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

مجتبی ملکی[1*]، محمد قلم باز[2]

[1]دانشجو ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[2]استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: پاییز ۹۶ پذیرش: پاییز ۹۶

چکیده

در این پژوهش فرآیند ذوب مواد تغییرفازدهنده بهبود یافته با نانوذرات در محیط‌های متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. معادلات حاکم با استناد به پارامترهایی همچون رایلی، استفان، پرانتل، دارسی به فرم بی‌بُعد خود منتقل شدند. به منظور مدلسازی فرآیند تغییرفاز 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 تغییرفازدهنده 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

کلمات کلیدی: مواد تغییرفازدهنده، نانوذرات، متخلخل، ذوب

۱- مقدمه

سیستم های مدیریت حرارتی مبتنی بر ذخیره‌سازی 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 تغییرفاز مقدار قابل توجهی حرارت را می‌توانند جذب یا آزاد کنند. این ذخیره کردن انرژی در حالی است که در طول انتقال فاز دما ثابت است. این ویژگی می تواند 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 تغییرفازدهنده در گرافیت [۱۰،۸] و فوم های فلزی [۷-۵] را می توان نام برد. اخیرا نفوذ مواد تغییرفازدهنده در فوم-های فلزی به علت هدایت حرارتی بالا فوم‌های فلزی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

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 لفدی و همکاران [۱۲] در یک کار تجربی برای مواد تغییرفازدهنده 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 تغییرفازدهنده 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 تغییرفازدهنده، زمان گرمایش و خنک کردن تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد.

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

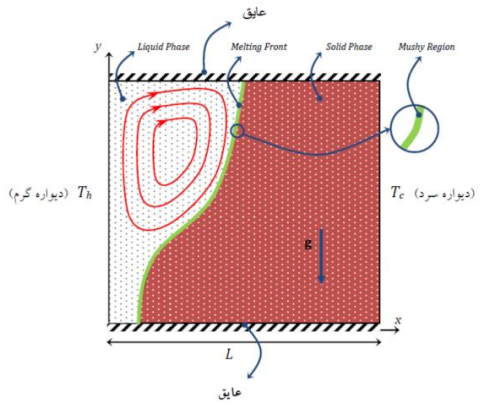
۲- روش مدلسازی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.3.3]

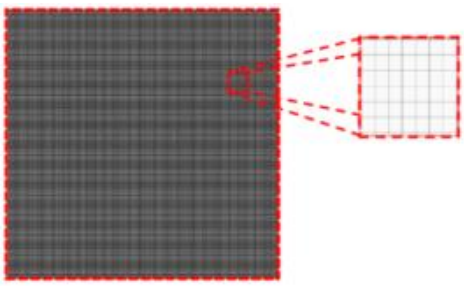
۲-۱-بیان مسئله

شکل ۱ شماتیکی از مدل فیزیکی و شرایط مرزی مسئله در مختصات کارتزین را ارائه می‌دهد. یک محفظه بسته مستطیل شکل با طول و ارتفاع L در نظر بگیرید. محفظه از یک ماده تغییرفازدهنده بهبودیافته 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 (Th) و دیواره سمت راست در دمای سرد (Tc) 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 صرف‌نظر می‌شود. 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 ازمدل 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 می‌آید. 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) 1×1 یک بوده (محفظه مربعی بسته) و همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه و گره‌های ایجاد شده به صورت یکنواخت می‌باشد. 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 هسته‌ای بوده 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 ساده‌سازی معادلات فیزیکی و ریاضی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

۱) با توجه به محدود بودن اختلاف دما، انتقال حرارت در ماده تغییرفازدهنده به کمک مکانیزم‌های جابه‌جایی و هدایت صورت می‌گیرد و از اثرات تشعشع صرفنظر 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 می‌شود.

۳) به دلیل کوچک بودن ضریب انبساط حرارتی از تغییرات حجمی ناشی از تغییر فاز صرف‌نظر می‌گردد.

