نحوه استناد به این مقاله: دوستانی دزفولی، علی؛ قلم‌باز، محمد؛ شمخه، علی جواد؛ طیبی، ایثار (۱۳۹۵). تحلیل اثر زاویه قرارگیری محفظه بر انتقال حرارت تغییر فاز درون یک محفظه بسته با استفاده از فرمولاسیون آنتالپی تخلخل. تبدیل انرژی، ۱(۴)، ۱-۱۰.

تحلیل اثر زاویه قرارگیری محفظه بر انتقال حرارت تغییر فاز درون یک محفظه بسته با استفاده از فرمولاسیون آنتالپی تخلخل

علی دوستانی دزفولی[۱]، محمد قلم باز[۲و*] علی جواد شمخه[۳] و ایثار طیبی[۴]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۲]استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۳]استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه دولتی آموزش و پرورش کاربردی، الشویخ، کویت
[۴]سرپرست امور دفاتر ارتباط با دانشگاه و مراکز علمی (اداره پژوهش و فناوری شرکت ملی و حفاری ایران)

دریافت: تیر ۹۵، بازنگری: مرداد ۹۵، پذیرش: شهریور ۹۵

چکیده

در این مقاله با استفاده از یک حل عددی اثر زاویه محفظه بر روی شبیه‌سازی رفتار ذوب یک ماده تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مسئله مورد بررسی، یک گرم‌کن در دیواره سمت چپ قرار گرفته است. دیواره سمت راست و دیواره‌های افقی به ترتیب در دمای پایین‌تر از دمای ذوب و عایق حرارتی فرض شده‌اند. معادلات حاکم بر مسئله در ابتدا با یکدیگر کوپل شده‌اند، سپس به شکل بی‌بعد خود انتقال یافته‌اند و در نهایت به روش المان محدود با استفاده از کدنویسی کامپیوترسلوشن و زبان متلب حل شده است. در روش حاضر شبکه محاسباتی به صورت ثابت در نظر گرفته شده و به منظور مدل‌سازی فرآیند تغییر فاز از روش آنتالپی متخلخل استفاده شده است. در مدل حاضر جریان سیال در منطقه خمیری به عنوان جریان در یک محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. زوایای ۰ تا ۶۰ درجه به‌منظور بررسی تأثیر زاویه محفظه بر رفتار ذوب ماده تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش زاویه محفظه از ۰ تا ۶۰ درجه، سبب رفتار ذوب یکنواخت‌تری شده و میزان انتقال حرارت و نهایتاً میزان کسر فاز مایع را افزایش می‌دهد و در نتیجه افزایش زاویه محفظه می‌تواند کنترل بسزایی بر روی فرآیند ذوب در فرآیندهای تولید داشته باشد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** m.ghalambaz@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: تغییر فاز، ذوب، فرمولاسیون آنتالپی تخلخل، روش عددی شبکه ثابت، زاویه محفظه

۱- مقدمه

فرآیندهای تغییر فاز (ذوب، انجماد، تبخیر، تصعید و ...) از جمله فرآیندهای فیزیکی هستند که در بسیاری از رخدادهای طبیعی و عملیات صنعتی مشاهده می‌شوند. با توجه به اهمیت تغییر فاز، در بسیاری از عملیات صنعتی و غیر صنعتی، شناخت و تبیین چگونگی انجام این فرآیند و عوامل تأثیرگذار بر آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. گروه‌های خاصی از مواد به دلیل داشتن خصوصیات مناسبی مانند گرمای نهان بالا، دمای تغییر فاز مناسب و تغییر حجم اندک حین تغییر فاز به‌منظور مدیریت حرارتی (کنترل درجه حرارت سیستم‌های حرارتی) در برخی از فرآیندهای حرارتی استفاده می‌گردد. از این مواد اصطلاحاً به عنوان مواد تغییر فاز دهنده[۱] نام‌برده می‌شود. مواد تغییر فاز دهنده موادی هستند که طی فرآیند تغییر حالت از جامد به مایع، انرژی را ذخیره می‌کنند و از پیوندهای شیمیایی برای ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی استفاده می‌کنند. مواد تغییر فاز دهنده، بدون استفاده از تجهیزات مکانیکی و به صوت کاملاً 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 دارند. با توجه به صنعتی‌تر شدن کشورها و با ایجاد فاصله بین عرضه و تقاضای انرژی در بازار مصرف، دانشمندان و محققین به

[1] -PCM (Phase Change Materials)

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.5.6]

دنبال پیدا کردن منابع جدید انرژی و همچنین بهبود عملکرد وسایل مرتبط با این منابع هستند. از جمله این وسایل، سیستم‌های ذخیره کننده انرژی حرارتی با گرمای نهان است که به‌طور قابل‌توجهی در سراسر جهان موردتوجه قرار گرفته‌اند و این به دلیل پتانسیل زیاد آن‌ها برای ذخیره‌سازی انرژی و توانایی آن‌ها جهت تأمین یا جذب مقدار نسبتاً بزرگی از انرژی حرارتی است [۱].

اهمیت فرآیندهای ذوب و انجماد سبب شده است تا پژوهشگران بیش‌ازپیش به حل عددی و بررسی آزمایشگاهی مشتاق گردند. تاکنون پژوهش‌های گوناگونی در حوزه تغییر فاز صورت گرفته است که از جمله به‌صورت خلاصه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

داس و دوتا[1] [۲] به طور تجربی و عددی رفتار ذوب یک پارافین واکس خالص را در یک فضای حلقوی میان دو استوانه افقی هم مرکز مورد بررسی قرار دادند. در لوله داخلی سیالی در دمای گرم جریان داشت در حالی که لوله خارجی عایق شده بود. آن‌ها به طور تجربی مسیر حرکت فصل مشترک جامد- مایع را که بین پارافین ذوب شده و جامد قرار داشت در طی پیشرفت فرآیند ذوب شدن ارائه کردند. در این پژوهش داس و دوتا [۲] دریافتند که زمان ذوب شدن با افزایش عدد رایلی کم می‌شود. آنیکا ترپ[2] [۳] به بررسی عددی و آزمایشگاهی انتقال حرارت در طول فرآیند ذوب و انجماد پارافین درون یک واحد ذخیره‌سازی انرژی دو لوله‌ای پرداخت. در این پژوهش، انتقال حرارت جابجایی با پرانتل متوسط، انتقال حرارت هدایتی از سیال عامل به دیواره و از دیواره به مواد تغییر فاز دهنده و نهایتاً ذوب و انجماد آن به روش آنتالپی رابطه بندی شده است. نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که سرعت سیال عامل سریعاً به حالت توسعه یافته می‌رسد. در این پژوهش نتایج عددی، تقریب نسبتاً خوبی را برای فرآیند ذوب و انجماد نشان داده است. جولین و همکاران[3] [۴] به تدوین فرمولاسیون، و پیاده‌سازی یک روش عددی به منظور بهینه‌سازی طراحی دیوارهای خورشیدی غیر فعال شامل مواد تغییر فاز دهنده پرداختند.

