



## اثر ضریب تخلخل و نانو ذرات مس بر ذوب سیکلو هگزان در محفظه متخلخل

مجید طهماسبی کهیانی<sup>1</sup>، بهزاد قاسمی<sup>2\*</sup>، افراسیاب رئیسی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، تبدیل انرژی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

\* شهرکرد، صندوق پستی 115، ghasemi@eng.sku.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 خرداد 1395

پذیرش: 28 تیر 1395

ارائه در سایت: 24 شهریور 1395

کلید واژگان:

ذوب

نانو ماده تغییر فاز دهنده

محفظه متخلخل

### چکیده

در این مقاله ذوب نانو ماده تغییر فاز دهنده سیکلو هگزان - مس در یک محفظه مربعی متخلخل، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. دمای اولیه نانو ماده  $T_i$  برابر با دمای ذوب آن،  $T_m$  است. دیواره‌های افقی این محفظه عایق است. در شروع دمای دیوار عمودی سمت چپ به بالاتر از دمای ذوب نانو ماده تغییر می‌یابد. در معادلات بی‌بعد شده سه پارامتر مؤثر وجود خواهد داشت که عبارتند از:  $Ra$ ،  $\varphi$  و  $\varepsilon$ . معادلات بی‌بعد حاکم بر اساس مدل داری به دست آمده‌اند و برای حل این معادلات از روش حجم کنترل استفاده شده است. اثر تغییر این پارامترها بر میدان جریان و دما، آهنگ انتقال گرما و مدت زمان لازم جهت ذوب کامل نانو ماده در شرایط مختلف ( $0 \leq \varphi \leq 0.50$ ،  $50 \leq Ra \leq 500$ ) بررسی شده است. نتایج نشان دهنده تأثیر گذاری بالای تغییر تخلخل محیط،  $\varepsilon$  بر روند و مدت زمان ذوب در محفظه است. حال آنکه تأثیر تغییر درصد حجمی نانو ذرات،  $\varphi$  تنها ایجاد تأخیر کوچکی در مدت زمان ذوب کامل نانو ماده بوده است. افزایش عدد رایلی باعث افزایش قدرت مکانیزم انتقال گرمای جابجایی در محفظه شده و به تبع آن سرعت ذوب در محفظه افزایش یافته و شکل خط ذوب از حالت خط راست موازی با وجوه عمودی محفظه به خط منحنی شکل تبدیل می‌شود.

## The effect of porosity and Cu-nanoparticles on melting of Cyclohexane in porous cavity

Majid Tahmasebi Kohyani, Behzad Ghasemi\*, Afrasiab Raisi

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

\* P.O.B. 115 Shahrekord, Iran, ghasemi@eng.sku.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 05 June 2016  
Accepted 18 July 2016  
Available Online 14 September 2016

Keywords:  
Melting  
Nano-PCM  
Porous cavity

### ABSTRACT

Melting of Cyclohexane-Cu nano-material in a porous square cavity is studied numerically in this paper. The initial temperature of the cavity is  $T_i$  that is equal to melting temperature of nano-PCM (phase change material),  $T_m$ . The horizontal walls are adiabatic. Suddenly the left wall's temperature changes to  $T_h > T_m$ . The effective parameters in this case are  $Ra$ ,  $\varphi$  and  $\varepsilon$  which appear in the nondimensionalized equations. Nondimensionalized governing equations are obtained based on the Darcy model; a control volume approach is used for solving these equations. The effect of the variation of mentioned parameters ( $50 \leq Ra \leq 500$ ,  $0 \leq \varphi \leq 0.05$  and  $0.1 \leq \varepsilon \leq 0.6$ ) is investigated on the heat transfer rate, fluid flow, isotherms and melting time of nano-PCM. The results show that changing any of the parameters will affect the increase or decrease of heat transfer rate and melting process time. For example variation of  $\varepsilon$  has considerable effect on melt fraction in cavity with time. The results show that melting of PCM is prolonged when nano-particles are added. The results show that, increasing the  $Ra$  number, enhanced the power of natural convection heat transfer and the rate of nano-PCM melting in the cavity and therefore deforms the melting line.

### 1- مقدمه

متخلخل با شرایط مرزی مختلف یکی از موضوعات مهم در این زمینه به - شمار می‌رود و مقالات زیادی در این زمینه به ثبت رسیده است. سعید [5] انتقال گرمای جابجایی در یک محیط متخلخل که توسط دو لایه با ضخامت محدود احاطه شده است را مورد بررسی قرار داده است. از جمله نتایج این بررسی، می‌توان به افزایش مقدار چرخش با دو عامل کاهش ضخامت دیواره‌ها و افزایش نسبت رسانایی گرمایی دیواره‌ها به رسانایی گرمایی محیط متخلخل ( $Kr$ ) اشاره کرد. در این مقاله همچنین نشان داده شده است که با افزایش  $Kr$  عدد نوسل و گرادیان دمای افقی افزایش می‌یابند. چمخا و همکارانش [6] یک محفظه متخلخل در معرض تابش را مورد بررسی قرار داده و نحوه اثر

انتقال گرما در محیط‌های متخلخل یکی از موضوعاتی است که در میان تحقیقات مربوط به انتقال گرما رشد ناگهانی داشته است. مکانیک حرکت سیال در یک محیط متخلخل برای بیش از یک قرن محققان را به خود مشغول کرده و در چند دهه گذشته مطالعات مربوط به انتقال گرما در این محیط‌ها خود به شاخه ای جدید تبدیل شده است. به عنوان نمونه کاربردی موضوع می‌توان به مبدل‌های زیرزمینی برای ذخیره انرژی، بازیابی و کنترل دمای راکتورها، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، عایق‌های گرمایی، انرژی‌های زمین گرمایی و غیره اشاره کرد [1-4]. بررسی انتقال گرما در محیط‌های

Please cite this article using:

M. Tahmasebi Kohyani, B. Ghasemi, A. Raisi, The effect of porosity and Cu-nanoparticles on melting of Cyclohexane in porous cavity, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 165-174, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

$\varphi$ ، بررسی شده است. از نتایج تحقیق می‌توان به حاصل شدن بیشینه انتقال گرما در بزرگترین عدد ریلی، کوچکترین اندازه محفظه در شرایطی که هیتز در پائین قرار دارد اشاره کرد. دیگر آنکه در اعداد ریلی کوچک افزایش نسبت حجمی ذرات نانو،  $\varphi$ ، موجب بهبود انتقال گرما از محفظه می‌گردد در حالی که در اعداد ریلی بزرگ این نتیجه عکس می‌گردد. علاوه بر کارهای ذکر شده در بالا یکی از موارد جذاب برای محققان استفاده از محیط‌های متخلخل اشباع شده با مواد یا نانو مواد برای ذخیره انرژی می‌باشد که لازم است ابتدا توضیح مختصری در خصوص دلیل این امر ارائه شده و سپس مروری بر کارهای انجام شده در این زمینه صورت پذیرد. ذخیره انرژی یکی از مسائل مهم جهت تأمین امنیت انرژی، افزایش بازدهی سیستم‌های گرمایی و حفظ کیفیت محیط اطراف می‌باشد. به این منظور دو روش متفاوت برای ذخیره انرژی در مواد ذخیره کننده به وسیله سرد کردن و یا گرم کردن آن‌ها وجود دارد [15]: 1- ذخیره انرژی گرمایی محسوس 2- ذخیره انرژی گرمایی نامحسوس. در روش اول با افزایش یا کاهش مقدار انرژی در مواد ذخیره کننده همچون آب، خاک، بتن یا دیگر مواد دمای آن‌ها تغییر خواهد کرد در حالی که در روش دوم انرژی گرمایی می‌تواند به عنوان گرمای نهان ذوب یا انجماد به ماده اضافه یا از آن کم شود و موجب تغییر فاز ماده به مایع یا جامد در پدیده‌های ذوب یا انجماد شود و در این شرایط دمای مواد ثابت خواهد بود. از میان دو روش ذکر شده نوع دوم مزایای بیشتری دارد که از جمله آنها ذخیره بیشتر انرژی در حجم ثابت و بهینه نمودن طراحی سیستم‌ها از نظر ابعاد می‌باشد. به دلایل ذکر شده روش دوم نظر محققین زیادی را جلب نموده است که به بررسی کاربردهای عملی آن در سیستم‌های گرمایش خورشیدی، ساختمان‌های انرژی پایین و واحدهای ذخیره انرژی دما پایین پرداخته‌اند [16-20]. بکرمن و ویسکانتا [21] ذوب گالیم در محیط متخلخل متشکل از ذرات شیشه را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها با در نظر گرفتن بازه کوچک دمایی که در آن تغییر فاز رخ می‌دهد معادله خط ذوب را یافته و نسبت به حل در فازهای جامد و مایع مبادرت نمودند. آنها نشان دادند که همچون انتقال گرمای رسانشی در بخش جامد جابجایی آزاد در قسمت سیال بر روند ذوب بسیار اثرگذار است. تا جایی که شکل خط ذوب تا حد زیادی از آن متأثر است. در این تحقیق علاوه بر به نمایش در آوردن خطوط جریان و دما ثابت در مراحل ذوب برای گام‌های زمانی مختلف خط ذوب نیز به صورت تابعی از زمان ترسیم شده است. از نتایج این بررسی تحلیل اثرات کاهش یا افزایش اعداد ریلی،  $Ra$ ، و استفان،  $Ste$  بر زمان ذوب کامل در محفظه و مشخصه‌های دیگر حرارتی و سیالاتی را می‌توان برشمرد. جنگ و یانگ [22] بررسی انتقال گرمای گذرای ذوب یخ در محیط متخلخل مستطیلی شکل را مورد بررسی قرار دادند. آنها با در نظر گرفتن اثرات شناوری، اصطکاک و جابجایی آزاد در یک مدل غیر داری پروسه ذوب را تحلیل نمودند. از نتایج این محققان می‌توان به بهبود انتقال گرما، افزایش سرعت ذوب و افزایش شیب و انحنای خط ذوب با افزایش عدد داری،  $Da$ ، اشاره کرد. همچنین افزایش انتقال گرما در مرز سرد و کاهش آن در مرز گرم با گذر زمان از دیگر نتایج این تحقیق بوده است. ژانگ وهانگ [23] ذوب یخ در محیط متخلخل از پایین محفظه را مورد تحقیق قرار دادند و اثر پارامترهایی چون عدد ریلی،  $Ra$ ، استفان،  $Ste$  و تغییرات چگالی را بر روند ذوب بررسی کردند. آنها اعلام داشته‌اند که در شروع ذوب بسته به شرایط مسأله الگوهای خاصی از حالت گذرا به پایا وجود خواهد داشت. همچنین بیان کردند که تغییر در پارامترهای اثرگذار بر جابجایی آزاد می‌تواند منجر

