مدلسازی فرآیند ذوب مواد تغییر فازدهنده در محیط های متخلخل غیرهمسانگرد

مجتبی ملکی[۱]، محمد قلم باز[۲]*

[۱]دانشجو ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول،دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۲]استادیار، گروه مهندسی مکانیک واحد دزفول،دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: پاییز ۹۶ پذیرش: زمستان ۹۶

چکیده

ذخیره انرژی گرمایی توسط جسم به صورت نهان به هنگام تغییر فاز جسم از حالت جامد به مایع یا مایع به گاز و یا جامد به جامد صورت می‌گیرد. مواد تغییر فازدهنده انرژی را به صورت گرمای نهان ذوب ذخیره می‌کنند. استفاده از سیستم های ذخیره‌سازی با گرمای نهان با استفاده از مواد تغییرفازدهنده (PCMs) یک راه موثر برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی است و دارای مزیت هایی مانند چگالی بالای ذخیره‌سازی انرژی و طبیعت دما ثابت در طی فرآیند ذخیره‌سازی می باشند. از طرفی دیگر، امروزه مواد و ساختار متخلخل بخاطر در دسترس بودن آن‌ها بسیار حائز اهمیت شده است. یک ساختار مناسب متخلخل با توجه به وجود یک شبکه بهم متصل از مواد، دارای رسانش حرارتی بالایی می‌باشد که می‌تواند بر انتقال حرارت تاثیر بگذارد. شکل و نحوه آرایش یک شبکه متخلخل نیز دارای اهمیت زیادی است. همچنین می‌تواند تاثیر زیادی بر انتقال حرارت در فرآیند ذوب داشته باشد که باید در مدلسازی‌ها لحاظ شود. با توجه به این که تولید ساختارهای غیرهمسانگرد در روش های نوین ساخت فوم‌های فلزی امکان پذیر شده است، مدلسازی پدیده ذوب و مطالعه رفتار حرارتی ساختارهای متخلخل غیرهمسانگرد امری مهم و ضروری است. بنابراین در این پژوهش مدلسازی فرآیند ذوب در محیط های متخلخل غیرهمسانگرد 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 تغییر فاز از روش تعادل حرارتی استفاده شده است. سپس با استفاده از یک کد دینامیک سیالات با روش المان محدود تحت نرم افزار کامسول حل شده است. به عنوان هدف نهایی، اثر محیط های متخلخل غیرهمسانگرد بر فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در محیط های متخلخل مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که غیر همسانگردی بر فرآیند ذوب تاثیر گذار است و افزایش غیرهمسانگردی در جهت افقی برای هندسه این مسئله باعث بهبود انتقال حرارت و فرآیند ذوب می شود.

***عهده‌دار مکاتبات:** m.ghalambaz@gmail.com

کلمات کلیدی: مواد تغییرفازدهنده، غیرهمسانگردی، متخلخل، ذوب

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]

۱- مقدمه

مواد تغییرفازدهنده (PCM)، موادی هستند که برای کنترل درجه حرارت سیستم های حرارتی به کار می‌روند. این مواد بدون استفاده از تجهیزات مکانیکی و به صورت کاملا هوشمند و تنها از طریق تمایل ذاتی به تغییر فاز، به طور طبیعی خود را با نوسانات محیط تطبیق داده و کاهش مصرف انرژی را به دنبال دارد. سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی بر مبنای PCMs در انجمن‌های بزرگی مانند انجمن‌های جهانی انتقال حرارت و انجمن جهانی انرژی های تجدیدپذیر به عنوان یک مسئله مهم مطرح گردیده است. با توجه به این موضوع، استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سال های اخیر، به عنوان یک مساله مهم و اساسی مورد توجه بسیاری از محققین و پژوهشگران قرار گرفته است. این توجه در اثر ظرفیت حرارتی بالا و همچنین رفتار دما ثابت در PCMs ها تحت گذر از فاز جامد به مایع است [۱]. نمونه‌های عمده در کاربردهای PCMs، ذخیره‌سازی حرارتی در انرژی خورشیدی [۳,۲]، کنترل دما یا اجزاء به صورت الکترونیک [۴]،تنظیم دما در ساختمان‌های مسکونی و تجاری[۵] و بهبود عملکرد در تکنولوژی کلکتورهای خورشیدی هستند [۶].

PCM در طول فرآیند تغییر فاز 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 می‌تواند بسیار مفید باشد. با این حال، نقطه ضعف بزرگ PCM ها به طور کلی انتقال حرارت هدایتی پایین آن ها است که می‌تواند باعث کاهش انتقال حرارت و غیریکنواخت شدن ذوب شود [۷]. در ادامه راه‌ها و تکنیک‌های زیادی برای بهبود فرآیند ذوب مواد تغییرفاز دهنده ارائه شد که استفاده از محیط متخلخل به عنوان یک روش نوین در این خصوص مورد توجه قرار گرفته است. در زمینه استفاده از مواد متخلخل به عنوان عوامل بهبود و یا کنترل انتقال

حرارت مواد تغییرفازدهنده کارهای زیادی انجام شده است. یک مطالعه تجربی برای سیستم های ذخیره انرژی حرارتی نهان گرمایی در یک ساختار متخلخل با قرار دادن فوم سرامیکی در [۸] صورت گرفته است و در [۹] با استفاده از یک فوم فلزی و در [۱۰] یک سیستم متخلخل استوانه‌ای انباشته شده از پارافین مطالعه شده است، نتایج نشان داد که با استفاده از فوم فلزی انتقال حرارت به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. میزان تخلخل و اندازه منافذ نیز بر انتقال حرارت تاثیر می‌گذارد [۱۱]. برای مدلسازی مواد متخلخل از دو نوع مدل عدم تعادل حرارتی و مدل تعادل حرارتی استفاده می‌شود [۱۲].