پیشرفت تکنولوژی و نیاز برای نصب پنل‌های مواد تغییر فاز دهنده در فضاهای شیب‌دار و نیز ضرورت کنترل یکنواختی ذوب مواد تغییر فاز دهنده در صنعت ذوب فلزات، سبب شده است که مسئله انتقال حرارت جابجایی تغییر فاز در محفظه‌های شیب‌دار مهم و ضروری تلقی گردد. لاک و فو[4] [۵]، ثابت کردند که بیشترین انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی، را زمانی می‌توان بدست آورد که به طور بهینه شیب‌دار گردد. تسنیم و محمود[5] [۶] به بررسی عددی جریان جابجایی آزاد در یک محفظه L شکل مورب پرداختند. این مطالعات نشان داده است که میزان انتقال حرارت برای محدوده مشخصی از اعداد رایلی با تغییرات زاویه ثابت می‌باشد. رحمان و شریف[6] [۷] مطالعات عددی بر جابجایی آزاد در محفظه مستطیلی شیب‌دار با نسبت وجه‌های مختلف، انجام دادند. ایشان دریافتند که در محفظه‌های مربعی با طول و عرض برابر در یک شیب مشخص، انتقال حرارت جابجایی دیواره‌های سرد و گرم بیشترین مقدار را دارد. این در حالی است که در محفظه‌های با نسبت طول به عرض زیاد، همواره با افزایش شیب، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. امین الساداتی و قاسمی[7] [۸] نیز، جابجایی آزاد در محفظه شیب‌داری که دو دیواره مجاور آن در دو دمای مختلف بود را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان دریافتند که تأثیر زاویه محفظه در اعداد رایلی کم، بر خطوط جریان و دما ناچیز است و در رایلی‌های بزرگ، جابجایی آزاد در محفظه به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در تمامی اعداد رایلی، دمای متوسط محفظه با افزایش زاویه محفظه، تا یک مقدار ماکزیمم، افزایش یافته و پس‌ازآن کاهش می‌یابد. نرخ کاهش دما در اعداد رایلی بزرگ مشهودتر است. ایشان همچنین نشان دادند که برای اعداد رایلی بزرگ، زاویه محفظه بهینه‌ای وجود دارد که نرخ انتقال حرارت را ماکزیمم می‌کند.

توجه به پیشینه پژوهش در ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که رفتار ذوب مواد تغییر فاز دهنده بدون شیب‌دار کردن محفظه در پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین بررسی اثر شیب محفظه بر روی انتقال حرارت جابجایی آزاد برای یک سیال، بدون در نظر گرفتن تغییر فاز (ذوب) بررسی شده است. ولی تاکنون پژوهشی که رفتار ذوب مواد تغییر فاز دهنده را در حال تغییر فاز با مدنظر قرار دادن اثر شیب محفظه بررسی نماید، صورت نگرفته است. هدف پژوهش حاضر، مدل‌سازی ماده تغییر فاز دهنده (برای مثال پارافین در حال ذوب) با در نظر گرفتن اثر شیب‌دار کردن محفظه است.

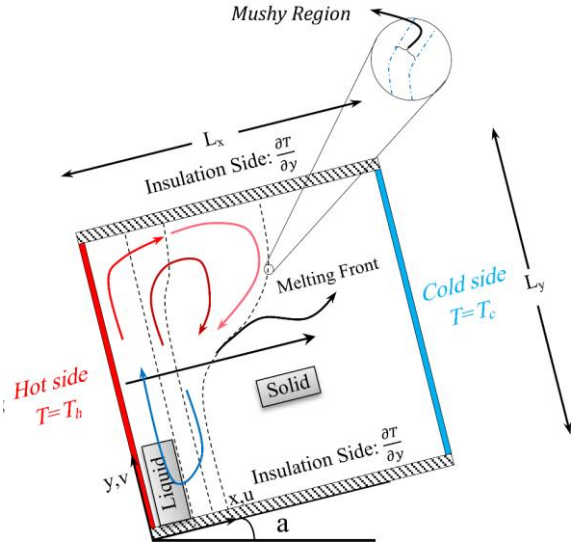
۲- بیان مسئله و معادلات حاکم

مطابق شکل ۱، یک محفظه بسته مستطیل شکل با طول L_x و ارتفاع L_y که با افق زاویه a می‌سازد را در نظر بگیرید. دیواره سمت چپ در دمای گرم (T_h) و دیواره سمت راست در دمای سرد (T_c) قرار دارد. وجوه دیگر نیز عایق هستند. نسبت ارتفاع محفظه به طول محفظه $L_y/L_x=AR$ می‌باشد. درون محفظه با یک ماده تغییر فاز دهنده در حالت جامد و در دمای اولیه (T_0) پر شده است. دمای ذوب جامد رسانا برابر T_f می‌باشد ($T_c<T_f<T_h$). اختلاف دمای صفحه گرم و دمای ذوب جامد محدود (کمتر از ده درجه سلسیوس) در نظر گرفته شده است. بنابراین، برای

[1] -Das and Dutta
[2] -Anica Trp
[3] - Joulin et al.
[4] -Lock and Fu
[5] -Tasnim and Mahmoud
[6] -Rahman and Sharif
[7] -Aminossadat and Ghasemi

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.5.6]

مدل‌سازی نیروی شناوری از مدل بوزینسک استفاده شده است. به دلیل اختلاف دمای محدود، از تغییر خواص ترموفیزیکی در اثر تغییر دما صرف نظر می‌شود ولی تغییر خواص در اثر تغییر فاز می‌تواند مهم باشد و در مدل‌سازی لحاظ شده است.



