

## مدلسازی فرآیند ذوب مواد تغییر فازدهنده در محیط متخلخل بهبود یافته با نانو ذرات

مجتبی ملکی<sup>۱\*</sup>، محمد قلم باز<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجو ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران  
<sup>۲</sup>استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: پاییز ۹۶ پذیرش: پاییز ۹۶

### چکیده

در این پژوهش فرآیند ذوب مواد تغییر فازدهنده بهبود یافته با نانوذرات در محیط‌های متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. معادلات حاکم با استناد به پارامترهایی همچون رایلی، استفان، پرائتل، دارسی به فرم بی‌بعد خود منتقل شدند. به منظور مدلسازی فرآیند تغییر فاز از روش تعادل حرارتی استفاده شده است. سپس به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار کامسول حل شده است. به عنوان هدف نهایی، اثر افزودن نانوذرات به مدلسازی فرآیند ذوب مواد تغییر فازدهنده در محیط‌های متخلخل مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات مس به سیال پایه غیرفلزی اکتادکان با یک فوم سرامیکی باعث افزایش رسانش سیال پایه و همچنین بهبود انتقال حرارت و فرآیند ذوب می‌شود.

\*عهده‌دار مکاتبات: [mojtaba.maleki99@yahoo.com](mailto:mojtaba.maleki99@yahoo.com)

کلمات کلیدی: مواد تغییر فازدهنده، نانوذرات، متخلخل، ذوب

### ۱- مقدمه

عملکرد سیستم‌های PCM مبتنی بر فوم در دسترس است و با دو روش عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج از افزایش انتقال حرارت با توزیع حرارت در ماده متخلخل است [۱۱،۵]. همچنین لندی و همکاران [۱۲] در یک کار تجربی برای مواد تغییر فازدهنده در یک فوم آلومینیومی نشان دادند که تخلخل و اندازه حفره ها، هر دو بر مسئله اثر می‌گذارند. همچنین تیان و ژائو [۱۳] آزمایش مشابهی را با فوم‌های مس با اندازه حفره‌های مختلفی انجام دادند و نشان دادند که اندازه حفره در زمان ذوب شدن بر فرآیند ذوب تاثیر گذار است.

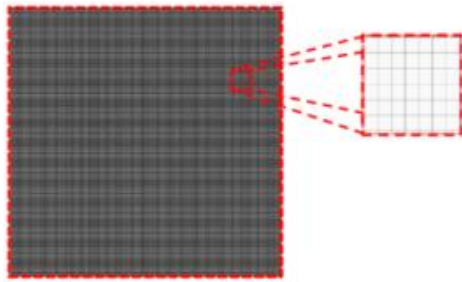
زنگ و همکاران [۱۴] نشان دادند که انتقال حرارت هدایتی مواد تغییر فازدهنده با استفاده از نانوذرات نقره به طور قابل توجهی افزایش می‌یابند. همچنین وو و همکاران [۱۵] نشان دادند با استفاده از کسر حجمی کوچکی از نانو ذرات مس در مواد تغییر فازدهنده، زمان گرمایش و خنک کردن تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد.

در این مقاله معادلات حاکم با روش تعادل برای فرآیند ذوب مواد تغییر فازدهنده در محیط متخلخل ارائه شدند و به حالت بی‌بعد خود منتقل شدند. در آخر اثر افزودن نانوذرات به فرآیند ذوب مواد تغییر فاز-دهنده با روش تعادل حرارتی بررسی شده است.

### ۲- روش مدلسازی

سیستم های مدیریت حرارتی مبتنی بر ذخیره سازی حرارت مواد تغییر فاز (PCMs) می‌تواند به طور گسترده‌ای در انواع مختلف استفاده شود. زمینه‌های کاربردی از جمله خنک کننده میکرو الکترونیک، ذخیره سازی انرژی خورشیدی، ذوب آهن، هسته‌ای و بازیافت حرارت ضایعات را خواهند داشت [۵-۱].

PCM در طول فرآیند تغییر فاز مقدار قابل توجهی حرارت را می‌تواند جذب یا آزاد کنند. این ذخیره کردن انرژی در حالی است که در طول انتقال فاز دما ثابت است. این ویژگی می‌تواند بسیار مفید باشد. با این حال، PCM ها به طور کلی از انتقال حرارت هدایتی پایین به صورت ذاتی رنج می‌برند که می‌تواند باعث کاهش نرخ ذوب و ناهموار شدن ذوب گردد [۸-۵]. در این چند سال اخیر تکنیک‌های افزایش هدایت حرارتی این مواد توسعه یافته اند، از جمله: افزودن زیاد هدایت کننده نانو فیلرها [۹،۶]. نفوذ پذیری مواد تغییر فازدهنده در گرافیت [۸،۱۰] و فوم های فلزی [۷-۵] را می‌توان نام برد. اخیراً نفوذ مواد تغییر فازدهنده در فوم-های فلزی به علت هدایت حرارتی بالا فوم‌های فلزی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۲: شماتیکی از مش بندی مسئله (مش بندی مربعی)

## ۲-۲- معادلات حاکم بر مسئله

معادلات حاکم برای فرآیند ذوب مواد تغییرفازدهنده بهبود یافته با نانو ذرات در محیط متخلخل با روش تعادل حرارتی مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور ساده سازی معادلات فیزیکی و ریاضی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده اند:

(۱) با توجه به محدود بودن اختلاف دما، انتقال حرارت در ماده تغییرفازدهنده به کمک مکانیزم های جابه جایی و هدایت صورت می گیرد و از اثرات تشعشع صرف نظر شده است.