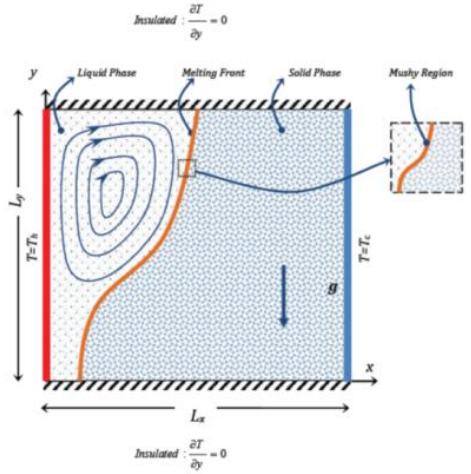
امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی شرایط تولید محیط های متخلخل غیرهمسانگرد در دسترس است و توجه زیادی به تولید این ساختارها می‌شود و عدم انطباق نفوذپذیری و انتشار حرارتی بر انتقال حرارت تاثیر-گذار است [۱۳و۱۴]. تاثیر غیرهمسانگردی در موارد خاص به خاطر کاربرد هیدرولیکی آن بسیار مورد اهمیت است، چون غیرهمسانگردی بر نفوذپذیری تاثیر مستقیم دارد [۱۹-۱۵]. اثرات غیرهمسانگردی محیط متخلخل در [۱۳و۱۴] برای انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی برای حالت های مختلف افقی، عمودی و تصادفی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج تاثیرگذاری غیرهمسانگردی بر انتقال حرارت را نشان داد. همچنین فهس[1] در [۲۰] به مقایسه و بررسی نتایج پژوهش‌های پیشین در زمینه غیرهمسانگردی محیط متخلخل پرداخت و برای حل مشکل اختلاف‌های این پژوهش‌ها که در اثر پیچیدگی این موضوع، اغلب به صورت عددی هستند، یک مقاله مرجع و به عنوان یک معیار برای اعتبارسنجی ها ارائه داد.

در بحث نوآوری این مطالعه باید گفت که در دنیا تا حال معادلات فرآیند ذوب در محیط متخلخل غیر همسانگرد به دست نیامدند و به شکل بی بعد خود نرسیده اند و برای اولین بار است که با روش تعادل حرارتی در فرآیند ذوب بررسی و معادلات بی بعد آن به دست می آید. همچنین اثر غیر همسانگردی در فرآیند ذوب برای اولین بار مدلسازی شده است.

۲- روش مدلسازی

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 که در یک محیط متخلخل غیرهمسانگرد 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، از مدل بوزینسک برای مدلسازی نیروی شناوری استفاده شده است. به دلیل اختلاف دمای محدود، از تغییر خواص ترموفیزیکی در اثر تغییر دما صرف نظر می‌شود. همچنین معادلات حاکم با استفاده از معادلات بریکمن در محیط متخلخل و اضافه کردن ترم های ذوب با روش تعادل حرارتی به دست آمده است. برای مدلسازی از نرم افزار کامسول استفاده شده است. حل مسئله با کد دینامیک سیالات بر اساس روش المان محدود انجام شده است. روش المان محدود یک روش نوین در زمینه پژوهش‌های سیالات به حساب می‌آید. محاسبات برای یک شبکه ثابت انجام شده است.



شکل ۱: نمای شماتیک ازمدل فیزیکی و شرایط مرزی

۲-۲-معادلات حاکم بر مسئله

۱) انتقال حرارت در ماده تغییر فاز دهنده به صورت جابه‌جایی و رسانش انجام می‌شود و همچنین تغییرات دما محدود است و از اثرات تشعشع صرف‌نظر شده است.

۲) به دلیل ناچیز 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 جابجایی 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 ذکر شده در مدلسازی فیزیکی ذوب ماده تغییر فاز دهنده، معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی به ترتیب به صورت زیر به دست آمدند [۱۹-۱۶].

[1]. FAHS

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon}\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\rho_f}{\varepsilon^2}\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial u}{\partial x}\left(\mu_f(\varphi)\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial u}{\partial y}\left(\mu_f(\varphi)\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$
$$-\frac{\mu}{\kappa(x,y)}v+S(T).u \qquad (۲)$$

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon}\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\rho_f}{\varepsilon^2}\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial v}{\partial x}\left(\mu_f(\varphi)\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial v}{\partial y}\left(\mu_f(\varphi)\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$
$$-\frac{\mu}{\kappa(x,y)}v+s(T).v+\rho_f g\beta(T-T_F) \qquad (۳)$$

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

$$(\rho c)_{m,f}\frac{\partial T}{\partial t}+(\rho c p)_f\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\left(\frac{\partial T}{\partial x}\left(k_{m,f}(\varphi)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial T}{\partial y}\left(k_{m,f}(\varphi)\frac{\partial T}{\partial y}\right)\right)$$
$$+\varepsilon\rho_f L_f\frac{\partial\varphi(T)}{\partial t} \qquad (۴)$$

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 بی بعدسازی از روابط زیر استفاده شده است:

$$X=\frac{x}{L_y},\ Y=\frac{y}{L_y},\ U=\frac{uL_y}{\alpha_f},\ V=\frac{vL_y}{\alpha_f},\ \theta_f=\frac{T-T_c}{T_h-T_f},\ \theta_P=\frac{T_P-T_c}{T_h-T_f},\ P=\frac{pL_y^2}{\rho_f\alpha_f^2},\ \Pr=\frac{\nu}{\alpha},$$
$$F_0=\frac{t\alpha_f}{L_y^2},\ Ra=\frac{g\beta(T_h-T_C)L_y^3\Pr}{\nu^2},\ S(T)=\frac{S(T)L_y^2}{\rho_f\alpha_f},\ \mu_r=\frac{\mu_f(\varphi)}{\mu_f},\ \alpha_r=\frac{\alpha(\varphi)}{\alpha_l},$$
$$Ste=\frac{(C_p)_f(T_h-T_f)}{L_f},\ k_r=\frac{k_f(\varphi)}{k_f},\quad Nh_p=\frac{h_{fP}L^2}{k_f},\ \gamma_p=\frac{k_f}{k_p}, \qquad (۵)$$

