

بررسی عددی فرآیند ذوب ترکیبات حاوی نانو ذرات برای توسعه روند تغییر فاز

نادر پورمحمود^۱، ناصر مصطفوی نیا^{۲*}، امیر حسن زاده^۳

* نویسنده مسئول: nassermostafavi@gmail.com.

چکیده

در کار ارائه شده، فرآیند ذوب ترکیبات حاوی نانو ذرات (NePCM) در یک حفره مربعی تحت زوایای مختلف در اثر اعمال دو جفت منبع حرارتی چاه-چشمه بر روی دیواره های افقی، بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی اثر تغییر در موقعیت المان های چاه-چشمه روی دیوارهای افقی بر نسبت کسری مایع، چهار چیدمان مختلف از المانهای مذکور بکار گرفته شده است. در مورد اول، چشمه ها و چاه ها به طور جداگانه روی دیوارهای افقی قرار گرفته اند. شرایط محیطی در مورد دوم بدین صورت است که المان های چشمه و چاه، بطور متناوب روی دیوارهای افقی چیده شده اند. در چیدمان سوم، چشمه ها در سمت چپ المان های چاه قرار گرفته و نهایتاً در مورد شکل چهارم، عناصر چشمه و چاه همه در پایین دیوارهای افقی قرار می گیرند. نتایج نشان می دهد که در چیدمان اول با استفاده از ۲ درصد وزنی نانو ذرات Al_2O_3 ، در مقایسه با بقیه موارد، بیشترین نسبت کسری مایع بدست می آید.

واژه های کلیدی

نرخ ذوب، پارافین، نانو ذره

۱-دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه ارومیه

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه ارومیه

۱- مقدمه

انرژی گرمایشی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد؛ گرمایش قابل لمس، گرمای نهان و انرژی نهفته در فرآیند های ترموشیمیایی. گرمای نهان را می‌توان به عنوان یک عامل مهم و تعیین کننده در فرآیند ذوب مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثال، انرژی که حین تغییر فاز در مواد مختلف ذخیره می‌شود، از انواع مهم و تعیین کننده انرژی نهان به حساب می‌آید. با در نظر گرفتن این ویژگی مهم می‌توان با انتخاب یک ماده مناسب، مقدار قابل توجه و چشمگیر از انرژی را در حین فرآیند ذوب، ذخیره کرد.

منگ و همکاران [۵] نوع جدیدی از اتاق تغییر حالت مواد معرفی کردند و خواص گرمایشی آن را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. تا کنون تحقیقات عددی و آزمایشگاهی گسترده‌ای در زمینه فرآیند ذوب مواد تغییرحالت دهنده انجام شده است. ژانگ و همکاران [۶]، فرآیند ذوب n-octadecane، داخل یک محفظه آزمایشگاهی، که یک وجه آن توسط یک شار گرمایی ثابت حرارت داده می‌شد را مورد بررسی قرار دادند. این در حالی بود که سایر وجه های محیط آزمایشی به لحاظ گرمایی کاملاً عایق بندی شده بود. تحقیقات آنها نشان داد که انتقال حرارت جابجایی طبیعی اثر بسیار مهمی بر مرزبندی بین فاز جامد و مایع دارد. بنابر نتایج آنها این اثر وقتی نمایان تر می‌شود که عدد استفان رو به افزایش باشد. فرجی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۰ عملکرد فرآیند ذوب مواد تغییر شکل دهنده را در یک محفظه مستطیلی عمودی بررسی کردند. از جمله شرایط مهمی که در تحقیق آنها می‌توان بدان اشاره کرد، استفاده از سه منبع حرارتی برآمده بر روی یک وجه مستطیل است. آنها نشان دادند که منبع حرارتی پایینی اثر بسیار مهمی بر روند انتقال حرارت دارد. کوسکو و همکاران [۸] به صورت عددی،