(۲) به دلیل کوچک بودن تغییرات دما و فشار در فرآیند ذوب خواص ترموفیزیکی سیال انتقال دهنده حرارت و ماده تغییر فاز دهنده ثابت فرض می شود.

(۳) به دلیل کوچک بودن ضریب انبساط حرارتی از تغییرات حجمی ناشی از تغییر فاز صرف نظر می گردد.

(۴) به دلیل پایین بودن سرعتها در فرآیندهای جابه جایی طبیعی، تلفات ویسکوزیته در سیال انتقال دهنده حرارت بسیار ناچیز در نظر گرفته شده و قابل صرف نظر کردن می باشد.

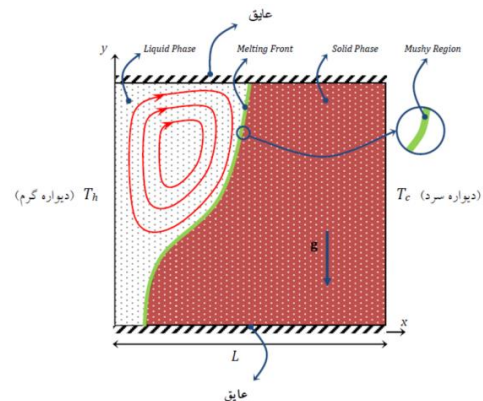
(۵) جریان سیال به صورت دوبعدی، هیدرودینامیکی، نیوتنی، آرام و تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است.

با توجه به فرضیات ذکر شده در مدلسازی فیزیکی ذوب ماده تغییر-فازدهنده، معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی به ترتیب به صورت زیر به دست آمدند [۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

## ۱-۲- بیان مسئله

شکل ۱ شماتیکی از مدل فیزیکی و شرایط مرزی مسئله در مختصات کارتزین را ارائه می دهد. یک محفظه بسته مستطیل شکل با طول و ارتفاع  $L$  در نظر بگیرید. محفظه از یک ماده تغییرفازدهنده بهبود یافته با نانو ذرات که در یک محیط متخلخل قرار دارد، تشکیل شده است. مطابق با فرضیات ارائه شده برای شرایط مرزی شکل ۱ دیواره سمت چپ در دمای گرم  $(T_h)$  و دیواره سمت راست در دمای سرد  $(T_c)$  قرار دارد. به طوری که  $T_h > T_f > T_c$  باشد. اختلاف دمای صفحه گرم و دمای ذوب جامد محدود (کمتر از ده درجه سلسیوس) در نظر گرفته شده است. بنابراین، برای مدلسازی نیروی شناوری از مدل بوزینسک استفاده شده است. به دلیل اختلاف دمای محدود، از تغییر خواص ترموفیزیکی در اثر تغییر دما صرف نظر می شود. همچنین به منظور تحلیل رفتار نانوسیال از روش همگن و برای محیط متخلخل از معادلات بریکمن با روش تعادل حرارتی استفاده شده است.



شکل ۱: نمای شماتیک از مدل فیزیکی و شرایط مرزی

برای مدلسازی از نرم افزار کامسول استفاده شده است. حل مسئله بر اساس روش المان محدود انجام شده است. روش المان محدود در زمینه سیالات یک روش نوین به حساب می آید. محاسبات برای یک شبکه ثابت مطابق شکل ۲ انجام شده است. شکل ۲ بیانگر شبکه ایجاد شده در محفظه مربعی است. ابعاد این محفظه بسته (به صورت بدون بعد)  $1 \times 1$  یک بوده (محفظه مربعی بسته) و همان طور که مشاهده می شود، شبکه و گره های ایجاد شده به صورت یکنواخت می باشد. علت ایجاد شبکه یکنواخت و متمرکز نشدن بر گوشه های محفظه، این است که در ابتدای فرآیند ذوب، انتقال حرارت هدایتی، انتقال حرارت غالب خواهد بود و پس از گذشت زمان و با فاصله گرفتن از گوشه های محفظه (به پیش رفتن فرآیند ذوب) انتقال حرارت همرفتی، بر انتقال حرارت هدایتی غلبه کرده و در نهایت انتقال حرارت غالب بر محفظه خواهد بود. همچنین در این مطالعه تمرکز بر بررسی افزودن نانوذرات در معادلات متخلخل بریکمن است. از این رو در این مطالعه نیاز به مطالعه بیشتر (انتخاب نوع مش با گره های غیر یکنواخت) وجود ندارد. برای ران کردن معادلات از ابر رایانه های دانشگاه صنعتی امیر کبیر استفاده شده است. ماشین های مورد استفاده از نوع ۱۶ هسته ای بوده است.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial V}{\partial F_0} + \frac{1}{2} \left( U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = - \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \frac{Pr}{\varepsilon} \times \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \left( \frac{\partial V}{\partial X} \left( \mu_r \frac{\partial V}{\partial X} \right) + \frac{\partial V}{\partial Y} \left( \mu_r \frac{\partial V}{\partial Y} \right) \right) + \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \frac{Pr}{Da} \times \frac{\bar{K}}{K(X, Y)} V + \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} VS(T) + PrRa \theta_{nf} \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_{bf}} \quad (7)$$