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

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \qquad (۶)$$

$$\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial U}{\partial F_0}+\frac{1}{\varepsilon^2}\left(U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial X}+\frac{Pr}{\varepsilon}\left(\frac{\partial U}{\partial X}\left(\mu_r\frac{\partial U}{\partial X}\right)+\frac{\partial U}{\partial Y}\left(\mu_r\frac{\partial U}{\partial Y}\right)\right)$$
$$+\frac{Pr}{Da}U+S(T)U \qquad (۷)$$

$$\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial V}{\partial F_0}+\frac{1}{\varepsilon^2}\left(U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{Pr}{\varepsilon}\times\left(\frac{\partial V}{\partial X}\left(\mu_r\frac{\partial V}{\partial X}\right)+\frac{\partial V}{\partial Y}\left(\mu_r\frac{\partial V}{\partial Y}\right)\right)$$
$$+\frac{Pr}{Da}\times\frac{\bar{K}}{K(X,Y)}V+VS(T)+PrRa\theta_f \qquad (۸)$$

و معادله انرژی به روش تعادل حرارتی:

$$\left[\frac{\partial\theta}{\partial F_0}+\frac{(\rho c)_f}{(\rho c)_{m,f}}\left(U\frac{\partial\theta}{\partial X}+V\frac{\partial\theta}{\partial Y}\right)\right]=\frac{a_{m,f}}{a_f}\left(\frac{\partial}{\partial X}\left(k_r\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(k_r\frac{\partial\theta}{\partial Y}\right)\right)$$
$$-\frac{\varepsilon(c_p)_f\rho_f}{(\rho c_p)_{m,f}}\frac{L_f}{L_f}\frac{1}{Ste}\frac{\partial\varphi(\theta)}{\partial F_0} \qquad (۹)$$

در ادامه برای به دست آوردن خواص مهم در معادله از رابطه‌های زیر استفاده می کنیم:

$$k_{m,f}(\varphi)=(1-\varepsilon)k_P+\varepsilon k_f \qquad (۱۰)$$

$$(\rho c)_{m,f}=(1-\varepsilon)(\rho c)_P+\varepsilon(\rho c_p)_f \qquad (۱۱)$$

$$k_r=(1-\varepsilon)\frac{k_P}{k_{mf,l}}+\varepsilon\frac{k_f}{k_{mf,l}} \qquad (۱۲)$$

برای تعریف محیط متخلخل غیر همسانگرد مانند فهس [۱۹] مقدار گذردهی که رژیم مسئله و ساختار ماده متخلخل به آن وابسته است را به صورت تابعی در جهت افقی به صورت (رابطه ۱۳) تعریف کردیم. این تابع گذردهی در واقع به گونه ای تعریف شده است که در جهت افقی طبق تابع مشخصی باعث افزایش تخلخل محیط می شود.

$$K(X,Y)=e^{\zeta X} \qquad (۱۳)$$

در رابطه بالا مشاهده می‌شود مقدار گذردهی با موقعیت مکان و ضریب (اتا) به دست می‌آید و طبق رابطه (۱۴) گذردهی میانگین حاصل می-شود. همچنین تعریف عدد دارسی به صورت رابطه (۱۵) غیرهمسانگردی بر محیط مسئله اعمال می‌شود.

$$\bar{\kappa}=\int_0^1\int_0^1\kappa(X,Y)\,dXdY \qquad (۱۴)$$

$$Da=\frac{\bar{\kappa}}{L^2} \qquad (۱۵)$$

مسئله برای مقدار ζ های مختلف با روش تعادل بررسی شده است.

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

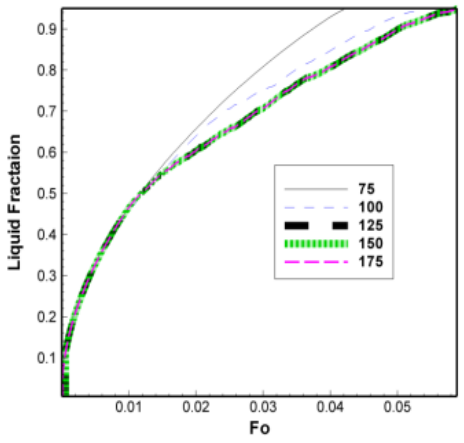
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]

۳-استقلال شبکه

استقلال حل از شبکه برای روش تعادل حرارتی بررسی شد. در روش تعادل حرارتی برای شبکه محاسباتی در حالت مش بندی منظم چندین سایز مختلف شبکه با در نظر گرفتن اعداد بی بعد $Ste=0.1$، $Ra=1\times10^{10}$ و $\gamma=10$ = 5rl مورد بررسی قرار گرفت. با تغییرات بسیار زیادی که در پارمترهای ورودی منطقه خمیری داشتیم و همچنین بررسی مطالعه های [۲۰] و [۲۱]، مناسب ترین مقدار ثابت ناحیه خمیری و اختلاف دما در ناحیه خمیری را به ترتیب $A_mush=1.5\times10^{5}$ و $\Delta T=0.0$ در نظر گرفته شد. برای انجام محاسبات از ابر رایانه دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شد که برای هر حل 16 هسته پردازشی 2 / 2 GH استفاده شده است. برای سایز شبکه 175×175 زمان مورد نیاز برای 90 درصد از ماده تغییر فاز دهنده 8 ساعت و 13 دقیقه و برای شبکه 75×75 یک ساعت و 25 دقیقه بوده است. جزییات زمان لازم بری بررسی استقلال حل از اندازه شبکه در جدول (۱) آمده است. کسر حجمی فاز مایع نیز برای سایز متفاوت شبکه در شکل (۲) آمده است. با توجه به شکل (۲) همگرایی مسئله در شبکه 125×125 ایجاد شده است. در نتیجه نتایج کار حاضر با سایز شبکه 125×125 انجام گرفت.