۴) به دلیل پایین بودن سرعت‌ها در فرآیندهای جابه‌جایی طبیعی، تلفات ویسکوزیته در سیال انتقال دهنده حرارت بسیار ناچیز در نظر گرفته شده و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

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

با توجه به فرضیات ذکرشده 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].

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.3.3]

$$\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon}\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon^2}\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial u}{\partial x}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\left(\varphi\right)\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial u}{\partial y}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\left(\varphi\right)\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

$$-\frac{\mu}{\kappa}v+S\left(T\right).u$$

(۲)

$$\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon}\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\rho_{nf}}{\varepsilon^2}\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial v}{\partial x}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\left(\varphi\right)\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial v}{\partial y}\left(\mu_{\mathrm{nf}}\left(\varphi\right)\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

$$-\frac{\mu}{\kappa}v+s\left(T\right).v+\rho_{nf}\,g\beta\left(T-T_F\right)$$

(۳)

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

$$\left(\rho c\right)_{m,nf}\frac{\partial T}{\partial t}+\left(\rho cp\right)_{nf}\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\left(\frac{\partial T}{\partial x}\left(\mathrm{k}_{\mathrm{m,nf}}\left(\varphi\right)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial T}{\partial y}\left(\mathrm{k}_{\mathrm{m,nf}}\left(\varphi\right)\frac{\partial T}{\partial y}\right)\right)$$

$$+\varepsilon\rho_{nf}L_{nf}\frac{\partial\varphi\left(T\right)}{\partial t}$$

(۴)

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 بی‌بعد سازی از روابط زیر استفاده شده است:

$$X=\frac{x}{L_y},\mathrm{Y}=\frac{y}{L_y},U=\frac{uL_y}{\alpha_{bf}},V=\frac{vL_y}{\alpha_{bf}},\theta_{nf}=\frac{T_{nf}-T_c}{T_h-T_f},\theta_P=\frac{T_P-T_c}{T_h-T_f},P=\frac{pL_y^2}{\rho_{bf}\alpha_{bf}^2},$$

$$\mathrm{Pr}=\frac{\nu}{\alpha},F_0=\frac{ta_{bf}}{L_y^2},Ra=\frac{g\beta(T_h-T_C)L_y^3\,\mathrm{Pr}}{\nu^2},S\left(T\right)=\frac{S\left(T\right)L_y^2}{\rho_{bf}a_{bf}},\mu_r=\frac{\mu_{\mathrm{nf}}\left(\varphi\right)}{\mu_{\mathrm{nf}}},\alpha_r=\frac{\alpha\left(\varphi\right)}{a_l},$$

$$Ste=\frac{(C_p)_{bf}(T_h-T_f)}{L_{bf}},k_r=\frac{k_{nf}(\varphi)}{k_{nf}},\quad Nh_p=\frac{h_{nfp}L^2}{k_{bf}},\gamma_{\mathrm{p}}=\frac{k_{bf}}{k_p},\gamma_{nf}=\frac{\left(\rho c\right)_{bf}}{\left(\rho c\right)_{nf}}$$

(۵)

بنابراین در این مقاله معادلات حاکم بر فرآیند ذوب مواد تغییرفازدهنده در محیط متخلخل با روش تعادل به صورت بی‌بعد خود منتقل شدند و به صورت زیر ارائه شدند:

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0$$

(۶)

$$\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial V}{\partial F_0}+\frac{1}{\varepsilon^2}\left(U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}\right)=-\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\frac{Pr}{\varepsilon}\times\frac{\mu_{\mathrm{nf}}}{\mu_{\mathrm{bf}}}\left(\frac{\partial V}{\partial X}\left(\mu_r\frac{\partial V}{\partial X}\right)+\frac{\partial V}{\partial Y}\left(\mu_r\frac{\partial V}{\partial Y}\right)\right)$$

$$+\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\frac{Pr}{Da}\times\frac{\bar{\mathrm{K}}}{K\left(X,Y\right)}V+\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}VS\left(T\right)+PrRa\theta_{nf}\frac{\left(\rho\beta\right)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_{bf}}$$

(۷)

