



مطالعه عددی تأثیر میدان‌های مغناطیسی غیر یکنواخت در انتقال حرارت و پیشروی جبهه انجماد و ذوب در یک محفظه بسته

موسی محمدپور فرد^{۱*}، مرتضی رستمی دیپاور^۲

^۱دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳ فروردین ۱۳۹۶

بازنگری: ۵ مرداد ۱۳۹۶

پذیرش: ۱۵ شهریور ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۲۰ شهریور ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

پیشروی ذوب و انجماد

مدل تک‌فازی همگن

روش آنتالپی-تخلخل

میدان مغناطیسی غیر یکنواخت

چکیده: اخیراً سیستم‌های جدید ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند، زیرا این مواد در هنگام تغییر فاز، می‌توانند انرژی را در دمای ثابت جذب و آزاد کنند. با توجه به این ویژگی، آنها به طور گسترده‌ای در سیستم‌های انرژی استفاده می‌شود. در این مطالعه، تأثیر اعمال میدان مغناطیسی غیر یکنواخت با گرادیان‌های مثبت و منفی بر روی انتقال حرارت و پیشروی جبهه انجماد و ذوب نانوسیال مغناطیس‌شونده فاقد هدایت الکتریکی بعنوان یک ماده تغییر فاز دهنده در یک محفظه چهارگوش در حضور میدان‌های مغناطیسی مختلف به صورت عددی با استفاده از مدل تک‌فازی همگن و روش حجم محدود، مورد بررسی قرار گرفته است. در کار حاضر برای تحلیل فرآیند انجماد و ذوب مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانوذرات (که در مطالعه حاضر از نانوذرات اکسید آهن استفاده شده است)، از روش آنتالپی-تخلخل استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، نانوذرات و اعمال میدان مغناطیسی باعث سرعت بخشیدن به فرآیندهای ذوب و انجماد می‌شود. میدان مغناطیسی با گرادیان منفی در جهت محور عمودی، در هر دو حالت انجماد و ذوب بیشترین تأثیر را در پیشروی سریع جبهه انجماد و ذوب و در نتیجه کوتاه‌تر شدن زمان این فرآیند دارد.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به افزایش نیاز به انرژی و محدودیت سوخت‌های فسیلی به عنوان منابع رو به اتمام و آلاینده محیط زیست، نیاز به استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر بیشتر احساس می‌شود. یکی از انرژی‌هایی که کاربرد آن رو به افزایش است انرژی حرارتی است. همین افزایش موجب گردید دانشمندان زیادی در سراسر جهان توجه خود را علاوه بر منابع تجدید پذیر انرژی به سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی نیز معطوف نمایند. ذخیره‌سازی انرژی از این جهت اهمیت دارد که تولید و مصرف انرژی به طور روز افزون و مستقل از زمان در حال رشد می‌باشد. ذخیره‌کننده انرژی خورشیدی و سیستم‌های یخچال، از مواد تغییر فاز دهنده همچون پارافین، نمک و آب برای ذخیره انرژی استفاده می‌کنند. مواد تغییر فاز دهنده دارای ویژگی بی‌همتایی هستند که همین عامل سبب به‌کارگیری آنها در سطح وسیعی از سیستم‌های انرژی است. مواد تغییر فاز دهنده همچون آب، دارای ظرفیت گرمایی بالایی هستند و همچنین دمای ذوب آنها در سطح وسیعی قرار دارد. امروزه این مواد در فرآیندهای ذوب و انجماد در خیلی از کاربردهای صنعتی بکار گرفته می‌شود.

مواد تغییر فاز دهنده موادی هستند که می‌توان آنها را به مواد تغییر فاز دهنده آلی که به گروه پارافین‌ها (ذخیره آلکان‌ها) معروف هستند و غیر پارافین‌ها مانند استرها، اسیدهای چرب، الکل‌ها و گلیکولیک اسیدها

تقسیم‌بندی نمود [۱]. دی‌هیدرات سولفات سدیم، هگزا‌هیدرات کلراید کلسیم و پارافین‌ها جزء مهمترین مواد تغییر فاز دهنده هستند [۲]. از کاربردهای این مواد می‌توان به موارد زیادی اشاره کرد؛ موادی که زیر ۱۵ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند، برای خنک‌کردن و تهویه هوای اتاق قابلیت استفاده دارند. موادی که بالای ۹۰ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند، برای کاهش دما در جاهایی که دما ممکن است به طور ناگهانی بالا رود کاربرد دارند و مانع آتش سوزی می‌شوند. سایر این مواد که دمای ذوب آنها بین این دو مقدار است برای ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی کاربرد دارند [۳]. بیشتر از آب، پارافین و نمک برای ذخیره انرژی استفاده می‌کنند.

این مواد در وسایل گرمای نهان، در محفظه‌هایی که به صورت چهارگوش، دایروی، بیضوی و شش‌گوش هستند، می‌توانند ذخیره شوند [۴]. عیب اصلی این مواد پایین بودن هدایت حرارتی آنها می‌باشد. از آنجایی که نانوذرات فلزی دارای هدایت حرارتی بالایی هستند و همچنین با توجه به پیشرفت نانو تکنولوژی، با اضافه کردن نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده، بهبود قابل توجهی در ضریب هدایت حرارتی آنها ایجاد شده است [۵].

بسیاری از تحقیقات مزایای اضافه کردن نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده برای تشکیل مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو به منظور افزایش هدایت حرارتی را تشریح می‌کنند. خدادادی و حسین‌زاده [۶] گزارشی از بهبود PCM ها با حل کردن ذرات مس ارائه دادند که نتایج آنها بیانگر

افزایش ضریب هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانوذرات^۱ نسبت به PCM ها بود. وو و همکاران [۷] با اضافه کردن ۲٪ وزنی نانوذرات مس به پارافین دریافتند که بهبود هدایت گرمایی تقریباً ۱۴٪ و ۱۸٪ برای حالت‌های جامد و مایع می‌باشد. زانگ و همکاران [۸] مطالعه بر روی ذوب اکتادکان در یک محوطه بسته با یک طرف گرم شده گسسته در یک نرخ شار ثابت و نیز دیواره‌های طرف دیگر در حالت آدیاباتیک، انجام دادند. باتوجه به نتایج آنها، جابجایی آزاد یک اثر مهم بر روی شکل سطح مشترک مایع-جامد دارد. باتوجه به محاسبات آنها، عامل ذکر شده زمانی که عدد استفان افزایش یابد بیشتر قابل رؤیت است. فرجی و همکاران [۹] شبیه‌سازی ذوب PCM را در یک محفظه چهارگوش، که دیواره‌های عمودی و بالایی آن در حالت آدیاباتیک و دیواره‌های پایین آن در دمای ثابت قرار داشت را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین آنها دریافتند که با افزایش مقدار دامنه موج دیواره پایین، نرخ ذوب افزایش می‌یابد. کاشانی و همکاران [۱۰] یک مدل عددی برای انجماد نانوسیال آب-مس به عنوان PCM در یک محفظه با دیواره‌های عمودی در گراش‌های متفاوت انجام دادند. آنالیز آن‌ها اثرات حالت موجی سطح و پراکندگی نانوذرات در نرخ انجماد بود. نتایج آنها نشان می‌دهد که پراکندگی نانوذرات در PCM با کاهش زمان انجماد همراه است. همچنین آنها نشان دادند که سطح موجی می‌تواند به عنوان فاکتور کنترل کننده برای تحلیل زمان انجماد مورد توجه قرار بگیرد. به علاوه در تمامی عدد‌های گراش بررسی شده زمان انجماد نهایی با افزایش موج سطح، افزایش می‌یابد.

حسین‌زاده و همکاران [۱۱] فرآیند ذوب NEPCM، را در یک محفظه کروی که در آن RT27 به عنوان ماده اصلی و مس به عنوان نانوذره به کارگرفته شده بود، شبیه‌سازی نموده‌اند. نتایج آنها چگونگی افزایش هدایت حرارتی بر کاهش گرمای نهان و بهبود نرخ ذوب را نشان می‌داد. زنگ و همکاران [۱۲] نشان دادند که با افزایش لزجت، نرخ ذوب و مقدار اثر جابجایی آزاد کم می‌شود. جوارشکیان و همکاران [۱۳] یک مدل عددی مبتنی بر روش آنتالپی-تخلخل به منظور بررسی و شبیه‌سازی عددی پدیده انجماد در یک لوله حاوی جریان آب که پارامترهای تأثیر گذار مختلف بر فرآیند انجماد همچون سرعت جریان، دمای ورودی سیال، قطر لوله، دمای سطح لوله و تغییر خواص فیزیکی فازهای جامد و مایع آب بر زمان انجماد و طول سرمایش مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که متغیر گرفتن گرمای ویژه، ضریب رسانش گرمایی، چگالی و گرانشی تأثیر بسزایی در فرآیند انجماد دارند و نیز استفاده از سیال سرمازا با درجه حرارت پایین‌تر، می‌تواند زمان انجماد را کاهش دهد. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی یک فرآیند انجماد داخل یک محفظه دایروی با استفاده از روش المان محدود توسط آلاوادی [۱۴] انجام شد. نتایج آنها نشان می‌دهد که انتقال گرمایی جابجایی زمانی برجسته‌تر از انتقال حرارت هدایت خواهد بود که، عدد رایلی بزرگتر از 5×10^6 باشد. فومین و همکاران [۱۵] به این نتیجه رسیدند که

فرآیند ذوب داخل یک محفظه دایروی زمان بیشتری نسبت به محفظه بیضوی نیاز دارد. در مطالعات آن‌ها فرآیند انجماد به‌طور تحلیلی مطالعه نشده بود و اثر جریان جابجایی آزاد در طول فرآیند تغییر فاز قابل توجه نبود. همچنین نشان دادند که نرخ ذوب در حالت بیضی صفر درجه نسبت به خط افقی، نسبت به بیضی های ۴۵ و ۹۰ درجه، بیشتر است. خدادادی و همکاران [۱۶] شبیه‌سازی عددی اثر اندازه نانوذرات بر روی فرآیند انجماد NEPCM را انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش در اندازه نانوذرات، سطح جامد-سیال تغییر می‌کند و از شکل سطح پایا به یک ساختار دندردستی ناپایا تبدیل می‌شود.