و معادله انرژی به روش تعادل حرارتی:

$$\left[ \frac{\partial \theta}{\partial F_0} + \frac{(\rho c)_{nf}}{(\rho c)_{m,nf}} \left( U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right] = \frac{a_{m,nf}}{a_{bf}} \left( \frac{\partial}{\partial X} \left( k_r \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( k_r \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right) - \frac{\varepsilon (c_p)_{bf} \rho_{nf} L_{nf}}{(\rho c_p)_{m,nf} L_{bf} Ste} \frac{1}{\partial F_0} \frac{\partial \phi(\theta)}{\partial \theta} \quad (8)$$

و معادله انرژی به روش تعادل حرارتی:

$$\left[ \frac{\partial \theta}{\partial F_0} + \frac{(\rho c)_f}{(\rho c)_{m,f}} \left( U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right] = \frac{a_{m,f}}{a_f} \left( \frac{\partial}{\partial X} \left( k_r \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( k_r \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right) - \frac{\varepsilon (c_p)_f \rho_f L_f}{(\rho c_p)_{m,f} L_f Ste} \frac{1}{\partial F_0} \frac{\partial \phi(\theta)}{\partial \theta}$$

در ادامه برای به دست آوردن خواص مهم در معادلات از رابطه های زیر استفاده می کنیم:

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-C)(\rho c_p)_{bf} + C(\rho c_p)_{bf} \quad (9)$$

$$k_{nf}(\varphi) = \varphi k_{nf,l} + k_{nf,s}(1-\varphi) \quad (10)$$

$$k_{m,nf}(\varphi) = (1-\varepsilon)k_p + \varepsilon k_{nf} \quad (11)$$

$$(\rho c)_{m,nf} = (1-\varepsilon)(\rho c)_p + \varepsilon(\rho c_p)_{nf} \quad (12)$$

$$\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho_{nf}}{\varepsilon} \frac{1}{2} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial x} \left( \mu_{nf}(\varphi) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} \left( \mu_{nf}(\varphi) \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\mu}{\kappa} v + S(T)_{,u}$$

(2)

$$\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho_{nf}}{\varepsilon} \frac{1}{2} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial x} \left( \mu_{nf}(\varphi) \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial v}{\partial y} \left( \mu_{nf}(\varphi) \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\mu}{\kappa} v + s(T)_{,v} + \rho_{nf} g \beta (T - T_F) \quad (3)$$

برای روش تعادل حرارتی دمای سیال و ماتریس جامد متخلخل در هر لحظه یکسان فرض می شود و معادله انرژی آن در قالب یک رابطه است، که خواص معادل را در هر دو قسمت نشان می دهد:

$$\left( \rho c \right)_{m,nf} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c p)_{nf} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \left( \frac{\partial T}{\partial x} \left( k_{m,nf}(\varphi) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left( k_{m,nf}(\varphi) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) + \varepsilon \rho_{nf} L_{nf} \frac{\partial \phi(T)}{\partial T} \quad (4)$$

به منظور ارائه شکل استاندارد معادلات فوق (پیوستگی، مومنتوم و انرژی)، میبایست معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی را به شکل بدون بعد خود منتقل نمود. برای بی بعد سازی از روابط زیر استفاده شده است:

$$X = \frac{x}{L_y}, Y = \frac{y}{L_y}, U = \frac{u L_y}{\alpha_{bf}}, V = \frac{v L_y}{\alpha_{bf}}, \theta_{nf} = \frac{T_{nf} - T_c}{T_h - T_f}, \theta_p = \frac{T_p - T_c}{T_h - T_f}, P = \frac{p L_y^2}{\rho_{bf} \alpha_{bf}^2}, Pr = \frac{v}{\alpha}, F_0 = \frac{u_{bf} L_y}{\alpha}, Ra = \frac{g \beta (T_h - T_c) L_y^3 Pr}{v^2}, S(T) = \frac{s(T) L_y^2}{\rho_{bf} \alpha_{bf}}, \mu_r = \frac{\mu_{nf}(\varphi)}{\mu_{nf}}, \alpha_r = \frac{\alpha(\varphi)}{\alpha_l}, Ste = \frac{(C_p)_{bf} (T_h - T_f)}{L_{bf}}, k_r = \frac{k_{nf}(\varphi)}{k_{nf}}, Nh_p = \frac{h_{np} L^2}{k_{bf}}, \gamma_p = \frac{k_{bf}}{k_p}, \gamma_{nf} = \frac{(\rho c)_{bf}}{(\rho c)_{nf}}$$

(5)

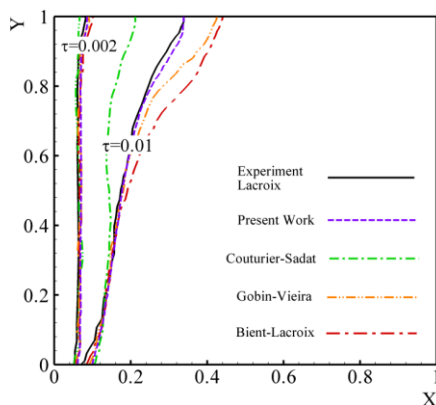
بنابراین در این مقاله معادلات حاکم بر فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در محیط متخلخل با روش تعادل به صورت بی بعد خود منتقل شدند و به صورت زیر ارائه شدند:

## ۴- اعتبارسنجی نتایج

اعتبارسنجی مسئله برای دو قسمت انجام شده است. از آنجا که مسئله ترکیبی از دو موضوع ذوب مواد تغییرفازدهنده و ماده متخلخل است، برای هر موضوع به صورت جداگانه اعتبارسنجی صورت گرفته است.

