

تأثیر اعمال میدان مغناطیسی بر جابجایی آزاد گذرا در یک محفظه دوبعدی با دیواره‌های جانبی دما ثابت

قنبر علی شیخ زاده^۱

استادیار

وحید رحمانی^۲

کارشناس

محمد رضا بابائی^۳

کارشناس

در این تحقیق تأثیر اعمال میدان مغناطیسی ثابت بر جابجایی آزاد گذرا در داخل یک محفظه مربعی حاوی گالیم مذاب بصورت عددی مطالعه شده است. دیواره سمت چپ گرم و دیواره سمت راست سرد بوده و دیواره‌های بالا و پایین عایق حرارتی می‌باشند. تبدیل معادلات دیفرانسیل حاکم به معادلات جبری با روش حجم محدود و تکنیک پیوندی انجام گرفته است. برای بیان گرادیان فشار در معادلات مومنتوم از الگوریتم سیمپلر استفاده شده است. نتایج حاصله بصورت تغییرات نسبت نیروی شناوری به نیروی لورنتز، خطوط دما ثابت و خطوط جریان و همچنین نمودارهای تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبت به زمان ارائه شده است. نتایج نشان داده‌اند که قدرت میدان مغناطیسی تأثیر قابل توجهی بر میدان جریان و انتقال حرارت در تمام زمان‌ها دارد، بطوریکه نسبت نیروی شناوری به لورنتز با افزایش هارتمن به شدت کاهش می‌یابد. مشاهده شده است که عدد ناسلت متوسط در ابتدای فرایند، از یک مقدار بسیار زیاد شروع و با گذشت زمان کاهش یافته تا اینکه در مقدار معینی ثابت می‌شود و با افزایش عدد هارتمن، این مقدار به سمت یک (یعنی هدایت خالص) میل می‌کند.

واژه‌های راهنما: جابجایی آزاد گذرا، هیدرودینامیک مغناطیسی، عدد هارتمن، نیروی لورنتز، عدد ناسلت.

۱- مقدمه

در صنعت تولید مواد و در فرایندهای ریخته‌گری پیوسته، در درون محفظه‌ای که از یک مذاب در حال انجماد پر شده است، بواسطه وجود گرادیانهای دمایی ناشی از اختلاف دمایی بین دیوار جامد و مذاب، پدیده جابجایی آزاد رخ می‌دهد [۱-۳]. در فرایندهای رشد کریستال‌ها گرادیان دمایی ایجاد شده بین دیوار جامد و مذاب سبب ایجاد نیروی شناوری و حرکت سیال در داخل محفظه می‌شود. در خیلی موارد عملی، حرکت ایجاد شده نابسامان، بی‌نظم و یا حتی آشفته می‌باشد. این نوع جریان‌ها می‌توانند باعث ایجاد ناهمگنی میکروسکوپی در محصولات تولیدی شوند بطوریکه بر ساختار محصول نهایی که شامل شمش، شمشه،

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان sheikhz@kashanu.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان rahmanivahid@yahoo.com

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان mrb_6079@yahoo.com

تختالهای فلزی بزرگ و ... می‌باشد تأثیر گذار بوده، و باعث پدیدار شدن یک ساختار غیر همگن و درشت دانه در قطعه ریخته‌گری شده می‌شود. بنابراین در چنین فرایندهایی کاهش قدرت جابجایی مورد توجه می‌باشد.

دو روش به منظور کاهش جابجایی وجود دارد، یکی کاهش نیروی شناوری است که با استفاده از کاهش جاذبه صورت می‌پذیرد (البته این روش به لحاظ هزینه بسیار گران است) و دیگری استفاده از میدان مغناطیسی است که روشی مؤثر برای مذاب‌های هادی جریان الکتریکی می‌باشد. با اعمال یک میدان مغناطیسی بر مذاب درون محفظه می‌توان جریان جابجایی را کاهش داده و یک ساختار ریز دانه و همگن در محصول نهایی بوجود آورد [۴]. مطالعه و درک انتقال حرارت در چنین فرایندهایی به منظور کنترل بهتر و ایجاد کیفیت بیشتر در محصولات ساخته شده، دارای اهمیت فراوان می‌باشد. در این راستا مطالعات فراوانی صورت گرفته است که به برخی از آنها اشاره می‌شود.

آرپر و همکارش اثر میدان مغناطیسی را بر میدان جریان و دما در یک محفظه با دیواره‌های جانبی دما ثابت در حالت گذرا بررسی کرده‌اند [۵]. آنها نشان داده‌اند در این سیستم که به حالت ایده‌آل در زمان رشد کریستال‌ها نزدیک است قدرت میدان مغناطیسی یکی از عوامل مهم در تضعیف انتقال حرارت جابجایی است.

رودرایاه و همکاران تأثیر اعمال میدان مغناطیسی ثابت هم‌جهت با شتاب جاذبه بر جریان جابجایی آزاد گذرا درون یک محفظه مربعی با دیواره‌های جانبی دما ثابت و دیواره‌های افقی عایق حاوی سیالی با عدد پرانتل ۰,۷۳۳ را به طور عددی بررسی نموده‌اند و نشان داده‌اند که با افزایش قدرت میدان مغناطیسی، جریان جابجایی از بین رفته و نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد [۶].

الناجم و همکاران میدان‌های دما و جریان را تحت اعمال یک میدان مغناطیسی در یک محفظه مربعی مایل با دیواره‌های عمودی دما ثابت و دیواره‌های افقی عایق برای سیالی با عدد پرانتل ۰,۷۱ با استفاده از روش حجم کنترل بر اساس قاعده توانی بررسی نموده‌اند [۷]. آنها نشان دادند که اعمال یک میدان مغناطیسی بر جریان‌های جابجایی آزاد و انتقال حرارت، برای زوایای انحراف کوچکتر و اعداد گراشف بالاتر تأثیر بیشتری دارد.

استوک و همکاران یک مطالعه تجربی روی انتقال حرارت جابجایی آزاد با و بدون حضور میدان مغناطیسی در درون محفظه‌ای مستطیل شکل که از گالیم مذاب پر شده است انجام داده‌اند و نشان دادند که حضور میدان مغناطیسی باعث توقف انتقال حرارت می‌شود [۸]. آنها همچنین نشان دادند زمانی که قدرت میدان مغناطیسی بالا و قدرت جابجایی پایین باشد، خطوط جریان در مرکز محفظه کشیده شده و خطوط دما ثابت تقریباً موازی می‌شود که نشان دهنده غالب شدن هدایت حرارتی در مرکز محفظه می‌باشد. مهمت و الیف تأثیر اعمال میدان مغناطیسی بر جریان درون محفظه‌های مربعی و مستطیلی شکل مایل را که دو دیواره جانبی آن گرم و سرد و دو دیواره دیگر عایق بودند را برای سیالی با عدد پرانتل ۱ بطور عددی مطالعه کردند [۹]. آنها نشان دادند که زاویه قرارگیری محفظه نسبت به افق، نسبت ابعاد محفظه، قدرت و جهت اعمال میدان مغناطیسی تأثیرات قابل توجهی را بر میدان جریان و انتقال حرارت می‌گذارند.

تیاما اثر جابجائی آزاد را در یک محفظه‌ی مستطیلی شکل تحت یک میدان مغناطیسی ثابت در حالی که دیواره‌های بالا و پائین عایق و دیواره‌های جانبی در دمای ثابت باشند را بررسی کرده است [۱۰]. تیاما نشان داد که عدد ناسلت متوسط که معیاری برای نرخ انتقال حرارت در داخل محفظه در نظر گرفته می‌شود، با افزایش عدد رایلی افزایش و با افزایش قدرت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد.

پیرمحمدی و همکاران تأثیر اعمال میدان مغناطیسی بر جریان درون محفظه‌های مربعی شکل را که دو دیواره‌ی جانبی آن گرم و سرد و دو دیواره‌ی دیگر عایق بودند را برای سیالی با عدد پرانتل ۰,۷۳۳ بطور عددی مطالعه کردند [۱۱]. آنها نشان دادند که با افزایش قدرت میدان مغناطیسی جابجائی آزاد و عدد ناسلت متوسط در داخل محفظه کاهش می‌یابد.