محمدپورفرد [۱۷] در یک کار عددی که مطالعه اثرات میدان‌های مغناطیسی بر جریان نانوسیال مغناطیس شونده غیرنیوتونی دارای هدایت الکتریکی در یک کانال عمودی به این نتیجه رسیدند که، روند کلی تغییرات برای عدد نوسلت و ضریب اصطکاک برای سیال غیرنیوتونی همانند حالت نیوتونی است با این تفاوت که در حالت غیرنیوتونی و با کاهش شاخص توانی، تأثیرپذیری پروفیل سرعت، عدد نوسلت، ضریب اصطکاک از میدان محوری بیشتر می‌شود. زابلوسکی و همکاران [۱۸] در یک کار عددی و تجربی انتقال حرارت جابجایی ترمومغناطیس یک فروسیال با خواص متغیر با دما را در حضور میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت بررسی کردند. آزمایش روی یک سلول مستطیلی انجام یافته و آهنرباهای دائمی روی دیواره‌های آن نصب شده بود. هنگامی که سلول از پائین گرم می‌شود میزان انتقال حرارت نسبت به حالت بدون میدان بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین یاماگوچی و همکاران [۱۹] رفتار حرارتی یک سیال مغناطیسی با خواص متغیر با دما را داخل یک ظرف مکعبی شکل بررسی کرده‌اند. این محفظه در معرض یک میدان مغناطیسی یکنواخت رو به بالا قرار گرفته و داخل آن یک سیلندر مربعی جهت تولید حرارت قرار داده شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که علیرغم وجود گرمکن داخل محفظه با هر اندازه‌ای، مشخصه‌های انتقال حرارت این سیال در حضور میدان مغناطیسی ارتقاء می‌یابد.

در مطالعه حاضر اثر میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت با گرادیان‌های مثبت و منفی بر پیشروی جبهه ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده بهبود یافته با نانو ذرات به صورت دو بعدی در یک محفظه چهار گوش با استفاده از نرم افزار تجاری انسیس فلوئنت ۱۶^۲ به طور عددی و مدل تک فازی همگن بررسی شده است. نتایج کار حاضر از تحلیل فرایندهای ذوب و انجماد نانو سیال مغناطیسی فاقد هدایت الکتریکی نیز با روش آنتالپی-تخلخل بدست آمده است.

۲- معادلات حاکم

در این مطالعه برای تحلیل فرآیند انجماد NEPCM، از روش آنتالپی-تخلخل استفاده شده است. این روش بجای بررسی ضمنی فصل مشترک

$$\bar{S}_i = A_{mush} \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)} \bar{V} \quad (7)$$

که در اینجا ε عدد کوچک 0.001 برای جلوگیری از تقسیم بر صفر شدن است و A_{mush} ثابت ناحیه خمیری می باشد که عددی مابین 10^4 و 10^7 است و در این مطالعه بر روی عدد ثابت 10^5 تنظیم شده است. γ نیز کسر مایع شده است که با توجه به مایع، جامد و یا دو فازی بودن مخلوط، می تواند صفر، ۱ و یا اعدادی بین این دو باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & ; \text{if } T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{Liquidus} - T_{solidus}} & ; \text{if } T_{Liquidus} < T < T_{solidus} \\ 1 & ; \text{if } T > T_{Liquidus} \end{cases} \quad (8)$$

همچنین در صورت اعمال میدان مغناطیسی از طریق نیروی جسم خارجی جملات چشمه $(\mu_0 M(\partial H/\partial x))$ و $(\mu_0 M(\partial H/\partial y))$ ناشی از نیروی کلین از فروهیدرودینامیک به ترتیب به معادلات مومنتوم در جهت x و y اضافه می شود. همچنین M که مغناطیس پذیری می باشد به صورت زیر تعریف می شود:

$$M = \frac{6m_p}{\pi d_p^3} \left\{ \coth \left(\frac{\mu_0 m_p H}{K_b T} \right) - \frac{K_b T}{\mu_0 m_p H} \right\} \quad (9)$$

۲-۳- معادله انرژی:

$$(\rho C_p)_{nf} \left(\frac{\partial A}{\partial t} + u \frac{\partial A}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = k_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu_{nf} \left\{ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

که A مربوط به آنتالپی NEPCM و k_{nf} مربوط به هدایت گرمایی می باشد. در معادله فوق چشمه گرمایی حجمی صفر فرض شده است.

۳- خواص ترموفیزیکی مخلوط

خواص ترموفیزیکی مخلوط تک فازی همگن به صورت زیر تعریف می شود:
چگالی مخلوط:

$$\rho_{nf} = (1-\phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (11)$$

در معادله فوق، α به کسر حجمی ذرات جامد مربوط می شود، ρ_f ، ρ_p و ρ به ترتیب چگالی نانو سیال، چگالی سیال و چگالی ذرات می باشد. ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط:

مایع-جامد، از یک مقدار که کسر مایع شده نامیده می شود، در هر سلول در منطقه محاسباتی در هر تکرار بر اساس بالانس آنتالپی محاسبه می کند. محاسبه آنتالپی مواد از حاصل جمع آنتالپی محسوس و گرمای نهان صورت می گیرد.

$$A = a + \Delta A \quad (1)$$

که a آنتالپی محسوس و ΔA گرمای نهان می باشد. در این روش، آنتالپی محسوس شامل آنتالپی مرجع و تغییرات آنتالپی نسبت به آنتالپی مرجع در نظر گرفته می شود، که اگر a_{ref} را به عنوان آنتالپی مرجع و T_{ref} را به عنوان دمای مرجع قرار دهیم، آنتالپی محسوس به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$a = a_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C dT \quad (2)$$

همچنین مقدار گرمای نهان از رابطه‌ی زیر بدست می آید:

$$\Delta A = \gamma L_h \quad (3)$$

که در معادله فوق، γ کسر مایع شده و L_h گرمای نهان می باشد. بنابراین با توجه به روابط بالا می توان رابطه‌ی بین آنتالپی و دما به صورت جمله‌ای از گرمای نهان آزاد شده ناشی از تغییر فاز ماده، تعریف کرد.

۲-۱- معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

در این مطالعه به دلیل غیر قابل تراکم بودن نانو سیال، $\frac{\partial \rho_{nf}}{\partial t} = 0$ می باشد.

۲-۲- معادله مومنتوم در جهت x و y :

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \mu_0 M \frac{\partial H}{\partial x} + S_x \quad (5)$$

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \mu_0 M \frac{\partial H}{\partial y} + \rho_{nf} \beta_{nf} g (T - T_c) + S_y \quad (6)$$

که در آن P اشاره به فشار استاتیکی دارد. S_x جمله چشمه مربوط به روش آنتالپی تخلخل می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

در رابطه فوق T_0 دمای اولیه سیستم است.

در زمان $t > 0$ دیواره افقی پایین ($y = 0$) و دیواره افقی بالا ($y = D$)، به صورت عایق در نظر گرفته شده است و شرط عدم لغزش نیز برقرار می‌باشد:

$$\begin{aligned} y = 0, D, \quad 0 \leq x \leq L \\ u = v = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=D} = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

دیواره‌های عمودی سمت چپ و راست به ترتیب در دمای ثابت T_C و T_H می‌باشد و شرط عدم لغزش در دیواره‌ها نیز برقرار می‌باشد:

$$\begin{aligned} x = 0, \quad 0 \leq y \leq D \\ T = T_C, \quad u = v = 0 \\ x = L, \quad 0 \leq y \leq D \\ T = T_H, \quad u = v = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

۴-۲- فرآیند ذوب

در لحظه اولیه ($t = 0$)، دمای اولیه سیستم صفر درجه سانتیگراد و شرط عدم لغزش بر روی دیواره‌ها برقرار می‌باشد:

$$u = v = 0, \quad T_0 = 0^\circ C \quad (20)$$

در رابطه فوق T_0 دمای اولیه سیستم است.