و معادله انرژی به روش تعادل حرارتی:

$$\left[\frac{\partial\theta}{\partial F_0}+\frac{\left(\rho c\right)_{nf}}{\left(\rho c\right)_{m,nf}}\left(U\frac{\partial\theta}{\partial X}+V\frac{\partial\theta}{\partial Y}\right)\right]=\frac{a_{m,nf}}{a_{bf}}\left(\frac{\partial}{\partial X}\left(k_r\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(k_r\frac{\partial\theta}{\partial Y}\right)\right)$$

$$-\frac{\varepsilon\left(c_p\right)_{bf}\rho_{nf}}{\left(\rho c_p\right)_{m,nf}}\frac{L_{nf}}{L_{bf}}\frac{1}{Ste}\frac{\partial\varphi\left(\theta\right)}{\partial F_0}$$

(۸)

و معادله انرژی به روش تعادل حرارتی:

$$\left[\frac{\partial\theta}{\partial F_0}+\frac{\left(\rho c\right)_f}{\left(\rho c\right)_{m,f}}\left(U\frac{\partial\theta}{\partial X}+V\frac{\partial\theta}{\partial Y}\right)\right]=\frac{a_{m,f}}{a_f}\left(\frac{\partial}{\partial X}\left(k_r\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(k_r\frac{\partial\theta}{\partial Y}\right)\right)$$

$$-\frac{\varepsilon\left(c_p\right)_f\rho_f}{\left(\rho c_p\right)_{m,f}}\frac{L_f}{L_f}\frac{1}{Ste}\frac{\partial\varphi\left(\theta\right)}{\partial F_0}$$

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

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

(۹)

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

(۱۰)

$$k_{m,nf}\left(\varphi\right)=\left(1-\varepsilon\right)k_P+\varepsilon k_{nf}$$

(۱۱)

$$\left(\rho c\right)_{m,nf}=\left(1-\varepsilon\right)\left(\rho c\right)_P+\varepsilon\left(\rho c_p\right)_{nf}$$

(۱۲)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.3.3]

$$k_r = (1-\varepsilon)\frac{k_P}{k_{mnf,l}} + \varepsilon\frac{k_{nf}}{k_{mnf,l}} \qquad (۱۳)$$

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 $\gamma = 1$ ، $\mathrm{Pr} = 50$ ، $\mathrm{Ste}=0.1$، $\mathrm{Ra}=1\times10^{10}$ 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 $A_mush = 1.5\times10^{5}$ و $\Delta T = 0.0۷$ 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 ۱۷۵ × ۱۷۵ زمان مورد نیاز برای ۹۰ درصد از ماده تغییر فاز دهنده ۸ ساعت و ۱۳ دقیقه و برای شبکه ۷۵ × ۷۵، یک ساعت و ۲۵ دقیقه بوده است. زمان مورد نیاز برای ذوب ۹۰ درصد از ماده تغیرفاز-دهنده برای اندازه های دیگر شبکه با توجه به ابعاد شبکه بین این دو زمان ذکر شده می باشد. جزییات 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 ۱۲۵ × ۱۲۵ ایجاد شده است. در نتیجه نتایج کار حاضر با سایز شبکه ۱۲۵ × ۱۲۵ انجام گرفت.

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

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

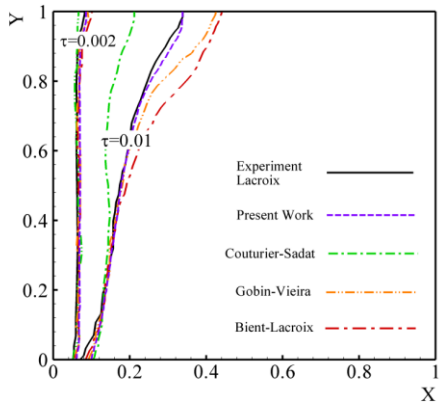
جدول ۲: مقدار کسر حجمی ذوب برای مقادیر مختلف اندازه شبکه در روش تعادل حرارتی