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

سایز	زمان محاسباتی	موارد
75×75	25یک ساعت و دقیقه	مورد یک
100×100	56یک ساعت و دقیقه	مورد دو
125×125	46دو ساعت و دقیقه	مورد سه
150×150	7پنج ساعت و دقیقه	مورد چهار
175×175	هشت ساعت و 13دقیقه	مورد پنجم

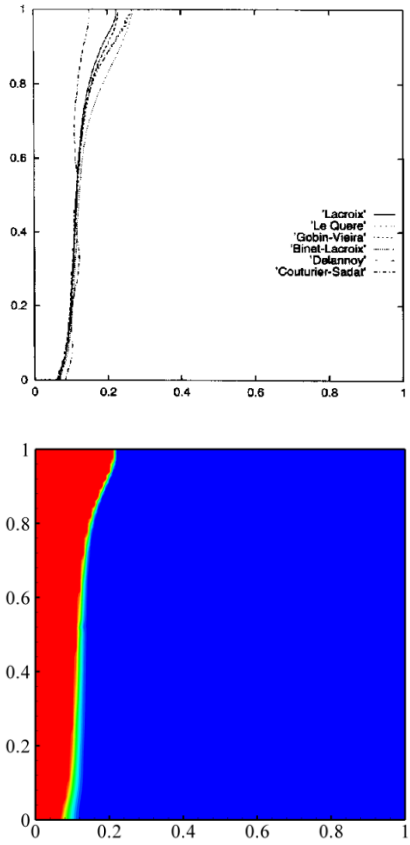


شکل(۲): جبهه ذوب برای مقادیر مختلف اندازه شبکه در روش تعادل حرارتی

۴-اعتبار سنجی نتایج

اعتبارسنجی مسئله برای سه قسمت انجام شده است. از آن‌جا که .مسئله ترکیبی از دو موضوع ذوب مواد تغییر فاز دهنده و ماده متخلخل و همچنین غیرهمسانگردی محیط متخلخل به عنوان موضوع نوآوری است، برای هر موضوع به صورت جداگانه اعتبار سنجی صورت گرفته است.

در بخش اول پژوهش، صحت نتایج به دست آمده از تغییر فاز را بررسی می کنیم. برترند[2] و همکارن [۲۰] یک مطالعه جامع برای ذوب مواد تغییر فاز دهنده برای یک محفظه مربعی که سمت چپ آن در دمای گرم و سمت راست آن در دمای سرد و بالا و پایین هر دو عایق قرار داشت؛ انجام داد. برترند و همکارن نتایج خود را برای جبهه ذوب و کسر حجمی ذوب در زمان های مختلف ارائه دادند. مطالعه برترند و همکاران یک پژوهش جامع و قوی در زمینه تغییرفاز می‌باشد. همچنین اعداد بی‌بعد رایلی، پرانتل، دارسی و استفان را به ترتیب برابر $Ra=1\times10^{7}$ و $Pr=50$ و $Da=10^{-4}$ و $Ste=0.1$ انتخاب شده‌اند. نتایج در شکل (۳) و (۴) برای زمان های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می-شود نتایج حل عددی حاضر توافق و تطابق بسیار خوبی با نتایج برترند و همکاران دارند.

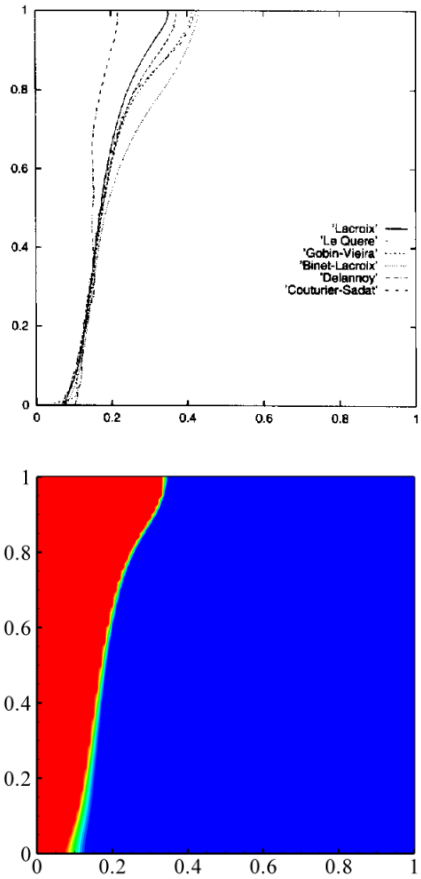


شکل (۳): اعتبارسنجی جبهه ذوب با حل معتبر برترند و همکاران برای زمان $\tau=0.006$ [۲۰].

[2] - Bertrand

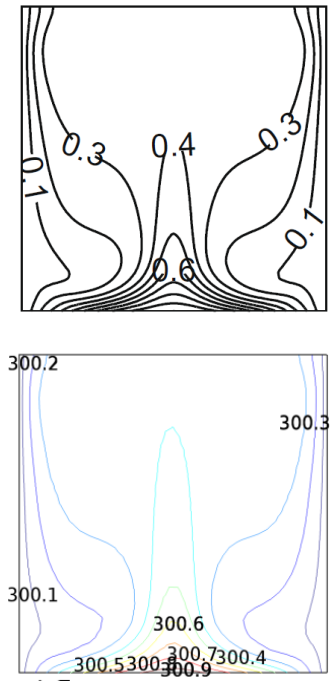
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]