شیخ زاده و همکاران با استفاده از روشهای عددی، یک محفظه‌ی دو بعدی حاوی سیالی با عدد پرانتل ۰,۷۱ را که بخشی از دیواره‌ی راست محفظه گرم و بخشی از دیواره‌ی چپ آن سرد بود و در معرض یک میدان مغناطیسی ثابت قرار داشت را مدلسازی کرده و میدان دما و انتقال حرارت را مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. آنها نتایج را برای مقادیر مختلف اعداد رایلی، هارتمن و زاویه‌ی قرارگیری محفظه نسبت به افق ارائه نمودند و مشاهده کردند که قدرت میدان مغناطیسی اعمالی یکی از پارامترهای مهم در تضعیف جریان‌های جابجایی آزاد می‌باشد و با اعمال میدان مناسب می‌توان جابجایی آزاد را از بین برد. آنها همچنین دریافتند که قرارگیری محفظه در زاویه‌هایی بزرگتر از زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به افق نیز می‌تواند یک عامل مؤثر در تضعیف جریان جابجایی آزاد باشد.

۲- هیدرودینامیک مغناطیسی

اگر جریان سیال هادی الکتریسیته با سرعت \vec{u} در حضور میدان مغناطیسی \vec{B} رخ دهد، چگالی جریان الکتریکی، \vec{J} ، مطابق با قانون القای فارادی بوجود می‌آید [۴]:

$$\vec{J} = \sigma(-\vec{\nabla} \Phi + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (1)$$

که در آن σ ضریب هدایت الکتریکی محیط رسانا، Φ پتانسیل الکتریکی و $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{b}$ مجموع میدان مغناطیسی اعمالی (\vec{B}_0) و میدان مغناطیسی القایی (\vec{b}) می‌باشد. بواسطه‌ی برهمکنش چگالی جریان الکتریکی با میدان مغناطیسی، نیروی لورنتز بصورت زیر فعال می‌شود:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

نیروی لورنتز بر تمام رساناهای متحرک که در معرض میدان مغناطیسی قرار گرفته‌اند عمل می‌کند. یکی از پارامترهای مهم در هیدرودینامیک مغناطیسی، عدد بدون بعدی به نام رینولدز مغناطیسی می‌باشد که نسبت میدان مغناطیسی القایی به میدان مغناطیسی اعمالی می‌باشد:

$$\text{Re}_m = \mu_0 \sigma u l \quad (3)$$

که در آن، μ_0 ضریب نفوذ پذیری محیط و l طول مشخصه می‌باشد. در رینولدزهای مغناطیسی بزرگ، میدان مغناطیسی القایی بر میدان مغناطیسی اعمالی غلبه خواهد کرد. این حالت در مبحث فیزیک نجومی

که طول مشخصه‌های بزرگ نظیر فواصل بین سیارات و ... مطرح است، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در صنعت تولید مواد بواسطه‌ی اینکه سرعت و طول مشخصه کم می‌باشند رینولدز مغناطیسی کوچک و میدان مغناطیسی اعمالی بر میدان مغناطیسی القایی غلبه می‌کند. در این حالت، میدان مغناطیسی میدان سرعت را بواسطه وجود نیروی لورنتز تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما بدلیل کوچک بودن میدان مغناطیسی القایی میدان سرعت تأثیر چندانی بر میدان مغناطیسی نمی‌گذارد. یکی از موارد کاربرد هیدرودینامیک مغناطیسی در صنعت تولید مواد اعمال میدان مغناطیسی بر مذاب در حال انجماد می‌باشد. تضعیف جریان بواسطه تقابل نیروی لورنتز با نیروی شناوری رخ می‌دهد و در نتیجه آن، انجماد بصورتی انجام خواهد گرفت که ساختار شمش نهایی بهبود خواهد یافت. شکل (۱) یک شمش منجمد شده در مجاورت میدان‌های مغناطیسی متفاوت را نشان می‌دهد که با افزایش میدان مغناطیسی، ساختار شمش بهبود یافته است.

۳- هندسه مسئله و معادلات حاکم

هندسه مسئله مورد نظر به همراه شرایط مرزی در شکل (۲) نشان داده شده است. محفظه دارای دیواره‌های جانبی دما ثابت و دیواره‌های بالایی و پایینی عایق می‌باشد. فرض شده است که تمام دیواره‌ها عایق الکتریکی هستند. محفظه دارای پهنا و ارتفاع L است. همچنین عدد رینولدز مغناطیسی کوچک بوده و میدان مغناطیسی القایی در برابر میدان مغناطیسی اعمالی ناچیز است [۱۴].

معادلات حاکم بر جریان دوبعدی، گذرا و آرام برای محفظه‌ی حاوی سیال هادی الکتریسیته نوشته می‌شود. بمنظور بیان معادلات حاکم، ابتدا باید نیروی لورنتز برحسب متغیرهای جریان و میدان مغناطیسی اعمالی محاسبه شود. با توجه به تعریف رابطه چگالی جریان الکتریکی در رابطه (۱) و قانون بقای بار الکتریکی ($\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$) داریم:

$$\nabla^2 \Phi = \vec{\nabla} \cdot (\vec{u} \times \vec{B}) \quad (4)$$

با توجه به دو بعدی بودن جریان سمت راست معادله فوق صفر می‌باشد و در نتیجه داریم:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (5)$$

از طرفی با توجه به اینکه تمام دیواره‌ها عایق الکتریکی هستند، $\vec{\nabla} \Phi = 0$ تنها جواب معادله خواهد بود. بنابراین چگالی جریان الکتریکی به شکل زیر ساده می‌شود:

$$\vec{J} = \sigma (\vec{u} \times \vec{B}) \quad (6)$$

با توجه به بردار سرعت و بردار میدان مغناطیسی در مسئله مورد نظر نیروی لورنتز برحسب متغیرهای مسئله عبارت است از:

$$\vec{u} = u \hat{e}_x + v \hat{e}_y \quad (7)$$

$$\vec{B} = B_0 \hat{e}_x$$

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} = -\sigma v B^2 \hat{e}_y \quad (8)$$

بنابراین معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی، معادلات مومنوموم در جهت x و y و معادله انرژی بصورت زیر بدست می آیند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (10)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_c) - v \sigma B_0^2 \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

جهت انجام مطالعات پارامتری، مناسبتر است که نتایج بصورت بی بعد بررسی شوند. لذا شکل بدون بعد معادلات با استفاده از متغیرهای بدون بعد استخراج می گرد و اعداد بی بعد مهم مشخص می گردد. متغیرهای بدون بعد بصورت زیر تعریف می شوند:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{Lu}{\alpha}, V = \frac{Lv}{\alpha}, P = \frac{pL^2}{\rho\alpha^2}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \tau = \frac{t}{L^2 / \alpha} \quad (13)$$

که در آن، t ، x و y مختصات با بعد، L پهنای محفظه، u و v سرعت با بعد در راستای محورهای x و y ، α ضریب پخش حرارتی، ρ چگالی جریان، p فشار سیال می باشند. θ دمای بدون بعد و T_h و T_c دمای دیواره های گرم و سرد می باشند. همچنین τ ، X و Y مختصات بدون بعد، U و V سرعت های بدون بعد و P فشار بدون بعد می باشد. شرایط اولیه بدون بعد عبارتند از:

$$\tau = 0 \Rightarrow U = V = 0, \theta = 0 \quad (14)$$

و شرایط مرزی بدون بعد بصورت زیر می باشد:

$$X = 0: U, V = 0, \theta = 1$$

$$X = 1: U, V = 0, \theta = 0 \quad (15)$$

$$Y = 0, 1 \quad U, V = 0, \partial \theta / \partial Y = 0$$

اعداد بدون بعد پرانتل، Pr، هارتمن، Ha، و رایلی، Ra، که در معادلات بی بعد ظاهر می شوند عبارتند از:

$$Pr = \frac{\mu}{\rho\alpha}, Ha = LB_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}, Ra = \frac{\rho g \beta (T_h - T_c) L^3}{\alpha\mu} \quad (16)$$