افزایش شدت تابش بر افزایش عدد نوسلت و قدرت گردابه‌ها را ارائه نمودند. علاوه بر تحقیقات فوق که در آنها انرژی گرمایی بر روی مرزهای محفظه اعمال می‌شود، در برخی تحقیقات نیز منبع انرژی در داخل محفظه در نظر گرفته شده است. پپ و سعید [7] به بررسی انتقال حرارت جابجایی در یک محیط متخلخل عمودی با دو منبع حرارتی پرداخته‌اند که در آن تغییرات پارامترهایی از جمله اعداد ریلی و پکلت و فاصله میان منابع گرمایی بر آهنگ انتقال گرما مورد توجه واقع شده است. گروسان و همکارانش [8] به بررسی اثرات تولید گرمای داخلی و میدان مغناطیسی در یک محیط متخلخل پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که میزان انتقال گرما جابجایی به شدت به پارامترهایی از جمله عدد ریلی و عدد هارتمن وابسته است. همچنین نشان داده‌اند که عدد نوسلت موضعی در دیواره‌های افقی با تغییر زاویه میدان مغناطیسی از حالت افقی به عمودی تغییر قابل ملاحظه‌ای دارد. میلی و مرکین [9] انتقال گرمای جابجایی در محیط متخلخل با تولید انرژی داخلی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها نشان داده‌اند که در اعداد ریلی بزرگ لایه‌های مرزی با گردابه‌هایی قوی در نواحی مرکزی دیواره‌های عمودی ایجاد می‌شود. از دیگر نتایج آن می‌توان به دستیابی به دمایی بالاتر از دمای دیوار گرم توسط تولید انرژی داخلی درون محیط متخلخل اشاره کرد. وینسکی و کیمورا [10] به بررسی انتقال گرمای گذرا ترکیبی جابجایی آزاد و رسانش در یک محیط متخلخل نیمه بی نهایت در حضور صفحه جامد پرداختند. آنها به ارائه نتیجه تحقیقات به صورت حل عددی و تحلیلی مبادرت ورزیدند و در اعداد ریلی مختلف رژیم‌های گوناگون انتقال گرمای گذرا و جواب ماندگار مسأله را یافته و مورد تحلیل و بررسی قرار داده‌اند. به عنوان نمونه نشان داده‌اند که در اعداد ریلی بزرگ رسیدن به حالت پایا به شدت شتاب می‌گیرد. اسلام و نانداکوما [11] اثرات تولید انرژی داخلی یکنواخت بر واحد حجم بر انتقال گرما گذرا در محیط‌های متخلخل را مورد تحقیق قرار داده‌اند و انگیزه خود از این کار را اهمیت موضوع و کاربرد آن در ذخیره پسماند‌های رادیواکتیو و علوم زمین گرمایی بیان کرده‌اند. از نتایج این تحقیق می‌توان به بررسی اثر افزایش و کاهش میزان تولید انرژی بر رژیم جریان و اثرات آن بر جواب پایدار مسأله اشاره کرد. چمخا و اسماعیل [12] به بررسی انتقال گرمای ترکیبی جابجایی آزاد و رسانش در محفظه مستطیلی حاوی محیط متخلخل و نانو ذرات که به وسیله یک دیوار جامد مثلثی گرم می‌شد، پرداخته‌اند. آنها اثر اضافه نمودن نانو ذرات مس، اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم به سیال پایه آب در محیط متخلخل را در شرایط متفاوت پارامترهای اثرگذاری همچون عدد ریلی،  $Ra$ ، نسبت حجمی ذرات نانو،  $\varphi$ ، ضخامت دیوار جامد،  $D$  و نسبت رسانایی گرمایی محیط متخلخل به جامد،  $kr_0$  را مورد تحقیق قرار داده و در هر حالت مشخصه‌های گرمایی و سیالاتی همچون خطوط دما ثابت، جریان و میزان انتقال گرما میانگین و موضعی را ارائه نمودند. از نتایج مهم این بررسی می‌توان به شدت یافتن انتقال گرما در اعداد ریلی پایین با افزایش  $\varphi$  اشاره کرد. همچنین نشان داده شد که وابسته به میزان  $\varphi$  با افزایش یا کاهش ضخامت دیوار جامد انتقال گرما تغییر خواهد کرد. سان و پپ [13] جابجایی آزاد در محفظه مثلثی قائم‌الزاویه حاوی محیط متخلخل در حضور نانو ذرات را در شرایطی که قسمتی از دیوار عمودی محفظه دارای دمای ثابت  $T_0$  و دیوار شیب دار در دمای  $T_c$  بوده است را مورد بررسی قرار داده‌اند. معادلات حاصل بر فرضیات داری استوار بوده و نانو سیال بر اساس مدل تیواری و داس [14] شبیه‌سازی شده است. در این شرایط اثر پارامترهای مختلفی همچون عدد ریلی،  $Ra$ ، اندازه هیتز،  $Ht$ ، و نسبت حجمی ذرات نانو،

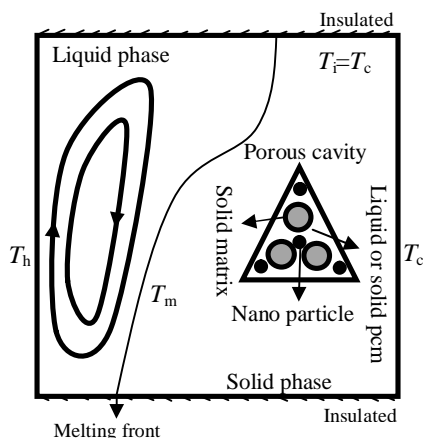


Fig. 1 A schematic diagram of the physical model

شکل 1 نمایشی از محفظه مورد بررسی

همچنین فرض می‌شود که چگالی سیال مطابق با فرضیه مشهور بوزینسک، تغییر می‌کند و سیال درون محیط متخلخل از مدل دارسی تبعیت می‌کند. نهایتاً از تفاوت چگالی فازهای مایع و جامد در محل خط ذوب صرف‌نظر شده است. با توضیحات ذکر شده معادلات خط ذوب، پیوستگی، مومنتم و انرژی حاکم بر رفتار سیال در حالت دوبعدی با روابط (1-4) بیان می‌شود [27-29]:

$$-k_{pnm} \left[ \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial s}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right] = [(1-\varepsilon)(\rho h)_{pm} + \varepsilon(\rho h)_{nf}] \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1) \text{ خط ذوب}$$

$$\approx \varepsilon(\rho h)_{nf} \frac{\partial s}{\partial t} \quad x = s(y, t) \quad (2) \text{ پیوستگی}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3) \text{ مومنتم}$$

$$= -\frac{g \left( (1-\varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_p \right) K \frac{\partial T_{nf}}{\partial x}}{\mu_{nf}} \quad (4) \text{ انرژی}$$

$$\Gamma_{pnm} \frac{\partial T_{nm}}{\partial t} + u \frac{\partial T_{nm}}{\partial x} + v \frac{\partial T_{nm}}{\partial y} = \alpha_{pnm} \left[ \frac{\partial^2 T_{nm}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{nm}}{\partial y^2} \right]$$

$u$  و  $v$  مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های  $x$  و  $y$ ،  $T_{nm}$  دمای نانوماده در فازهای جامد یا سیال و  $K$  ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل می‌باشند. تعریف کلیه پارامترهای به کار رفته در معادلات (1-4) در جدول 1 آمده است.