سایز	کسرحجمی ذوب برای زمان $t = 0.02$	کسرحجمی ذوب برای زمان $t = 0.03$
75×75	0.735468	0.810658
100×100	0.663241	0.754292
125×125	0.597163	0.719879
150×150	0.584256	0.709386
175×175	0.582047	0.704287

۴-اعتبار سنجی 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 اعتبار سنجی 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 همکارن [۲۳] می باشد. در مقاله گوبین نتایج چندین حل عددی و تجربی دیگر با هم مقایسه شدند که محققین به منظور اعتبار بخشیدن به پژوهش های 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، پرانتل، دارسی و استفان را به ترتیب برابر $Ra = 1\times10^{7}$ و P 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 پژوهش های خود، نتایج خود را برای پیش بینی جبهه ذوب اکتادکان در یک محفظه مربعی گزارش داده و مقایسه نموده اند. اکتادکان از دسته مواد تغییر فاز دهنده غیر فلزی به نام آلکان‌ها هستند و آلکان‌ها از مهم‌ترین و رایج‌ترین دسته مواد تغییرفازدهنده غیرفلزی 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 می باشد. خلاصه نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود نتایج حل عددی حاضر توافق بسیار خوبی با بررسی های تجربی و عددی دارد.



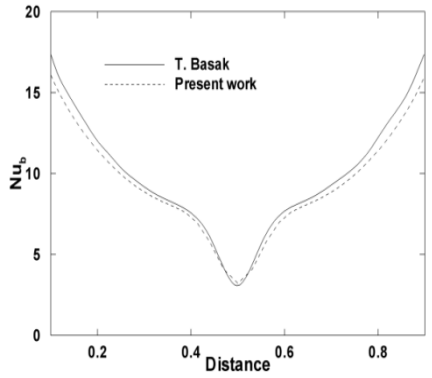
شکل ۳: (a) و (b) اعتبارسنجی جبهه ذوب با حل معتبر گوبین و همکاران [۲۳].

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 می-گیرد. در شکل ۴ مقایسه‌ای بین عدد ناسلت محلی برای دیواره پایین و

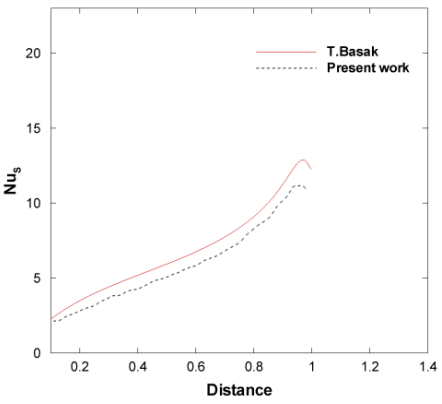
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.3.3]

دیواره سمت چپ پژوهش حاضر و نتایج گزارش شده از باساک و همکاران [۲۴] صورت گرفته است. باساک و همکاران [۲۴] انتقال حرارات جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه مربعی بسته اشباع 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، اشباع شده با یک ماده متخلخل می‌باشد. با مشاهده شکل ۴ می‌بینیم که تطابق بسیار خوبی بین نتایج مقاله حاضر و نتایج باساک وجود دارد.



(a)



(b)

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 (اکسیدآلومینیوم) می‌باشد، استفاده شده است. عدد رایلی و 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	نماد	اکتادکان (سیال پایه)	سرامیک (اکسید آلومینیوم)	مس (نانوذره)	واحد
چگالی	ρ	۸۰۰	۲۷۱۹	۸۹۵۴	$\left(kg/m^3\right)$
رسانش حرارتی	K	۰/۲	۱۸۲	۴۰۰	$\left(W/m.K\right)$
ظرفیت گرمای ویژه	c	۱۲۵۰	۸۷۱	۳۸۳	$\left(J/kg.K\right)$
ضریب انبساط حرارتی	β	2×10^{-3}	-	1.67×10^{-5}	$\left(1/K\right)$
دمای ذوب	T_f	۳۰۳/۱۶	-	-	K
گرمای نهان ذوب	L_f	1.25×10^5	-	2.05×10^5	$\left(J/kg\right)$
ویسکوزیته دینامیکی	μ	8×10^{-3}	-	-	$\left(kg/m.s\right)$
تخلخل	ε	-	۰.۹۵	-	