در زمان $t > 0$ دیواره افقی پایین ($y = 0$) و دیواره افقی بالا ($y = D$)، به صورت عایق در نظر گرفته شده است و شرط عدم لغزش نیز برقرار می‌باشد:

$$\begin{aligned} y = 0, D, \quad 0 \leq x \leq L \\ u = v = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=D} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

دیواره‌های عمودی سمت چپ و راست به ترتیب در دمای ثابت T_H و T_C می‌باشد و شرط عدم لغزش در دیواره‌ها نیز برقرار می‌باشد:

$$\begin{aligned} x = 0, \quad 0 \leq y \leq D \\ T = T_H, \quad u = v = 0 \\ x = L, \quad 0 \leq y \leq D \\ T = T_C, \quad u = v = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

۵- تعریف مسئله و مدل‌سازی عددی

تأثیر اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت (مثبت و منفی) بر روی فرآیند ذوب و انجماد نانو سیال مغناطیسی فاقد هدایت الکتریکی آب و نانوذرات اکسید آهن در دو حالت ۲٪ و ۵٪ در یک محفظه چهارگوش مورد بررسی قرار گرفته است. فرض شده است که قطر نانوذرات ۱۰ نانومتر است و نیز شتاب گرانش در جهت پایین محفظه می‌باشد.

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (12)$$

در معادله فوق، C_{p_f} ، C_{p_p} و C_p به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال، سیال و ذرات می‌باشد.

لزجت مخلوط:

لزجت نانوسیالی که ذرات کوچک آن به شکل کروی است، از مدل برینکمن [۲۰] استفاده می‌شود:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (13)$$

که در معادله فوق، μ_f و μ_{nf} به ترتیب مربوط به لزجت نانوسیال و سیال پایه می‌باشد.

هدایت گرمایی مخلوط:

$$k_{nf} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_f + (k_f - k_p)\phi} k_f \quad (14)$$

n ضریب شکل ذرات نانو که برای نانوذرات کروی شکل این ضریب برابر با ۳ است، k_f ، k_p و k_{nf} به ترتیب ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، سیال و نانوذرات می‌باشد. گرمای نهان مخلوط:

$$(\rho L_h)_{nf} = (1-\phi)(\rho L_h)_f \quad (15)$$

در معادله فوق L_{h_f} و $L_{h_{nf}}$ به ترتیب گرمای نهان نانوسیال و سیال پایه می‌باشد.

ضریب انبساط حرارتی مخلوط:

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \quad (16)$$

در معادله فوق β_f و β_p به ترتیب مربوط به ضریب انبساط گرمایی نانوسیال، ضریب انبساط گرمایی سیال و ضریب انبساط گرمایی نانوذرات می‌باشد.

۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی و اولیه مسئله برای هر دو فرآیند ذوب و انجماد به صورت زیر خواهد بود:

۴-۱- فرآیند انجماد

در لحظه اولیه ($t = 0$)، دمای اولیه سیستم $1^\circ C$ و شرط عدم لغزش بر روی دیواره‌ها برقرار می‌باشد:

$$u = v = 0, \quad T_0 = 1^\circ C \quad (17)$$

۴. خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده به جز چگالی ثابت در نظر گرفته شده است که در خصوص تغییرات چگالی با دما، تقریب بوزینسک^۱ لحاظ شده است.
۵. از هدایت الکتریکی نانو سیال مغناطیسی نیز صرف نظر شده است.
۶. حرکات براونی و نیروی ترموفرسیس نانو ذرات در نظر گرفته نشده است.

در جدول ۱ خواص ترموفیزیکی سیال پایه آب و ذرات اکسید آهن نمایش داده شده است. هندسه مسأله در نرم افزار گمبیت^۲ تولید و شبکه بندی شده است. شبکه مورد استفاده، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در تمامی مناطق یکنواخت می باشد. معادلات دیفرانسیل غیرخطی دو بعدی حاکم بر مسأله نیز با استفاده از نرم افزار تجاری انسیس فلونت ۱۶ بر اساس روش حجم محدود حل شده اند. جهت اضافه کردن جمله های چشمه مربوط به میدان مغناطیسی ناشی از نیروی کلونین از فروهیدرودینامیک به معادلات مومنتوم، کدهایی با استفاده از C++ نوشته شده است و به صورت توابع تعریفی کاربر به نرم افزار انسیس فلونت اضافه شده است. جهت حل مسأله از حل کننده فشار محور^۳ و برای ارتباط فشار و سرعت از اسکیم سیمپل سی^۴ استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات مومنتوم و انرژی از دقت مرتبه دوم استفاده شده است و معیار همگرایی برای معادله پیوستگی 10^{-6} و برای معادله انرژی 10^{-8} می باشد.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی سیال پایه آب و ذرات اکسید آهن

Table 1. Thermophysical properties of water and iron oxide particles

خواص	آب (سیال پایه)	اکسید آهن (ذرات)
چگالی	۹۹۷/۱ kg/m ³	۵۲۰۰ kg/m ³
گرمای ویژه	۴۱۷۹ J/kg K	۶۷۰ J/kg K
هدایت حرارتی	۰/۶ W/m.K	۶ W/m.K
لزجت	$۸/۹ \times 10^{-۴}$ kg/m.s	
ضریب انبساط حرارتی	$۳/۳۵ \times 10^{-۵}$ J/kg	
گرمای نهان	$۲/۱ \times 10^{-۴}$ K ^{-۱}	

۶- نتایج و بحث

۶-۱- بررسی استقلال جواب ها از شبکه بندی و اعتباردهی

بررسی استقلال جواب ها از شبکه بندی برای شبکه بندی های مختلف در شکل ۳ آورده شده است. این نمودار تغییرات دما در داخل محفظه در راستای محور افقی را نمایش می دهد. همانگونه که مشاهده می شود نتایج موجود در شبکه بندی های 100×100 و نیز 120×120 و همچنین 150×150 با نتایج

- 1 Boussinesq approximation
- 2 Gambit
- 3 Pressure-based solver
- 4 SIMPLEC

در هندسه مورد نظر دیواره های پایینی و بالایی (افقی) محفظه عایق می باشند و دیواره های سمت چپ و راست (عمودی) در دمای ثابت قرار گرفته اند. باتوجه به شرایط مرزی می توان گفت که انتقال حرارت از طریق دیواره های عمودی صورت می گیرد. میدان های مغناطیسی تنها به ناحیه خمیری در جهت محور y (دیواره های عمودی) اعمال می شوند. همانطور که در شکل ۱ مشخص است، میدان مغناطیسی غیر یکنواخت محوری در تمام طول دیواره اعمال شده است و گرادیان آن برابر با G است. طول محفظه L و عرض آن D می باشد که نسبت طول به عرض برابر با یک در نظر گرفته شده است.

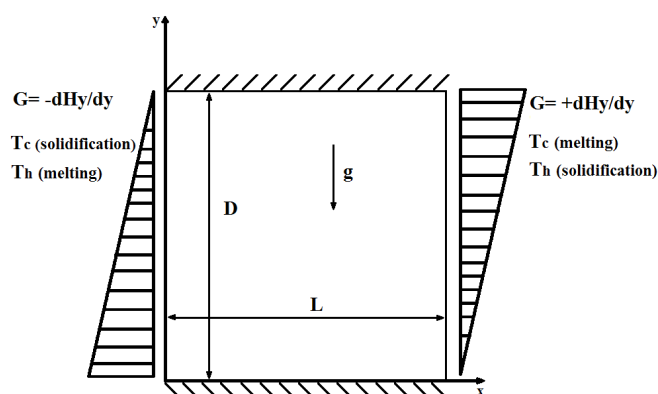


Fig. 1. Schematic of the defined geometry and applied magnetic fields

شکل ۱: هندسه مورد استفاده و میدان های مغناطیسی اعمال شده

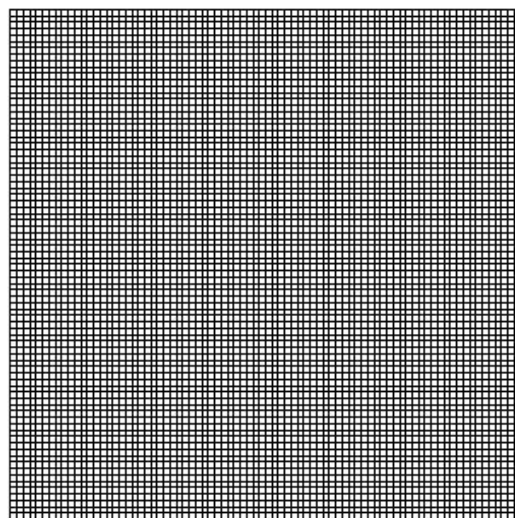


Fig. 2. The used two-dimensional grid

شکل ۲: شبکه بندی دوبعدی استفاده شده

برخی فرضیات در حل عددی نیز لحاظ شده است که به قرار زیر است:

۱. ماده تغییر فاز دهنده نیوتنی و غیر قابل تراکم می باشد.
۲. حرکت سیال در داخل محفظه به صورت جریان آرام دو بعدی در نظر گرفته شده است.
۳. تلفات لزجت سیال نیز ناچیز می باشد.