که در آن، μ ویسکوزیته و β ضریب انبساط حرارتی سیال می‌باشد. عدد بدون بعد هارتمن، Ha ، برابر با نسبت نیروی لورنتز به نیروی لزجت می‌باشد. در حقیقت بزرگی این عدد نشان‌دهنده قدرت میدان مغناطیسی می‌باشد. بدین ترتیب معادلات حاکم با فرض اینکه زاویه‌ی میدان و محفظه‌ی با افق صفر باشد به شکل بدون بعد عبارتند از:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + pr \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (18)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + pr \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Ra Pr \theta + Ha^2 pr V \quad (19)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (20)$$

به منظور مقایسه قدرت جریان از تابع جریان استفاده می‌شود که با انتگرالگیری از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$-\frac{\partial \Psi}{\partial Y} = U \quad (21)$$

همچنین به منظور مقایسه نرخ انتقال حرارت از عدد بدون بعد ناسلت استفاده می‌شود. عدد ناسلت موضعی و متوسط روی دیواره‌ی گرم به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$Nu_y = \frac{hL}{k} = -\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{x=0} \quad (22)$$

$$\overline{Nu} = \int_0^1 Nu_y dY \quad (23)$$

۴- روش عددی

معادلات حاکم به همراه شرایط اولیه و مرزی با استفاده از روش عددی حجم محدود حل شده‌اند. برای جداسازی جملات جابجایی از تکنیک پیوندی در شبکه جابجا شده استفاده و وابستگی میدان سرعت و فشار از طریق الگوریتم سیمپلر برقرار شده‌است. معادلات منفصل شده که کاملاً به هم وابسته می‌باشند از طریق روش ماتریس سه قطری حل شده‌اند. بدین منظور یک کد کامپیوتری به زبان فرترن برگرفته از کد TEACH [۱۶] تهیه شده است [۱۴].

۴-۱- انتخاب شبکه مناسب

برای بدست آوردن نتایج مستقل از شبکه نقاط، نمودار تغییرات دما روی خط میانی محفظه برای چندین شبکه ترسیم و با مقایسه آنها شبکه بهینه انتخاب شده است. به این منظور شبکه‌های 41×41 ، 61×51 ، 71×71 و 81×81 برای عدد رایلی 10^5 و عدد هارتمن ۲۰ مورد بررسی قرار گرفته و در

شکل (۳) تغییرات دما روی خط میانی محفظه، θ_c ، بر حسب X داده شده است. با توجه به این شبکه 61×61 بعنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. افزایش تعداد نقاط بیش از آن تغییر قابل ملاحظه‌ای در نمودار دما مشاهده نمی‌شود.

۴-۲- بررسی عملکرد صحت برنامه کامپیوتری

برای اطمینان از عملکرد صحیح برنامه کامپیوتری و بررسی دقت نتایج بدست آمده، برای یک کار نمونه که نتایج آن در متون منتشر شده موجود است و تا حدی کار حاضر به آن مشابه است، برنامه کامپیوتری اجرا و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته است. مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در حالت دائم برای اعداد گراش 2×10^4 و 2×10^5 و اعداد هارتمن مختلف حاصل از کار حاضر با نتایج مرجع [۶] در جدول (۱) مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد و ماکزیمم اختلاف موجود بین نتایج حاضر و نتایج مرجع [۶]، یک درصد می‌باشد.

۵- بررسی نتایج

پس از اطمینان از صحت عملکرد برنامه کامپیوتری به حل مسئله مورد نظر پرداخته شده است. نتایج حاصل در چند بخش مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. در بخش اول، مقایسه‌ای اجمالی میان نیروی لورنتز و شناوری انجام گرفته است و تغییرات زمانی نسبت نیروی لورنتز و شناوری بررسی شده است. در بخش دوم، نحوه‌ی تشکیل خطوط جریان و دما ثابت در اعداد رایلی و هارتمن مختلف در طی زمان تا رسیدن به حالت دائم، بررسی شده و تاثیرات افزایش قدرت میدان مغناطیسی، بر میدان جریان و انتقال حرارت با بررسی ماکزیمم قدر مطلق تابع جریان و عدد ناسلت متوسط با گذشت زمان نشان داده شده است.

۵-۱- تاثیر افزایش قدرت میدان مغناطیسی بر نسبت نیروی شناوری و لورنتز

در این بخش به بررسی تاثیر افزایش عدد هارتمن بر نسبت نیروی شناوری و لورنتز بر حسب زمان در اعداد رایلی 10^4 تا 10^6 پرداخته شده است. بدین منظور مقدار مجموع قدر مطلق نیروی لورنتز (F_l) و شناوری (F_b) در تمام نقاط به صورت زیر محاسبه شده است.

$$F_l = \sum_{i=1}^{m \times m} |f_l|_i, \quad F_b = \sum_{i=1}^{m \times m} |f_b|_i \quad (24)$$

که در آن m تعداد نقاط شبکه در هر جهت، و f_l و f_b مقادیر نیروی شناوری و لورنتز در نقاط شبکه می‌باشند.

توجه شود که در حالتی که هیچ میدان مغناطیسی‌ای اعمال نشده است، یعنی در هارتمن صفر، نیروی لورنتز در سراسر میدان حل برابر صفر است و نیروی شناوری در قویترین حالت خود می‌باشد.

مقادیر نسبت این نیروها در اعداد هارتمن ۱ و ۱۰۰، برای عدد رایلی 10^4 و اعداد هارتمن ۱ و ۱۶۰، در سایر اعداد رایلی، در طی گذشت زمان بررسی شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد نسبت نیروی

شناوری به لورنتز از مقدار اولیه‌ی صفر بدلیل ایجاد گرادیان دما در کنار دیواره‌ی گرم شروع به افزایش می‌کند. با گذشت زمان، همانطور که در بخش بعدی مشاهده خواهد شد حرارت در سراسر محفظه نفوذ پیدا خواهد کرد و گرادیان دما در کناره‌ی دیواره‌ی گرم تعدیل شده و نسبت نیروها به مقدار ثابتی میل خواهد کرد.

مطابق با شکل (۴) در $Ra = 10^4$ مشاهده می‌شود که در عدد هارتمن ۱ بدلیل قدرت زیاد جابجائی و قدرت بسیار کم میدان مغناطیسی مقدار نسبت نیروی شناوری به لورنتز با گذشت زمان تا حدود $\tau = 0.6$ ثابت می‌شود این در حالی که با افزایش عدد هارتمن تا ۱۰۰ به دلیل کاهش جابجائی و کاهش سرعت ذرات سیال در داخل محفظه نسبت این نیروها در حدود $\tau = 0.2$ ثابت می‌شود و نسبت نیروی شناوری به لورنتز در حدود سی و پنج هزار برابر نسبت به عدد هارتمن ۱ کوچک‌تر می‌شود.

افزایش عدد رایلی که بیانگر افزایش قدرت جابجائی در داخل محفظه است انتظار می‌رود که نسبت نیروی شناوری به لورنتز افزایش یابد. این افزایش بخوبی در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. در عدد رایلی 10^5 مطابق با شکل (۵) مشاهده می‌گردد که با افزایش عدد هارتمن از مقدار ۱ تا 160 نیروی شناوری که در ابتدا بیش از چهل هزار برابر بزرگ‌تر از نیروی لورنتز است بیش از یکصدو سی هزار برابر کاهش پیدا کرده و به حدود ۳ برابر می‌رسد.

در شکل (۶) نیز تغییرات زمانی نسبت نیروی شناوری به لورنتز در اعداد هارتمن ۱ و 160 و عدد رایلی 10^6 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش قدرت میدان از ۱ تا 160 نسبت نیروی شناوری به لورنتز بیست هزار برابر کوچک می‌شود.

۵-۲- تأثیر افزایش قدرت میدان مغناطیسی بر میدان جریان و انتقال حرارت

در این بخش به بررسی تأثیر افزایش قدرت میدان مغناطیسی بر خطوط جریان و دما ثابت در اعداد هارتمن 10^4 و 10^5 و برای عدد رایلی 10^4 و اعداد هارتمن 50 و 160 برای اعداد رایلی 10^5 و 10^6 پرداخته می‌شود.