شکل ۱: شماتیکی از مدل فیزیکی

معادلات حاکم بر تغییر فاز با در نظر گرفتن اثر زاویه محفظه، به ترتیب به معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی تخصیص می‌یابند که به صورت زیر نمایش داده می‌شوند [۹, ۱۰]:

پیوستگی

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

u سرعت در راستای x (متر بر ثانیه)

v سرعت در راستای y (متر بر ثانیه)

مومنتوم در جهت x

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu(\varphi)\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu(\varphi)\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right)+\rho g\beta\left(T-T_f\right)\sin a+uS(T) \qquad (۲)$$

که در آن:

ρ چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)

P فشار (پاسکال)

t زمان (ثانیه)

μ ویسکوزیته دینامیکی (کیلوگرم بر متر ثانیه)

مومنتوم در جهت y

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu(\varphi)\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu(\varphi)\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right)+\rho g\beta\left(T-T_f\right)\cos a+vS(T) \qquad (۳)$$

انرژی

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha(\varphi)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\alpha(\varphi)\frac{\partial T}{\partial y}\right)\right)-\frac{L}{C_p}\frac{\partial\varphi}{\partial t} \qquad (۴)$$

که در آن:

T دما (کلوین)

α ضریب انتشار حرارتی (مترمربع بر ثانیه)

L گرمای نهان ذوب (ژول بر کیلوگرم)

C_p گرمای ویژه در فشار ثابت (ژول بر کیلوگرم کلوین)

φ کسر ذوب شده (کسر حجمی فاز مایع)

ترم شناوری در معادلات (۳) و (۴)، نیروی شناوری است که منجر به انتقال گرمای طبیعی در بخش مایع (ذوب شده) می‌گردد و با در نظر گرفتن تقریب بوزینسک به صورت زیر بیان می‌گردد

$$F=\rho\beta g\left(T-T_f\right) \qquad (۵)$$

و جمله S(T) در معادلات (۳) و (۴)، مدل کارمن کازنی است که اثر میرایی در منطقه خمیری را با افزودن رابطه (۶) به معادله مومنتوم بیان می‌کند [۱۱].

$$S(T)=-A_{mush}\frac{(1-\varphi(T))^2}{\varphi(T)^3+\varepsilon} \qquad (۶)$$

در معادله (۶)، A_{mush} ثابت ناحیه خمیری، ε ثابت معادله کارمن کازنی و φ کسر فاز ذوب است که تابع دما بوده و با توجه به توزیع دما در دامنه حل، نواحی مذاب و جامد را بیان می‌کند؛ زمانی که مقدار کسر ذوب شده برابر صفر گردد (ناحیه جامد) مقدار عددی این جمله و تأثیر آن در معادله مومنتوم زیاد خواهد شد و زمانی که مقدار کسر ذوب شده برابر یک گردد (ناحیه سیال)، این جمله به صفر میل نموده و حرکت سیال در حالت مذاب فقط تحت تأثیر نیروهای حجمی صورت خواهد گرفت [۱۱].

$$\varphi=\begin{cases}0 & ,T<T_f-\frac{\Delta T}{2}\\ \frac{T-(T_f+\Delta T/2)}{\Delta T} & ,T_f-\frac{\Delta T}{2}<T<T_f+\frac{\Delta T}{2}\\ 1 & ,T>T_f+\frac{\Delta T}{2}\end{cases} \qquad (۷)$$

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.5.6]

رفتار سیال در ناحیه خمیری به صورت کاملاً استاتیکی نیست؛ علاوه بر این انتقال حرارت از نوع همرفتی در ناحیه خمیری نقش اصلی و مؤثری را ایفا می‌کند. مدل‌سازی نادرست پروفیل سرعت سبب پیش‌بینی نادرست مکان سطح مشترک جامد/مایع در طول فرآیند تغییر فاز (ذوب) خواهد شد. می‌توان با وابسته کردن لزجت سیستم با کسر فاز ذوب شده در قالب رابطه (۸) در محدوده زمانی معین، سرعت همگرایی کد کامپیوترسلوشن را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

$$\mu(T)=\mu\left(1+A_{mush}(1-\varphi)\right) \qquad (۸)$$

پخش حرارتی در فاز مایع، منطقه خمیری و نیز در فاز جامد به صورت یک تابع خطی از کسر حجمی فاز مایع، به صورت رابطه (۹) در ادامه تعریف می‌گردد:

$$\alpha(\varphi)=\varphi\alpha_l+\alpha_s(1-\varphi) \qquad (۹)$$

روابط (۱۰) تا (۱۴) متغیرها و پارامترهای بی‌بعد مورد استفاده در معادلات و ارائه نتایج را نشان می‌دهند.

$$X=\frac{x}{L_y}\ ,\ Y=\frac{y}{L_y}\ ,\ U=\frac{uL_y}{\alpha_l}\ ,\ V=\frac{vL_y}{\alpha_l},$$
$$\mu_r=\frac{\mu(\varphi)}{\mu_l},\ \theta=\frac{T-T_f}{T_h-T_f}$$
$$\alpha_r=\frac{\alpha(\varphi)}{\alpha_l}\ ,\ P=\frac{pL_y^2}{\rho\alpha_l^2} \qquad (۱۰)$$

$$Ra=\frac{\rho^2 c_l g\,\beta L_y^3\,(T_h-T_f)}{\mu k_l} \qquad (۱۱)$$

$$Ste=\frac{c_l\,(T_h-T_f)}{L} \qquad (۱۲)$$

$$\Pr=\frac{c_l\mu}{k_l} \qquad (۱۳)$$

که Ra عدد رایلی، Ste عدد استفان، Pr عدد پرانتل است.

