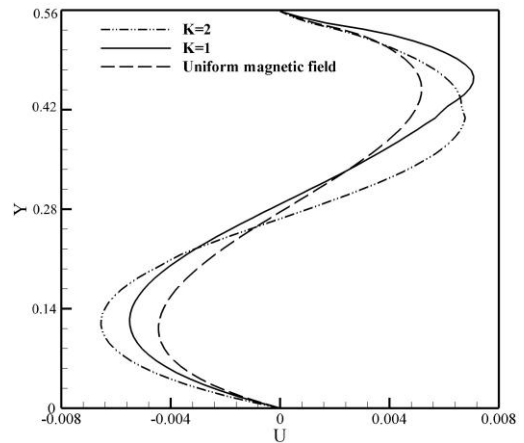
شکل (۱۰): خطوط جریان (ردیف بالا) و خطوط هم‌دما (ردیف پایین) در  $\text{Ha}=50$ ,  $\text{Ri}=1$ ،  $\delta=45^\circ$  و  $\varepsilon=0.65$



شکل (۱۱): خطوط جریان در  $\delta=60^\circ$  و  $Ha=0$  و  $\varepsilon=0.65$

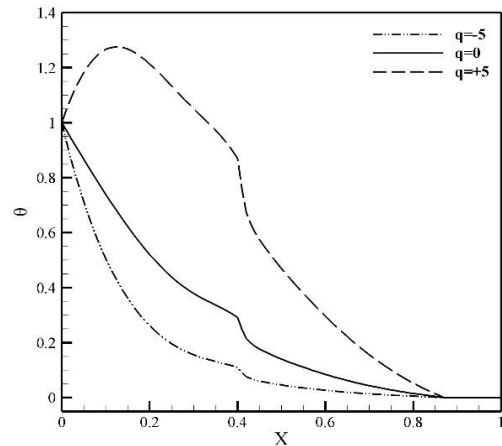


شکل (۱۴): عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی در  $Ha=0$  و  $Ri=1$ ،  $q=0$

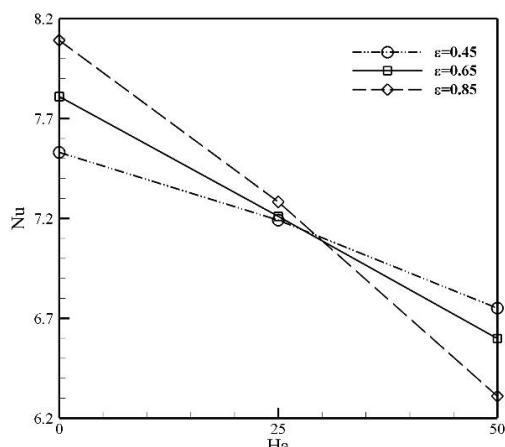


شکل (۱۲): سرعت افقی در  $\delta=90^\circ$  و  $q=-5$  و  $\varepsilon=0.85$ ،  $Ha=25$  و  $Ri=1$

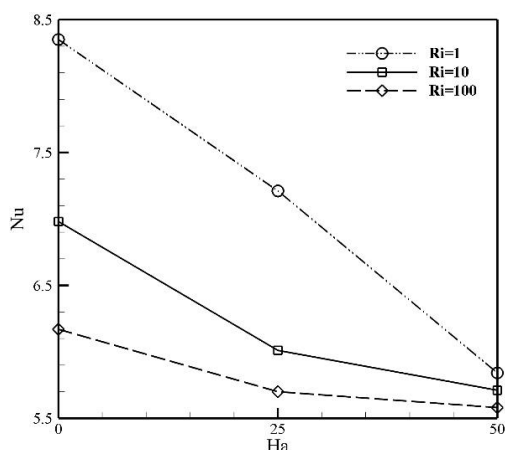
با توجه به شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود که در تمامی مقادیر عدد ریچاردسون، افزایش عدد هارتمن سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌شود. زیرا افزایش قدرت میدان مغناطیسی سبب افزایش نیروی مقاوم لورنتز شده و این عامل سبب کاهش سرعت جریان سیال داخل محفظه می‌شود و منجر به کاهش اثرات جابجایی می‌شود که این کاهش سرعت در نزدیکی دیواره‌ها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



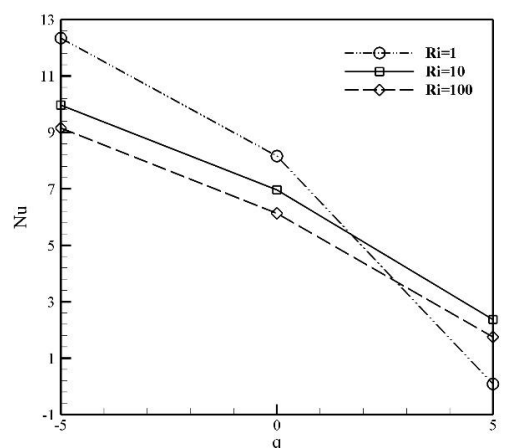
شکل (۱۳): دما در قسمت میانی محفظه در  $Ri=1$ ،  $Ha=50$ ،  $\delta=45^\circ$  و  $\varepsilon=0.65$  و میدان مغناطیسی یکنواخت



شکل (۱۵): عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی در  $q=0$ ,  $Ri=1$ ,  $\delta=45^\circ$  و میدان مغناطیسی یکنواخت



شکل (۱۶): عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی در  $q=0$ ,  $\delta=90^\circ$  و  $\varepsilon=0.85$  و میدان مغناطیسی یکنواخت



شکل (۱۷): عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی در  $Ha=0$ ,  $\delta=60^\circ$  و  $\varepsilon=0.65$