۵-۲-۱- خطوط جریان

خطوط جریان در عدد رایلی 10^4 و اعداد هارتمن مختلف در زمانهای مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در عدد رایلی 10^4 و تمامی اعداد هارتمن در لحظه‌ی ابتدائی خطوط جریان در کنار دیواره‌ی گرم تشکیل و با گذشت زمان در سراسر محفظه گسترش می‌یابد.

در عدد هارتمن صفر، خطوط جریان با تراکم بالا بواسطه‌ی گرادیان شدید ایجاد شده در لحظه‌ی ابتدائی در کنار دیواره‌ی گرم تشکیل شده و با گذشت زمان بتدریج سراسر محفظه را در بر می‌گیرند. بطوری که پس از رسیدن به شرایط دائم ($\tau = 0.5$)، خطوط جریان بصورت دوایر متحدالمرکز سراسر محفظه را می‌پوشانند. همچنین در زیر شکل‌ها مقادیر ماکزیمم قدر مطلق تابع جریان ذکر شده است. مشاهده می‌شود که $\|v\|_{\max}$ از مقدار کم 0.006 در زمان $\tau = 0.002$ به مقدار 2.21 در حالت دائم افزایش می‌یابد.

در سایر اعداد هارتمن نیز روندی شبیه آنچه که در مورد عدد هارتمن صفر مشاهده گردید دیده می‌شود با این تفاوت که با افزایش عدد هارتمن در تمامی زمان‌ها ماکزیمم قدر مطلق تابع جریان کاهش یافته و گردابه‌ها شکل محفظه را بخود می‌گیرند.

شکل (۸-الف) تغییرات مؤلفه عمودی سرعت، V_c ، بر حسب X را روی خط میانی محفظه ($Y=0.5$) و شکل (۸-ب) تغییرات مؤلفه افقی سرعت، U_c ، بر حسب Y را روی خط میانی محفظه ($X=0.5$) برای عدد رایلی 10^4 و اعداد هارتمن مختلف نشان می‌دهد.

نکته‌ای که با مشاهده پروفیل‌های سرعت در شکل (۸) می‌توان به آن اشاره کرد این است که هرچه عدد هارتمن افزایش می‌یابد، قلّه سرعت که در نزدیکی دیواره وجود دارد کوتاه‌تر می‌شود که نشان از کاهش سرعت‌ها با افزایش عدد رایلی دارد.

با افزایش عدد رایلی به مقدار 10^5 همانطور که از شکل (۹) کاملاً مشخص است، در تمامی اعداد هارتمن مقدار ماکزیمم قدر مطلق تابع جریان افزایش پیدا می‌کند. بطوریکه در عدد هارتمن صفر و در عدد رایلی 10^5 ، در لحظه‌ی دائم، در حدود سه برابر $|v_{max}|$ در عدد رایلی 10^4 است. در این عدد رایلی نیز با گذشت زمان خطوط جریان که در ابتدا بدلیل گرادیان دمای ایجاد شده در کنار دیوار گرم تشکیل شده بودند بتدریج سراسر محفظه را در بر می‌گیرند. همچنین مطابق با شکل با افزایش عدد هارتمن جابجائی در داخل محفظه تضعیف می‌گردد بطوریکه خطوط جریان در سراسر محفظه تقریباً هم مرتبه شده و خطوط شکل محفظه را به خود می‌گیرند.

تغییرات خطوط جریان در عدد رایلی 10^6 نیز در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مطابق با شکل به دلیل قدرت بسیار زیاد جابجائی در این عدد رایلی خطوط جریان در کنار دیوار گرم تراکم بالائی دارند. با افزایش عدد هارتمن مشاهده می‌گردد که این خطوط به سمت مرکز محفظه کشیده شده بطوریکه در عدد هارتمن ۱۶۰ تقریباً محفظه را می‌پوشانند. همچنین مقدار $|v_{max}|$ با افزایش عدد هارتمن کاهش یافته بطوریکه در شرایط دائم این مقدار حدود ۶ برابر کاهش یافته است.

۵-۲-۲- خطوط دما ثابت

تغییرات خطوط دما ثابت نیز در عدد رایلی 10^4 و اعداد هارتمن مختلف در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق با شکل مشاهده می‌گردد که خطوط دما ثابت که در زمان‌های ابتدائی بواسطه‌ی گرادیان دمای ایجاد شده در کناره‌ی دیواره‌ی گرم تشکیل شده بودند با گذشت زمان در محفظه نفوذ پیدا کرده و به سمت دیوار سرد پیش می‌روند. مطابق با شکل در عدد هارتمن صفر، تشکیل خطوط دما ثابت در کنار دیوار گرم و موازی آن، نشان دهنده‌ی هدایت خالص می‌باشد که با گذشت زمان تا $\tau=0.064$ نفوذ حرارت تحت تاثیر جابجائی به داخل محفظه صورت گرفته است. با گذشت بیشتر زمان جابجائی سراسر محفظه را در بر گرفته و انحراف خطوط بیشتر می‌شود. با افزایش عدد هارتمن نقش جابجائی در محفظه کم‌رنگ می‌شود بطوریکه در عدد هارتمن ۱۰۰ خطوط در تمامی زمان‌ها موازی دیوار گرم بوده و نشان دهنده‌ی هدایت خالص در محفظه می‌باشند.

خطوط دما ثابت نیز در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد در تمامی اعداد هارتمن خطوط از کنار دیوار گرم شروع به حرکت کرده و با گذشت زمان به سمت دیوار سرد پیش می‌رود. مطابق با شکل به دلیل قدرت بیشتر جابجائی در عدد رایلی 10^5 جابجائی تاثیر خود را زودتر ($\tau = 0,016$) نسبت به عدد رایلی 10^4 نشان می‌دهد. همچنین همانطور که مشاهده شده است پس از رسیدن به شرایط دائم ($\tau = 0,5$) در مرکز محفظه بدلیل قدرت جابجائی لایه بندی حرارتی ایجاد شده است. با افزایش عدد هارتمن تاثیر جابجائی در خطوط دما ثابت دیرتر اتفاق افتاده و لایه بندی حرارتی ایجاد شده در مرکز محفظه از بین می‌رود اما همانطور که مشاهده می‌شود در این عدد رایلی بدلیل قدرت نیروی شناوری تا عدد هارتمن ۱۶۰ نیز خطوط دما ثابت کاملاً موازی دیواره‌های کناری نشده‌اند. تغییرات خطوط دما ثابت با زمان در عدد رایلی 10^6 نیز در اعداد هارتمن مختلف در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

مطابق با شکل به دلیل قدرت بیشتر جابجائی در عدد رایلی 10^6 جابجائی تاثیر خود را خیلی زود در زمان، $\tau = 0,008$ نسبت به سایر اعداد رایلی 10^4 نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود بدلیل قدرت زیاد جابجائی در زمان‌های بیشتر از $\tau = 0,032$ لایه بندی حرارتی در بالای محفظه تشکیل شده و با گذشت زمان در محفظه پیش می‌رود. با افزایش عدد هارتمن تاثیر جابجائی در خطوط جریان دیرتر اتفاق افتاده و لایه بندی حرارتی ایجاد شده در مرکز محفظه از بین می‌رود اما همانطور که مشاهده شده است در این عدد رایلی بدلیل قدرت نیروی شناوری تا عدد هارتمن ۱۶۰ هنوز ترکیبی از انتقال حرارت به شیوه‌ی هدایت و جابجائی در محفظه برقرار است و جابجائی هنوز کاملاً تضعیف نشده است.

۵-۲-۳- عدد ناسلت متوسط

تغییرات عدد ناسلت متوسط در اعداد هارتمن و رایلی مختلف در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در $Ra = 10^4$ و در زمان‌های ابتدائی بواسطه‌ی گرادیان دمای زیاد ایجاد شده در کنار دیوار گرم مقدار عدد ناسلت بسیار زیاد است که این مقدار پس از نفوذ حرارت در طی زمان، به داخل محفظه کاهش پیدا کرده و به مقدار ثابتی میل می‌کند. مطابق با شکل با افزایش عدد هارتمن عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد.

در عدد رایلی 10^5 مطابق با شکل همانند عدد رایلی 10^4 عدد ناسلت از مقدار زیاد اولیه با گذشت زمان کاهش یافته و به عدد ثابتی میل می‌کند و با افزایش عدد هارتمن عدد ناسلت به مقدار کمتری در تمامی زمان‌ها میل می‌کند.