ابتدا به اعتبارسنجی قسمت تغییر فاز می‌پردازیم: اولین مقایسه بین نتایج پژوهش حاضر، نتایج کد المان محدود با نتایج مقاله معتبر گوبین و همکاران [۲۳] می‌باشد. در مقاله گوبین نتایج چندین حل عددی و تجربی دیگر با هم مقایسه شدند که محققین به منظور اعتبار بخشیدن به پژوهش‌های خود، نتایج خود را با نتایج این مقاله مقایسه می‌کنند. در این مطالعه گوبین و همکاران [۲۳] مواد تغییر فاز دهنده اکتادکان را در یک محفظه مربعی از جنس اکتادکان که سمت چپ آن در دمای گرم و سمت راست آن در دمای سرد و بالا و پایین هر دو عایق قرار دارد، را مورد بررسی قرار دادند و اعداد بی‌بعد رایلی، پراتل، دارسی و استفان را

به ترتیب برابر  $Ra = 1 \times 10^7$  و  $Pr = 50$  و  $Da = 10^{-4}$  و  $Ste = 0.1$  انتخاب شده‌اند. مطالعه گوبین و همکاران [۲۳] یکی از معتبرترین مقالات در زمینه ذوب و تغییر فاز است که چندین محقق و نویسنده در پژوهش‌های خود، نتایج خود را برای پیش‌بینی جبهه ذوب اکتادکان در یک محفظه مربعی گزارش داده و مقایسه نموده‌اند. اکتادکان از دسته مواد تغییر فاز دهنده غیر فلزی به نام آلکان‌ها هستند و آلکان‌ها از مهم‌ترین رایج‌ترین دسته مواد تغییر فاز دهنده غیر فلزی هستند. ما با تغییراتی که در پارامترهای ورودی ناحیه خمیری داشتیم، توانستیم به مناسب‌ترین مقدار  $A_{mush} = 1.5^5$  و همچنین  $\Delta T = 0.04$  برای این مسئله بعد از چند حل دست پیدا کنیم که با توجه به طولانی بودن زمان حل‌ها یک نتیجه خوب می‌باشد. خلاصه نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج حل عددی حاضر توافق بسیار خوبی با بررسی‌های تجربی و عددی دارد.



شکل ۳: (a) و (b) اعتبارسنجی جبهه ذوب با حل معتبر گوبین و همکاران [۲۳].

برای اعتبارسنجی و تعیین صحت نتایج حاصل شده در مطالعه حاضر در حوزه متخلخل نیز نیاز است مقایسات و بررسی‌های با پژوهش‌های قبلی صورت گیرد. در همین راستا در این قسمت نیز به مقایسه نتایج جداگانه بخش متخلخل این پژوهش با مقالات متخلخل معتبر پیشین صورت می‌گیرد. در شکل ۴ مقایسه‌ای بین عدد ناسلت محلی برای دیواره پایین و

$$k_r = (1 - \varepsilon) \frac{k_p}{k_{mf,l}} + \varepsilon \frac{k_{mf}}{k_{mf,l}} \quad (13)$$

## ۳- استقلال شبکه

برای بررسی استقلال حل در روش تعادل حرارتی از اندازه شبکه محاسباتی در حالت مش‌بندی منظم چندین سایز مختلف شبکه با در نظر گرفتن اعداد بی‌بعد  $\gamma = 1$ ،  $Pr = 50$ ،  $Ste = 0.1$ ،  $Ra = 1 \times 10^{10}$  مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ثابت ناحیه خمیری و اختلاف دما در ناحیه خمیری با چندین ولیدت گرفتن و بررسی مطالعه‌های [۲۱] و [۲۲] به ترتیب  $A_{mush} = 1.5 \times 10^5$  و  $\Delta T = 0.04$  در نظر گرفته شد. انجام محاسبات در شبکه مش‌بندی با استفاده از ابررایانه انجام شد که برای هر حل ۱۶ هسته پردازشی GH ۲/۲ استفاده شده است. برای سایز شبکه  $175 \times 175$  زمان مورد نیاز برای ۹۰ درصد از ماده تغییر فاز دهنده ۸ ساعت و ۱۳ دقیقه و برای شبکه  $75 \times 75$ ، یک ساعت و ۲۵ دقیقه بوده است. زمان مورد نیاز برای ذوب ۹۰ درصد از ماده تغییر فاز دهنده برای اندازه‌های دیگر شبکه با توجه به ابعاد شبکه بین این دو زمان ذکر شده می‌باشد. جزئیات زمان لازم برای بررسی استقلال حل از اندازه شبکه در جدول ۱ آمده است. کسر حجمی ذوب نیز برای سایز متفاوت شبکه در جدول ۲ آمده است. با توجه به جدول ۲ همگرایی مسئله در شبکه  $125 \times 125$  ایجاد شده است. در نتیجه نتایج کار حاضر با سایز شبکه  $125 \times 125$  انجام گرفت.