عمل ذوب در یک محیط مستطیلی عمودی، که وجه‌های جانبی و مرز بالایی آن عایق شده بود را مورد بررسی قرار دادند. لازم به ذکر است که آنها مرز پایینی را به صورت موج و تحت دمای ثابت در نظر گرفتند. تحقیقات آنها نشان داد که با افزایش دامنه موج وجه پایینی، روند فرآیند ذوب تشدید می‌شود. نکته بسیار کلیدی در مورد مواد تغییر فاز دهنده، هدایت حرارتی پایین آنهاست. ازین رو، دانشمندان زیادی سعی بر تشریح و بیان فواید اضافه کردن نانو ذرات به منظور بالا بردن هدایت حرارتی مواد تغییر فازدهنده کردند که از جمله آنها می‌توان به چو و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۹۶، خدادادی و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۷، زنگ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۷، واژها و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۹، هوو همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۹ و هو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۲ اشاره کرد. هو و همکاران [۱۱]، برای بررسی اثر نانوذرات مس بر هدایت حرارتی و همچنین روند انتقال گرما حین تغییر فاز در مواد تغییر حالت دهنده، از یک دیسک حرارت سنج داغ باروش نظارتی مادون قرمز استفاده کردند. آنها دریافتند که با اضافه کردن ۲ درصد وزنی نانو ذرات مس به پارافین مایع، هدایت حرارتی به میزان ۱۴/۲ درصد افزایش می‌یابد، درحالی که این مقدار افزایش برای پارافین جامد در حدود ۱۸/۱ است. کاشانی و همکاران [۱۵]، شرایط انجماد نانو سیال مس - آب (به عنوان یک ماده تغییر حالت دهنده) را در یک محیط مستطیلی با دیوارهای عمودی موج، تحت اعداد گراشف (Gr) مختلف به صورت عددی بررسی کردند. به طور کلی کار آنها اثر موج بودن سطوح و میزان پراکندگی نانو ذرات را بر روند انجماد نانو سیال مورد بررسی قرار می‌دهد. آنها نشان دادند که پراکندگی نانوذرات در ماده تغییر حالت دهنده، زمان انجماد را کاهش می‌دهد. علاوه بر این مطلب، آنها ثابت

عمودی برای ترکیب n-octadecane و نانو ذرات Al_2O_3 مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق هر کدام از دیوار-های عمودی، تحت یک دمای ثابت در نظر گرفته شده- است. این شرایط برای دیوارهای بالایی و پایینی، کمی متفاوت است؛ بدین صورت که این دیوارها به لحاظ گرمایشی کاملاً عایق بندی شده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می-دهد که با افزایش کسر جرمی نانو ذرات در ترکیب استفاده شده، فرآیند انتقال حرارت جابجایی طبیعی بشدت تضعیف می‌شود. زنگ و همکاران [۲۰]، یک تحقیق آزمایشگاهی جامع روی فرآیند ذوب dodeconal تحت اضافه شدن مقادیر مختلف نانولوله‌های چند جداره کربنی انجام دادند. در این کار، فرآیند ذوب در یک استوانه عمودی با شرایط گرمایشی از وجه پایین انجام شد. تحقیق آن‌ها نشان داد که با اضافه کردن نانو لوله‌های کربنی، نرخ ذوب مخلوط به دلیل افزایش لزجت، کاهش می‌یابد (چراکه با افزایش لزجت، انتقال حرارت جابجایی طبیعی تضعیف می‌شود). آن‌ها نتیجه گرفتند که اثر رقابتی بین هدایت حرارتی افزایش یافته و جابجایی طبیعی تضعیف شده، نرخ و روند ذوب مخلوط را تعیین می‌کند. حسدی و همکاران [۲۱]، اثر اندازه نانو ذرات بر روند انجماد مواد تغییر حالت دهنده را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می-دهد که با افزایش سایز نانو ذرات از ۲ تا ۵ نانومتر، صفحات بین فازهای جامد و مایع از حالت مسطح به حالت مغشوش تغییر شکل می‌دهند. هایدان و همکاران [۲۲، ۲۳] و [۲۴]، با استفاده از حفره های مربعی، سیلندرهای افقی و لوله‌های حلقوی، فرآیند ذوب برای n-octadecane را تحت اضافه شدن نانو ذرات اکسید مس به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که فرآیند انتقال حرارت در ماده تغییر فاز دهنده با افزایش مقدار نانو ذرات گسترش می‌یابد. از دلایلی که