همچنین در عدد رایلی 10^6 مطابق با شکل همانند سایر اعداد رایلی عدد ناسلت از مقدار زیاد اولیه در طی زمان شروع به کاهش کرده و به عدد ثابتی میل می‌کنند و با افزایش عدد هارتمن مقادیر عدد ناسلت به مقدار کمتری در تمامی زمان‌ها میل می‌کند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر اعمال یک میدان مغناطیسی ثابت بر جریان جابجایی آزاد و میدان دما در حالت گذرا و آرام درون یک محفظه دو بعدی حاوی فلز گالیم مذاب با عدد پرانتل 0.02 برای محفظه‌ای با دیواره‌های جانبی دما پرداخته شد. با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده شد که:

۱. در تمامی اعداد رایلی در زمان‌های ابتدائی و عدد هارتمن صفر خطوط جریان بصورت گردابه در کنار دیواره‌ی گرم تشکیل می‌شوند. مرکز این گردابه‌ها با گذشت زمان به سمت مرکز محفظه حرکت می‌کند و با افزایش عدد هارتمن شکل محفظه را به خود می‌گیرند.
۲. خطوط دما ثابت در تمامی اعداد رایلی در زمان‌های ابتدائی نشان دهنده‌ی انتقال حرارت به شیوه‌ی هدایت در مجاورت دیوار گرم می‌باشند. با گذشت زمان این خطوط در سراسر محفظه نفوذ پیدا کرده و تحت تاثیر جابجائی منحرف می‌شوند.
۳. در تمامی اعداد رایلی نسبت نیروی شناوری به لورنتز در ابتدای فرایند از مقدار صفر شروع و به سرعت افزایش می‌یابد (بدلیل گرادیان دمای شدید ایجاد شده در مجاورت دیواره‌ی گرم) و پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم خود، کاهش یافته و در مقدار مشخصی ثابت می‌شوند (بدلیل نفوذ حرارت در سراسر محفظه و کاهش گرادیان دما در کنار دیوار گرم).
۴. در اعداد رایلی مختلف با اعمال یک میدان مغناطیسی مناسب می‌توان جابجائی آزاد، که در شروع فرایند در داخل محفظه ایجاد شده است را تا حد قابل توجهی تضعیف نمود.
۵. عدد ناسلت متوسط در ابتدای فرایند در تمامی اعداد رایلی و هارتمن، از یک مقدار بسیار زیاد شروع می‌شود و در طی گذشت زمان کاهش یافته تا اینکه در مقدار معینی ثابت می‌شود. مشاهده شده است که در تمامی زمان‌ها با افزایش عدد هارتمن عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد.
۶. با افزایش عدد هارتمن، بخاطر تقابل نیروی لورنتز با نیروی شناوری، در تمامی زمان‌ها از مقادیر سرعت درون محفظه کاسته شده و در نتیجه ماکزیمم قدر مطلق تابع جریان کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد هارتمن، جابجایی آزاد تضعیف شده و نرخ انتقال حرارت کلی بین دیواره‌های گرم و سرد کاهش یافته و مکانیزم انتقال حرارت به سمت هدایت خالص ($\overline{Nu} = 1$) پیش می‌رود.

مراجع

- [1] Basak, T., Roy, S., and Balakrishnan, A.R., "Effects of Thermal Boundary Conditions on Natural Convection Flows within a Square Cavity", *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 4525-4535, (2006).
- [2] Nithyadevi, N., Kandaswamy, P., and Sivasankaran, S., "Natural Convection in a Square Cavity with Partially Active Vertical Walls: Time-periodic Boundary Condition", *Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 23425. pp. 1-16, (2006).
- [3] Hong Deng, Q., "Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics of Natural Convection in Square Cavities Due to Discrete Source-sink Pairs", *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 5949-5957, (2008).

- [4] Davidson, P.A., "An Introduction to Magnetohydrodynamic", Cambridge University Press, London, pp.3-24, (2001).
- [5] Oreper, G. M., and Szekely, J., "The Effect of an Externally Imposed Magnetic Field on Bouyancy Driven Flow in a Rectangular Cavity", Journal of Crystal Growth, Vol. 64, pp. 505-15, (1983).
- [6] Rudraiah, N., Barron, R.M., Venkatachalappa, M., and Subbaraya, C.K., "Effect of a Magnetic Field on Free Convection in a Rectangular Enclosure", Int. J. Engng Sci., Vol. 33, No. 8, pp. 1075-84, (1995).
- [7] Al-Najem, N.M., Khanafer, K.M., and El-Refae, M.M., "Numerical Study of Laminar Natural Convection in Tilted Enclosure with Transverse Magnetic Field", Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow, Vol. 8, pp. 651-672, (1998).
- [8] Xu, B., Li, B.Q., Stock, D.E., and Nithyadevi, N., "An Experimental Study of Thermally Induced Convection of Molten Gallium in Magnetic Fields", Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 2009-2019, (2006).
- [9] Mehmet, C.E., and Elif, B., "Natural Convection Flow under a Magnetic Field in an Inclined Square Enclosure Differentially Heated on Adjacent Walls", Meccanica, Vol. 42, pp. 435-449, (2007).
- [10] Teamah, M.A., "Numerical Simulation of Double Diffusive Natural Convection in Rectangular Enclosure in the Presences of Magnetic Field and Heat Source", Journal of Thermal Sciences, Vol. 47, pp. 237-248, (2008).
- [11] Pirmohamadi, M., Gasemi, M., and Sheikhzadeh, G.A., "Effect of a Magnetic Field on Buoyancy-driven Convection in Differentially Heated Square Cavity", IEEE Transactions on Magnetic, Vol. 45, No. 1, pp. 407-411 (2009).
- [۱۲] شیخ زاده، ق.ع.، بابائی، م. ر.، رحمانی، و. و پیرمحمدی، م.، "بررسی تأثیر اعمال میدان مغناطیسی بر میدان دما و انتقال حرارت در یک محفظه دوعدی"، مقاله نامه کنفرانس سالانه فیزیک ایران، دانشگاه کاشان، ص ۱۲۵-۱۲۲، (۱۳۸۷).
- [13] Gao, Y.L., LiGong, Q.S., and Zhai, Q.J., "Comparative Study on Structural Transformation of Low-melting Pure Al and High-melting Stainless Steel under External Pulsed Magnetic Field", Materials Letters, Vol. 61, pp. 4011-4014, (2007).
- [۱۴] رحمانی، و.، "بررسی عددی تأثیر اعمال یک میدان مغناطیسی بر جریان جابجایی آزاد و انتقال حرارت در یک حفره دو بعدی در حالت گذرا"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، (۱۳۸۷).
- [15] Bejan, A., "Convection Heat Transfer", Wiley Publisher, New York, (1984).

[16] Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, New York, (1980).

فهرست نمادهای انگلیسی

B_0	: میدان مغناطیسی اعمالی
b	: میدان مغناطیسی القایی
F	: نیروی لورنتز
F_l	: مجموع قدرمطلق نیروی لورنتز
F_b	: مجموع قدرمطلق نیروی شناوری
g	: شتاب ثقل
Gr	: عدد گرافف
H	: ارتفاع محفظه
H	: تابع گرمای بدون بعد
Ha	: عدد هارتمن
h	: ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی
J	: چگالی جریان الکتریکی
k	: ضریب انتقال حرارت هدایتی
L	: پهنای محفظه
ℓ	: طول مشخصه
Nu_y	: عدد ناسلت موضعی بر روی دیواره گرم
\overline{Nu}	: عدد ناسلت متوسط
Pr	: عدد پرانتل
p	: فشار
P	: فشار بی بعد
Re_m	: عدد رینولدز مغناطیسی
Ra	: عدد رایلی
t	: زمان
T_h	: دمای دیواره گرم
T_c	: دمای دیواره سرد

- u, v : مؤلفه سرعت در جهت x و y
 U, V : مؤلفه سرعت بی بعد در جهت X و Y
 U_c, V_c : مؤلفه سرعت بی بعد در جهت X و Y روی خط میانی محفظه
 x, y : مختصات با بعد
 X, Y : مختصات بی بعد