جدول ۱: بررسی استقلال حل از اندازه شبکه با روش تعادل حرارتی

سایز	زمان محاسباتی	موارد
$75 \times 75$	۱ ساعت و ۲۵ دقیقه	مورد یک
$100 \times 100$	۱ ساعت و ۵۶ دقیقه	مورد دو
$125 \times 125$	۲ ساعت و ۴۶ دقیقه	مورد سه
$150 \times 150$	۵ ساعت و ۷ دقیقه	مورد چهار
$175 \times 175$	۸ ساعت و ۱۳ دقیقه	مورد پنجم

جدول ۲: مقدار کسر حجمی ذوب برای مقادیر مختلف اندازه شبکه در روش تعادل

حرارتی		
سایز	کسر حجمی ذوب برای $t = 0.02$ زمان	کسر حجمی ذوب برای $t = 0.03$ زمان
$75 \times 75$	0.735468	0.810658
$100 \times 100$	0.663241	0.754292
$125 \times 125$	0.597163	0.719879
$150 \times 150$	0.584256	0.709386
$175 \times 175$	0.582047	0.704287

عدد دارسی مطابق با قسمت‌های قبل به ترتیب  $10^7$  و  $10^{-4}$  گرفته شد. عدد پرانتل برابر با ۵۰ متناسب با اکتادکان در نظر گرفته شده است. عدد استفان هم با در نظر گرفتن یک درجه اختلاف دمای سرد و گرم برابر با مقدار کوچک ۰.۱ گرفته شده است.

جدول ۳: خواص اکتادکان، اکسید آلومینیوم و مس

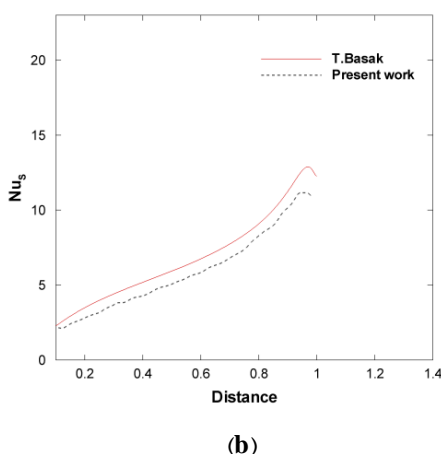
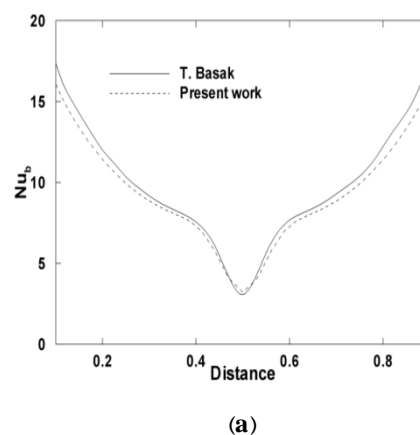
خواص	نما	اکتادکان (سیال پایه)	سرامیک (اکسید آلومینیوم)	مس (نانوذره)	واحد
چگالی	$\rho$	۸۰۰	۲۷۱۹	۸۹۵۴	$(kg/m^3)$
رسانش حرارتی	$K$	۰/۲	۱۸۲	۴۰۰	$(W / m.K)$
ظرفیت گرمای ویژه	$c$	۱۲۵۰	۸۷۱	۳۸۳	$(J / kg.K)$
ضریب انبساط حرارتی	$\beta$	$2 \times 10^{-3}$	-	$1.67 \times 10^{-5}$	$(1 / K)$
دمای ذوب	$T_f$	۳۰۳/۱۶	-	-	$K$
گرمای نهان ذوب	$L_f$	$1.25 \times 10^5$	-	$2.05 \times 10^5$	$(J / kg)$
ویسکوزیته دینامیکی	$\mu$	$8 \times 10^{-3}$	-	-	$(kg / m.s)$
تخلخل	$\epsilon$	-	۰.۹۵	-	-

در این بخش اثر افزودن نانو ذره برای کسر حجمی ۰، ۰.۰۲ و ۰.۰۵ با روش تعادل بررسی شده است. نانوذره مس دارای خاصیت رسانندگی بسیار بالایی است که افزودن آن به سیال پایه می‌تواند ترکیبی با خواص رسانندگی بهتری به دست آورد. اکتادکان از دسته مواد تغییرفازدهنده غیر فلزی به نام آلکان‌ها هستند و آلکان‌ها نیز مهم‌ترین و رایج‌ترین مواد تغییر فازدهنده غیرفلزی هستند که به نوعی بر اثر ارزان بودن و در دسترس بودن، رویه پژوهش‌ها به سمت این مواد هست. بنابراین بهبود انتقال حرارت در این مواد بسیار مهم است.