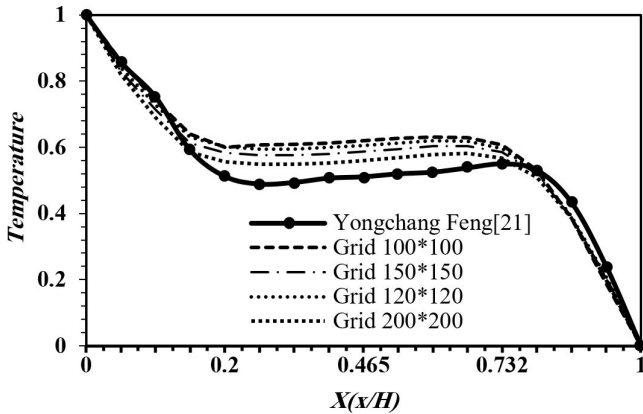


Fig. 4. Dimensionless temperature in the x direction for a square enclosure

شکل ۴: مقایسه دمای بی بعد در راستای محور x در یک محفظه چهار گوش

حل عددی یانگ چانگ فنگ [۲۱] تطابق زیادی ندارد. همانگونه که مشاهده می شود شبکه بندی 200×200 با نتایج حل عددی مرجع مورد نظر تطابق خوبی دارد. بنابراین شبکه بندی بهینه برای شبیه سازی هندسه مورد نظر در راستای محورهای x و y به ترتیب 200 و 200 می باشد.

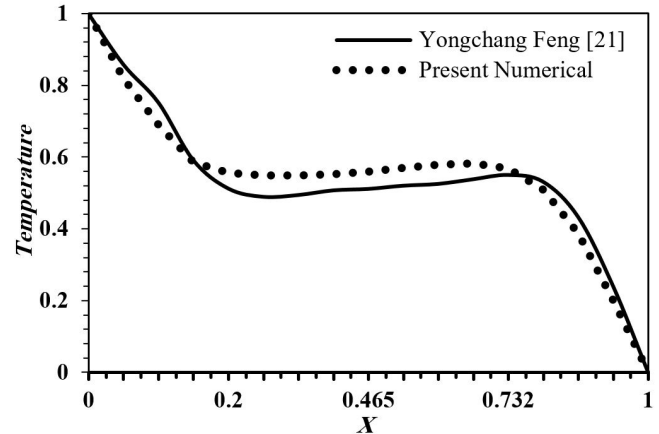


Fig. 3. Grid independency test: variation in the enclosure temperature in the horizontal direction due to changing grids

شکل ۳: بررسی استقلال جواب ها از شبکه بندی تغییرات دمای داخل محفظه در راستای محور افقی برای شبکه بندی های مختلف

۵٪ نسبت به سیال فاقد نانوذرات به ترتیب ۵/۸۸٪ و ۱۴/۰۳٪ می باشد. به عبارتی در کسر حجمی ۲٪ زمان انجماد در ۷۰۷۸ ثانیه به اتمام می رسد و در کسر حجمی ۵٪ در زمان ۶۴۶۵ ثانیه انجماد کامل می شود، ولی در حالت بدون نانوذره ماده تغییر فاز دهنده داخل محفظه در زمان ۷۵۲۰ ثانیه کاملاً منجمد می گردد.

به دلیل انتقال حرارت از طریق دیواره های عمودی، تأثیر اعمال میدان مغناطیسی با گرادیان های مثبت و منفی در جهت محور y بررسی می شود. در شکل ۶ و شکل ۷ تأثیرات اعمال شدت میدان مغناطیسی به مقدار $A/m^2 \pm 4 \times 10^4$ و $A/m^2 \pm 2 \times 10^5$ بر کسر مایع شده نسبت به زمان، برای نانوسیال های مغناطیسی با کسر حجمی ۲٪ و در شکل ۸ و شکل ۹ با کسر حجمی ۵٪ نشان داده شده است. در این حالت نیز تغییراتی در نمودارهای کسر مایع بر حسب زمان ایجاد می شود و باعث کوتاه شدن زمان انجماد و یا به عبارتی باعث سریع شدن فرآیند انجماد می گردد. با توجه به شکل ۶، در حالت کسر حجمی ۲٪ با شدت میدان $A/m^2 \pm 4 \times 10^4$ میزان بهبود زمان نسبت به حالت بدون میدان ۹/۸۶٪ و با شدت میدان $A/m^2 \pm 4 \times 10^4$ حدود ۱۲/۶۸٪ می باشد. همچنین در شکل ۷ کاهش زمان انجماد با شدت میدان $A/m^2 \pm 2 \times 10^5$ به میزان ۱۷/۶۱٪ و با شدت میدان $A/m^2 \pm 2 \times 10^5$ ، ۲۹/۵۸٪ می باشد. از طرفی در شکل ۸ برای حالت کسر حجمی ۵٪ با شدت میدان $A/m^2 \pm 4 \times 10^4$ میزان کاهش زمان انجماد نسبت به حالت بدون میدان ۹/۲۳٪ و با شدت میدان $A/m^2 \pm 4 \times 10^4$ حدود ۱۳/۸۴٪ می باشد و با افزایش شدت میدان همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود افزایش سرعت انجماد با شدت میدان $A/m^2 \pm 2 \times 10^5$ به میزان ۱۴/۶۱٪ و با شدت میدان $A/m^2 \pm 2 \times 10^5$ ، ۲۳/۸۵٪ می باشد. در حالت کلی هر چقدر میدان مغناطیسی قوی تر باشد زمان انجماد کوتاه تر و سرعت انجماد افزایش پیدا خواهد کرد که بیشترین کاهش در زمان انجماد در کسر حجمی ۵٪ و با شدت میدان $A/m^2 \pm 2 \times 10^5$ نسبت به PCM به میزان ۳۴/۱۶٪ مشاهده شد.

۶-۲- نتایج حل عددی

برای نشان دادن صحت و دقت مدل حاضر و حل عددی، مقایسه ای با مطالعات عددی انجام شده است. مقایسه اول در حالت ذوب در غیاب میدان مغناطیسی و با استفاده از نانوسیال آب - مس، با کسر حجمی $\alpha = 0.1$ و عدد گراش $Gr = 10^4$ صورت گرفته است. از آنجایی که در روش آنتالپی - تخلخل، دما یک پارامتر مهم برای تشخیص کسر مایع شده می باشد، بنابراین نتایج حل عددی حاضر با نتایج حل عددی یانگ چانگ فنگ و همکاران [۲۱] در یک محفظه چهار گوش که یک سمت دیواره عمودی آن در دمای T_H و دیواره عمودی دیگر در دمای T_C قرار دارند، مقایسه شده است. شکل ۴ نتایج این مقایسه را نشان می دهد. همانگونه که مشخص است، تطابق خوبی بین نتایج حل عددی که با روش لیتیس بولتزمن بدست آمده است با حل عددی حاضر وجود دارد.

۶-۳- نتایج حل برای حالت انجماد

با افزودن نانوذرات به ماده تغییر فاز دهنده، همانطور که انتظار می رود هدایت حرارتی موثر NEPCM افزایش و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می یابد. به عبارتی ذخیره (ذوب) و آزاد سازی (انجماد) انرژی در NEPCM بهبود می یابد. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می شود، در نمودار کسر مایع شده بر حسب زمان، زمان انجماد در NEPCM ها نسبت به PCM ها کوتاه تر است و در زمان کوتاه تری منجمد می شوند و هر چقدر نانوسیال پخش شده در سیال یا به عبارتی کسر حجمی بیشتر باشد، این زمان کوتاه تر می شود، بطوریکه بهبود کسر مایع شده نسبت به زمان در نانوسیال های ۲٪ و

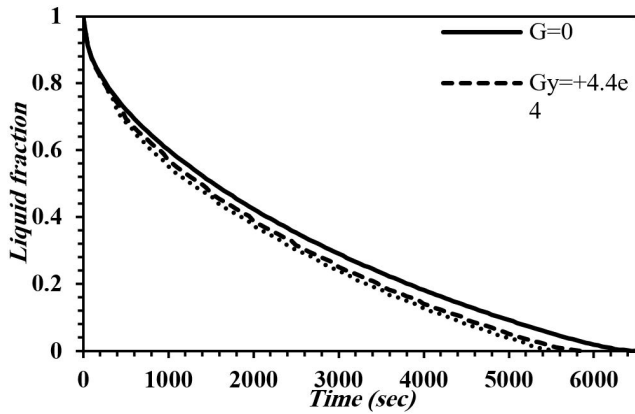


Fig. 8. The influence of magnetic field with the rate of $\pm 4.4 \times 10^4$ A/m² on 5% wt. nanofluid in y direction

شکل ۸: تأثیر اعمال شدت میدان مغناطیسی $\pm 4.4 \times 10^4$ A/m² بر نانوسیال با کسر حجمی ۵٪ در جهت محور y