با جایگذاری روابط (۱۰) تا (۱۴) در معادلات (۱) تا (۴) خواهیم داشت:

برای فاز مایع (ذوب شده)

پیوستگی

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \qquad (۱۴)$$

مومنتوم در جهت x

$$\frac{\partial U}{\partial F_0}+U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y}=$$
$$-\frac{\partial P}{\partial X}+\Pr\left(\frac{\partial}{\partial X}\left(\mu_r\frac{\partial U}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\mu_r\frac{\partial U}{\partial Y}\right)\right)$$
$$+Ra\,\Pr\theta\sin a+U\,S(T) \qquad (۱۵)$$

مومنتوم در جهت y

$$\frac{\partial V}{\partial F_0}+U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial Y}$$
$$+\Pr\left(\frac{\partial}{\partial X}\left(\mu_r\frac{\partial V}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\mu_r\frac{\partial V}{\partial Y}\right)\right)$$
$$+Ra\,\Pr\theta\cos a+V\,S(T) \qquad (۱۶)$$

انرژی

$$\frac{\partial\theta}{\partial Fo}+U\frac{\partial\theta}{\partial X}+V\frac{\partial\theta}{\partial Y}=$$
$$\left(\frac{\partial}{\partial X}\left(\alpha_r\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\alpha_r\frac{\partial\theta}{\partial Y}\right)\right)-\frac{1}{Ste}\frac{\partial f}{\partial F_0} \qquad (۱۷)$$

۳- روش محاسباتی و استقلال حل از اندازه شبکه

دسته معادلات دیفرانسیل پاره‌ای با مشتقات جزئی روابط (۱۵) تا (۱۸) و شرایط مرزی متناظر با آن‌ها، با استفاده از روش المان محدود حل شده‌اند. در واقع، معادلات حاکم در شکل ضعیف فرموله شده و در نهایت به صورت عددی حل می‌گردد [۱۲]. معادلات به طور کامل با استفاده از روش نیوتن به هم کوپل شده‌اند [۱۳]. لازم به ذکر است که یک حل‌کننده مستقیم پراکنده‌سازی موازی برای حل معادلات جبری، استفاده شده است [۱۴]. تکرار محاسبات تا باقی‌مانده کم‌تر از $۱۰^{-۶}$ برای هریک از معادلات پیوستگی، دو معادله مومنتوم و نیز معادله انرژی ادامه یافته است. در پژوهش حاضر، فرآیند حل در قالب یک کد دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که معادلات حاکم بر مسئله به روش المان محدود با استفاده از کد نویسی کامپیوترسلوشن به کمک نرم‌افزار متلب در طول زمان حل شده است.

برای بررسی استقلال حل از اندازه شبکه محاسباتی در حالت مش‌بندی سازمان یافته (منظم)، چندین سایز متفاوت شبکه با در نظر گرفتن اعداد بی‌بعد Pr=۰/۰۲۱۶ و Ra=۲/۱×۱۰۵ و Ste=۰/۰۳۹ و γ=۱ مورد بررسی قرار گرفت. در مش بندی به صورت منظم (مربعی)، مقدار ثابت ناحیه خمیری و اختلاف دما در ناحیه خمیری به تبعیت از [۱۰] به ترتیب مقدار خیلی بزرگ A_{mush}=۱/۶×۱۰۶ و مقدار خیلی کوچک ΔT=۰/۱ در نظر گرفته شد. بزرگ بودن ثابت ناحیه خمیری و کوچک بودن مقدار اختلاف دما در این ناحیه باعث افزایش دقت حل عددی می‌گردد [۱۵]. انجام محاسبات در شبکه مش‌بندی منظم (مربعی) با استفاده از

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.5.6]

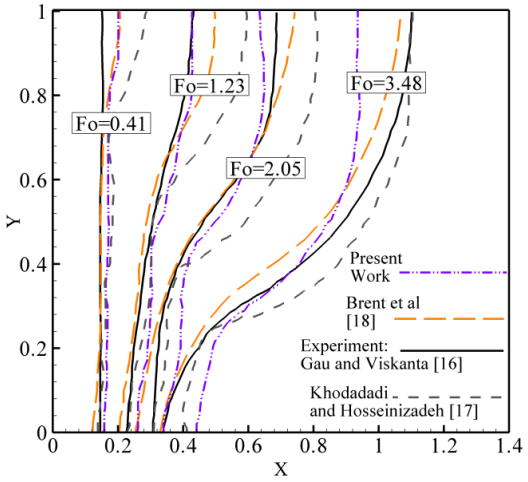
ابررایانه انجام پذیرفت که برای هر حل، ۲۰ هسته پردازشی *GH* ۲/۲ استفاده شده است. برای سایز شبکه ۲۰۰×۲۰۰ زمان مورد نیاز برای ذوب ۹۰ درصد از ماده تغییر فاز دهنده ۳ روز و ۱۰ ساعت و ۴۸ دقیقه و برای سایز شبکه ۱۰۰×۱۰۰، ۱۴ ساعت و ۲۱ دقیقه بوده است. درصد فاز مایع برای سایزهای متفاوت شبکه نیز در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۱ همگرایی از سایز شبکه ۱۵۰×۱۵۰ ایجاد شده است. این سایز شبکه به عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. نتایج کار حاضر در حالت بدون در نظر گرفتن انتقال حرارت همبسته، با سایز شبکه ۱۵۰×۱۵۰ انجام گرفت.

جدول ۱: درصد کسر مذاب برای مقادیر مختلف اندازه شبکه در حالت مش‌بندی منظم (مربعی)

زمان بی‌بعد (*Fo*)	سایز شبکه‌بندی				
	۱۰۰×۱۰۰	۱۲۵×۱۲۵	۱۵۰×۱۵۰	۱۷۵×۱۷۵	۲۰۰×۲۰۰
۱	۲۵/۶٪	۲۷/۵٪	۲۸/۴٪	۲۹/۱٪	۲۸/۵٪
۲	۳۹/۵٪	۴۲/۵٪	۴۴٪	۴۴/۸٪	۴۴/۲٪
۳	۵۲/۸٪	۵۶/۷٪	۵۸/۵٪	۵۹/۵٪	۵۹٪
۴	۶۳/۶٪	۶۸/۳٪	۷۰/۳٪	۷۱/۵٪	۷۱/۲٪
۵	۷۳٪	۷۸/۳٪	۸۰/۴٪	۸۱/۶٪	۸۱/۴٪
۶	۷۸/۴٪	۸۴/۲٪	۸۶/۲٪	۸۷/۵٪	۸۷/۴٪