در شکل ۵ و شکل ۶ اثر افزودن نانو ذره مس با کسر حجمی ۰، ۰.۰۲ و ۰.۰۵ در سیال پایه اکتادکان برای روش تعادل حرارتی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزودن نانوذره با کسر حجمی ۰.۰۲ اندکی باعث بهبود فرآیند انتقال حرارت شده و با افزودن کسر حجمی ۰.۰۵ از نانو ذره تاثیر قابل توجهی برانتقال حرارت و نیز فرآیند ذوب گذاشته و باعث تسریع فرآیند ذوب می‌گردد. در شروع فرآیند انتقال حرارت حاکم بر مسئله انتقال حرارت هدایتی است. با گذشت زمان و غالب شدن نیروی شناوری انتقال حرارت جابه جایی بر انتقال حرارت هدایتی غالب می‌شود. همانطور که در تصویر a تا c مشهود است با گذشت زمان جبهه ذوب افزایش یافته است و میزان کسر ذوب بیشتر می‌شود.

$$Fo = 0.02$$

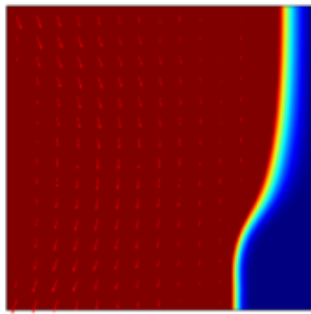
دیواره سمت چپ پژوهش حاضر و نتایج گزارش شده از باساک و همکاران [۲۴] صورت گرفته است. باساک و همکاران [۲۴] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه مربعی بسته اشباح شده با ماده متخلخل در زاویه های مختلف و همچنین برای دو حالت دما ثابت و شار ثابت مورد مطالعه قرار دادند. نتایج گزارش شده برای عددهای رایلی و پرانتل و دارسی به ترتیب  $10^6$ ، 7.2 و  $10^{-3}$  و یک محفظه مربعی که دیواره بالا عایق و دیواره سمت چپ و سمت راست هر دو در دمای سرد و دیواره پایین در دمای گرم، اشباح شده با یک ماده متخلخل می‌باشد. با مشاهده شکل ۴ می‌بینیم که تطابق بسیار خوبی بین نتایج مقاله حاضر و نتایج باساک وجود دارد.



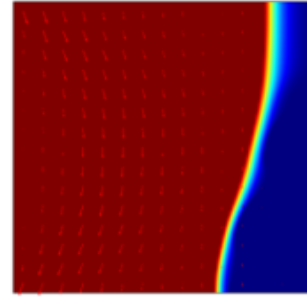
شکل ۴: (a) و (b) مقایسه نتایج مقاله حاضر با نتایج باساک برای عدد ناسلت دیواره پایین و سمت چپ در زاویه صفر درجه [۲۴].

## ۵- نتایج و بحث

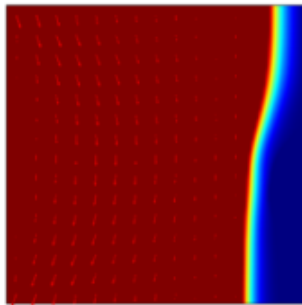
در این مساله از سیال پایه اکتادکان بهبود یافته با نانوذرات مس با کسر حجمی ۰.۰۲ تا ۰.۰۵ که در یک محیط متخلخل پوشانده شده از یک فوم سرامیکی (اکسید آلومینیوم) می‌باشد، استفاده شده است. عدد رایلی و



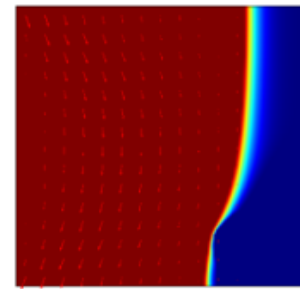
(b)



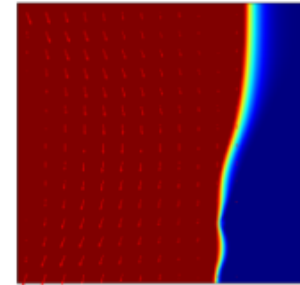
(a)



(c)



(b)



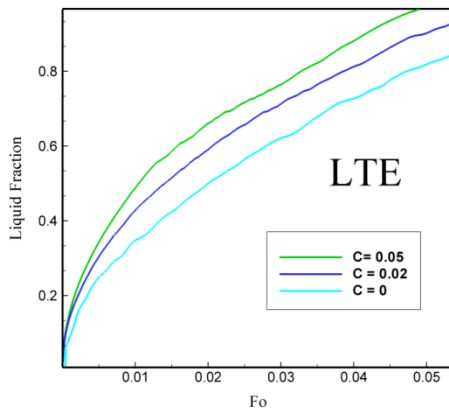
(c)

شکل ۶: موقعیت جبهه ذوب در کسر حجمی مختلف نانوذره با روش تعادل برای زمان های  $Fo=0.03$ ،  $C=0$ :a و  $C=0.02$ :b و  $C=0.05$ :c

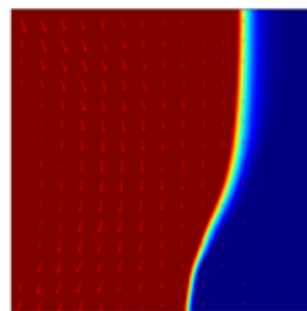
شکل ۷ کسر حجمی ذوب را برای کسر حجمی مختلف نانوذره در زمان های مختلف نشان می‌دهد. با مشاهده شکل ۷ کاملاً مشهود است که در ابتدای فرآیند چون انتقال حرارت غالب هدایت است تاثیر افزودن نانو ذرات کم‌تر است و با گذشت زمان و غالب شدن نیروی شناوری و انتقال حرارت جابه جایی اثر افزودن نانوذره بسیار بیشتر می‌شود و حجم بیشتری را ذوب می‌کند. اثر افزودن نانوذره با گذشت زمان بیشتر می‌شود.