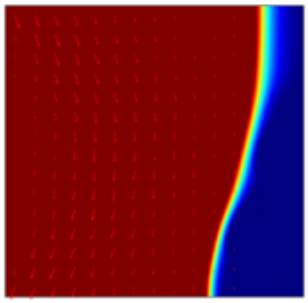
در این بخش اثر افزودن نانو ذره برای کسر حجمی ۰ و ۰.۰۲ و ۰.۰۵ با روش تعادل بررسی شده است. نانوذره مس دارای خاصیت رسانندگی بسیار بالایی است که افزودن آن به سیال پایه می‌تواند ترکیبی با خواص رسانندگی بهتری به دست آورد. اکتادکان از دسته مواد تغییرفازدهنده غیر فلزی به نام آلکان‌ها هستند و آلکان‌ها نیز مهم‌ترین 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 حرارات شده و با افزودن کسر حجمی ۰.۰۵ از نانو ذره تاثیر قابل توجهی برانتقال حرارت و نیز فرآیند ذوب گذاشته و باعث تسریع فزآیند 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.

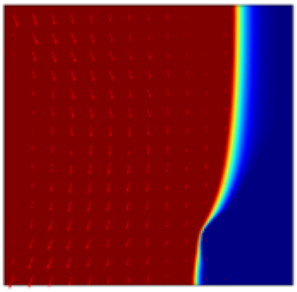
$$Fo = 0.02$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

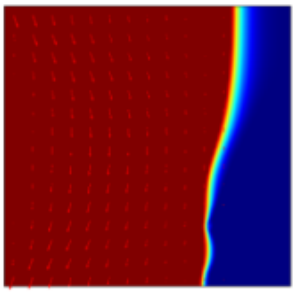
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.3.3]



(a)



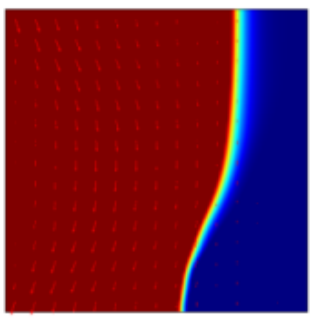
(b)



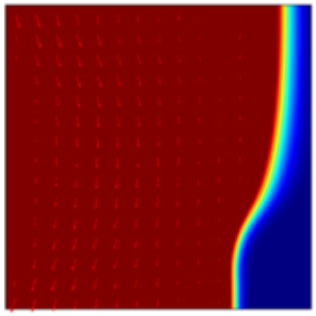
(c)

شکل ۵: موقعیت جبهه ذوب در کسر حجمی مختلف نانوذره با روش تعادل برای زمان‌های Fo=0.02 ، (**a: C=0 و b: C=0.02 و c: C=0.05**)

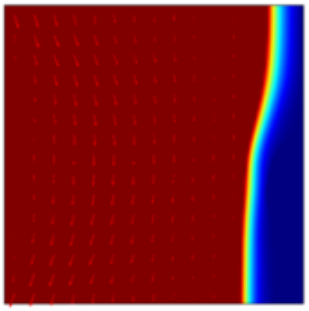
$Fo = 0.03$



(a)



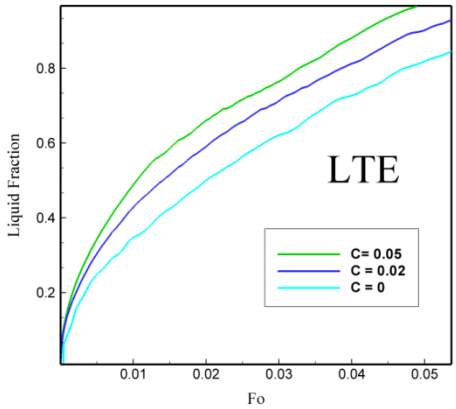
(b)



(c)

شکل ۶: موقعیت جبهه ذوب در کسر حجمی مختلف نانوذره با روش تعادل برای زمان‌های Fo=0.03 ، (**a: C=0 و b: C=0.02 و c: C=0.05**)