۴- اعتبارسنجی نتایج

به منظور برای بررسی صحت مدل‌سازی و محاسبات نتایج کار عددی حاضر، مقایسه نتایج حل پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی گائو و ویسکانتا [۱۶] و نتایج چندین حل عددی دیگر است که این حل‌های عددی به منظور اعتبارسنجی پژوهش‌های عددی خود، نتایجشان را با این کار آزمایشگاهی بررسی و قیاس نمودند. در این بررسی آزمایشگاهی گائو و ویسکانتا [۱۶] ذوب یک قطعه از جنس گالیوم را که در یک محفظه مستطیلی با نسبت متناظر (طول محفظه/ارتفاع محفظه) برابر ۰/۷۱۴ را که دیواره‌های بالا و پایین عایق و دیواره سمت چپ در دمای گرم و دیواره سمت راست در دمای سرد قرار دارد را مورد بررسی قرار دادند. اعداد رایلی و پرانتل و استفان در این مطالعه به ترتیب برابر $Ra=6\times10^5$ و $Pr=0/0216$ و $Ste=0/039$ انتخاب شدند. در این بررسی گائو و ویسکانتا [۱۶] برای ارزیابی جبهه ذوب در هر زمان از روش پروب[1] بهره جستند. ارزیابی موقعیت جبهه ذوب و سطح مشترک جامد و مایع برای این مسئله آزمایشگاهی، توسط حل‌های عددی و توسط مقالات معتبر گوناگونی مقایسه شده است. برخی از معتبرترین حل‌های عددی، می‌توان به حل‌های خدادادی و حسینی زاده [۱۷] و برِنت و همکاران [۱۸]، اشاره نمود. خلاصه نتایج عددی موجود در شکل ۲ ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد نتایج حل عددی حاضر توافق خیلی خوبی با بررسی آزمایشگاهی و حل‌های عددی موجود دارد. در زمان بی‌بعد Fo=۳/۴۸ نتایج عددی مقداری از حل آزمایشگاهی فاصله گرفته‌اند اما در توافق با هم (حل‌های عددی) قابل قبول هستند.



شکل ۲: اعتبار سنجی جبهه ذوب با نتایج آزمایشگاهی گائو و ویسکانتا [۱۶] و حل‌های عددی معتبر دیگر

نویسندگان قبلی با توجه به ارزیابی‌هایشان نتیجه گرفتند که این اختلاف بین حل‌های عددی و حل آزمایشگاهی گائو و ویسکانتا [۱۶] می‌تواند به سبب روش اندازه‌گیری جبهه ذوب سطح مشترک جامد - مایع در نتایج آزمایشگاهی گائو و ویسکانتا باشد [۱۶]. نویسندگان نتیجه گرفتند، اندازه‌گیری جبهه ذوب با استفاده از روش پروب با توجه به اینکه در مقادیر بالای Fo سطح مشترک جامد- مایع ناپایدار است این تشخیص دقیق برای مکان سطح مشترک می‌تواند سخت و با دقت نسبتاً پایین‌تری صورت گیرد.

در ادامه، نتایج مطالعه حاضر برای یک سیال معمولی، با نتایج چندین مقاله معتبر در حوزه انتقال حرارت سیالات (بدون فرآیند ذوب) مقایسه شد. در این مقایسه دیواره راست در دمای سرد T_c و دیواره چپ در دمای گرم T_h و دیواره‌های بالا و پایین نیز عایق هستند، در این مطالعات به منظور مقایسه بهتر عدد رایلی و پرانتل به ترتیب برابر $Ra=1\times10^4$ و $Pr=0/71$ انتخاب شدند. جدول ۲ مقایسه عدد ناسلت متوسط در ادبیات تحقیق را با نتایج کار حاضر نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ توافق خوبی بین پیشینه تحقیق با مطالعه حاضر وجود دارد.

۵- نتایج و بحث

در مطالعه ذوب مواد تغییر فاز دهنده پارافینی، عدد پرانتل مقداری بزرگ می‌باشد. در پژوهش حاضر مقدار عدد پرانتل برابر Pr=۵۰ متناظر با پارافین انتخاب شد. عدد استفان نیز با در نظر گرفتن اختلاف دمای ۱۰ درجه سلسیوس بین دیوار سرد و گرم

[1] -Probing method

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.5.6]

درون محفظه مقدار عدد استفان برابر Ste=۰/۱ و متناظر با پارافین در نظر گرفته شد. خواص ترموفیزیکی پارافین در جدول ۳ ارائه شده‌اند. عدد رایلی به تبعیت از مطالعه برترند و همکاران [۱۰] مقدار معمول مرتبه صد هزار و برابر $Ra= ۱\times۱۰^{۷}$ در نظر گرفته شد. همچنین در این بخش محفظه به تبعیت از مطالعه تجربی برترند و همکاران [۱۰] و ادبیات تحقیق برای سیال معمولی [۱۹-۲۳] به صورت مربعی با نسبت متناظر AR=۱ در نظر گرفته شد.

جدول ۲: مقایسه عدد ناسلت $\overline{Nu}$ متوسط بین نتایج کد عددی حاضر با نتایج عددی دیگر در ادبیات تحقیق (عدد رایلی و پرانتل به ترتیب $Ra=۱\times۱۰^{۴}$ و $Pr=۰/۷۱$)

مطالعه حاضر	۲/۲۴۵
الناجم و همکاران [۱۹]	۲/۲۴۹
دووال دیویس [۲۰]	۲/۲۴۳
ماکاتوس و پریکلئوس [۲۱]	۲/۲۰۱
باراکوس و همکاران [۲۲]	۲/۲۴۵
فیوسجی و همکاران [۲۳]	۲/۳۰۲

جدول ۳: خواص ترموفیزیکی پارافین

خاصیت	نماد	مقدار	واحد
چگالی (جامد/ مایع)	ρ	۸۰۰	$(kg.m^{-3})$
گرمای ویژه در فشار ثابت	C_p	۱۲۵۰	$(J.kg.K^{-1})$
ضریب رسانش حرارتی	k	۰/۲	$(W.mK^{-1})$
ضریب انتشار حرارتی	α	۲×۱۰^{-۷}	$(m^2.s^{-1})$
ویسکوزیته سینماتیکی	υ	$۱۰^{-۵}$	$(m^2.s^{-1})$
گرمای نهان ذوب	L_f	$۱/۲۵\times۱۰^{۵}$	$(J.kg^{-1})$