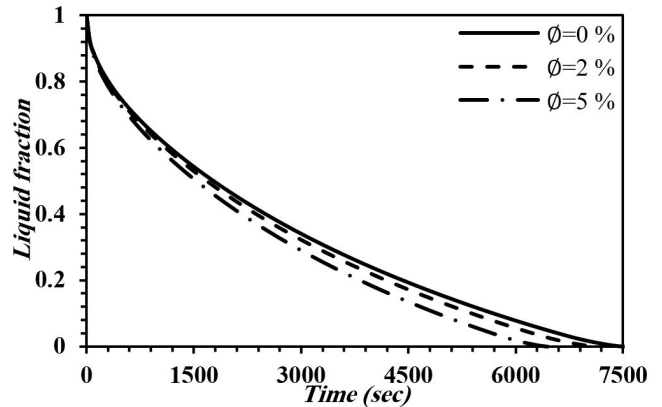


Fig. 5. Variation of liquid fraction of pure fluid, 2% wt. and 5% wt. nanofluid with time

شکل ۵: نمودار کسر مایع شده برحسب زمان برای سیال خالص، نانوسیال با کسر حجمی ۲٪ و ۵٪

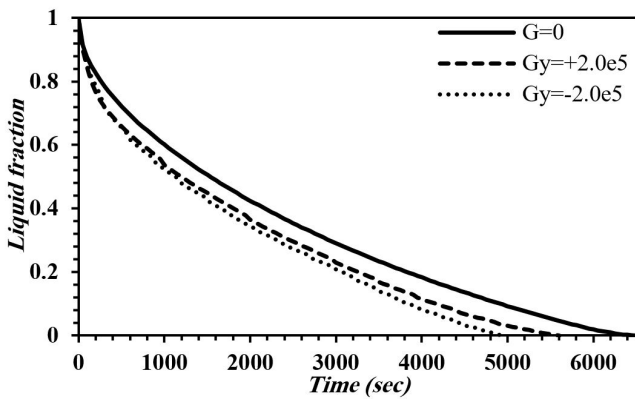


Fig. 9. The influence of magnetic field with the rate of $\pm 2.02 \times 10^5$ A/m² on 5% wt. nanofluid in y direction

شکل ۹: تأثیر اعمال شدت میدان مغناطیسی $\pm 2.02 \times 10^5$ A/m² بر نانوسیال با کسر حجمی ۵٪ در جهت محور y

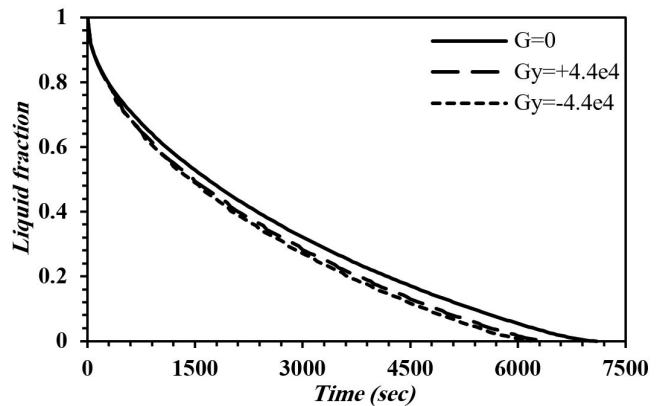


Fig. 6. The influence of magnetic field with the rate of $\pm 4.4 \times 10^4$ A/m² on 2% wt. nanofluid in y direction

شکل ۶: تأثیر اعمال شدت میدان مغناطیسی $\pm 4.4 \times 10^4$ A/m² بر نانوسیال با کسر حجمی ۲٪ در جهت محور y

با مقایسه شکل‌های ۶ تا ۹ مشاهده می‌شود که در تمامی نمودارهای مذکور، میدان مغناطیسی منفی نسبت به میدان مغناطیسی مثبت، تأثیر بیشتری در سرعت جبهه انجماد و کاهش زمان آن دارد. دلیل این پدیده را می‌توان با توجه به شکل ۱۰ که خطوط جریان و خطوط دما ثابت را برای فرآیند انجماد نشان می‌دهد، اینگونه بیان کرد که با توجه به این که میدان مغناطیسی فقط به ناحیه خمیری وارد می‌شود و همچنین در میدان مغناطیسی منفی، جهت نیروی کلین به سمت پایین می‌باشد و از آنجایی که در فرآیند انجماد جهت جریان در ناحیه خمیری از بالا به سمت پایین می‌باشد، بنابراین نیروی کلین هم جهت با جهت این قسمت از جریان شده و باعث سرعت بخشیدن به فرآیند انجماد و در نهایت باعث کوتاه‌تر شدن زمان آن می‌شود.

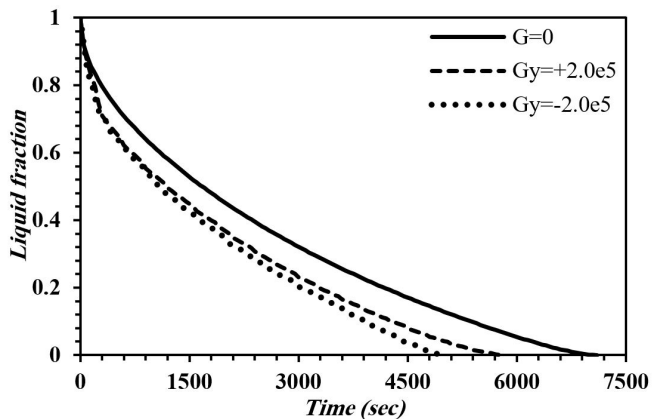


Fig. 7. The influence of magnetic field with the rate of $\pm 2.02 \times 10^5$ A/m² on 2% wt. nanofluid in y direction

شکل ۷: تأثیر اعمال شدت میدان مغناطیسی $\pm 2.02 \times 10^5$ A/m² بر نانوسیال با کسر حجمی ۲٪ در جهت محور y

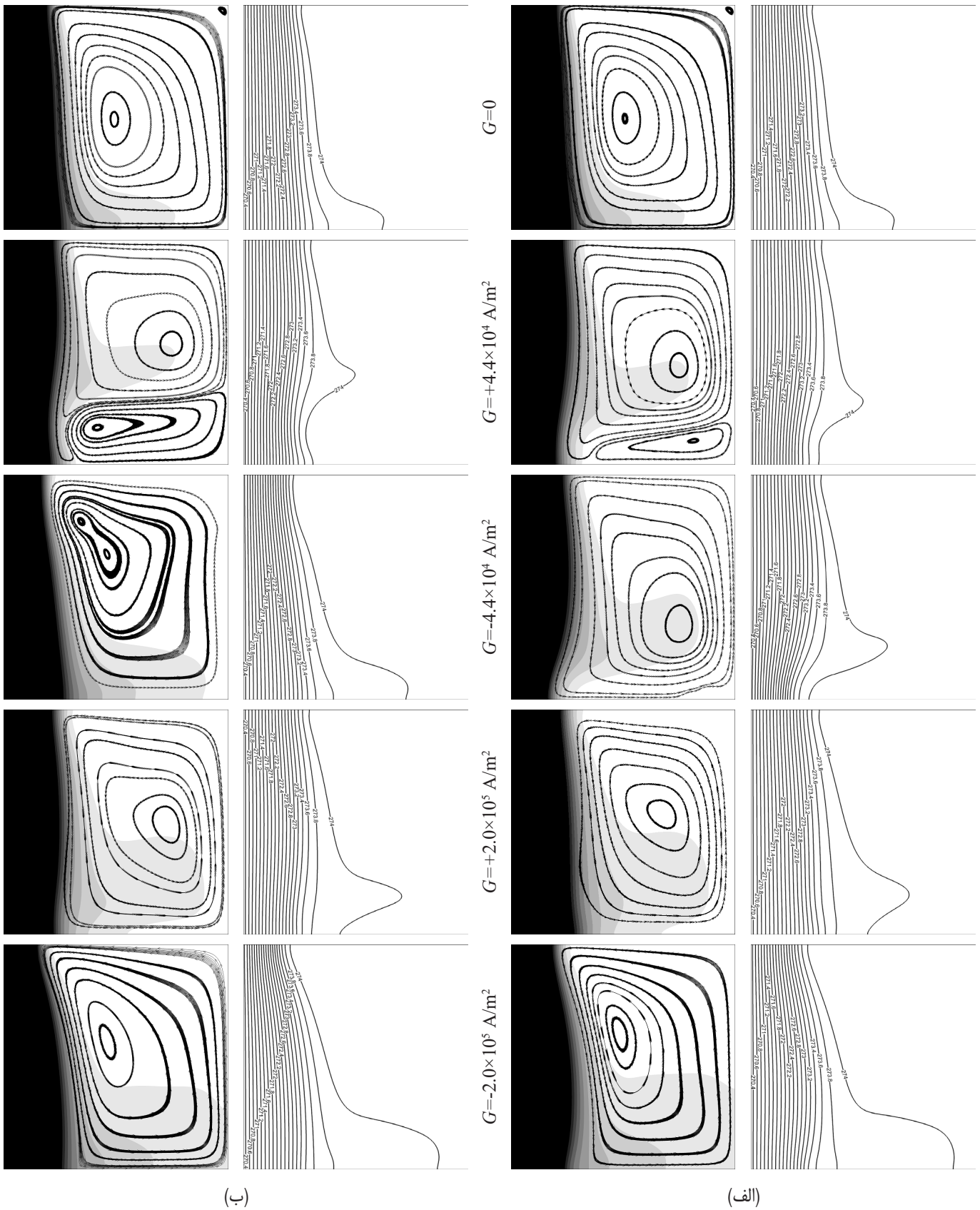


Fig. 10. Isothermal lines (right) and streamlines (left) at $t=10$ min for solidification process: a) streamlines and isothermal lines for 2% wt. nanofluid b) streamlines and isothermal lines for 5% wt. nanofluid

شکل ۱۰: خطوط دما ثابت (راست) و خطوط جریان (چپ) در زمان ۱۰ دقیقه برای فرایند انجماد (الف) خطوط جریان و خطوط دما ثابت با کسر حجمی ۲٪. (ب) خطوط جریان و خطوط دما ثابت با کسر حجمی ۵٪.