کردند که از عامل موج بودن سطوح می‌توان به عنوان کنترل کننده زمان انجماد استفاده کرد. نتایج آن‌ها همچنین نشان می‌دهد که به ازای تمامی اعداد گرافش، با افزایش میزان موج صفحات، زمان انجماد هم افزایش می‌یابد. حسین زاده و همکاران [۱۶]، فرآیند ذوب را برای نانو سیال RT27-Cu در یک محفظه کروی، به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن‌ها از RT27 به عنوان سیال پایه و از مس به عنوان نانو ذره استفاده شده است. کار آنها برای سه کسر حجمی و عدد استفان مختلف انجام گرفت و از نتایج آنها می‌توان به این نکته اشاره کرد که افزایش هدایت حرارتی باعث کاهش گرمای نهان شده و در نتیجه نرخ ذوب نانو سیال به عنوان یک ماده تغییر حالت دهنده افزایش می‌یابد. ارسو و همکاران [۱۷]، یک کار عددی روی فرآیند ذوب واکس پارافینی به همراه نانو ذرات Al_2O_3 در یک محفظه استوانه‌ای انجام داده‌اند، درحالی که مخلوط مورد نظر از طرف دیواره جانبی و پایینی در حال حرارت دیدن است. نتایج نشان دادند، در برخی موقعیت‌ها که در سیستم، انتقال حرارت جابجایی طبیعی محدود داریم، گرمایش از طرف دیواره های جانبی روند ذوب را تشدید می‌کند. بنابر خروجی کار آن‌ها، در صورتی که مقدار نانو ذرات در سیستم به بیش از ۲ درصد وزنی افزایش یابد منجر به تضعیف جابجایی طبیعی خواهد شد و این اتفاق از طریق افزایش لزجت به وقوع می‌پیوندد. سبتی و همکاران [۱۸]، یک کار عددی مفصل بر انتقال حرارت در تغییر فاز مواد تغییر حالت دهنده در یک محفظه مربعی دوبعدی انجام دادند. در این کار از نانو ذرات مس استفاده شده است. بنا بر نتایج آن‌ها با افزایش درصد وزنی نانوذرات، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد و در نتیجه زمان ذوب ماده تغییر حالت دهنده کاهش می‌یابد. هو و همکاران [۱۹]، فرآیند ذوب را در یک محفظه مربعی

۲- تلفات لزجت، گرمایش تابشی، انتقال حرارت جابجایی سه بعدی و انبساط و تراکم حجمی ناچیز در نظر گرفته می-شوند.

۳- مخلوط واکس پارافینی و نانو ذرات اکسید آلومینیوم کاملا پیوسته فرض شده و شرایط عدم لغزش و تعادل ترمودینامیکی رعایت می شود.

۴- شرایط ترموفیزیکی واکس پارافینی در حالت خالص و بعد از اضافه شدن نانو ذرات به صورت وابسته به دما در نظر گرفته می شوند.

۵- فرآیند ذوب بصورت ناپایا، وابسته به زمان و تحت جریان آرام تحلیل می شود.

۳- فرمول بندی ریاضی

۳-۱- معادلات حاکم

در این کار از روش آنتالپی متخلخل برای شبیه سازی فرآیند ذوب در ماده مورد نظر استفاده می شود. در فرآیند ذوب، کسر جرمی مایع در محدوده ۰ تا ۱ می تواند تغییر کند. وقتی که کسر جرمی مایع برابر با صفر می شود، فاز مورد نظر کلا جامد است و بالعکس؛ اگر برابر با ۱ باشد حالت ماده به صورت کاملا مایع فرض می شود. لذا اعدادی که بین صفر و یک قرار می گیرند، اشاره دارند بر مخلوطی از فازهای مایع و جامد.

معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای یک جریان دو بعدی در حالت آرام به صورت زیر قابل بیان هستند [۲۶]:
معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

در این مطالعه میدان سیال مورد نظر تراکم دائم در نظر گرفته شده است، لذا مولفه اول برابر با صفر فرض می شود.

آن ها مطرح کردند به این می توان اشاره کرد که با افزایش مقدار نانو ذرات، هدایت حرارتی مخلوط هم افزایش می-یابد. جواریان و همکاران [۲۵]، اثر موقعیت سیلندر داغ و همچنین کسر حجمی نانو ذرات را بر روند ذوب نانو سیال آب-مس، در یک سری لوله حلقوی با روش آنتالپی پایه LBM بررسی کردند.

باتوجه به کارهایی که در بالا معرفی شد میتوان هدف از ارائه کار حاضر را این گونه بیان کرد که تغییر در زوایای افقی حفره، تحت کسرهای مختلف جرمی نانو ذره Al_2O_3 ، چه اثری می تواند بر روند ذوب واکس پارافینی به عنوان یک ماده تغییر حالت دهنده داشته باشد. در این کار دو جفت المان چشمه و چاه بر روی دیوارهای عمودی تعبیه شده و سایر دیوارها تحت شرایط عایق بندی حرارتی قرار دارند. کسرهای حجمی بکار رفته از نانو ذرات عبارت است از: ۰، ۲ و ۵ درصد و ابعاد حفره 25×25 میلیمتر در نظر گرفته شده اند.

۲- مدل فیزیکی

کار حاضر عبارت است از تحلیل شرایط ذوب یک ماده تغییر فاز دهنده مخلوط با نانو ذرات که در یک حفره دو بعدی مربعی شکل قرار دارد. در حالت اول مطابق شکل (۱) دیوارهای افقی به لحاظ گرمایی کاملا عایق بندی شده اند. دمای چشمه ها و چاه های حرارتی، ثابت و به ترتیب برابر با ۳۳۰ و ۳۰۰ درجه کلوین فرض شده اند. فضای حفره دوبعدی به طور کامل با واکس پارافینی پر شده و از کسرهای حجمی ۰، ۲ و ۵ درصد اکسید آلومینیوم برای گسترش هدایت حرارتی استفاده می شود. دمای اولیه مخلوط برابر با ۳۰۰ درجه کلوین در نظر می گیریم و با فرضیات زیر تحلیل را آغاز می کنیم:

۱- واکس پارافینی به عنوان ماده تغییر حالت دهنده؛ کاملا خالص، تراکم ناپذیر و نیوتنی است.

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \bar{\tau} + \vec{F} \quad (2)$$

که در آن \vec{P} ، $\bar{\tau}$ ، $\rho \vec{g}$ و \vec{F} به ترتیب نشان دهنده فشار استاتیکی، المان تنش، نیروهای گرانشی و نیروهای حجمی هستند.

معادله انرژی:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (3)$$

در این معادله عبارت‌های H ، ρ ، k ، \vec{V} و T به ترتیب؛ آنتالپی، چگالی، ضریب هدایت گرمایی، سرعت و دمای ماده تغییر حالت دهنده هستند. به علاوه علامت اختصاری S ، نشان دهنده منبع حرارتی حجمی است که در این مطالعه برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

آنتالپی کل H بصورت حاصل جمع آنتالپی قابل محسوس h و گرمای نهان ΔH تعریف می‌شود:

$$H = h + \Delta H \quad (4)$$

که در آن h به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (5)$$

در معادله بالا h_{ref} و T_{ref} به ترتیب بیانگر آنتالپی و دمای مرجع هستند و C_p گرمای نهان در فشار ثابت را معرفی میکند.