معادلات فوق را می‌توان برحسب تابع جریان، که به صورت  $u = \partial\psi/\partial y$  و  $v = -\partial\psi/\partial x$  تعریف می‌شود، بیان نمود. همچنین با تعریف پارامترهای بدون بعد طبق جدول 2 می‌توان این معادلات را بصورت بدون بعد نوشت.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -Ra\Delta \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (5) \text{ مومنتم بی بعد}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \theta}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{pnm}}{\alpha_{pmf}} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (6) \text{ انرژی بی بعد}$$

$$\frac{\partial S}{\partial Fo} = -\Gamma_{pnm} \left( \frac{Ste}{\varepsilon} \right) \times \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} - \frac{\partial S}{\partial Y} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \quad (7) \text{ خط ذوب بی بعد}$$

در روابط (5-7) عدد ریلی به صورت  $Ra = (g\rho_f\beta_f K \Delta T H) / (\mu_f \alpha_{pmf})$  تعریف شده است، که  $\Delta T = (T_h - T_c)$  است. پارامتر  $\Delta$  که ضریب آن است

به تغییرات شدید انتقال گرما و سرعت پیشروی خط ذوب در محفظه شود. در قسمت قبل به روش ذخیره انرژی به وسیله ذوب و انجماد اشاره شد. همانند روش‌های دیگر این نوع نیز معایبی دارد. از جمله آنها پایین بودن ضریب رسانایی گرمایی مواد تغییر فاز دهنده است که سبب افزایش مدت زمان ذوب یا انجماد می‌گردد و به علت نیاز به ذوب و انجماد سریع در برخی کاربردهای مهندسی، محققان روش‌های گوناگونی ارائه داده‌اند [24-26] که به عنوان نمونه می‌توان به افزودن نانو ذرات با رسانایی گرمایی بالا به مواد تغییر فاز دهنده، استفاده از ساختار فلزی متخلخل، استفاده هم‌زمان از چند ماده و قراردادن رینگ‌های فلزی در مواد تغییر فاز دهنده اشاره نمود. نوع اول از راهکارهای ذکر شده یعنی اضافه کردن نانو ذرات به مواد تغییر فاز دهنده درون محیط یکی از مهمترین روش‌های مد نظر محققان بوده است. حسین و همکاران [27] برای اولین بار ذوب نانو مواد در محیط متخلخل را بررسی نمودند. در کار آن‌ها فرایند ذوب از مرز بالایی محفظه مربعی که دیگر مرزهای آن عایق بود شروع می‌شد، بنابراین خط ذوب تقریباً به صورت موازی با دیوار افقی محفظه از بالا به پایین حرکت می‌کرد. از نتایج این تحقیق می‌توان به ارائه درصد ذوب نانو مواد در مقادیر مختلف نسبت جمعی ذرات نانو،  $\varphi$ ، در زمان‌های مختلف اشاره نمود. از نتایج دیگر کار مذکور کاهش مقدار انرژی مورد نیاز جهت ذوب نانو مواد در مقادیر بزرگ  $\varphi$  است. تسنیم و همکاران [28] به تازگی اثر افزایش نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده در محیط متخلخل را بر روند ذوب این مواد مورد بررسی قرار داده‌اند و اثر تغییر پارامترهایی همچون عدد ریلی  $Ra$ ، و یک مقدار نسبت جمعی ذرات نانو،  $\varphi$ ، را بر روند ذوب نشان داده‌اند. تحقیقات آن‌ها حکایت از به تأخیر افتادن روند ذوب و کاهش انتقال گرمایی جابجایی و رسانشی با افزایش نانو ذرات دارد. از دیگر نتایج می‌توان به ارائه خطوط دما ثابت و جریان در زمان‌های مختلف اشاره نمود. همان‌گونه که اشاره شد علاوه بر کاهش یا افزایش انتقال گرما با تغییر خواص حرارتی مواد پایه، به کمک افزودن نانو مواد می‌توان با استفاده از محیط‌های متخلخل با ضریب رسانش بالا و تغییر تخلخل آنها بر ذوب و انجماد اثر گذاشت. از کاربردهای این اثر کنترل سرعت ذوب و انجماد جهت اهداف خاص می‌باشد. هرچند تحقیقاتی در رابطه با ذوب و انجماد در محیط‌های متخلخل انجام شده، اما در بررسی‌های انجام شده کمتر اثر تغییر تخلخل محیط و حضور نانومواد به صورت هم‌زمان مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر مذکور انجام شده است.

## 2- بیان مسأله و روش حل

طرح‌واره مسأله مورد بررسی در شکل 1 نمایش داده شده است. دیواره‌های افقی این محفظه عایق و دمای اولیه کل سیستم  $T_i$  می‌باشد که با دمای ذوب نانو ماده برابر است،  $T_m = T_i$ . در شروع در حالی که دمای دیواره عمودی سمت راست ثابت است ( $T_c = T_i$ ) دمای دیوار عمودی سمت چپ به بالای دمای نقطه ذوب تغییر می‌یابد. فرض می‌شود که محیط متخلخل همسانگرد و همگن بوده، نانو ذرات به صورت همگن در ماده تغییر فاز دهنده پخش شده‌اند، محیط در حالت کاملاً اشباع قرار دارد، نانو ماده و محیط در شرایط تعادل دمای محلی قرار دارند و از اثرات اتلاف اصطکاکی و جمله اینرسی در معادلات انرژی و مومنتم صرف‌نظر می‌شود. خواص ترمودینامیکی محیط و سیال، به جز چگالی سیال در جمله شناوری، طی این بررسی ثابت فرض می‌شوند.

جدول 3 خواص حرارتی و فیزیکی محیط متخلخل (آلمینیوم)، نانوذرات (مس) و ماده پایه (سیکلو هگزان)، [28]

Table 3 Thermophysical properties of porous medium (Aluminum), nano particle (copper), and base material (Cyclo hexane), [28]

سیکلو هگزان	سیکلو هگزان	مس	آلمینیوم	خواص فیزیکی
مایع	جامد			
1763	1600	385	903	$C$ ( $\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$ )
779	856	8933	2702	$\rho$ ( $\text{kgm}^{-3}$ )
0.127	0.136	401	237	$k$ ( $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ )
121	-	1.67	-	$\beta \times 10^5$ ( $\text{K}^{-1}$ )
32557	-	-	-	$h_{fs}$ ( $\text{Jkg}^{-1}$ )

در این بررسی عدد نوسلت موضعی،  $Nu$ ، و متوسط،  $\overline{Nu}$ ، روی دیوارهای سرد یا گرم با رابطه (10) تعریف می‌شوند:

$$Nu = -\frac{\partial \theta}{\partial X}, \quad \overline{Nu} = \int_0^1 Nu dy \quad (10)$$

### 3- روش حل عددی

برای جبری کردن معادلات بی‌بعد شده از روش حجم کنترل استفاده شده است. همان‌طور که از روابط (6,5) پیدا است، معادلات مذکور به یکدیگر مرتبط بوده و باید به‌صورت هم‌زمان حل شوند. البته یکی از قسمت‌های مهم این مسأله یافتن شرایط مرزی وابسته به زمان در خط ذوب است که پس از یافتن آن حل مسأله مقدور خواهد بود و این امر با حل هم‌زمان معادله خط ذوب (7) و معادلات مومنتم و انرژی مقدور خواهد شد. با توجه به بررسی‌هایی که روی پارامترهای مهم مسأله، برای نشان دادن عدم وابستگی حل به تعداد نقاط شبکه انجام گرفت، شبکه بهینه انتخاب شد. نمونه‌ای از این بررسی‌ها به ازای  $\phi = 0.02$ ,  $\varepsilon = 0.3$  در جدول 4 مشاهده می‌شود. با توجه به داده‌ها مشخص است که تغییرات بیشینه تابع جریان دامنه حل،  $\Psi_{\max}$  و عدد نوسلت متوسط،  $\overline{Nu}$  در انتهای روند ذوب از شبکه  $46 \times 46$  تا شبکه  $101 \times 101$  بسیار کم است. پس برای داشتن سرعت و دقت بالا در روند حل از شبکه  $76 \times 76$  استفاده شده است.