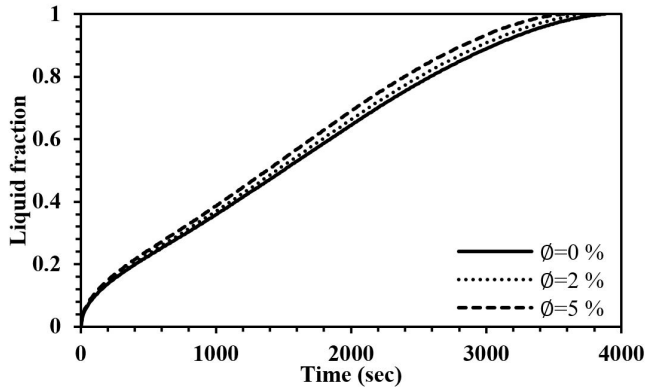


Fig. 11. Variation of liquid fraction of pure fluid, 2% wt. and 5% wt. nanofluid with time

شکل ۱۱: نمودار کسر مایع شده برحسب زمان برای سیال، نانوسیال با کسر حجمی ۲٪ و نانوسیال با کسر حجمی ۵٪

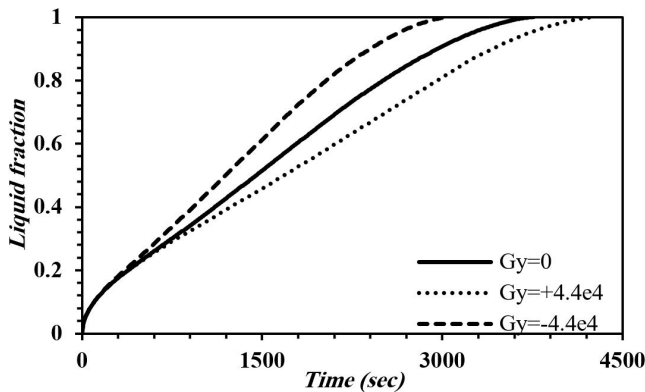


Fig. 12. The influence of magnetic field with the rate of $\pm 4.4 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ on 2% wt. nanofluid in y direction

شکل ۱۲: تأثیر اعمال شدت میدان مغناطیسی $\pm 4.4 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ بر نانوسیال با کسر حجمی ۲٪ در جهت محور y

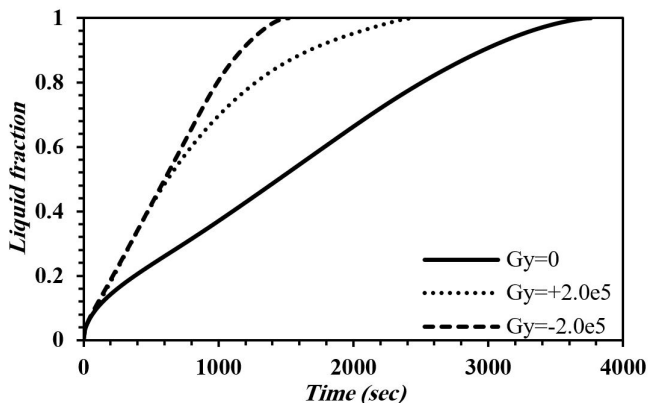


Fig. 13. The influence of magnetic field with the rate of $\pm 2.02 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ on 2% wt. nanofluid in y direction

شکل ۱۳: تأثیر اعمال شدت میدان مغناطیسی $\pm 2.02 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ بر نانوسیال با کسر حجمی ۲٪ در جهت محور y

۶-۴- نتایج حل برای حالت ذوب

شکل ۱۱ نمودار کسر مایع شده بر حسب زمان در فرآیند ذوب را نشان می‌دهد. ذوب شدن NEPCM نسبت به PCM ها با کسرهای حجمی ۲٪ و ۵٪ سریع‌تر شده است بطوریکه بهبود کسر مایع شده نسبت به زمان در نانوسیال‌های ۲٪ و ۵٪ نسبت به سیال فاقد نانوذرات به ترتیب ۳/۰۹٪ و ۷/۷۳٪ می‌باشد. به عبارتی در کسر حجمی ۲٪ زمان ذوب در ۳۷۶۰ ثانیه به اتمام می‌رسد و در کسر حجمی ۵٪ ذوب در زمان ۳۵۸۰ کامل انجام می‌گردد، ولی در حالت بدون نانو ذره ماده تغییر فاز دهنده در زمان ۳۸۸۰ ثانیه کاملاً ذوب می‌شود.

برخلاف فرآیند انجماد، فرآیند ذوب بیشتر تحت تأثیر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت با شدت‌های مختلف قرار می‌گیرد. در این فرآیند نیز با اعمال میدان‌های مغناطیسی غیر یکنواخت تغییراتی در پیشروی جبهه ذوب در جهت کاهش و یا افزایش سرعت این فرآیند بوجود می‌آید. در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ همانند حالت انجماد تأثیرات اعمال شدت میدان مغناطیسی به میزان $\pm 2/02 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ و $\pm 4/4 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ بر کسر مایع شده نسبت به زمان، برای نانوسیال‌های مغناطیسی با کسر حجمی ۲٪ و شکل ۱۴ و شکل ۱۵ با کسر حجمی ۵٪ نشان داده شده است. در این حالت نیز تغییراتی در نمودارهای کسر مایع برحسب زمان ایجاد می‌شود، به طوری که هم باعث کوتاه شدن زمان ذوب و هم کند شدن آن می‌شود. در شکل ۱۲ در حالت کسر حجمی ۲٪، شدت میدان $4/4 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ باعث افزایش زمان ذوب نسبت به حالت بدون میدان به میزان ۱۳/۵۶٪ می‌شود، اما با شدت میدان $4/4 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ - زمان ذوب شدن در حدود ۱۸/۶۳٪ کاهش می‌یابد. همچنین در این کسر حجمی با توجه به شکل ۱۳ کاهش چشمگیری در زمان ذوب با شدت میدان $2/02 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ به میزان ۳۴/۵۷٪ اتفاق می‌افتد و با شدت میدان $2/02 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ - افزایش شدید سرعت ذوب به اندازه ۵۹/۵۷٪ رخ می‌دهد. از طرفی با مشاهده شکل ۱۴ برای حالت کسر حجمی ۵٪ این افزایش و کاهش سرعت ذوب نیز بیشتر از نانوسیال ۲٪ دیده می‌شود به طوری که با شدت میدان $4/4 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ میزان افزایش زمان ذوب به اندازه ۱۷/۰۴٪ مشاهده شد و با شدت میدان $4/4 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ - افزایش سرعت ذوب حدود ۳۱/۲۸٪ می‌باشد. با افزایش شدت میدان در این کسر حجمی همانطور که در شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود سرعت ذوب در هر دو حالت گرادیان مثبت و منفی به شدت افزایش می‌یابد. با شدت میدان $2/02 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ این افزایش به میزان ۵۲/۲۳٪ می‌باشد. همچنین با شدت میدان $2/02 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ - کاهش زمان ذوب به اندازه ۶۹٪ نتیجه شد. در حالت کلی در فرآیند ذوب نیز هر چقدر میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد زمان ذوب کوتاه‌تر و سرعت آن افزایش پیدا خواهد کرد که بیشترین کاهش در زمان ذوب باز هم در کسر حجمی ۵٪ و با شدت میدان $2/02 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ نسبت به PCM به میزان ۷۱/۳۹٪ نتیجه شد.

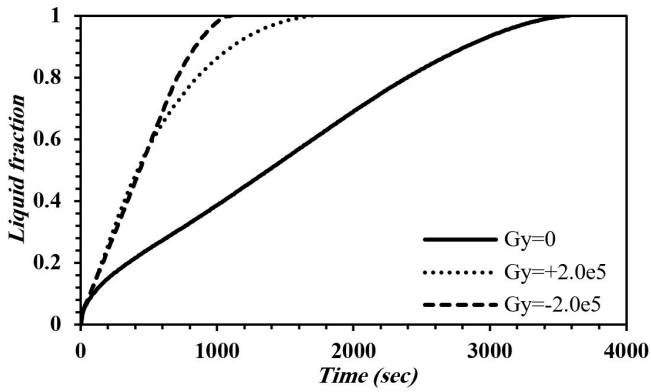


Fig. 15. The influence of magnetic field with the rate of $\pm 2.02 \times 10^5$ A/m² on 5% wt. nanofluid in y direction

شکل ۱۵: تأثیر اعمال شدت میدان مغناطیسی $\pm 2/0 \times 10^5$ A/m² بر نانوسیال با کسر حجمی ۵٪ در جهت محور y.