نمادهای یونانی

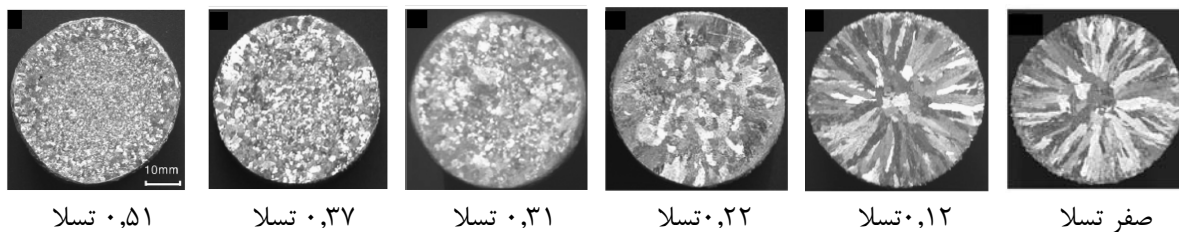
- α : ضریب پخش حرارتی
 β : ضریب انبساط حرارتی حجمی سیال
 θ : دمای بی بعد
 μ : لزجت دینامیکی
 μ_0 : ضریب نفوذ پذیری فضای آزاد
 ρ : دانسیته
 σ : ضریب هدایت الکتریکی سیال
 τ : دمای بدون بعد
 Φ : پتانسیل الکتریکی
 ψ : تابع جریان
 ∇ : اپراتور دل
 ∇^2 : اپراتور لاپلاسیان

جدولها

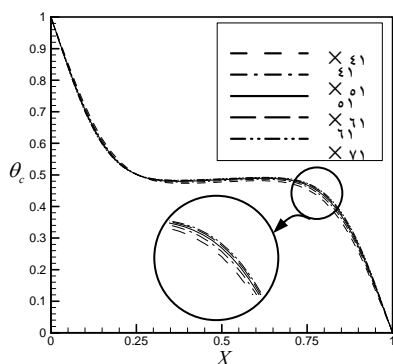
جدول ۱- مقادیر ناسلت متوسط بر روی دیواره گرم، مقایسه بین نتایج حاضر و نتایج مرجع [۶].

Gr	Ha	\overline{Nu}		
		نتایج مرجع [۶]	نتایج حاضر	درصد اختلاف
2×10^4	۰	۲,۵۱۸۸	۲,۵۰۳	۰,۶۲۷۲
	۱۰	۲,۲۲۳۴	۲,۲۱۳	۰,۴۶۷۷
	۵۰	۱,۰۸۵۶	۱,۰۸۳	۰,۲۳۹۴
	۱۰۰	۱,۰۱۱۰	۱,۰۰۹	۰,۱۹۷۸
2×10^5	۰	۴,۹۱۹۸	۴,۹۴۹	۰,۵۹۳۵
	۱۰	۴,۸۰۵۳	۴,۷۶۱	۰,۹۲۱۸
	۱۰۰	۱,۴۳۱۷	۱,۴۴۷	۱,۰۶۸۶

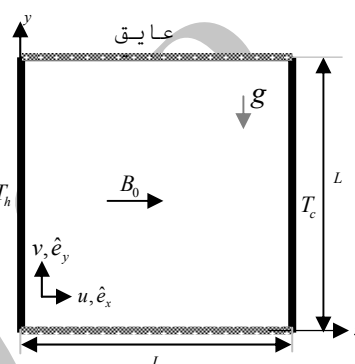
شکلها



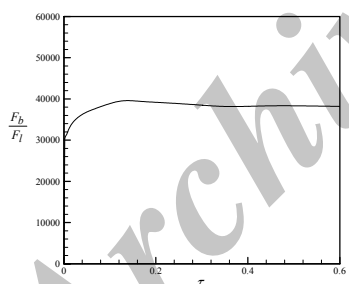
شکل ۱- اصلاح ساختار شمش منجمد شده با افزایش میدان مغناطیسی [۱۳]



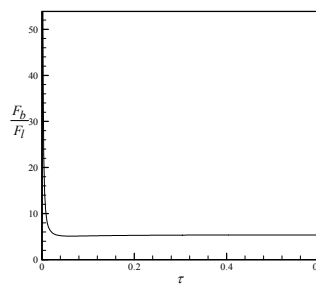
شکل ۳- تغییرات دما بر حسب X روی خط میانی محفظه



شکل ۲- هندسه محفظه مورد نظر و شرایط مرزی

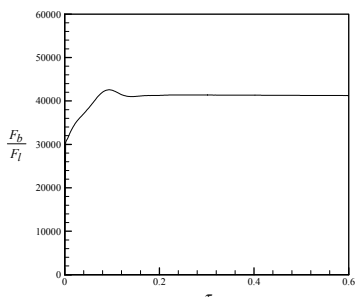


Ha=1

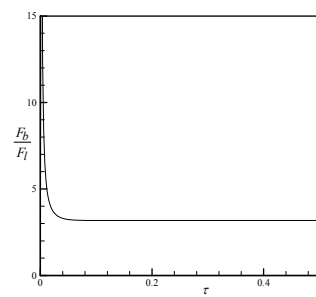


Ha=100

شکل ۴- تغییرات زمانی نسبت نیروی شناوری به لورنتز در عدد رایلی ۱۰^۴ و اعداد هارتمن ۱ و ۱۰۰