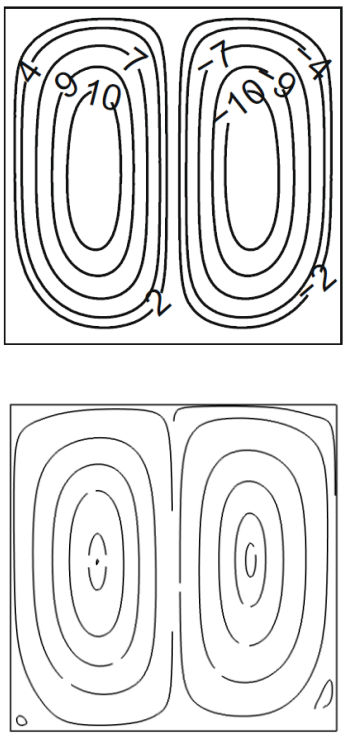


شکل (۴): اعتبارسنجی جبهه ذوب با حل معتبر برترند و همکاران برای زمان($\tau = 0.01$

در بحث اعتبارسنجی و بررسی صحت نتایج پژوهش حاضر در موضوع متخلخل نیز به صورت جداگانه اعتبارسنجی انجام شد. لذا در این قسمت نیز به مقایسه نتایج جداگانه بخش متخلخل پژوهش حاضر با مقالات متخلخل معتبر پیشین پرداخته شده است. باساک[3] و همکاران [۲۱] 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. در شکل (۵) و (۶) خطوط دما و خطوط جریان نشان داده شده است. همچنین برای بررسی بیشتر در شکل (۷) مقدار عدد ناسلت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تطابق بسیار خوبی بین نتایج پژوهش حاضر و نتایج باساک وجود دارد .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 می باشند که با ماده متخلخل اشباع شده است. با مشاهده شکل (۵) و (۶) می بینیم که تطابق بسیار خوبی بین نتایج مطالعه حاضر و نتایج باساک وجود دارد.



شکل (۵): مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج باساک برای خطوط دما [۲۱].

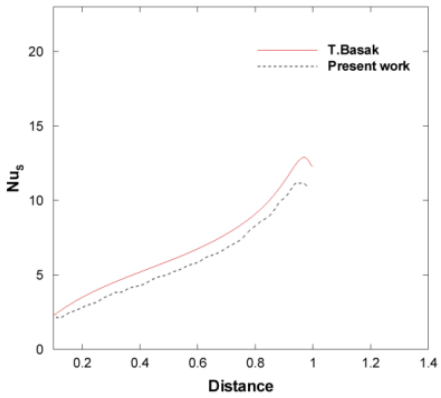


شکل (۶): مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج باساک برای خطوط جریان[۲۱].

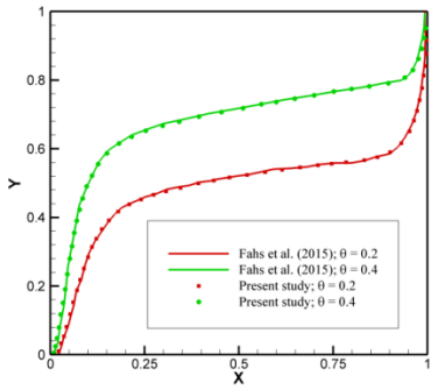
[3] - Basak

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]



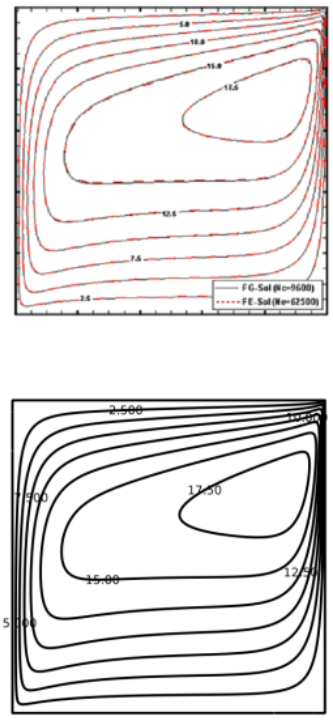
شکل (۷): مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج باساک برای عدد ناسلت دیواره سمت چپ در زاویه صفر درجه [۲۱].



شکل (۸): اعتبارسنجی پژوهش حاضر با نتایج مقاله فهس و همکاران [۱۹].

در اعتبارسنجی دیگر در حوزه متخلخل بر بخش غیرهمسانگرد بودن محیط متخلخل تمرکز می‌کنیم و به مقایسه نتایج این بخش مطالعه حاضر با پژوهش‌های پیشین می‌پردازیم.

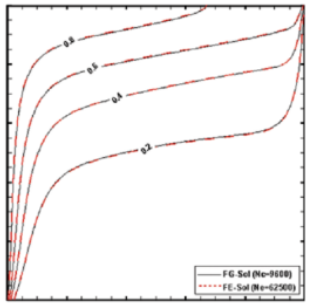
در زمینه محیط‌های متخلخل بحث غیرهمسانگردی با استفاده از اشکال مختلفی از هندسه ناهمسانگرد در پژوهش های زیادی بررسی شده است. غیر همسانگرد بودن گذردهی و ضریب پخش حرارتی تاثیر بسیار زیادی بر نرخ انتقال حرارت کلی می گذارد؛ ولی اخیرا فهس و همکاران [۱۹] در یک مطالعه جامع عددی و تحلیلی با مقایسه نتایج پژوهش های پیشین و همچنین مطالعه حالت های مختلف غیر همسانگردی با دو روش عددی و تحلیلی کوشیدند: یک سنجش مرجع برای اعتبارسنجی روش های عددی در محیط های ناهمسانگرد ارائه کنند. همچنین نتایج خود را برای اولین بار به عنوان یک مرجع در زمینه نا همسانگردی محیط متخلخل ارائه دادند که مرجع بسیاری از محققین قرار گرفته است. لذا در این بخش ما به اعتبار سنجی نتایج مطالعه حاضر با نتایج گزارش شده فهس و همکاران [۱۹] می‌پردازیم. فهس و همکاران [۱۹] نتایج خود را برای یک محفظه مربعی اشباح شده با ماده متخلخل غیرهمسانگرد که دیواره بالا و پایین هر دو عایق و دیواره سمت چپ در دمای گرم و دیواره سمت راست در دمای سرد را برای اعداد رایلی مختلف گزارش داده است. در شکل (۸) با مقایسه نتایج کلی و در شکل (۹) و شکل (۱۰) مقایسه نمودار خط جریان و دمای بی بعد برای نتایج مطالعه حاضر با نتایج گزارش شده فهس مشاهده می‌شود که نتایج تطابق بسیار خوبی با هم دارند.