به سمت جابجایی طبیعی متمایل می‌شود. بعلاوه با توجه به شکل، با افزایش عدد ریچاردسون، اثر میدان مغناطیسی کمتر می‌شود. 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 می‌شود. شکل ۱۷ عدد ناسلت متوسط را به ازای مقادیر مختلف عدد ریچاردسون و ضریب جذب/تولید حرارت نشان می‌دهد. دیده می‌شود که 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 می‌شود. لازم به ذکر است که این تأثیر با کاهش عدد ریچاردسون بیشتر می‌شود زیرا در این حالت اثرات جابجایی ناشی از بیشتر بودن سرعت حرکت دیواره‌ها، بیشتر است. شکل ۱۸ اثر نوع اعمال میدان مغناطیسی را بر عدد ناسلت متوسط نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، متوسط نیروی لورنز اعمال شده در جهت عمودی بر جریان سیال، نسبت به حالتی که میدان مغناطیسی یکنواخت اعمال می‌شود، 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  $\kappa=2$  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 می‌شود افزایش هم‌زمان ضریب جذب/تولید حرارت و افزایش عدد هارتمن سبب کاهش بیشتر عدد ناسلت می‌شود. زیرا افزایش هر دو پارامتر موجب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌گردد.

شد و دقت بالایی شبیه‌سازی، صحت اطلاعات به دست آمده را تأیید نمود. خلاصه نتایج به دست آمده 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 می‌شود. این عامل منجر به کاهش قدرت گردابه‌های شکل گرفته درون محفظه و عدد ناسلت متوسط می‌شود.

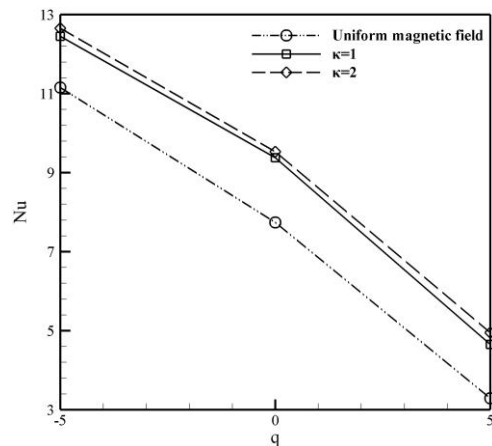
- با ثابت ماندن تمامی پارامترها، افزایش عدد هارتمن به دلیل ایجاد نیروی مقاوم قوی‌تر در برابر حرکت سیال و کاستن از سرعت، منجر به کاهش قدرت گردابه‌ها و انتقال حرارت می‌شود. نکته حائز اهمیت این است که تأثیر ذکر شده، با کاهش عدد ریچاردسون، افزایش می‌یابد.

- 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.

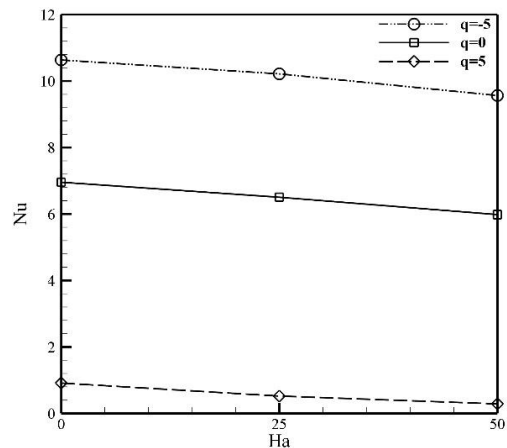
- افزایش زاویه اعمال سرعت و تغییر جهت حرکت دیواره پارامتر تأثیرگذاری بر مشخصات جریان و میزان انتقال حرارت است، به نحوی که افزایش آن عدد ناسلت متوسط بیشتری را نتیجه می‌دهد. بیشترین عدد ناسلت متوسط به ازای زاویه ۹۰ درجه حاصل می‌شود.

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

- اعمال نمودن میدان مغناطیسی به صورت 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.



شکل (۱۸): عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی در  $Ha=25$  و  $\epsilon=0.85$  و  $\delta=90^\circ$ ,  $Ri=1$



شکل (۱۹): عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی در  $Ri=1$  و  $\delta=45^\circ$  و  $\epsilon=0.65$  و  $\kappa=2$

## 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 به صورت افقی بر محفظه اعمال می‌شود. جابجایی ترکیبی به وسیله حرکت دیواره‌های محفظه با سرعت ثابت و تحت زوایای مختلف به وجود می‌آید. 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

## ۷-مراجع

- 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)
11. 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.
  12. 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.
  13. 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.
  14. Hussain, 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.
  15. 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.
  16. 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.
  17. 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.
  18. 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.
  19. 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.
  1. 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.
  2. 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.
  3. Chamkha, A. J., Selimefendigil, F., and Öztop, 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.
  4. 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)
  5. 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.
  6. 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.
  7. 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.
  8. 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.
  9. 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



- 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)
31. 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.
  35. 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.
  37. 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.
  38. 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.
  39. 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.
  20. 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.
  21. S. Mojumder, S., Saha, M., and Ibrahim, T. A., "Numerical Study on Mixed Convection Heat Transfer in a Porous L-Shaped Cavity", *Eng. Sci Technology*, Vol. 20, pp. 272-282, 2017.
  22. 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.
  24. 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-H<sub>2</sub>O Nanofluid via Porous Stretching/Shrinking Convergent/Divergent Channel", *J. Egyptian Mathematical Sci.*, Vol. 28, pp. 1-18, 2020.
  27. 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.
  28. Abbassi, M. A., Mliki, B., Omr, A., and Zeghamati, 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