برای تقریب جملات پخش از تقریب تفاضل مرکزی و در رابطه با جملات جابجایی پخش از روش قانون توانی استفاده شده است [33]. برای به‌دست آوردن جواب‌هایی دقیق باید از شبکه بندی متناسب با شرایط مرزی و هندسه مسأله استفاده نمود. زیرا در غیر این صورت جواب‌ها واگرا شده و یا با خطا به‌دست می‌آیند. برای شبکه سازی از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود. در مرجع [34] در این مورد توضیحات کافی آمده است. در مقاله حاضر از روش جبری برای شبکه‌سازی استفاده شده است. معادلات جبری به‌دست آمده به‌وسیله روش تکرار خط به خط و با استفاده از الگوریتم ماتریس سه قطری حل شده‌اند. همگرایی فرآیند تکرار در هر گام زمانی تا رسیدن به محدودیت تعریف شده در رابطه (11) ادامه می‌یابد:

$$\max \left| \frac{\Pi_{i,j}^{n+1} - \Pi_{i,j}^n}{\Pi_{i,j}^n} \right| \leq 10^{-4} \quad (11)$$

جدول 4 عدم وابستگی حل به تعداد نقاط شبکه ( $\phi = 0.02$ ,  $\varepsilon = 0.3$ )

Ra=100		Ra=200		Number of grids
$\overline{Nu}_h$	$\Psi_{\max}$	$\overline{Nu}_h$	$\Psi_{\max}$	
3.09	4.48	4.86	7.97	46×46
3.12	4.38	4.94	7.85	56×56
3.13	4.34	4.99	7.84	56×56
3.13	4.34	4.99	7.84	101×101

جدول 1 پارامترهای به کار رفته در معادلات

Table 1 The parameters applied in equations

پارامتر [مرجع]	مدل محاسبه
پخشندگی گرمایی نانو سیال [30]	$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c)_{nf}}$
ظرفیت گرمایی نانو سیال [31]	$(\rho c)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c)_f + \phi(\rho c)_p$
رسانایی گرمایی نانو سیال [12]	$k_{nf} = \frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} k_f$
لزجت نانو سیال [32]	$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}}$
انساز گرمایی نانو سیال [12]	$(\rho \beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho \beta)_f + \phi(\rho \beta)_p$
نسبت حجمی نانو ذرات	$\phi = \frac{V_p}{(V_p + V_f)}$
ظرفیت گرمایی میانگین نانو ماده و محیط	$(\rho c)_{pnm} = (1 - \varepsilon)(\rho c)_{pm} + \varepsilon(\rho c)_{nm}$
رسانایی گرمایی میانگین نانو ماده و محیط	$k_{pnm} = (1 - \varepsilon)k_{pm} + \varepsilon k_{nm}$
نسبت ظرفیت گرمایی میانگین	$\Gamma_{pnm} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{(\rho c)_{pm}}{(\rho c)_{nm}}$
پخشندگی گرمایی میانگین نانوماده و محیط	$\alpha_{pnm} = \frac{k_{pnm}}{(\rho c)_{nm}}$
پخشندگی گرمایی میانگین سیال پایه و محیط	$\alpha_{pmf} = \frac{k_{pmf}}{(\rho c)_f}$

جدول 2 تعریف پارامترها جهت بی‌بعد سازی معادلات

Table 2 parameters to make dimensionless equations

پارامتر بدون بعد	شیوه تعریف
تابع جریان	$\Psi = \frac{\psi}{\alpha_{pmf}}$
دما	$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$
مکان در جهت افقی و عمودی	$X = \frac{x}{H}; Y = \frac{y}{H}$
زمان	$Fo = \frac{t \alpha_{pnm}}{H^2}$
زمان ویژه	$\overline{Fo} = \frac{Fo}{\Gamma_{pnm}}$

به‌صورت:  $\Delta = [(1 - \phi) + \phi(\rho_p \beta_p / \rho_f \beta_f)](1 - \phi)^{2.5}$  تعریف می‌شود. همان‌طور که از تعریف پارامتر  $\Delta$  مشخص است اثر حضور نانوذرات در سیال پایه توسط آن به معادله مومنتم القاء می‌گردد. این امر در معادله انرژی به کمک ضریب  $(\alpha_{pnm} / \alpha_{pmf})$  محقق می‌شود. عدد استفان نیز که در معادله خط ذوب ظاهر شده است،  $Ste = C_n (T_h - T_m) / h_{fs}$  است. نکته قابل اهمیت در تعریف این پارامتر جدا کردن تأثیر تخلخل محیط از آن در معادله خط ذوب به صورت  $(Ste / \varepsilon)$  است که امکان بررسی مجزای تأثیر شرایط مرزی و ویژگی‌های نانو ماده و تخلخل را فراهم می‌کند و این امر در کارهای قبلی مورد توجه قرار نگرفته است. شرایط مرزی و اولیه مسأله مورد نظر با استفاده از پارامترهای بدون بعد با روابط (9,8) قابل بیان است:

$$\begin{aligned} \theta(0, Y) &= 1, \theta(1, Y) = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial X}(X, 0) &= \frac{\partial \theta}{\partial X}(X, 1) = 0 \\ \Psi(0, Y) &= \Psi(1, Y) = \Psi(X, 0) = \Psi(X, 1) = 0 \end{aligned} \quad (8) \text{ شرایط مرزی}$$

$$\theta_0(X, Y) = \Psi_0(X, Y) = 0 \quad (9) \text{ شرط اولیه}$$

در جدول 3 خواص ترموفیزیکی مواد به کار رفته برای مدل‌سازی مسأله شامل محیط متخلخل (آلمینیوم)، نانوذرات (مس) و ماده پایه (سیکلو هگزان) ارائه شده است.

4-1- اثر تغییر تخلخل ( $\varepsilon$ )

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد یکی از راه‌های بهبود و کنترل مکانیزم ذوب استفاده از ساختار فلزی با رسانایی گرمایی بالا به عنوان محیط متخلخل می‌باشد. با توجه به انتخاب آلومینیوم به عنوان ساختار جامد محیط، در این بخش اثر تغییر تخلخل که نسبت حجم اشباع شده با نانوماده به کل حجم محیط است مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور بررسی‌ها به ازای مقادیر ثابت  $Ra = 100$  و  $\varphi = 0.02$  در بازه  $0.1 \leq \varepsilon \leq 0.6$  انجام و نتایج مورد نظر به صورت نمودار به تصویر کشیده شده است. در شکل 3 خطوط دما ثابت و خطوط جریان به ازای  $SteFo = 1$  در زمان  $\varepsilon = 0.1, 0.3, 0.6$  نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل 3 مشخص است در  $\varepsilon = 0.1$  به علت درصد زیاد قسمت جامد دارای رسانایی گرمایی بالا در محفظه و به تبع آن انتقال گرمایی بیشتر، قدرت گردابه‌ها بیشتر است که همین امر موجب شده است در  $SteFo = 1$  میزان ذوب در محفظه نسبت به  $\varepsilon$ ‌های بزرگتر بیشتر باشد. برای درک بهتر موضوع در شکل 4 تغییرات میزان درصد ذوب در محفظه به ازای تخلخل‌های مختلف محیط با زمان آمده است که نمایانگر سرعت ذوب بیشتر در محفظه در تخلخل کوچکتر بوده و دلیل آن نفوذ ساده‌تر گرما از طریق رسانش در قسمت جامد از جنس آلومینیوم با ضریب رسانایی گرمایی زیاد است. همچنین در جدول 6 تأثیر تغییر تخلخل بر میزان ذوب در زمان‌های مختلف به صورت کمی برای مقایسه بهتر ارائه شده است.