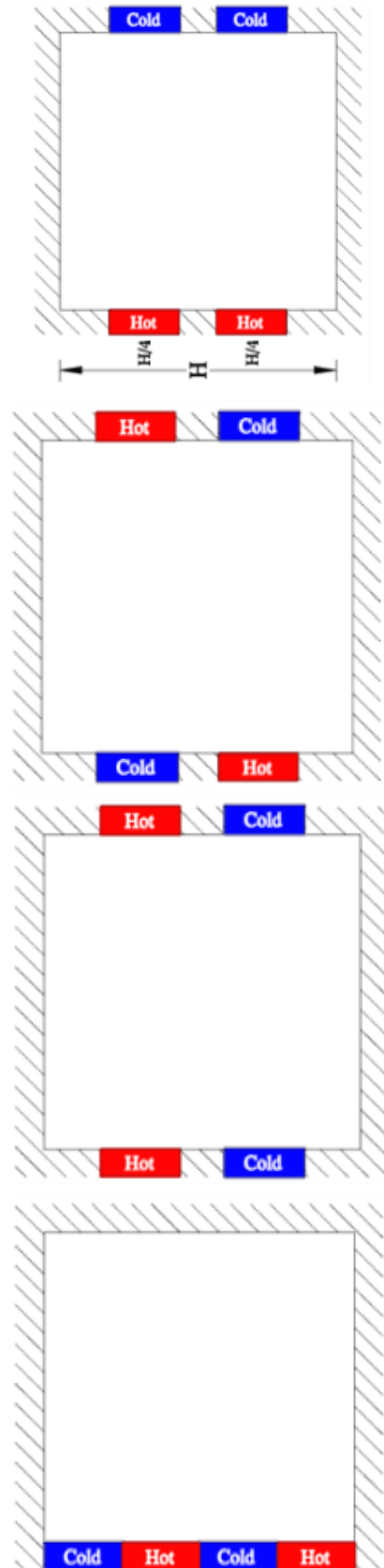
گرمای نهان کل ΔH بصورت تابعی از گرمای نهان ماده تغییر فاز دهنده، L قابل تعریف است:

$$\Delta H = \alpha L \quad (6)$$

که α کسر مایع است و به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\begin{cases} 0 & ; \text{ if } T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & ; \text{ if } T_{solidus} < T < T_{liquidus} \\ 1 & ; \text{ if } T > T_{liquidus} \end{cases} \quad (7)$$

معادله‌های انرژی (۳) و کسر مایع (۷) با هم ترکیب شده و محاسبات برای استخراج المان دمایی آغاز می‌شود. در روش آنتالپی متخلخل نواحی مرکب از فاز مایع و گاز، بصورت المان‌های متخلخل در نظر گرفته می‌شوند. در واقع



شکل (۱) چهار حالت در نظر گرفته شده برای المان‌های حرارتی

چشمه-چاه

$$k_{np\text{pcm}} = \frac{k_{np} + 2k_{\text{pcm}} - 2(k_{\text{pcm}} + k_{np})\varphi}{k_{np} + 2k_{\text{pcm}} + (k_{\text{pcm}} - k_{np})\varphi} k_{\text{pcm}} \quad (12)$$

$$+ 5 \times 10^4 \beta_k \delta \varphi \rho_{\text{pcm}} C_{p,\text{pcm}} \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \varphi)$$

در رابطه بالا ضریب β_k برای ذرات اکسید آلومینیوم عبارت است از:

$$\beta_k = 8.4407(100\varphi)^{-1.07304} \quad (13)$$

φ یک ضریب تصحیح برای حرکت براونین به حساب می

آید و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{cases} 0 & \text{if } T < T_{\text{solidus}} \\ \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} & \text{if } T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \\ 1 & \text{if } T > T_{\text{liquidus}} \end{cases} \quad (14)$$