شکل ۷ کسر حجمی ذوب را برای کسر حجمی مختلف نانوذره در زمان های مختلف نشان می‌دهد. با مشاهده شکل ۷ کاملا 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 ۷: کسر حجمی ذوب برای کسر حجمی نانوذره مختلف با روش تعادل در زمان‌های مختلف

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.3.3]

۷-نتیجه گیری

در مطالعه حاضر مدلسازی فرآیند ذوب مواد تغییرفازدهنده در محیط‌های متخلخل بهبودیافته با نانوذرات درون یک محفظه مربعی بسته به ضلع ۱۰ 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، پرانتل و دارسی به فرم بی‌بعد خود منتقل شده و سپس به روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار 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. مهم‌ترین نتایج را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

۱- معادلات بریکمن با در نظر گرفتن ترم های ذوب قادر به مدلسازی فرآیند ذوب مواد تغییر فازدهنده در محیط متخلخل بهبودیافته با نانو-ذرات می‌باشند.

۲-افزودن نانوذرات باعث افزایش رسانش سیال می‌شود 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 می‌یابد و باعث بهبود فرآیند ذوب می‌شود.

۴- افزودن نانوذره مس باعث افزایش کسرحجمی ذوب در هر زمان مشخصی می‌شود.

نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان می‌دهد که افزودن نانو ذرات در فرآیند ذوب مواد تغییرفاز دهنده دریک محیط متخلخل باعث بهبود و تسریح بخشیدن فرآیند ذوب می‌گردد.

تقدیر و تشکر

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

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی	
معادله کارمن کازنی	$S(T)$
ثابت ناحیه خمیری	A_mush
گرمای ویژه	c
گرمای ویژه در فشار ثابت	c_p
ضخامت دیواره	e
کسرحجمی نانو ذرات	C
شتاب گرانش	g
رسانش حرارتی	k
گرمای نهان ذوب	L
گذردهی	κ
فشار	P
دما	T
زمان	t
طول	L_x
ارتفاع	L_y
سرعت در جهت x	u
سرعت در جهت y	v
ضریب انتقال بینابینی	h_{nfp}
دمای ذوب	T_f
عدد فوریه	F_O
عدد رایلی	Ra
عدد پرانتل	Pr
عدد استفان	Ste
عدد دارسی	Da
برهم‌کنش انتقال حرارت جابجایی میان نانو سیال و ماده متخلخل	N_{hp}
علائم یونانی	
کسر حجمی فاز مایع	$\varphi(T)$
ضریب انتشار حرارتی	α
کسر فاز ذوب شده بی بعد	φ
ویسکوزیته دینامیکی	μ
چگالی	ρ
تخلخل	ε
ویسکوزیته سینماتیکی	ν
رنج دمایی ناحیه خمیری	ΔT
نسبت ضریب انتشار حرارتی	γ
دمای بی بعد	θ
ضریب انبساط حجمی	β
زیرنویس	
نانو سیال	nf
سیال پایه	bf

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.3.3]

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

مراجع

[1] A. Hoshi, D.R. Mills, A. Bittar, T.S. Saitoh, Screening of high melting point phasechange materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based onCLFR, 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 storagewith 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 thermalmanagement using phase change materials with embedded graphite nanofibersfor 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 ParaffinWax, University of Toronto, Toronto, 2011.

[8] Y. Zhong, Q. Guo, S. Li, J. Shi, L. Liu, Heat transfer enhancement of paraffin waxusing graphite foam for thermal energy storage, Sol. Energy Mater. Sol. Cells94 (6) (2010) 1011e1014.

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

[10] K. Lafdi, O. Mesalhy, A. Elgafy, Graphite foams infiltrated with phase changematerials as alternative 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 enhancementusing 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 foamporosity 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 changematerials (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/freezingcharacteristics 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 WeaklyHeterogeneous 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 Quéré, M. Médale, J. Mencinger, Melting driven by natural convection A

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.3.3]

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

Vancouver

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.3.3]