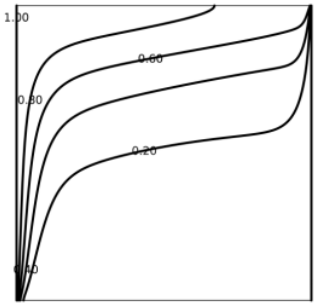


شکل (۹): مقایسه خط جریان برای نتایج پژوهش حاضر و نتایج فهس و همکاران [۱۹].

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]





شکل (۱۰): مقایسه دمای بی بعد برای نتایج پژوهش حاضر و نتایج فهس و همکاران [۱۹].

جدول ۲: خواص اکتادکان، اکسید آلومینیوم

خواص	نماد	اکتادکان (سیال پایه)	سرامیک اکسید آلومینیوم	واحد
چگالی	ρ	800	2719	$\left(kg / m^3\right)$
رسانش حرارتی	K	0/2	182	$\left(W / m.K\right)$
ظرفیت گرمای ویژه	C	1250	871	$\left(J / kg.K\right)$
ضریب انبساط حرارتی	β	2×10^{-3}	-	$\left(1 / K\right)$
دمای ذوب	T_f	303/16	-	K
گرمای نهان ذوب	L_f	1.25×10^{5}	-	$\left(J / kg\right)$
ویسکوزیته دینامیکی	μ	8×10^{-3}	-	$\left(kg / m.s\right)$
تخلخل	ε	-	0/95	-

۵-نتایج و بحث

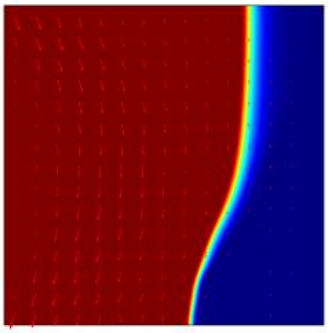
در این مساله از سیال پایه اکتادکان که در یک محیط متخلخل غیرهمسانگرد در جهت افقی، پوشانده شده از یک فوم سرامیکی (اکسیدآلومینیوم) است، استفاده شده است. رایلی و عدد دارسی مطابق با قسمت های قبل به ترتیب 10^7و 10^{-4} گرفته شد. عدد پرانتل برابر با ۵۰ متناسب با اکتادکان در نظر گرفته شده است. عدد استفان هم با در نظر گرفتن یک درجه اختلاف دمای سرد و گرم برابر با مقدار کوچک ۰.۱ گرفته شده است. خواص اکتادکان و اکسید آلومینیوم در جدول (۲) آمده است. اکتادکان از دسته مواد تغییر فاز دهنده غیر فلزی به نام آلکان ها هستند. آلکان ها نیز مهمترین و رایج ترین مواد تغییر فازدهنده غیر فلزی هستند که به نوعی بر اثر ارزان بودن و در دسترس بودن رویه پژوهش ها به سمت این مواد هست. بنابراین بهبود انتقال حرارت در این مواد بسیار مهم است. اکسید آلومینیوم یک عایق الکتریکی است، اما دارای رسانایی گرمایی نسبتا بالایی است. البته این رسانایی گرمایی با دما تغییر می کند. همچنین رسانایی گرمایی آلومینا در بین سرامیک ها بالا است .به دلیل بالا بودن نقطه ی ذوب آلومینا این ماده مقاومت و ثبات حرارتی بالایی دارد. همچنین به علت سختی بالا باعث شده از آلومینا به عنوان یک جزء مناسب برای کاربردهای ساینده و ابزارهای برش استفاده شود. سختی آلومینا بعد از الماس آلومینا در رتبه دوم قرار دارد.

در این بخش اثر غیرهمسانگردی با روش تعادل حرارتی بررسی شده است. برای تعریف محیط متخلخل غیر همسانگرد مانند فهس [۲۳] مقدار گذردهی که رژیم مسئله و ساختار ماده متخلخل به آن وابسته است را به صورت تابعی (رابطه ۱۳) در جهت افقی تعریف کردیم. که در (رابطه ۱۳) مشاهده می‌شود مقدار گذردهی با موقعیت مکان و ضریب (اتا) به دست می‌آید. بنابراین مسئله در ادامه برای مقدار ζهای مختلف با روش تعادل حرارتی بررسی شده است.

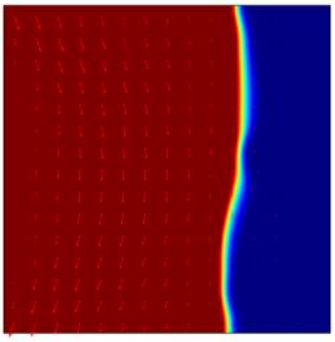
در شکل (۱۱) و (۱۲) جبهه ذوب برای دو زمان $Fo = 0.3$ و Fo=0.4 برای سه حالت $\zeta = 0$، $\zeta = 2$و $\zeta = 4$ با روش تعادل حرارتی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در حالت $\zeta = 2$ جبهه ذوب در زمان مشخص ($Fo = 0.03$) نسبت به حالت $\zeta = 0$ جلوتر و پیشرفت کرده است. همچنین با افزایش مقدار ζ جبهه ذوب جلوتر می‌رود. بنابراین به نظر می رسد با اعمال کردن محیط متخلخل غیرهمسانگرد مدنظر می‌توان با افزایش مقدار تخلخل، انتقال حرارت را افزایش داد و باعث بهبود فرآیند ذوب شد. با افزایش تخلخل توزیع دمای بیشتر و بهتری می توان در ماده داشت و این امر باعث تقویت انتقال حرارت و تسریع فرآیند ذوب می شود.