در مطالعه حاضر به منظور بررسی اثر زاویه محفظه بر روی رفتار ذوب ماده تغییر فاز دهنده، مقادیر ۳۰° و ۶۰° برای شیب محفظه مدنظر قرار گرفت. شکل ۳ کانتورهای سرعت و کانتورهای دما را در زمان‌های بی‌بعد مختلف (Fo) در حالت زاویه محفظه ۰° نشان می‌دهد. در شکل ۳ جبهه ذوب جایی قرار دارد که کسر حجمی مذاب ۰/۵ در نظر گرفته شود. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است در شروع فرآیند ذوب فاز مایع در کنار دیواره گرم تشکیل شده است و ناحیه بزرگی از فاز جامد نیز در کنار دیواره سرد واقع گردیده است. جابجایی بین فاز مایع و فاز جامد توسط معادله (۷) صورت می‌گیرد. با شروع فرآیند ذوب انتقال حرارت غالب در سیستم، انتقال حرارتی هدایتی است. با گذشت زمان و پیشرفت فرآیند ذوب، انتقال حرارت همرفتی بر انتقال حرارتی هدایتی غلبه کرده و شکل و الگوی ذوب را در برخی نواحی به صورت منحنی تغییر خواهد داد. شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی شکل ذوب برای زمان‌های بی‌بعد Fo=۰/۱۵ و Fo=۰/۳۵ و نیز Fo=۰/۷۰ است.

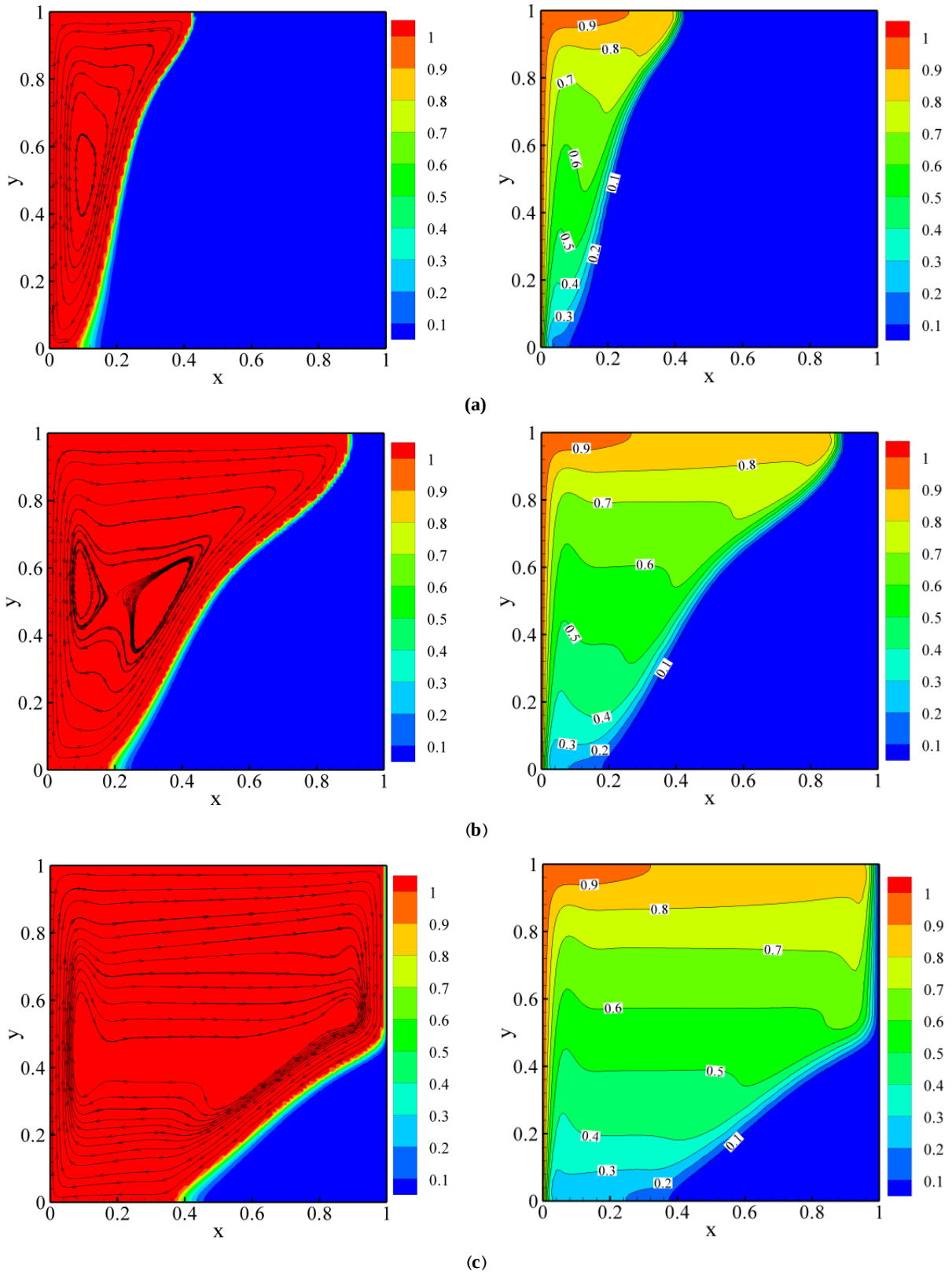
با گذشت زمان جبهه ذوب از مرز گرم به سوی مرز سرد پیشروی کرده و فاصله میان دیواره گرم و جبهه ذوب افزایش می‌یابد. افزایش فاصله میان این دو مرز سبب می‌شود تا میزان بیشتری از جامد محفظه ذوب گردیده و در فرآیند تغییر فاز به سیال ذوب شده تبدیل گردد که این سبب می‌شود میزان سیال درون محفظه افزایش یافته و در نهایت آزادی عمل سیال و تأثیر نیروی شناوری قابل تفکیک‌تر گردد. همان‌گونه که از شکل ۳ مشخص است، گردابه‌های ایجاد شده از نیروی شناوری سعی در انتقال و توزیع گرما از سمت دیواره گرم به سمت دیواره سرد، دارند. شکل ۴ نشان‌دهنده جبهه ذوب برای زوایای ۰°، ۳۰° و ۶۰° در زمان‌های بی‌بعد متفاوت است. همان‌گونه که از شکل ۴ مشخص است افزایش زاویه محفظه از ۰° تا ۶۰° تأثیر مستقیمی بر الگوی نیروی شناوری و میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده دارد در طول زمان دارد. مطابق شکل ۴، با افزایش زاویه محفظه از ۰° تا ۶۰° نیروی شناوری تمایل دارد تا شکل ذوب را از حالت منحنی به صورت خط مستقیم عمودی تغییر دهد که این امر با گذشت زمان و افزایش حجم مذاب و نهایتاً افزایش آزادی عمل سیال، بیشتر می‌گردد. همچنین با گذشت زمان بی‌بعد (Fo) تأثیر بهبودی در انتقال حرارت در اثر افزایش زاویه محفظه از ۰° تا ۶۰° به دلیل تقویت نیروی شناوری و تغییر الگوی جریان آشکارتر خواهد بود.