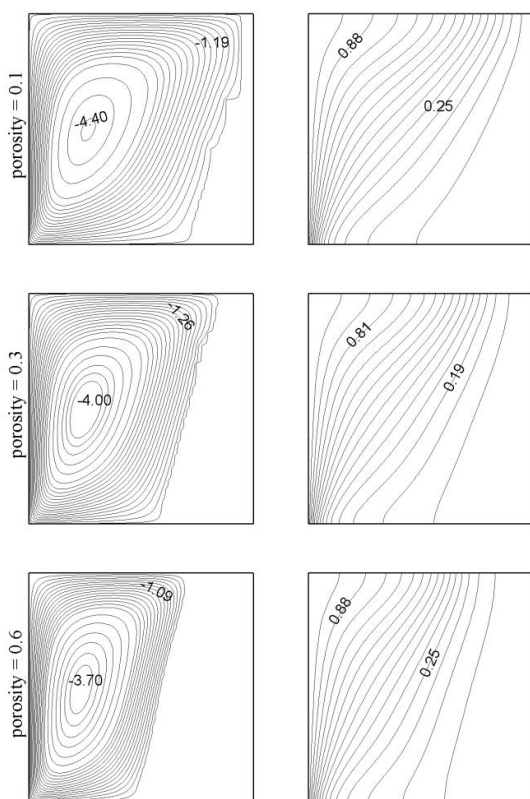


Fig. 3 Streamlines (left) and isotherms (right) at different porosity ( $Ra = 100$ ,  $\varphi = 0.02$ ,  $SteFo = 1$ )

شکل 3 خطوط دما ثابت (راست) و خطوط جریان (چپ) به ازای تخلخل‌های متفاوت در  $(Ra = 100, \varphi = 0.02, SteFo = 1)$

که  $\Pi$  می‌تواند  $\Psi$  یا  $\theta$  باشد و  $n$  شمارنده تکرار در هر گام زمانی است. شرط برقراری حالت پایا که با اتمام روند ذوب در محفظه و برابر شدن گرمای ورودی و خروجی از محفظه به علت عدم جذب گرمای نهان توسط نانو ماده پس از ذوب کامل محقق می‌شود، با معادله (12) کنترل شده است:

$$\left| \frac{\overline{Nu}_h^{nt} - \overline{Nu}_c^{nt}}{\overline{Nu}_h^{nt}} \right| \leq 10^{-4} \quad (12)$$

که در آن  $\overline{Nu}_c$  و  $\overline{Nu}_h$  به ترتیب معرف عدد نوسلت در مرزهای گرم و سرد بوده و  $nt$  نشانگر زمان کل در گام زمانی مورد نظر می‌باشد. پس از بررسی گام‌های زمانی متفاوت و کنترل پارامترهای اثرگذار بر مسأله، گام زمانی 0.009 برای حل مسأله انتخاب شد.

## 4- بحث در نتایج

برای اطمینان از صحت کد کامپیوتری نوشته شده، مقایسه‌ای با مرجع [28] برای ذوب در محفظه مربعی متخلخل انجام گرفته است. تغییرات عدد  $\overline{Nu}_h$  در محفظه با زمان بدون بعد به ازای  $Ra = 50, \varphi = 0.1$ ، برای کار حاضر و مرجع فوق در شکل 2 ارائه شده است.

همان‌طور که از این شکل مشخص است مشابهت قابل قبولی در خصوص تغییرات عدد نوسلت با زمان در هر دو کار وجود دارد. البته اندک تفاوت ایجاد شده را می‌توان به غیر هم‌سان بودن شیوه حل و نحوه مدل‌سازی ربط داد. همچنین مدت زمان بی بعد  $(SteFo)$  لازم جهت ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده در محفظه فوق به ازای  $\varphi = 0$  و در دو عدد رایلی مختلف برای کار حاضر و مقاله تسنیم و همکاران [28] در جدول 5 ارائه شده است. همان‌طور که از این جدول مشخص است، در این مورد نیز تطابق کاملاً مناسبی بین نتایج مشاهده می‌گردد. بعد از اطمینان از عملکرد کد رایانه‌ای به بررسی قسمت‌های مختلف مسأله حاضر پرداخته می‌شود.

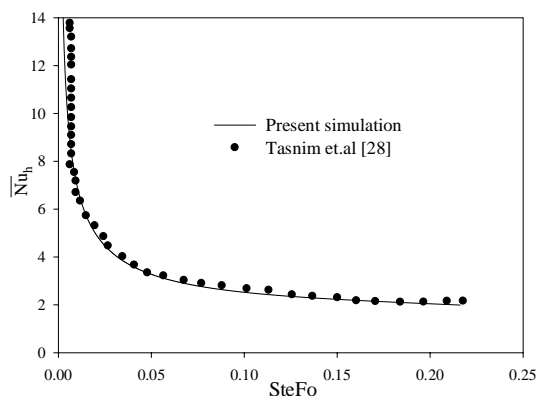


Fig. 2 Validation of the present code for melting in the square porous cavity against other researchers ( $\varphi = 0.1$ ,  $Ra = 50$ )

شکل 2 تغییرات عدد نوسلت  $\overline{Nu}_h$  در محفظه به ازای  $Ra = 50$ ،  $\varphi = 0.1$  (کار حاضر و تسنیم [28]) با عدد بدون بعد زمان  $(SteFo)$

جدول 5 مدت زمان لازم جهت ذوب کامل نانومواد در محفظه  $(SteFo)$  به ازای  $Ra = 12.5, 50$ ،  $\varphi = 0$ ، برای کار حاضر و مقاله تسنیم [28]

Table 5 melting time of nano-pcm in cavity for this work against paper presented by Tasnim et. al [28] ( $\varphi = 0, \varepsilon = 0.3, Ra = 12.5, 50$ )

$(SteFo)_{Ra=12.5}$	$(SteFo)_{Ra=50}$	تحقیق
0.51	0.3	تسنیم و همکاران [28]
0.48	0.29	کار حاضر

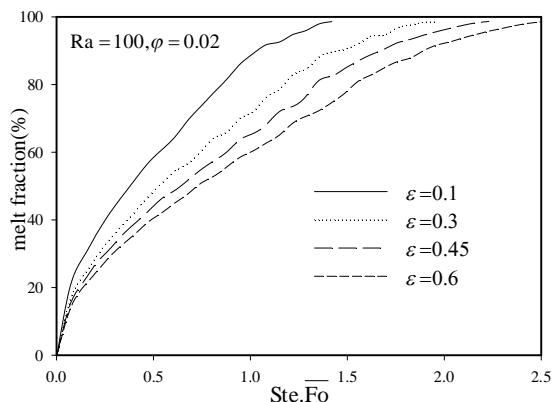


Fig. 4 Nano-PCM melting percent in cavity over time for different porosity ( $Ra = 100, \phi = 0.02$ )

شکل 4 مقدار درصد ذوب نانو ماده در محفظه با گذشت زمان  $(Ste.Fo)$  به ازای  $(Ra = 100, \phi = 0.02)$  در  $\epsilon = 0.1, 0.3, 0.45, 0.6$

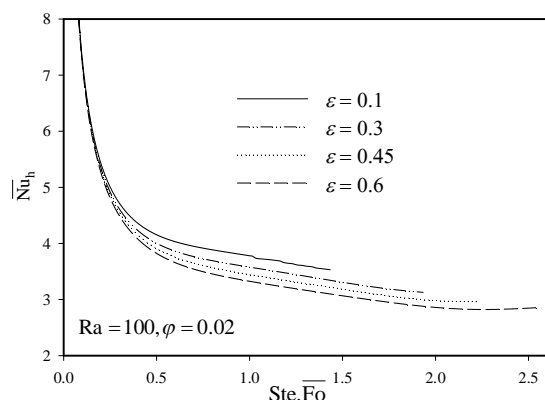


Fig. 5 Variation of the hot wall average Nusselt number with time for different porosity ( $Ra = 100, \phi = 0.02$ )

شکل 5 تغییرات عدد نوسلت میانگین در دیوار گرم محفظه با گذشت زمان در محیط‌هایی با تخلخل متفاوت  $(Ra = 100, \phi = 0.02)$

محفظه تا  $Ste.Fo = 2$  به تأخیر افتاده است. نکته دیگر قابل ذکر در این شکل آن است که میزان ذوب در زمان‌های ابتدایی به ازای اعداد رایلی مختلف تقریباً به صورت مشابه افزایش می‌یابد و با گذر زمان و شکل‌گیری میدان دمایی با شدت اختلاف لازم برای ذوب نانو ماده تأثیر عدد رایلی بیشتر نمایان شده است. تغییرات نوسلت موضعی،  $Nu$ ، در دیوارهای سمت چپ و راست به ازای  $Ra=250$  در دو زمان  $Ste.Fo = 0.5, 1.5$  در شکل 9 آمده است.