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

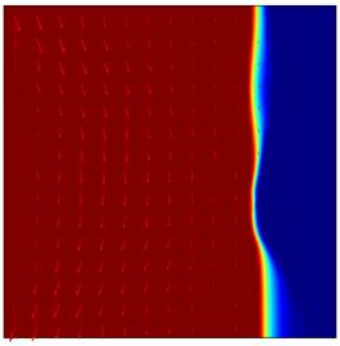
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]



(a)

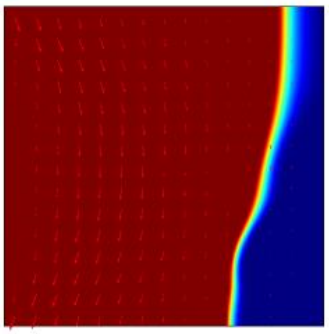


(b)

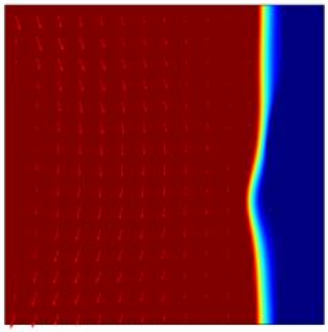


(c)

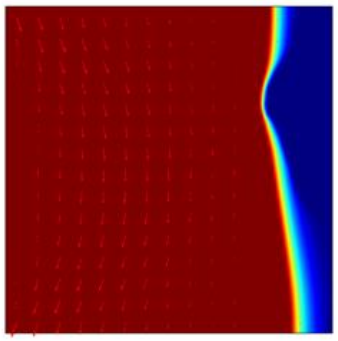
شکل (۱۱): موقعیت جبهه ذوب در محیط های غیر همسانگرد مختلف با روش تعادل برای زمان Fo=0.03 ، (a: $\zeta = 0$ و b: $\zeta = 2$ و c: $\zeta = 4$)



(a)



(b)



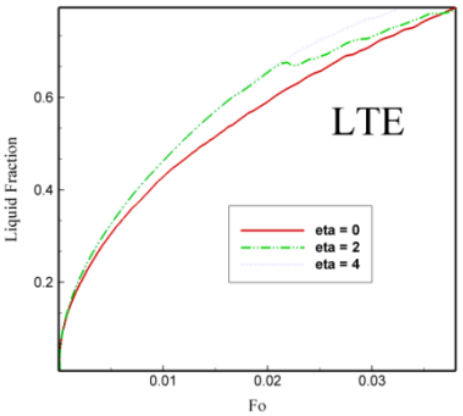
(c)

شکل (۱۲): موقعیت جبهه ذوب در محیط های غیر همسانگرد مختلف با روش تعادل برای زمان Fo=0.04 ، (a: $\zeta = 0$ و b: $\zeta = 2$ و c: $\zeta = 4$)

در شکل (۱۳) کسر حجمی ذوب برای ζهای مختلف نشان داده شده است که مشخص است با افزایش غیرهمسانگردی کسر حجمی ذوب در هر زمان مشخص نیز بیشتر شده است. در ابتدای فرآیند که انتقال حرارت غالب هدایت است افزایش غیرهمسانگردی تاثیر ندارد و با گذشت زمان با غالب شدن انتقال حرارت جابه جایی بر انتقال حرارت هدایتی، غیر همسانگردی تاثیر بیشتری بر انتقال حرارت می‌گذارد. در زمان های ۰.۰۱ تا ۰.۰۲۵ در حالت اتا های ۲ و ۴ غیر همسانگردی بر هم منطبق می شود چون در این محدوده زمانی انتقال حرارت غالب هدایت است. با فاصله گرفتن از دیواره گرم نیروی شناوری افزایش می‌یابد و انتقال حرارت جابه‌جایی بر مسئله حاکم می‌شود.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]



شکل (۱۳): کسرحجمی ذوب برای غیر همسانگردی مختلف در روش تعادل حرارتی

۷-نتیجه گیری

فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در محیط های متخلخل غیرهمسانگرد درون یک محفظه مربعی بسته به ضلع $۱۰\ cm$ در حالتی که دیواره سمت چپ در دمای گرم و دیواره سمت راست در دمای سرد و دیواره های بالا و پایین هردو عایق واقع شده بود؛ برای مقدار غیرهمسانگردی های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شبکه محاسباتی به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر مسئله با روش تعادل حرارتی با معادلات بریکمن به دست آمدند. همچنین معادلات حاکم با استناد بر پارامترهای همچون رایلی، استفان، پرانتل و دارسی به فرم بی بعد خود منتقل شدند. معادلات با روش المان محدود تحت یک کد دینامیک سیالات با نرم افزار کامسول حل شده است. به عنوان هدف نهایی مطالعه حاضر برای اثر محیط های متخلخل غیرهمسانگرد در میدان ذوب بررسی شد. اثر محیط غیرهمسانگردی با استفاده از یک تابع نمایی در جهت افقی که وابسته به ضریب ζ و موقعیت مکان است؛ تعریف شد. نتایج برای مقدار ζ های مختلف با روش تعادل به دست آمد. نتایج نشان داد که غیرهمسانگردی با تابع مشخص شده باعث افزایش رسانش و انتقال حرارت هدایتی در ماتریس جامد متخلخل می شود و با افزایش انتقال حرارت بهبود و تسریع فرآیند ذوب را به دنبال دارد. همچنین این تاثیر با افزایش ζ (غیر همسانگردی) بر فرآیند ذوب بیشتر شده و فرآیند ذوب بیشتر بهبود پیدا می‌کند. همچنین با افزایش مقدار ζ اختلاف کسر حجمی ذوب بیشتر هم می شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از یک محیط غیرهمسانگرد مناسب می‌تواند باعث یکنواخت کردن جبهه ذوب در فرآیند ذوب شود.