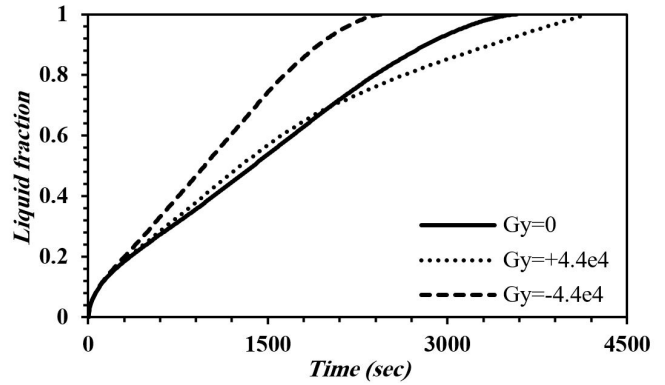
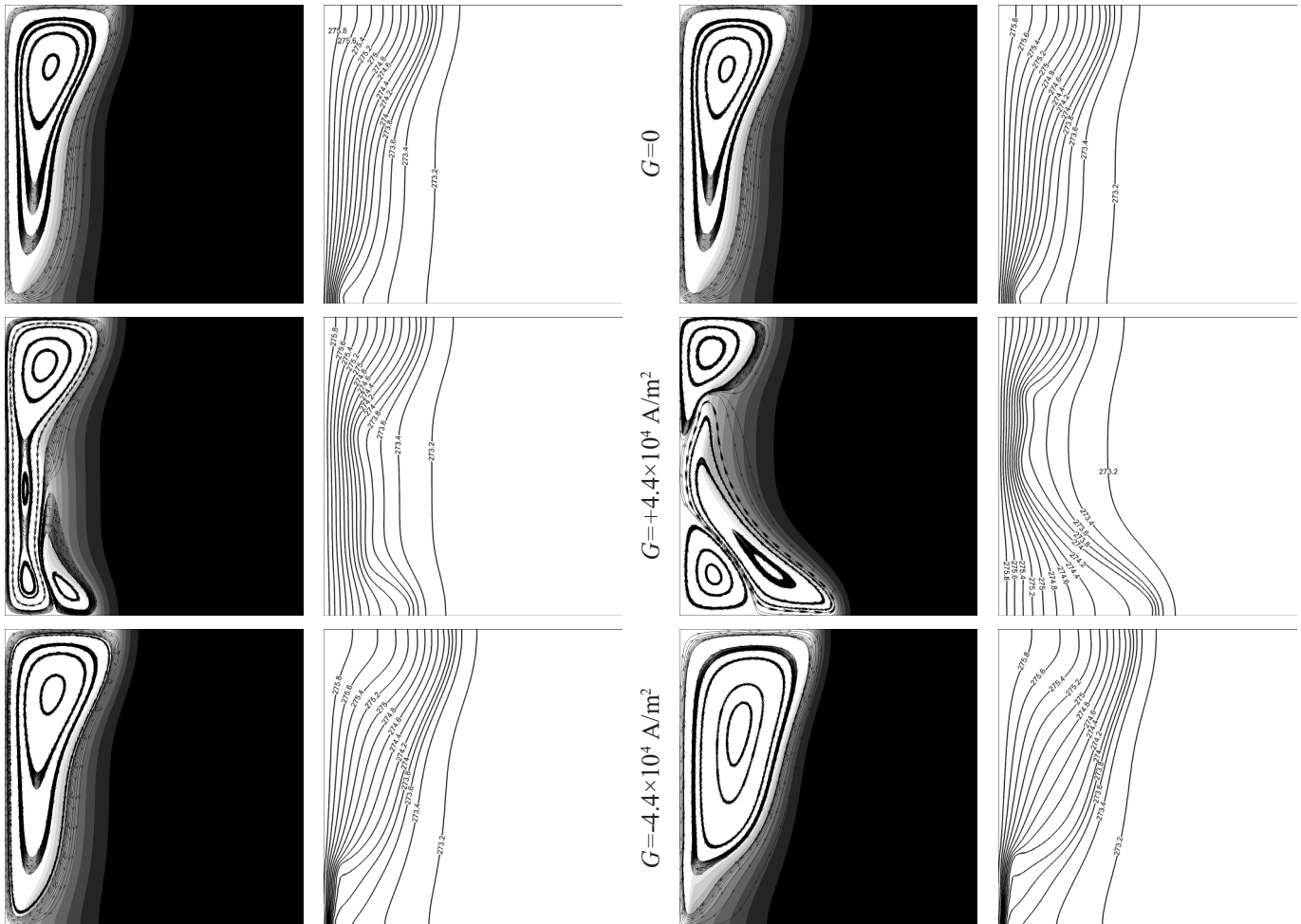


Fig. 14. The influence of magnetic field with the rate of $\pm 4.4 \times 10^4$ A/m² on 5% wt. nanofluid in y direction

شکل ۱۴: تأثیر اعمال شدت میدان مغناطیسی $\pm 4/4 \times 10^4$ A/m² بر نانوسیال با کسر حجمی ۵٪ در جهت محور y.

نیز جهت جریان در ناحیه خمیری از بالا به سمت پایین می‌باشد، بنابراین نیروی کلون هم جهت با جهت این قسمت از جریان شده و باعث سرعت بخشیدن به فرآیند ذوب و در نهایت باعث کوتاه‌تر شدن زمان آن می‌شود. از آنجایی که در فرآیند ذوب با افزایش زمان جریان طبیعی کل محفظه را در برمی‌گیرد، تأثیر میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت در فرآیند ذوب نسبت به فرآیند انجماد محسوس‌تر است.

با مقایسه شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ مشاهده می‌شود که در تمامی نمودارهای مذکور، باز هم میدان مغناطیسی منفی نسبت به میدان مغناطیسی مثبت، تأثیر بیشتری در سرعت جبهه ذوب و کاهش زمان آن دارد. با توجه به شکل ۱۶ که خطوط جریان و خطوط دما ثابت را برای فرآیند ذوب در زمان ۱۰ دقیقه نشان می‌دهد و از طرفی با توجه به این که میدان مغناطیسی فقط به ناحیه خمیری وارد می‌شود و همچنین در میدان مغناطیسی منفی، جهت نیروی کلون به سمت پایین می‌باشد و از آنجایی که در فرآیند ذوب



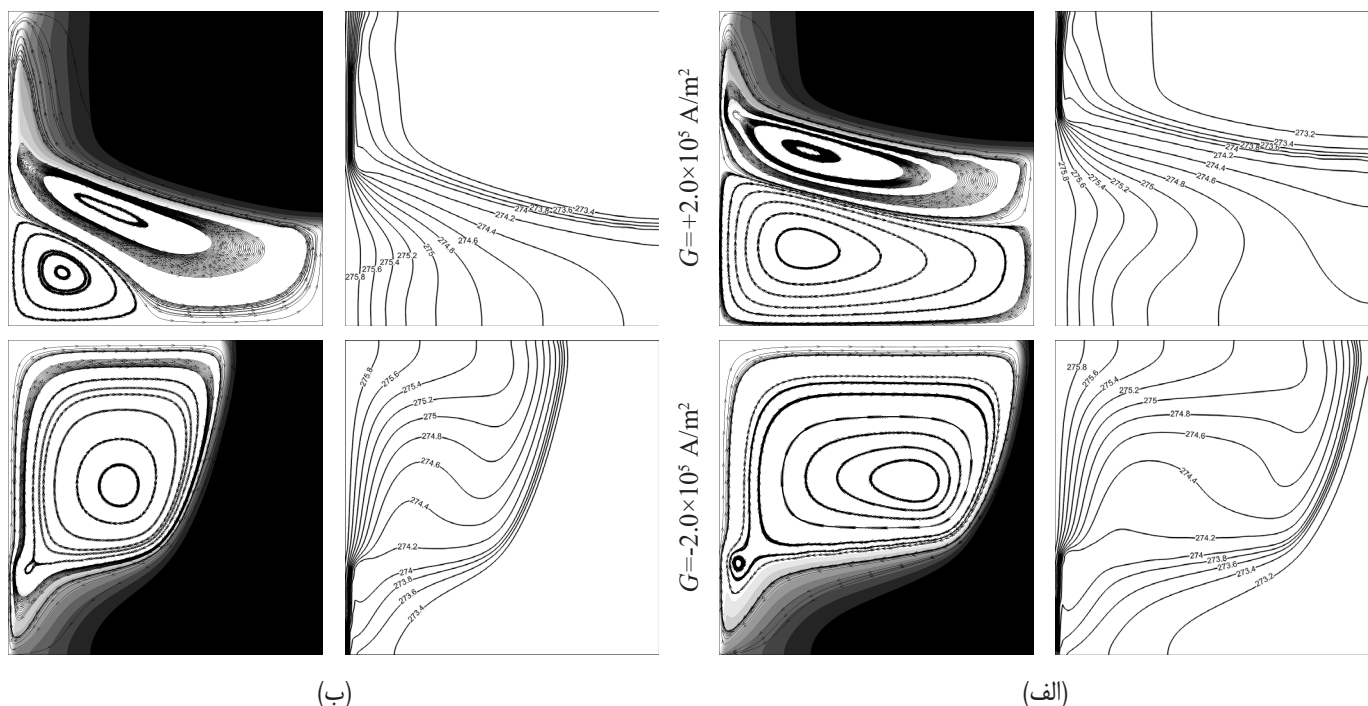


Fig. 16. Isothermal lines (right) and streamlines (left) at $t=10$ min for solidification process: a) streamlines and isothermal lines for 2% wt. nanofluid b) streamlines and isothermal lines for 5% wt. nanofluid

شکل ۱۶: خطوط دما ثابت (راست) و خطوط جریان (چپ) در زمان ۱۰ دقیقه برای فرایند ذوب (الف) خطوط جریان و خطوط دما ثابت با کسر حجمی ۲٪. (ب) خطوط جریان و خطوط دما ثابت با کسر حجمی ۵٪.