با دقت در این شکل مشخص است که در  $Ste.Fo = 0.5$  به علت عدم رسیدن خط ذوب به دیواره سمت راست، انتقال حرارتی از این دیواره وجود ندارد، اما پس از رسیدن خط ذوب به دیواره سمت راست در  $Ste.Fo = 1.5$  مقدار  $Nu$  در آن از صفر بزرگتر شده است. در خصوص  $Nu$  در دیواره گرم نیز کاهش آن با افزایش زمان کاملاً مشهود است. از سوی دیگر همان‌گونه که انتظار می‌رود در دیوار گرم میزان عدد نوسلت موضعی از پایین دیواره به بالای آن در حال کاهش است که دلیل آن کاهش اختلاف دما در دیوار گرم و ماده مجاور با حرکت از پایین محفظه به بالای آن با توجه به انبساط سیال سردتر با چگالی کمتر در پایین محفظه و سیال گرم‌تر در بالای آن می‌باشد. در خصوص دیوار سرد نیز می‌توان به صورت مشابه دلیل بیشتر بودن عدد

نتایج جدول 6 نشانگر افزایش درصد ذوب در در یک زمان خاص با کاهش تخلخل می‌باشد. به عنوان نمونه به ازای زمان  $Ste.Fo = 1.5$  در  $\epsilon = 0.1$  کل نانوماده درون محفظه ذوب شده است، حال آنکه در  $\epsilon = 0.3$  و  $\epsilon = 0.6$  به ترتیب درصد ذوب در محفظه برابر 90.5 و 77.4 است. برای تأیید افزایش انتقال گرما با کاهش تخلخل، در شکل 5 تغییرات نوسلت میانگین  $Nu$ ، در دیواره گرم با زمان آمده است. از سوی دیگر علت کاهش مقدار عددی نوسلت میانگین با زمان در این دیواره را می‌توان به کاهش اختلاف دما در دیواره و محیط با افزایش زمان نسبت داد.

در ادامه برای بررسی روند ذوب در محفظه با زمان، به ازای پارامترهای ثابت رایلی، نسبت حجمی ذرات نانو و تخلخل محیط در شکل 6 خطوط دما ثابت و جریان با گذشت زمان ارائه شده‌اند. نکته قابل برداشت از نمودارهای این شکل افزایش قدرت گردابه‌ها و مکانیزم انتقال گرمای جابجایی آزاد با افزایش زمان می‌باشد و دلیل آن افزایش اختلاف دما در بالا و پایین محفظه با گذر زمان است. همان‌گونه که از شکل‌های 4 و 5 مشخص است زمان پایا شدن عدد نوسلت در محفظه تقریباً همان زمان تکمیل فرایند ذوب در محفظه است و با توجه به آن که پس از اتمام ذوب کل ماده درون محیط متخلخل اشباع کننده محفظه دیگر گرمای نهان جهت تغییر فاز جذب نمی‌شود، کاملاً منطقی است. البته اندک تفاوت ایجاد شده به علت پایا شدن ورود و خروج انتقال گرما در محفظه پس از ذوب نانوماده است.

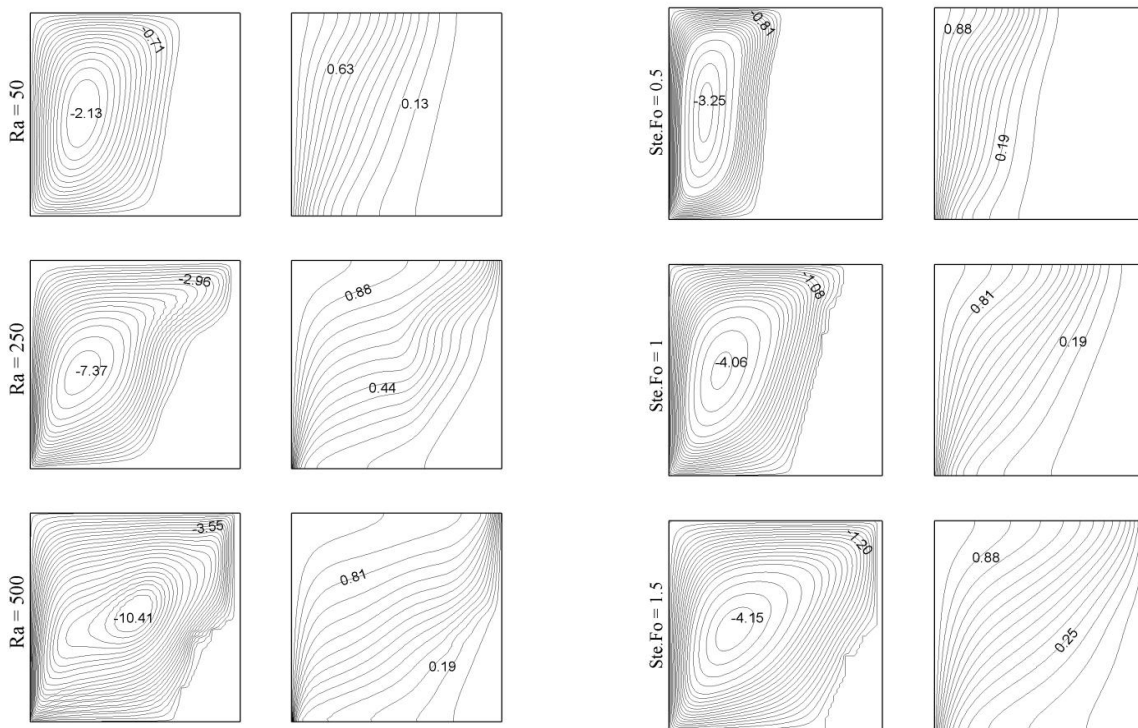
#### 2-4- اثر تغییر عدد رایلی ( $Ra$ )

هدف از ارائه این بخش بررسی تأثیر تغییر  $Ra$  بر روند و مدت زمان ذوب است. به این منظور بررسی‌ها به ازای مقادیر ثابت  $\epsilon = 0.3, \phi = 0.02$  در بازه  $50 \leq Ra \leq 500$  انجام شده است. در شکل 7 خطوط جریان و دما ثابت در محفظه برای زمان بی بعد  $Ste.Fo = 1$  در سه مقدار متفاوت  $Ra=50, 250, 500$  ارائه شده است. این شکل بیانگر افزایش قدرت مکانیزم جابجایی و افزایش قدرت گردابه‌ها با افزایش عدد رایلی است. این موضوع پیشروی بیشتر ذوب در بالای محفظه به خصوص در اعداد رایلی بزرگ را به همراه داشته است. تغییر شکل خطوط دما ثابت از حالت عمودی به افقی نیز تأیید کننده غالب شدن انتقال حرارت جابجایی با افزایش رایلی است. برای بررسی دقیق تأثیر افزایش عدد رایلی بر میزان ذوب با گذشت زمان در شکل 8 این تغییرات نمایش داده شده است. از این شکل مشخص است که همواره در یک زمان ثابت به ازای عدد رایلی بزرگتر مقدار بیشتری از نانو ماده ذوب شده است. به عنوان نمونه در  $Ste.Fo = 1.5$  به ازای  $Ra=500$  فرایند ذوب کل ماده تکمیل شده است در حالی که در  $Ra=50$  ذوب کامل نانو ماده در

جدول 6 درصد و اختلاف درصد ذوب در تخلخل و زمان‌های بی بعد مختلف به ازای  $Ra = 100, \phi = 0.02$  در محفظه

Table 6 Melt fraction (Mf) and the change of Melt fraction ( $\Delta Mf = Mf_{\epsilon=0.1} - Mf$ ) for different porosity and dimensionless time in cavity.  $Ra = 100, \phi = 0.02$

$\epsilon = 0.6$	$\epsilon = 0.3$	$\epsilon = 0.1$	درصد ذوب	$Ste.Fo$
60.4	72	89.2	Mf	1
28.8%	17.2%	0	$\Delta Mf$	
77.4	90.5	100	Mf	1.5
22.6%	9.5%	0	$\Delta Mf$	
92.6	100	100	Mf	2
7.4%	0%	0	$\Delta Mf$	
98.5	100	100	Mf	2.5
1.5%	0%	0	$\Delta Mf$	

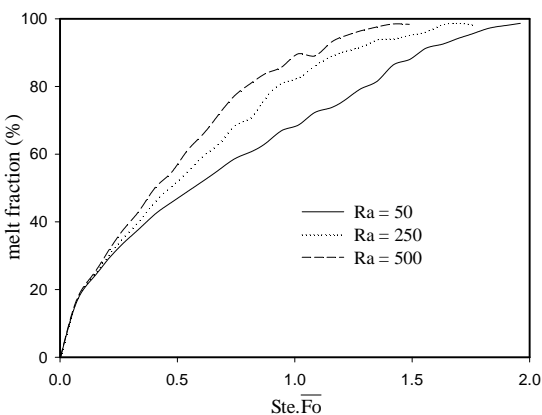


**Fig.7** Streamlines (left) and isotherms (right) at different Rayleigh numbers ( $Ste\overline{Fo} = 1, \varphi = 0.02, \varepsilon = 0.3$ )

شکل 7 خطوط دما ثابت (راست) و جریان (چپ) به ازای  $Ra = 50, 250, 500$  در  $Ste\overline{Fo} = 1, \varphi = 0.02, \varepsilon = 0.3$