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 تغییرفازدهنده در محیط متخلخل غیرهمسانگرد می-باشند.

۵- غیرهمسانگرد بودن محیط متخلخل بر فرآیند ذوب تاثیر گذار است و محیط غیر همسانگرد موردنظر باعث بهبود فرآیند ذوب می شود.

۳- افزایش غیرهمسانگردی کسر حجمی ذوب بیشتری در زمان معین به دنبال دارد و فرایند ذوب بهبود می‌یابد.

نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که غیر همسانگردی باعث بهبود فرآیند ذوب و کسر حجمی ذوب در زمان معین می‌شود.

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
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

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]

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	
سیال	f
متوسط سیال و فوم	m, f
خواص در اینترفیس ذوب	F
فاز مایع	l
فاز جامد	s
گرم	h
سرد	c
جامد متخلخل	p

مراجع

[1]. Pielichowska Kinga, and Krzysztof Pielichowski. "Phase change materials for thermal energy storage." *Progress in materials science* 65 (2014): 67-123.

[2]. Mazman Muhsin, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, Miquel Nogues, Hunay Evliya, and Halime Ö. Paksoy. "Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems." *Renewable Energy* 34, no. 6 (2009): 1639-1643.

[3]. Joseph, Alain, Moe Kabbara, Dominic Groulx, Paul Allred, and Mary Anne White. "Real-time Testing of Phase-Change Materials for Solar Thermal Energy Storage." In *Proc. of 13th International Conference on Clean Energy (ICCE-2014)*, pp. 265-274.

[4].Ling, Ziye, Zhengguo Zhang, Guoquan Shi, X Fang, Lei Wang, Xuenong Gao, Yutang Fang, T Shuangfeng Wang, and Xiaohong Liu. "Review on management systems using phase change materi electronic components, Li-ion batteries and phot modules. " *Renewable and Sustainable Energy Re*\ (2014): 427-438.

[5]. Rastogi, Monisha, Aditya Chauhan, Rahul Vaish, and Anil Kishan. "Selection and performance assessment of Phase Change Materials for heating, ventilation and air-conditioning applications." *Energy Conversion and Management* 89 (2015): 260-269.

[6]. Doostani, Ali, Mohammad Ghalambaz, and Ali J. Chamkha. "MHD natural convection phase-change heat transfer in a cavity: analysis of the magnetic field effect." Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 39.7 (2017): 2831-2846.

.[7]. Nkwetta, Dan Nchelatebe, and Fariborz Haghighat. "Thermal energy storage with phase change material—a state-of-the art review. " *Sustainable Cities and Society* 10 (2014): 87-100.

[8]. Yang, Yanyang, Jie Luo, Guolin Song, Yuan Liu, and Guoyi Tang. "The experimental exploration of nano-Si3N4/paraffin on thermal behavior of phase change materials. " *Thermochimica Acta* 597 (2014): 101-106.

[9]. Zhao, C. Y., W. Lu, and Yuan Tian. "Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs)." *Solar energy* 84, no. 8 (2010): 1402-1412.

[10]. Siahpush, Ali, and John Crepeau. "Phase change heat transfer enhancement using copper porous foam." *Journal of Heat Transfer* 130, no. 8 (2008): 082301.

[11]. Rathod, Manish K., and Jyotirmay Banerjee. "Entropy generation assessment of shell and tube latent heat storage unit. " *International Journal of Exergy* 16, no. 1 (2015): 97-108.

[12]. Buonomo, Bernardo, Oronzio Manca, Davide Ercole, and Sergio Nardini. "Numerical simulation of thermal energy storage with phase change material and aluminum foam." (2016).

[13]. Vadasz, Peter. "Bifurcation phenomena in natural convection in porous media." *Heat Transfer* 5 (1990): 147-152.

[14]. Nield, D. A., and A. V. Kuznetsov. "Onset of convection with internal heating in a weakly heterogeneous porous medium. " *Transport in porous media* 98, no. 3 (2013): 543-552.

[15]. Simmons, Craig T., Thomas R. Fenstemaker, and John M. Sharp Jr. "Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: approaches, resolutions and future challenges." *Journal of Contaminant Hydrology* 52, no. 1-4 (2001): 245-275.

[16]. Prasad, Awadhesh, and Craig T. Simmons. "Unstable density-driven flow in heterogeneous porous media: A stochastic study of the Elder [1967b]"short heater" problem." *Water Resources Research* 39, no. 1 (2003).

[17]. Nield, D. A. "General heterogeneity effects on the onset of convection in a porous medium."

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]

In *Emerging topics in heat and mass transfer in porous media*, pp. 63-84. Springer, Dordrecht, 2008.

[18]. Holzbecher, Ekkehard. "Numerical studies on thermal convection in cold groundwater. " *International journal of heat and mass transfer* 40, no. 3 (1997): 605-612.

[19]. Fahs, Marwan, Anis Younes, and Ahmed Makradi. "A reference benchmark solution for free convection in a square cavity filled with a heterogeneous porous medium." *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals* 67, no. 5 (2015): 437-462.

[20]. Bertrand, Olivier, Bruno Binet, Hervé Combeau, Stéphane Couturier, Yves Delannoy, Dominique Gobin, Marcel Lacroix et al. "Melting driven by natural convection A comparison exercise: first results. " *International Journal of Thermal Sciences* 38, no. 1 (1999): 5-26.

[21]. Basak, Tanmay, 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, no. 7-8 (2006): 1430-1441.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.1.4.7]