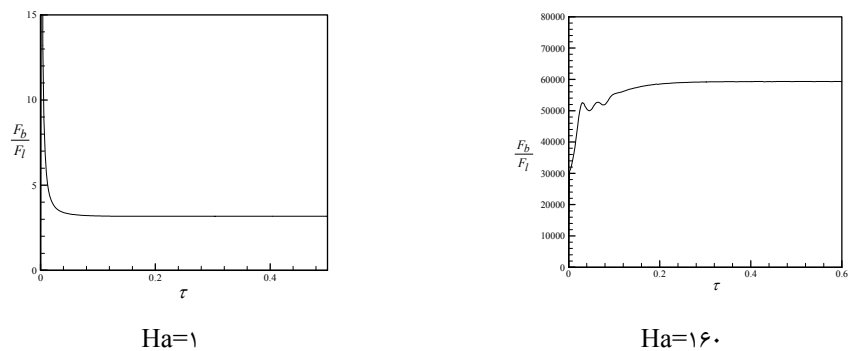


Ha=1

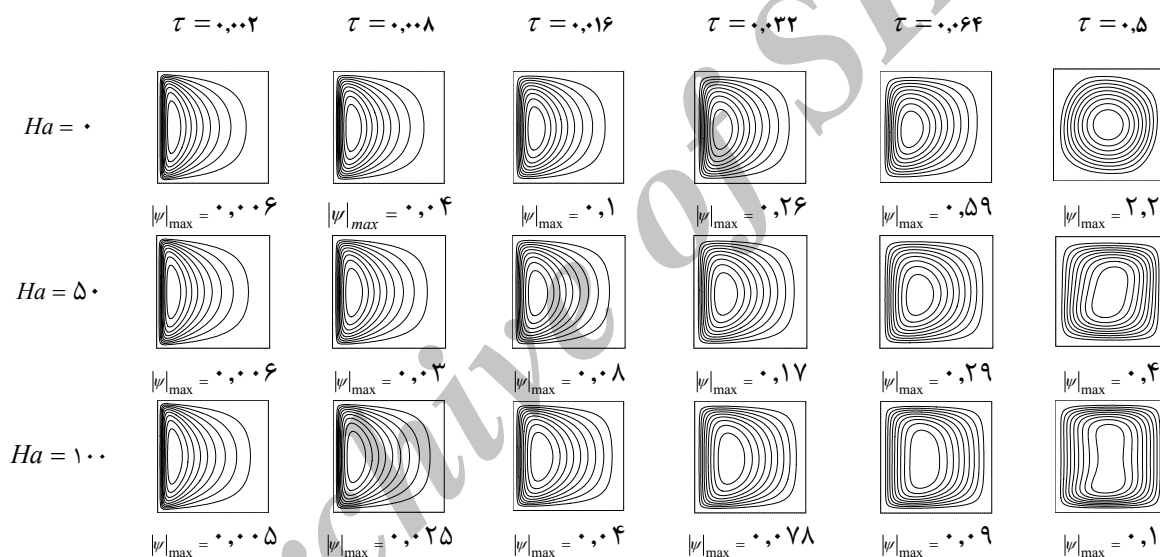


Ha=160

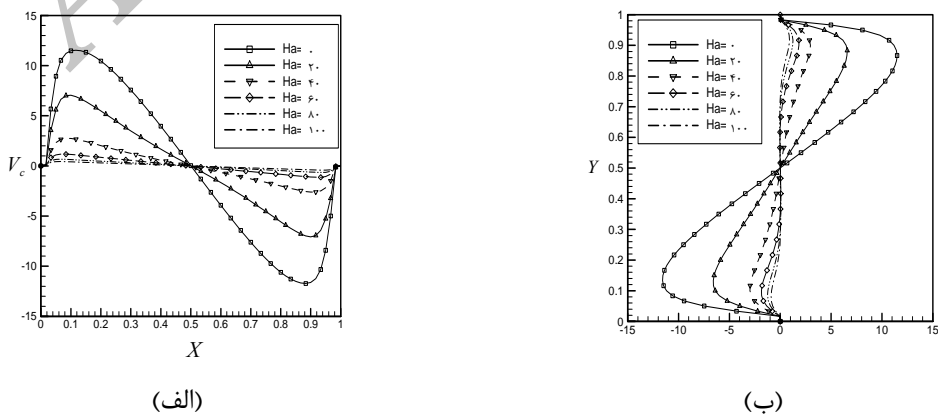
شکل ۵- تغییرات زمانی نسبت نیروی شناوری به لورنتز در عدد رایلی ۱۰^۵ و اعداد هارتمن ۱ و ۱۶۰



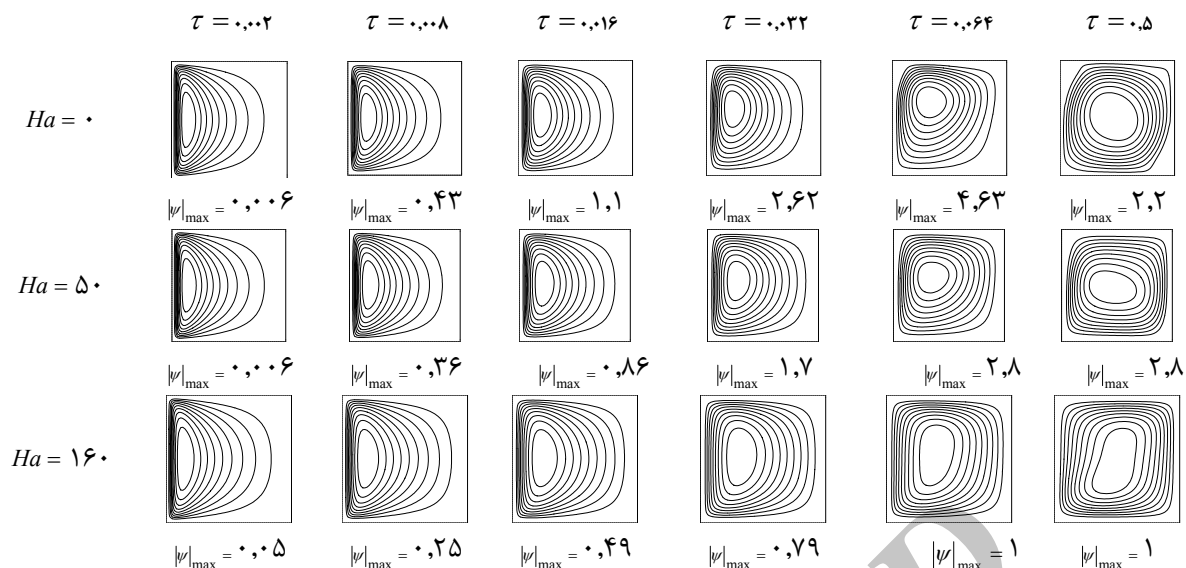
شکل ۶- تغییرات زمانی نسبت نیروی شناوری به لورنتز در عدد رایلی 10^6 و اعداد هارتمن 1 و 160



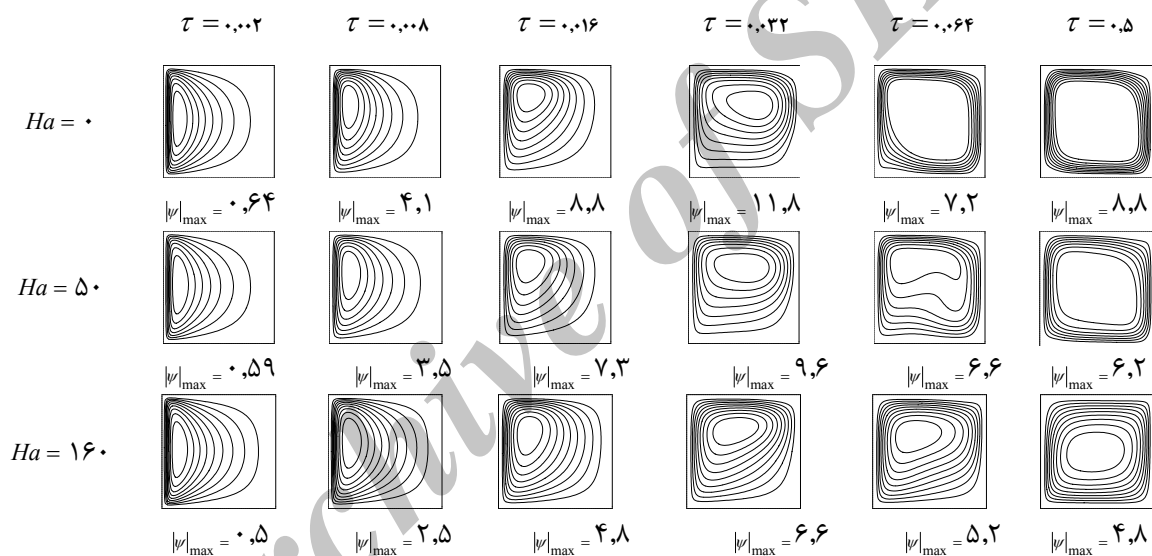
شکل ۷- تغییرات زمانی خطوط جریان در اعداد هارتمن مختلف و $10^4 Ra =$



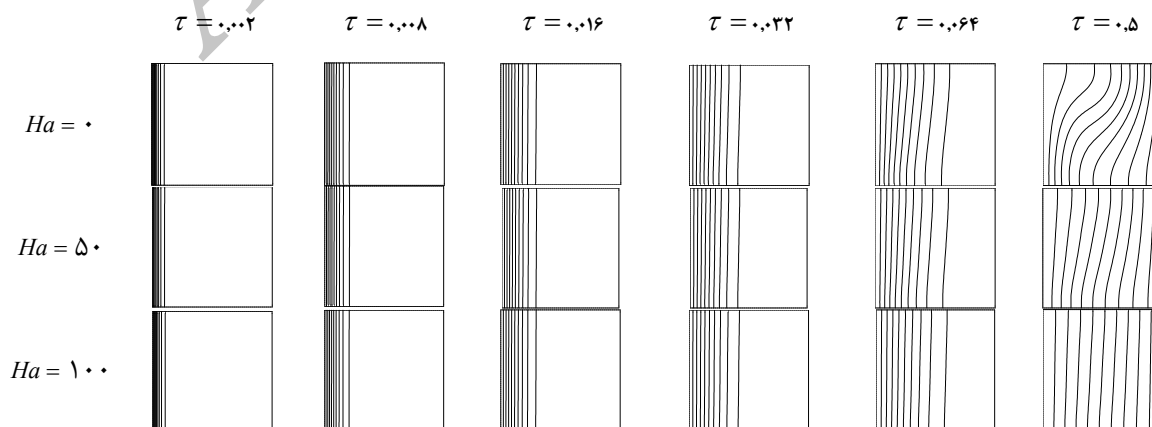
شکل ۸- (الف) تغییرات پروفیل مؤلفه عمودی سرعت (ب) تغییرات پروفیل مؤلفه افقی سرعت برای عدد رایلی 10^4