از شکل ۴ مشخص است که میزان ذوب و در نتیجه جبهه ذوب در هر زمان بی‌بعد نسبت به افزایش شیب محفظه به صورت یک تابع صعودی افزایش می‌یابد، به صورت واضح‌تر می‌توان بیان نمود که افزایش شیب محفظه باعث افزایش میزان ذوب می‌گردد و جبهه ذوب یک رابطه صعودی از زاویه محفظه است. به عنوان مثال هنگامی که عدد فوریه (Fo) برابر ۰/۳۵ است درصد ماده ذوب شده در زاویه محفظه ۰° به صورتی نسبتاً قابل توجه، کمتر از زمانی است که زاویه محفظه ۳۰° و ۶۰° (a=۳۰°،۶۰°) باشد. برای بررسی بیشتر اثر تغییر زاویه بر روی کسر فاز ماده ذوب شده شکل ۶ ارائه گردیده است. شکل ۵ در تائید شکل ۴ نشان می‌دهد که افزایش زاویه محفظه از ۰° تا ۶۰° منجر به افزایش در کسر فاز ذوب شده می‌گردد. به عبارت دیگر تغییر مقدار شیب محفظه با توجه به تفاوت در گرادیان حرارت و نیز تأثیر مستقیم در نیروی شناوری، سبب تغییر شکل ذوب به حالت نامتقارن می‌گردد و نهایتاً نرخ ذوب را افزایش خواهد داد.

Isotherms **Streamlines**

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

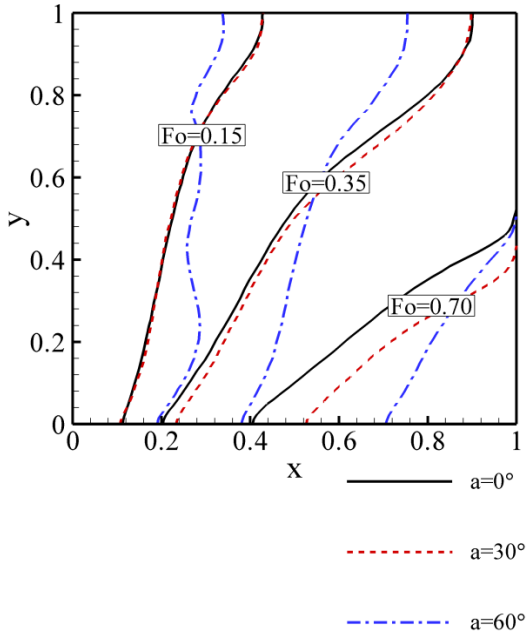
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.5.6]



شکل ۳: خطوط هم دما و خطوط جریان درحالی که a) Fo=۰/۱۵ و b) Fo=۰/۳۵ و c) Fo=۰/۷۰

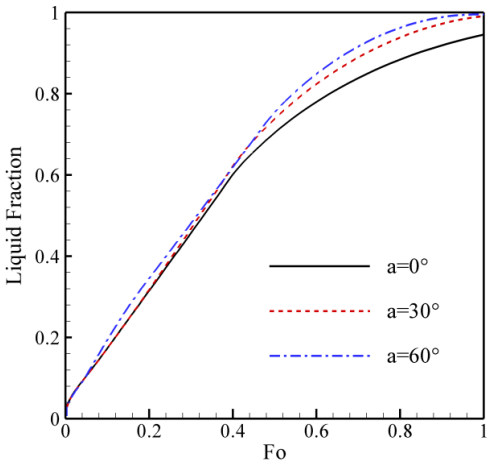
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.5.6]



شکل۴: جبهه ذوب برای زوایای ۰°، ۳۰° و ۶۰° در زمان‌های بی‌بعد متفاوت

مطابق با شکل ۵، واضح است که افزایش در زمان بی‌بعد (Fo) منجر به افزایش فاز مایع درون سیستم می‌گردد یعنی با افزایش زمان میزان ذوب نیز بیشتر خواهد شد. علاوه بر این در زمان‌های پایین یعنی۰/۴>Fo، تغییر زاویه محفظه تأثیر قابل توجه و بسزایی بر روی کسر حجمی فاز مایع نخواهد داشت. از طرفی با افزایش زمان (۰/۵<Fo) تفاوت میان کسرهای مختلف فاز مایع کاملاً مشهود می‌گردد.



شکل۵: اثر زاویه محفظه بر روی کسر حجمی فاز مایع

۶- نتیجه‌گیری

انتقال حرارت تغییر فاز در یک محفظه بسته مربعی پر شده با یک ماده تغییر فاز دهنده در حالتی که دیواره سمت چپ در دمای گرم و دیواره سمت راست در دمای سرد واقع شده بود؛ برای زوایای مختلف محفظه مورد ارزیابی قرار گرفت. شبکه محاسباتی ثابت در نظر گرفته شد و به منظور مدل‌سازی فرآیند تغییر فاز از روش آنتالپی متخلخل استفاده شد. معادلات حاکم به شکل بی‌بعد خود انتقال یافتند و با استفاده از روش المان محدود حل شدند. مهم‌ترین نتایج در پژوهش حاضر به شرح ذیل هستند:

۱- فرمولاسیون آنتالپی تخلخل قادر به مدل‌سازی فرآیند تغییر فاز برای یک ماده تغییر فاز دهنده است.

۲- کسر فاز مایع، تابعی نزولی از عدد استفان است. علاوه بر آن افزایش زاویه شیب‌دار محفظه سبب ایجاد ذوبی نامتقارن شده و با افزایش زاویه از ۰ تا ۶۰ درجه، افزایش ذوب را به دنبال دارد. به عنوان مثال افزایش زاویه محفظه از ۰ تا ۶۰ درجه در زمان بی‌بعد ۰/۸، ٪۷/۷۵ افزایش ذوب را نشان داد.

۳- اثر زاویه شیب محفظه (a) در فرآیند ذوب، در حالی که زمان بی‌بعد (Fo) افزایش یابد، قابل‌توجه‌تر می‌گردد. به عنوان مثال بیشترین اثر افزایش زاویه محفظه بر کسر مایع، در زمان ۰/۴ و به بعد مشاهده شد.

نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان می‌دهد که شیب‌دار کردن محفظه از ۰ تا ۶۰ درجه می‌تواند سبب تقویت مکانیسم انتقال حرارت و افزایش میزان ذوب گردد البته باید توجه داشت که مکانیسم انتقال حرارت همرفتی و رابطه کسر فاز ذوب شده یک رابطه خطی نیست. با این حال زاویه شیب محفظه برای زوایای بالاتر می‌تواند و نیز نسبت متناظر مختلفی از ابعاد محفظه، نقش مهمی را درروند ذوب مواد تغییر فاز دهنده ایجاد کند که می‌تواند موضوع مطالعات آینده باشد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان اول و دوم مقاله از حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول در انجام پژوهش حاضر تشکر و قدردانی می‌کنند. همچنین نویسندگان از مرکز ابررایانه شیخ بهایی (*SBNHOCC*) که مورد حمایت معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری و دانشگاه صنعتی اصفهان می‌باشد، برای فراهم ساختن امکان انجام محاسبات مقاله کمال قدردانی را دارند. همچنین نویسندگان از شرکت ملی و حفاری ایران برای حمایت مالی پژوهش حاضر کمال تشکر را دارند

فهرست علامت‌ها

ثابت ناحیه خمیری	A_{mush}
گرمای ویژه در فشار ثابت ($J\ kg^{-1}K^{-1}$)	C_p
گرمای ویژه ($J\ kg^{-1}K^{-1}$)	C
کسر ذوب بی‌بعد	f
عدد فوریه	Fo
گرانش (ms^{-2})	g
ضریب رسانش حرارتی ($W\ m^{-1}K^{-1}$)	k

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.5.6]

گرمای نهان ذوب ($J\ kg^{-1}$)	L
طول محفظه (m)	L_x
ارتفاع محفظه (m)	L_y
فشار (Pa)	P
عدد پرانتل	Pr
عدد رایلی	Ra
معادله کارمن کازنی	$S(T)$
عدد استفان	Ste
دما (K)	T
زمان (s)	t
دمای ذوب (K)	T_f
سرعت در راستای x (ms^{-1})	u
سرعت در راستای y (ms^{-1})	v
علائم یونانی	
کسر ذوب شده	φ
ضریب انتشار حرارتی (m^2s^{-1})	α
ویسکوزیته دینامیکی ($kg\ m^{-1}s^{-1}$)	μ
ویسکوزیته سینماتیکی (m^2s)	υ
ثابت معادله کارمن کازنی	ε
چگالی ($kg\ m^{-3}$)	ρ
محدوده دمای ناحیه خمیری (K)	ΔT
ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})	β
دمای بی‌بعد	θ
زیرنویس‌ها	
سرد	c
ذوب	F
گرم	h
فاز مایع	l
فاز جامد	s

مراجع

[1] I. Dincer, M., Rosen, Thermal energy storage: systems and applications, John Wiley & Sons, (2002).

[2] S. Das, TK., Dutta, Mathematical modeling and experimental studies on solar energy storage in a phase change material, Solar energy, 51 (1993) 305-312.

[3] A. Trp, An experimental and numerical investigation of heat transfer during technical grade paraffin melting and solidification in a shell-and-tube latent thermal energy storage unit, Solar energy, 79 (2005) 648-660.

[4] A. Joulin, Z., Younsi, L., Zalewski, DR., Rousse, S., Lassue, A numerical study of the melting of phase change material heated from a vertical wall of a rectangular enclosure, International Journal of Computational Fluid Dynamics, 23 (2009) 553-566.

[5] G.S.H. Lock, J., Fu, Natural convection in the inclined, cranked thermosyphon, Journal of heat transfer, 115 (1993) 166-172.

[6] S.H., Tasnim, S., Mahmud, Laminar free convection inside an inclined L-shaped enclosure, International communications in heat and mass transfer, 33 (2006) 936-942.

[7] M. Rahman, MAR., Sharif, Numerical study of laminar natural convection in inclined rectangular enclosures of various aspect ratios, Numerical Heat Transfer: Part A: Applications, 44 (2003) 355-373.

[8] S.M. Aminossadati, B., Ghasemi, The effects of orientation of an inclined enclosure on laminar natural convection, International Journal of Heat and Technology, 23 (2005) 43-49.

[9] A. Al-Mudhaf, A.J., Chamkha, Natural convection of liquid metals in an inclined enclosure in the presence of a magnetic field, International Journal of Fluid Mechanics Research, 31 (2004).

[10] 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 comparison exercise: first results, International Journal of Thermal sciences, 38 (1999) 5-26.

[11] S. Tiari, S., Qiu, M., Mahdavi, Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material, Energy Conversion and Management, 89 (2015) 833-842.

[12] J.N. Reddy, An introduction to the finite element method, McGraw-Hill New York, 1993.

[13] P. Wriggers, Nonlinear finite element methods, Springer Science & Business Media, 2008.

[14] P.R. Amestoy, I.S., Duff, J.K., L'Excellent, Multifrontal parallel distributed symmetric and unsymmetric solvers, Computer methods in applied mechanics and engineering, 184 (2000) 501-520.

[15] D. Groulx, P.H., Biwole, Solar PV Passive Temperature Control using Phase Change Materials, in: Proc. of 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15), 2014.

[16] C. Gau, R., Viskanta, Melting and solidification of a pure metal on a vertical wall, Journal of Heat Transfer, 108 (1986) 174-181.

[18] A. Brent, V., Voller, K.T.J., Reid, Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal, Numerical Heat Transfer, Part A Applications, 13 (1988) 297-318.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.5.6]

[19] N. Al-Najem., K.M., Khanafer, M.M., El-Refaee, Numerical study of laminar natural convection in tilted enclosure with transverse magnetic field, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 8 (1998) 651-672.

[20] G. de Vahl Davis, Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution, International journal for numerical methods in fluids, 3 (1983) 249-264.

[21] N.C. Markatos, K.A., Pericleous, Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer, 27 (1984) 755-772.

[23] T. Fusegi, J., Hyun, K., Kuwahara, B., Farouk, A numerical study of three-dimensional natural convection in a differentially heated cubical enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 34 (1991) 1543-155.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.5.6]