**Fig.6** Streamlines (left) and isotherms (right) at different times ( $Ra = 100, \varphi = 0.02, \varepsilon = 0.3$ )

شکل 6 خطوط دما ثابت (راست) و جریان (چپ) در زمان‌های مختلف ( $Ra = 100, \varphi = 0.02, \varepsilon = 0.3$ )



**Fig .8** Nano-PCM melting percent in cavity over time ( $Ste\overline{Fo}$ ) for different Rayleigh numbers ( $\varphi = 0.02, \varepsilon = 0.3$ )

شکل 8 مقدار ذوب نانو مواد در محفظه با گذشت زمان بدون بعد ( $Ste\overline{Fo}$ ) به ازای  $Ra = 50, 250, 500$  در  $(\varphi = 0.02, \varepsilon = 0.3)$

قدرت گردابه‌ها و مکانیزم انتقال گرمای جابجایی، قابل چشم‌پوشی است به نحوی که اثر چندانی در سرعت بخشی بر روند ذوب نداشته و حتی مقدار ناچیزی سرعت ذوب را می‌کاهد. شکل 12 نشان دهنده کاهش انتقال گرما به محفظه از دیواره سمت راست با افزایش نسبت حجمی ذرات نانو است که با توجه به توضیحات قبلی در خصوص کاهش میزان ذوب در محفظه با افزایش نسبت حجمی ذرات نانو کاملاً منطقی است.

نوسلت در نقاط بالاتر دیوار را توجیه نمود. شکل 10 تصویر خط ذوب و افزایش انحنای آن در محفظه را با گذشت زمان بدون بعد در سه زمان مختلف به ازای  $Ra = 100, 500$  ارائه می‌دهد.

صاف بودن خط ذوب در شروع فرایند ذوب نشانگر غالب بودن انتقال گرمای رسانشی است. حال آنکه با افزایش زمان در قسمت بالای محفظه قدرت انتقال گرمای جابجایی افزایش یافته و سرعت ذوب در آن قسمت نسبت به پایین محفظه بیشتر شده است (به خصوص در عدد رایلی بزرگتر) که علت پیشروی بیشتر خط ذوب در بالای محفظه نسبت به پایین آن همین امر می‌باشد. با دقت در شکل 10 به وضوح مشخص است که با گذشت زمان سرعت فرایند ذوب در عدد رایلی بزرگتر افزایش بیشتری داشته است.

### 3-4 اثر تغییرنسبت حجمی ذرات نانو ( $\varphi$ )

در ادامه لازم است اثر افزودن نانو ذرات مس به ماده پایه نیز بررسی شود. به این منظور در شکل 11 نحوه پیشروی خط ذوب در چند زمان مختلف به ازای  $\varphi = 0, 0.05$  با ثابت نگاه داشتن دیگر پارامترهای اثرگذار بر مسأله ( $\varepsilon = 0.3, Ra = 100$ ) ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، افزایش ذرات نانو مدت زمان ذوب سیکلو هگزان را در محفظه کمی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است در شرایط مورد بررسی با توجه به حضور آلومینیوم به عنوان قسمت متخلخل محیط، با توجه به رسانایی گرمایی بالای آن، اثر بهبود رسانایی گرمایی مؤثر نانو مواد با افزودن نانو ذرات مس در مقابل تأثیر منفی حضور نانو ذرات در محیط متخلخل به علت نقش کاهنده

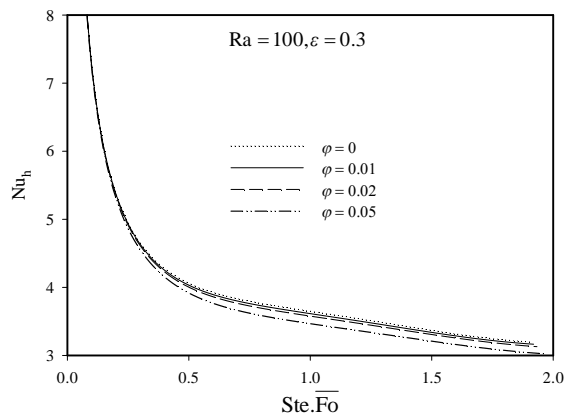


Fig. 12 Variation of the hot wall average Nusselt number with time (Ste.Fo) for different  $\phi$  ( $Ra = 100, \epsilon = 0.3$ )

شکل 12 تغییرات عدد نوسلت میانگین ( $\overline{Nu}_h$ ) در دیوار گرم محفظه با گذشت زمان برای نسبت‌های حجمی مختلف نانوذرات در ( $Ra = 100, \epsilon = 0.3$ )

معادلات بی‌بعد شده سه پارامتر مؤثر وجود داشت که عبارتند از:  $Ra$ ،  $\epsilon$  و  $\phi$ ، اثر تغییر پارامترهای مختلف اشاره شده بر میدان جریان و دما، آهنگ انتقال گرما و مدت زمان لازم جهت ذوب نانو ماده بررسی شده است. نتایج نشان دهنده تأثیرگذاری بالای تغییر تخلخل محیط بر روند و مدت زمان ذوب در محفظه است. حال آنکه تأثیر تغییر درصد حجمی نانو ذرات، تنها ایجاد تاخیر کوچکی در مدت زمان ذوب کامل نانو ماده بوده است. به گونه‌ای که سرعت ذوب نانو ماده در محیط با تخلخل کمتر با ثابت نگاه داشتن دیگر پارامترها بیشتر خواهد بود. حال آن که حضور نانو ذرات در شرایط مورد بررسی با محیط متخلخل از جنس آلومینیوم با رسانایی گرمایی بالا اثر چندانی در فرایند ذوب ندارد. اثر افزایش عدد رایلی افزایش قدرت مکانیزم انتقال گرمای جابجایی در محفظه و به تبع آن افزایش سرعت ذوب در محفظه بوده است.

#### 6- فهرست علائم

$c$	گرمای ویژه ( $Jkg^{-1}C^{-1}$ )
$Fo$	زمان بی بعد
$\overline{Fo}$	زمان بی بعد ویژه
$g$	جاذبه زمین ( $ms^{-2}$ )
$H$	طول ضلع محفظه (m)
$h_{fs}$	گرمای نهان ذوب ( $Jkg^{-1}$ )
$K$	نفوذ پذیری محیط متخلخل ( $m^2$ )
$k$	رسانایی گرمایی ( $Wm^{-1}C^{-1}$ )
$\overline{Nu}$	عدد نوسلت میانگین
$Nu$	عدد نوسلت موضعی
$P$	فشار (Pa)
$Ra$	عدد رایلی
$S$	فاصله افقی بی بعد از دیوار گرم تا خط ذوب ( $s/H$ )
$s$	فاصله افقی از دیوار گرم تا محل خط ذوب (m)
$Ste$	عدد استفان
$T$	دما (C)
$t$	زمان (s)

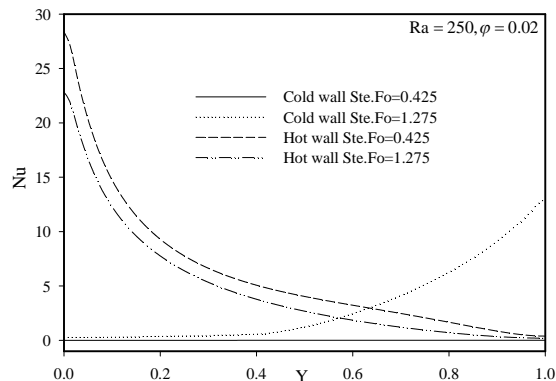


Fig. 9 Local Nusselt number along hot and cold walls of the cavity for different times ( $Ra = 250, \phi = 0.02, \epsilon = 0.3$ )

شکل 9 تغییرات عدد نوسلت موضعی در دیوار گرم و سرد محفظه در دو زمان مختلف به ازای ( $Ra = 250, \phi = 0.02, \epsilon = 0.3$ )

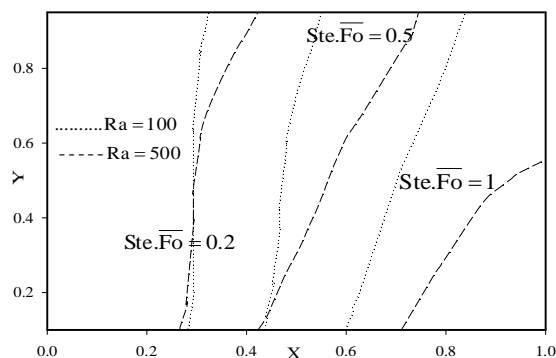


Fig. 10 Melting line advance and shape in cavity over time ( $Ste.Fo = 0.2, 0.5, 1$ ) for ( $Ra = 100, 500, \phi = 0.02, \epsilon = 0.3$ )