شکل ۵: موقعیت جبهه ذوب در کسر حجمی مختلف نانوذره با روش تعادل برای زمان های  $Fo=0.02$ ،  $C=0$ :a و  $C=0.02$ :b و  $C=0.05$ :c

$Fo = 0.03$



شکل ۷: کسر حجمی ذوب برای کسر حجمی مختلف نانوذره با روش تعادل در زمان های مختلف



(a)

## فهرست علامتها

## ۷- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر مدلسازی فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در محیطهای متخلخل بهبود یافته با نانوذرات درون یک محفظه مربعی بسته به ضلع  $10\text{ cm}$  که دیواره سمت چپ در دمای گرم و دیواره سمت راست در دمای سرد و دیواره بالا و پایین هردو عایق بررسی شد. معادلات حاکم بر مسئله با استناد بر پارامترهای همچون رایلی، استفان، پراتل و دارسی به فرم بی بعد خود منتقل شده و سپس به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار کامسول حل شده است. در روش حاضر شبکه محاسباتی به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. به منظور مدلسازی از روش تعادل حرارتی استفاده شده است. به عنوان هدف نهایی این مطالعه اثر افزودن نانوذرات به مدلسازی فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در محیطهای متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تحلیل رفتار نانوذرات از روش همگن استفاده شد. اثر افزودن نانوذرات بر لزجت و رسانش سیال پایه با معادلات بریکمن و ماکسول در معادلات تاثیر داده شدند. اثر کسر حجمی مختلف نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات مس به سیال پایه غیر فلزی اکتادکان با یک فوم اکسید آلومینیومی باعث افزایش رسانش سیال پایه و همچنین بهبود انتقال حرارت و فرآیند ذوب می شود. این تاثیر با افزایش کسر حجمی از (۰.۰۲) به (۰.۰۵) از نانوذرات خیلی بیشتر می شود و به صورت قابل توجهی بهبود فرآیند ذوب را به دنبال دارد. مهم ترین نتایج را می توان به شکل زیر بیان کرد:

- ۱- معادلات بریکمن با در نظر گرفتن ترم های ذوب قادر به مدلسازی فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در محیط متخلخل بهبود یافته با نانو ذرات می باشند.
- ۲- افزودن نانوذرات باعث افزایش رسانش سیال می شود و بهبود انتقال حرارت و فرآیند ذوب را به دنبال دارد.
- ۳- اثر افزودن نانو ذرات با افزایش کسر حجمی نانوذرات از (۰.۰۲) به (۰.۰۵) افزایش می یابد و باعث بهبود فرآیند ذوب می شود.
- ۴- افزودن نانوذره مس باعث افزایش کسر حجمی ذوب در هر زمان مشخصی می شود.

نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان می دهد که افزودن نانو ذرات در فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در یک محیط متخلخل باعث بهبود و تسریع بخشیدن فرآیند ذوب می گردد.

## تقدیر و تشکر

از ستاد نانو کشور جهت حمایت از این مطالعه تشکر و قدردانی می شود. همچنین از مرکز ابررایانه دانشگاه صنعتی امیرکبیر جهت فراهم ساختن امکان انجام محاسبات این مطالعه کمال قدردانی به عمل می آید.

علائم انگلیسی	
$S(T)$	معادله کارمن کارنی
$A_{mush}$	ثابت ناحیه خمیری
$c$	گرمای ویژه
$c_p$	گرمای ویژه در فشار ثابت
$e$	ضخامت دیواره
$C$	کسر حجمی نانو ذرات
$g$	شتاب گرانش
$k$	رسانش حرارتی
$L$	گرمای نهان ذوب
$\kappa$	گذردهی
$P$	فشار
$T$	دما
$t$	زمان
$L_x$	طول
$L_y$	ارتفاع
$u$	سرعت در جهت $x$
$v$	سرعت در جهت $y$
$h_{nfp}$	ضریب انتقال بینابینی
$T_f$	دمای ذوب
$F_o$	عدد فوریه
$Ra$	عدد رایلی
$Pr$	عدد پراتل
$Ste$	عدد استفان
$Da$	عدد دارسی
$N_{hp}$	برهم کنش انتقال حرارت جابجایی میان نانو سیال و ماده متخلخل
علائم یونانی	
$\varphi(T)$	کسر حجمی فاز مایع
$\alpha$	ضریب انتشار حرارتی
$\phi$	کسر فاز ذوب شده بی بعد
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی
$\rho$	چگالی
$\varepsilon$	تخلخل
$\nu$	ویسکوزیته سینماتیکی
$\Delta T$	رنج دمایی ناحیه خمیری
$\gamma$	نسبت ضریب انتشار حرارتی
$\theta$	دمای بی بعد
$\beta$	ضریب انبساط حجمی
زیرنویس	
$nf$	نانو سیال
$bf$	سیال پایه

materials for space and terrestrial thermal energystorage applications, Carbon 46 (1) (2008) 159e168.