فهرست علائم

آنتالپی	A
ثابت ناحیه خمیری	A_{mush}
گرمای ویژه	C_p
عرض محفظه	D
قطر ذره مغناطیسی	d_p
گرادیان میدان مغناطیسی محوری	G
عدد گراشف $(g\beta_f \Delta TH^3 / (\mu_f / \rho_f)^2)$	Gr
شدت میدان مغناطیسی	H
هدایت گرمایی	k
ثابت بولتزمن	K_b
طول محفظه	L
مغناطیس پذیری	M
ممان مغناطیسی	m_p
عدد نوسلت	Nu
فشار	P
عدد پکلت	Pe
چشمه گرمایی	S_{hi}

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه عددی تأثیر میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت در فرآیندهای ذوب و انجماد برای نانو سیال آب و ذرات اکسید آهن انجام شد. نانوذرات با کسرهای حجمی ۲٪ و ۵٪ به ترتیب در فرآیند انجماد ۵/۸۸٪ و ۱۴/۰۳٪ موجب کاهش زمان انجماد و در فرایند ذوب ۳/۰۹٪ و ۷/۷۳٪ باعث افزایش سرعت ذوب شد. علاوه بر این اعمال میدان مغناطیسی نیز باعث سرعت بخشیدن به فرآیندهای ذوب و انجماد شد. با اعمال میدان‌های مغناطیسی به نانو سیال مغناطیس شونده، تغییراتی در شکل جبهه انجماد و ذوب در جهت کاهش و حتی افزایش زمان صورت گرفت. به دلیل انتقال حرارت از طریق دیواره‌های عمودی، تأثیر اعمال میدان مغناطیسی با گرادیان‌های مثبت و منفی در جهت محور y بررسی شد.

با توجه به این که میدان مغناطیسی فقط به ناحیه خمیری اعمال شد و در این ناحیه چه در فرآیند انجماد و چه در فرآیند ذوب جهت جریان به سمت پایین می‌باشد، بنابراین در هر دو فرآیند میدان مغناطیسی با گرادیان منفی موجب افزایش سرعت در فرآیندهای ذوب و انجماد شد که در حالت انجماد بیشترین تأثیر را میدان مغناطیسی با شدت $G = -2 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ و کسر حجمی ۵٪ به میزان ۳۴/۱۶٪ و در فرآیند ذوب نیز همین شدت میدان با همان کسر حجمی به مقدار ۷۱/۳۹٪ نسبت به PCM داشت.

- [4] E.M. Alawadhi, A solidification process with free convection of water in an elliptical enclosure, *Energy Conversion and Management*, 50(2) (2009) 360-364.
- [5] J.M. Khodadadi, L. Fan, H. Babaei, Thermal conductivity enhancement of nanostructure-based colloidal suspensions utilized as phase change materials for thermal energy storage: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24 (2013) 418-444.
- [6] J.M. Khodadadi, S.F. Hosseinizadeh, Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34(5) (2007) 534-543.
- [7] S.Y. Wu, H. Wang, S. Xiao, D.S. Zhu, An investigation of melting/freezing characteristics of nanoparticle-enhanced phase change materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 110(3) (2012) 1127-1131.
- [8] R.L. Hamilton, O.K. Crosser, Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3) (1962) 187-191.
- [9] M. Faraji, H. El Qarnia, Numerical study of melting in an enclosure with discrete protruding heat sources, *Applied Mathematical Modelling*, 34(5) (2010) 1258-1275.
- [10] S. Kashani, A.A. Ranjbar, M. Abdollahzadeh, S. Sebti, Solidification of nano-enhanced phase change material (NEPCM) in a wavy cavity, *Heat and Mass Transfer*, 48(7) (2012) 1155-1166.
- [11] S.F. Hosseinizadeh, A.A.R. Darzi, F.L. Tan, Numerical investigations of unconstrained melting of nano-enhanced phase change material (NEPCM) inside a spherical container, *International Journal of Thermal Sciences*, 51 (2012) 77-83.
- [12] Y. Zeng, L.-W. Fan, Y.-Q. Xiao, Z.-T. Yu, K.-F. Cen, An experimental investigation of melting of nanoparticle-enhanced phase change materials (NePCMs) in a bottom-heated vertical cylindrical cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66 (2013) 111-117.
- [13] M.H. Djavarehshkian, A. Karimi, Numerical simulation of water solidification in pipes, *Journal of Aerospace* 2(3) (2006) 31-40 (in Persian).
- [14] E.M. Alawadhi, Phase change process with free convection in a circular enclosure: numerical simulations, *Computers & Fluids*, 33(10) (2004) 1335-1348.
- [15] S.A. Fomin, A.V. Wilchinsky, T.S. Saitoh, Close-Contact Melting Inside an Elliptical Cylinder, *Journal of Solar Energy Engineering*, 122(4) (2000) 192-195.
- [16] Y.M.F. El Hasadi, J.M. Khodadadi, Numerical Simulation of the Effect of the Size of Suspensions on the

چشمه روش آتالیپی تخلخل	S_i
دما	T
دمای دیواره سرد	T_C
دمای دیواره گرم	T_H
دمای ذوب	$T_{Liquidus}$
دمای انجماد	$T_{Solidus}$
زمان	t
سرعت در جهت محور افقی	u
سرعت در جهت محور عمودی	v
سرعت	V
محور افقی در دستگاه دکارتی	x
محور عمودی در دستگاه دکارتی	y

علامت یونانی

کسر حجمی	\emptyset
انبساط حرارتی	β
پارامتر لانژوئن	ξ
نفوذ پذیری مغناطیسی خلا	μ_0
لزجت دینامیکی	μ
چگالی	ρ
تنش برشی دیواره	τ
کسر مایع شده	γ

زیرنویس

سیال پایه	f
ذرات مغناطیسی	p
نانوسیال	nf
ناحیه خمیری	mush

منابع

- [1] X.-Q. Wang, C. Yap, A.S. Mujumdar, A parametric study of phase change material (PCM)-based heat sinks, *International Journal of Thermal Sciences*, 47(8) (2008) 1055-1068.
- [2] L. Jian-you, Numerical and experimental investigation for heat transfer in triplex concentric tube with phase change material for thermal energy storage, *Solar Energy*, 82(11) (2008) 977-985.
- [3] A. Elgafy, K. Lafdi, Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials, *Carbon*, 43(15) (2005) 3067-3074.

- Thermomagnetic natural convection of thermo-sensitive magnetic fluids in cubic cavity with heat generating object inside, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(6) (2010) 698-704.
- [20] H.C. Brinkman, The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions, *The Journal of Chemical Physics*, 20(4) (1952) 571-571.
- [21] Y. Feng, H. Li, L. Li, L. Bu, T. Wang, Numerical investigation on the melting of nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) in a bottom-heated rectangular cavity using lattice Boltzmann method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81 (2015) 415-425.
- Solidification Process of Nanoparticle-Enhanced Phase Change Materials, *Journal of Heat Transfer*, 135(5) (2013) 052901-052901-052911.
- [17] M. Mohammadpourfard, Numerical study the effects of magnetic fields on the nano-magnetic non-Newtonian fluid with the electrical conductivity in a vertical channel, *Modares Mechanical Engineering* 15(11) (2015) 379-389 (in Persian).
- [18] D. Zablotzky, A. Mezulis, E. Blums, Surface cooling based on the thermomagnetic convection: Numerical simulation and experiment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(23) (2009) 5302-5308.
- [19] H. Yamaguchi, X.-R. Zhang, X.-D. Niu, K. Yoshikawa,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Mohammadpourfard and M. Rostami Dibavar, Numerical Investigation of Non-Uniform Magnetic Fields Effects on Heat Transfer and Development of Melting- Solidification Processes in an Enclosure, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(6) (2018) 1251-1264.

DOI: 10.22060/mej.2017.12709.5405