شکل 10 نحوه پیشروی و شکل خط ذوب در محفظه با گذشت زمان بدون بعد به ازای ( $Ra = 100, 500, \phi = 0.02, \epsilon = 0.3$ )

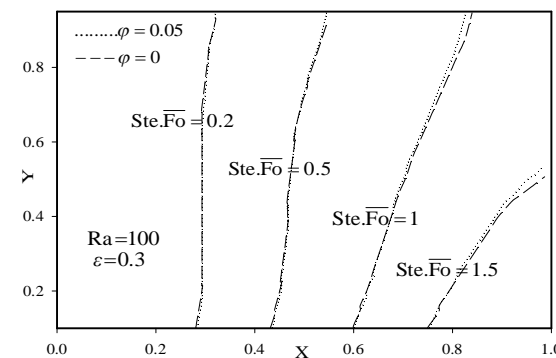


Fig. 11 Melting line advance in cavity over time ( $Ste.Fo = 0.2, 0.5, 1, 1.5$ ) for ( $Ra = 100, \epsilon = 0.3, \phi = 0, 0.05$ )

شکل 11 نحوه پیشروی خط ذوب در محفظه با گذشت زمان بدون بعد به ازای ( $Ra = 100, \epsilon = 0.3, \phi = 0, 0.05$ )

#### 5- نتیجه گیری

در این مقاله ذوب نانو ماده تغییر فزاینده سیکلو هگزان- مس در یک محفظه مربعی متخلخل به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در



- [9] L. R. Mealey, J. H. Merkin, Steady finite rayleigh number convective flows in a porous medium with internal heat generation, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 1068-1080, 2009.
- [10] M. Vynnycky, SH. Kimura, Transient conjugate free convection due to a vertical plate in a porous medium, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 2, No. 38, pp. 219-231, 1955.
- [11] M. R. Islam, K. Nandakumar, Transient convection in saturated porous layers with internal heat generation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, No. 33, pp. 151-161, 1990.
- [12] A. J. Chamkha, A. Muneer, Conjugate heat transfer in a porous cavity filled with nanofluids and heated by a triangular thick wall, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 67, pp. 135-151, 2013.
- [13] Q. Sun, I. Pop, Free convection in a triangle cavity filled with a porous medium saturated with nanofluids with flush mounted heater on the wall, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 2141-2153, 2011.
- [14] R. K. Tiwari, M. K. Das, Heat transfer augmentation in a two-sided lid-driven differentially heated square cavity utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 2002-2018, 2007.
- [15] L. Zalewski, A. Joulin, S. Lassue, Y. Dutil, D. Rousse, Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material, *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 208-219, 2012.
- [16] A. Shukla, D. Buddhi, R.L. Sawhney, Solar water heater with phase change material thermal energy storage medium: a review, *Renewable Sustainable Energy*, Vol. 8, No. 13, pp. 2119-2125, 2009.
- [17] S. Esakkimuthu, A. H. Hassabou, C. Palaniappan, M. Spinnler, J. Blumenberg, R. Velraj, Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications, *Solar Energy*, Vol. 88, pp. 144-153, 2013.
- [18] A. Hasan, S. J. McCormack, M. J. Huang, B. Norton, Characterization of phase change materials for thermal control of photovoltaics using differential scanning calorimetry and temperature history method, *Energy Conversion and Management*, Vol. 81, pp. 322-329, 2014.
- [19] S. Krishnan, S. V. Garimella, S. S. Kang, A novel hybrid heat sink using phase change materials for transient thermal management of electronics, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 2, No. 28, pp. 281-289, 2005.
- [20] M. R. Reid, D. B. Scharfe, R. N. Webb, Computational evolution of a latent heat energy storage system, *Solar Energy*, Vol. 95, pp. 99-105, 2013.
- [21] C. Beckermann, R. Viskanta, Natural convection solid/liquid phase change in porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, No. 31, pp. 35-46, 1988.
- [22] W. Jeng Chang, D. Yang, Natural convection for the melting of ice in porous media in a rectangular enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 2, No. 39, pp. 2333-2348, 1996.
- [23] X. Zhang, T. Hung Nguyen, Melting of ice in a porous medium heated from below, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 2, No. 34, pp. 389-405, 1991.
- [24] Y. Tian, C.Y. Zhao, Thermal and exergetic analysis of metal foam enhanced cascaded thermal energy storage (MF-CTES), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, pp. 86-96, 2013.
- [25] T. X. Li, J. H. Lee, R. Z. Wang, Y. T. Kang, Heat transfer characteristics of phase change nanocomposite materials for thermal energy storage application, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 75, pp. 1-11, 2014.
- [26] M. N. A. Hawlader, M. S. Uddin, M. M. Khan, Microencapsulated PCM thermal energy storage system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 74, pp. 195-202, 2003.
- [27] R. Hossain, S. Mahmud, A. Dutta, I. Pop, Energy storage system based on nanoparticle-enhanced phase change material inside porous medium, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 91, pp. 49-58, 2015.
- [28] S. H. Tasnim, R. Hossain, S. Mahmud, A. Dutta, Convection effect on the melting process of nano-PCM inside porous enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 85, pp. 206-220, 2015.

$u$	سرعت در جهت محور افقی ( $\text{ms}^{-1}$ )
$v$	سرعت در جهت محور عمودی ( $\text{ms}^{-1}$ )
$U$	سرعت بی بعد در جهت محور افقی
$V$	سرعت بی بعد در جهت محور عمودی
$x, y$	مختصات افقی و عمودی (m)
$X$	مختصات بی بعد افقی $x/H$
$Y$	مختصات بی بعد عمودی $y/H$

#### علامه یونانی

$\alpha$	پخشندگی گرمایی ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )
$\phi$	نسبت حجمی نانوذرات به حجم کل سیال
$\varepsilon$	تخلخل محیط
$\theta$	دما بی بعد
$\beta$	ضریب انبساط گرمایی ( $\text{K}^{-1}$ )
$\mu = \rho \nu$	لزجت دینامیکی ( $\text{Nsm}^{-2}$ )
$\psi$	تابع جریان ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )
$\Psi$	تابع جریان بی بعد
$\Delta T$	اختلاف دما در مرزهای گرم و سرد
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\Gamma$	نسبت ظرفیت گرمایی میانگین

#### زیر نویس ها

$c$	دیوار سرد
$f$	سیال
$h$	دیوار گرم
$i$	شرط اولیه یا اندیس جهت افقی نقاط شبکه
max	بیشینه
nf	نانو سیال
nm	نانو ماده
$p$	نانو ذره
pm	محیط متخلخل
pnm	میانگین خاصیت بین نانو ماده و محیط متخلخل

#### 7- مراجع

- [1] K. A. Vafai, *Hand Book of Porous Media*, pp. 1-89, New York, Taylor & Francis Group, 2005.
- [2] D. B. Ingham, A. Bejan, E. Mamut, I. Pop, *Emerging Technologies Techniques in Porous Media*, pp. 1-350, Dordrecht, Kluwer Academic, 2004.
- [3] D. B. Ingham, I. Pop, Book, Vol.1 and 2, *Transport Phenomena in Porous Media*, pp. 1-500, Pergamon, Oxford, 2005.
- [4] D. A. Nield, A. Bejan, *Convection in Porous Media*, Third edition, pp. 1-479, North Carolina, USA, Duke University Durham, 2006.
- [5] N. H. Saeid, Conjugate natural convection in a vertical porous layer sandwiched by finite thickness walls, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 200-216, 2007.
- [6] A. J. Chamkha, I. C. Khalil Khanafer, Natural convection from an inclined plate embedded in a variable porosity porous medium due to solar radiation, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 41, pp. 73-81, 2002.
- [7] I. Pop, N. H. Saeid, Mixed convection from two thermal sources in a vertical porous layer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 4150-4160, 2005.
- [8] A. T. Grosan, B. C. Revnic, I. Pop, D. B. Ingham, Magnetic field and internal heat generation effects on the free convection in a rectangular cavity filled with a porous medium, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 1525-1533, 2009.

- 46, pp. 3639-3653, 2003.
- [32] H. C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 4 , pp. 571-581, 1952.
- [33] S. V. Patankar, *Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer*, pp.1-240, USA, Innovative Research, 1996.
- [34] K. A. Hoffmann, S. T. Chiang, *Computational Fluid Dynamics For Engineers*, pp. 358-420, Kansas, USA, Wichita State University, 1993.
- [29] A. Faghri ,Y. Zhang , *Transport phenomena in multiphase systems*, pp. 500-510, Burlington, Elsevier Academic Press, 2006
- [30] E. Abu-Nada, Effects of variable viscosity and thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ewater nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 679-690, 2009.
- [31] K. Khanafer, K. Vafai , M. Lightstone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.