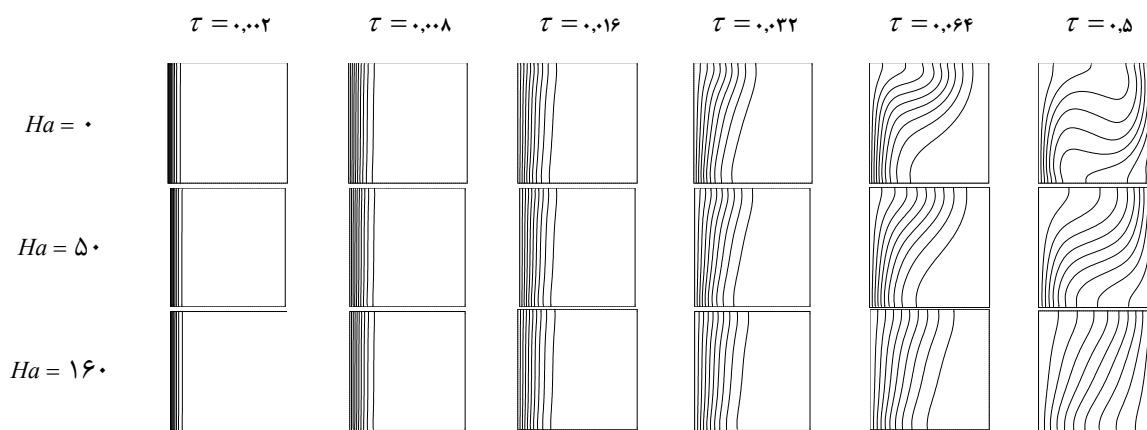
شکل ۹- تغییرات زمانی خطوط جریان در اعداد هارتمن مختلف و $Ra = 10^5$



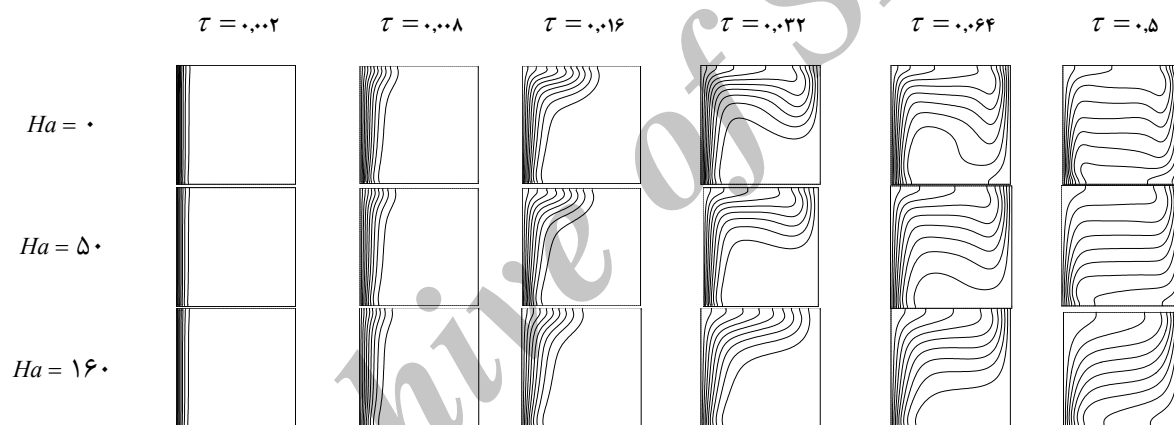
شکل ۱۰- تغییرات زمانی خطوط جریان در اعداد هارتمن مختلف و $Ra = 10^6$



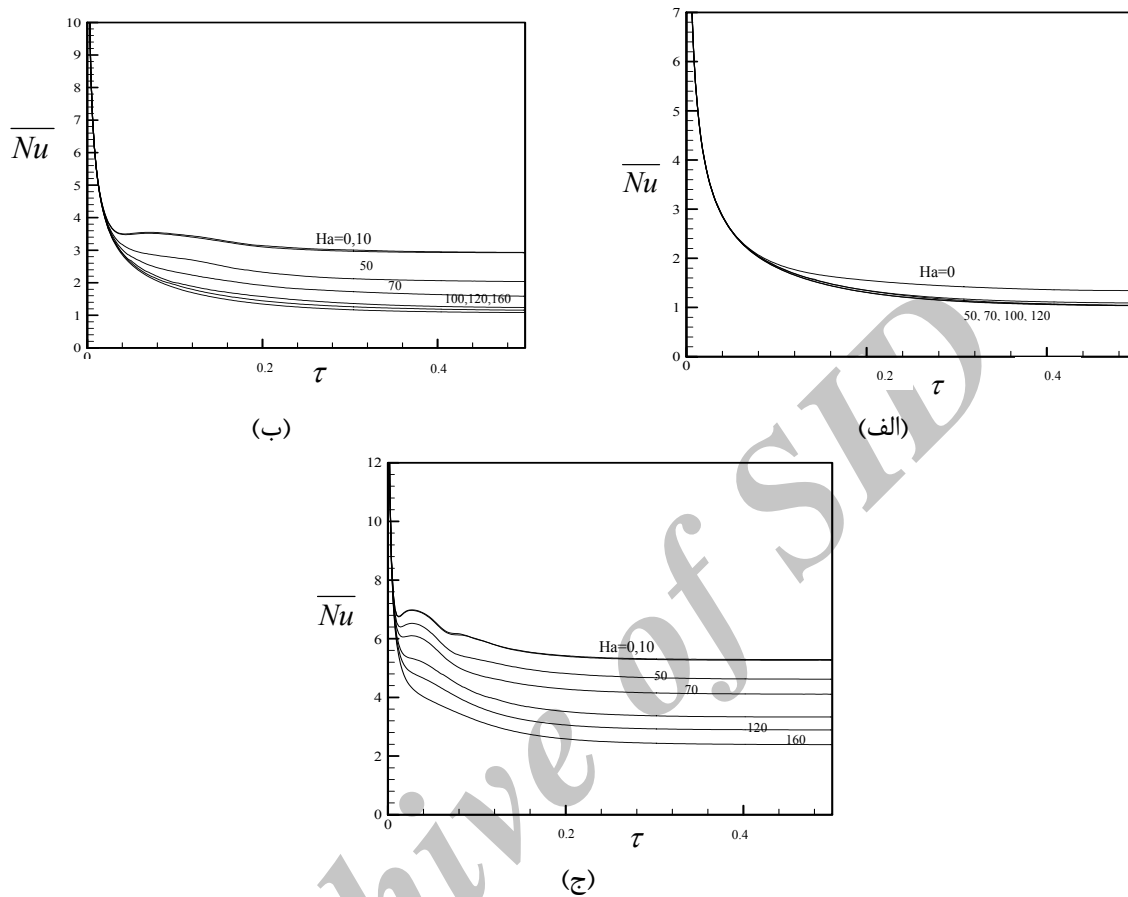
شکل ۱۱- تغییرات زمانی خطوط جریان در اعداد هارتمن مختلف و $Ra = 10^4$



شکل ۱۲- تغییرات زمانی خطوط دما ثابت در اعداد هارتمن مختلف و $Ra = 10^5$



شکل ۱۳- تغییرات زمانی خطوط دما ثابت در اعداد هارتمن مختلف و $Ra = 10^6$



شکل ۱۴- تغییرات زمانی عدد ناسلت متوسط در اعداد هارتمن و رایلی مختلف

Abstract

In this paper, the effect of an imposed magnetic field on unsteady natural convection in a cavity containing liquid gallium is numerically studied. The left side wall is hot and the right side wall is cold and the top and bottom walls are adiabatic. The governing equations are discretized using the control volume method and the hybrid scheme. The SIMPLER algorithm is used to indicate the pressure gradient in the momentum equations. The results are displayed in the form of the ratio of Buoyancy force to Lorentz force, streamlines and isotherms, and variations of Nusselt number in terms of time. The result showed the strength of the magnetic field has a significant effect on the flow and temperature fields in all times, as the ratio of buoyancy force to Lorentz force decreases with increasing Ha . It is observed that average Nusselt number have a high value at the start of process and decreases with the time and approaches to a constant value; and with increasing Ha , average Nusselt number approaches to unity (i.e. pure conduction)

Archive of SID