[11] A. Siahpush, J. O'Brien, J. Crepeau, Phase change heat transfer enhancement using copper porous foam, J. Heat Transfer 130 (8) (2008) 082301-1e 082301-11, <http://dx.doi.org/10.1115/1.2928010>.

[12] K. Lafdi, O. Mesalhy, S. Shaikh, Experimental study on the influence of foam porosity and pore size on the melting of phase change materials, J. Appl. Phys. 102 (8) (2007) 083549e083549-6.

[13] Y. Tian, C.Y. Zhao, A numerical investigation of heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous metals, Energy 36 (9) (2011) 5539e5546 .

[14] J. Zeng, L. Sun, F. Xu, Z. Tan, Z. Zhang, J. Zhang, T. Zhang, Study of a PCM based energy storage system containing Ag nanoparticles, J. Therm. Anal. Calorim. 87(2006) 371–375.

[15] S. Wu, D. Zhu, X. Zhang, J. Huang, Preparation and melting/freezing characteristics of Cu/paraffin nanofluid as phase-change material (PCM), Energy Fuels 24 (2010) 1894–1898.

[16] P. Vadasz, Bifurcation Phenomena in Natural Convection in Porous Media, Heat Transfer, Hemisphere, Washington, DC, vol. 5, pp. 147–152, 1990.

[17] D. A. Nield, General Heterogeneity Effects on the Onset of Convection in a Porous Medium, in P. Vadasz (ed.), Emerging Topics in Heat and Mass Transfer in Porous Media, Springer-Verlag, chap. 3, 2008.

[18] C. T. Simmons, T. R. Fenstemaker, and J. M. Sharp, Variable-Density Flow, and Solute Transport in Heterogeneous Porous Media: Approaches, Resolutions and Future Challenges, J. Contam. Hydrol., vol. 52, pp. 245–275, 2001.

[19] A. Prasad, and C. T. Simmons, Unstable Density-Driven Flow in Heterogeneous Porous Media: A Stochastic Study of the Elder [1967b] “Short Heater” Problem, Water Resource Res., vol. 39, doi: 10.1029=2002WR001290, 2003.

[20] D. A. Nield and A. V. Kuznetsov, Onset of Convection with Internal Heating in a Weakly Heterogeneous Porous Medium, Transp. Porous Media, vol. 98, pp. 543–552, 2013.

[21] E. Holzbecher, Numerical Studies on Thermal Convection in Cold Groundwater, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 40, pp. 605–612, 1997.

[22] E. Holzbecher, The Fast-C Simulators for Density-Driven Flow: Application to Geothermal Modelling, Proc. World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, 2000.

[23] O. Bertrand, B. Binet, H. Combeau, S. Couturier, Y. Delannoy, D. Gobin, M. Lacroix, P. Le Quééré, M. Médale, J. Mencinger, Melting driven by natural convection A

$m, nf$	متوسط نانو سیال و فوم
$f$	خواص در اینترفیس ذوب
$l$	فاز مایع
$s$	فاز جامد
$np$	نانوذرات
$h$	گرم
$c$	سرد
$p$	جامد متخلخل

## مراجع

[1] A. Hoshi, D.R. Mills, A. Bittar, T.S. Saitoh, Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR, Sol. Energy 79 (3) (2005) 332e339.

[2] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renew. Sustain. Energy Rev. 13(2) (2009) 318e345.

[3] V.V. Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: a state of art, Renew. Sustain. Energy Rev. 11 (6) (2007) 1146e1166.

[4] B. Zalba, J.M. Marín, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Appl. Therm. Eng. 23 (3) (2003) 251e283.

[5] C.Y. Zhao, W. Lu, Y. Tian, Heat transfer enhancement for thermal energystorage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs), Sol. Energy 84 (8) (2010) 1402e1412.

[6] A.S. Fleischer, K. Chintakrinda, R. Weinstein, C.A. Bessel, Transient thermal management using phase change materials with embedded graphite nanofibers for systems with high power requirements, in: 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2008.

[7] P.H. Vadwala, Thermal Energy Storage in Copper Foams Filled with Paraffin Wax, University of Toronto, Toronto, 2011.

[8] Y. Zhong, Q. Guo, S. Li, J. Shi, L. Liu, Heat transfer enhancement of paraffin wax using graphite foam for thermal energy storage, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 94 (6) (2010) 1011e1014.

[9] A. Elgafy, K. Lafdi, Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials, Carbon 43 (15) (2005) 3067e3074.

[10] K. Lafdi, O. Mesalhy, A. Elgafy, Graphite foams infiltrated with phase change materials as alternative



conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (7) (2006) , pp.1430-1441.

Vancouver

comparison exercise: first results, *International Journal of Thermal sciences*, 38(1) (1999) 5-26.

[24] T.Basak, , S.Roy, , T.Paul, and I.Pop, Natural convection in a square cavity filled with a porous medium: effects of various thermal boundary