در روابط بالا ثابت بولتزمن K برابر است با $1.381 \times 10^{-23} \text{ (J/K)}$ برابر است و عبارت $f(T, \varphi)$ توسط رابطه آزمایشگاهی زیر بدست می آید [۱۳]:

$$f(T, \varphi) = (2.8217 \times 10^{-2} \varphi + 3.917 \times 10^{-3}) \frac{T}{T_0} + (-3.0669 \times 10^{-2} \varphi - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (14)$$

در رابطه بالا T_0 برابر با 273 درجه کلوین است. شکل (۲) تغییرات لزجت دینامیکی موثر و ضریب هدایت گرمایی واکس پارافینی، در حالی که از 0 ، 2 و 5 درصد وزنی اکسید آلومینیوم در آن استفاده شده است را بر اساس تابعی از دما نشان می دهد. تغییرات لزجت دینامیکی موثر و ضریب هدایت گرمایی واکس پارافینی در درصدهای مختلف اکسید آلومینیوم، بر اساس تابعی از دما با نتایجی که هو و همکاران [۱۴] در سال 2009 از روش آزمایشگاهی بدست آورده اند مطابقت قابل قبولی دارد. بر اساس شکل (۲-الف)، لزجت دینامیکی با افزایش درصد وزنی نانو ذرات افزایش یافته و با افزایش دما کاهش می یابد. با توجه به این شکل، افزایش ویسکوزیته دینامیکی توسط غلظت نانو ذرات، در دماهای پایین تر ملموس تر است. توسعه لزجت دینامیکی به

میزان تخلخل در هر سلول برابر است با کسر مایع α در همان سلول.

۳-۲- شرایط مرزی و اولیه

در چشمه ها و چاه ها شرایط مرزی دما ثابت، رعایت و سایر جداره ها بصورت آدیاباتیک فرض شده اند. شرایط اولیه مسئله، مطابق با شرایط دمایی المان های چاه در نظر گرفته می شود.

۳-۳- ویژگی های ترموفیزیکی

ویژگی های ترموفیزیکی واکس پارافینی و نانو ذرات اکسید آلومینیوم، در [۲۷-۲۸] ارائه شده است. خواص ترموفیزیکی مخلوط واکس پارافینی و نانو ذرات اکسید آلومینیوم، توسط روابط زیر قابل محاسبه است. لازم به ذکر است، زیرنویس های np و pcm به ترتیب نماد خاصیت مورد نظر برای نانو ذرات و واکس پارافینی (به عنوان ماده تغییر حالت دهنده) هستند.

چگالی [۱۲]:

$$\rho_{np\text{pcm}} = \varphi \rho_{np} + (1 - \varphi) \rho_{\text{pcm}} \quad (8)$$

ظرفیت گرمایی ویژه [۱۲]:

$$C_{p,np\text{pcm}} = \frac{\varphi(\rho C_p)_{np} + (1 - \varphi)(\rho C_p)_{\text{pcm}}}{\rho_{np\text{pcm}}} \quad (9)$$

گرمای نهان [۱۲]:

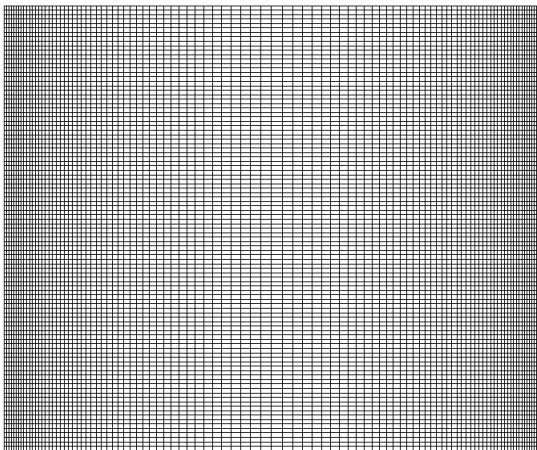
$$L_{np\text{pcm}} = \frac{(1 - \varphi)(\rho L)_{\text{pcm}}}{\rho_{np\text{pcm}}} \quad (10)$$

لزجت دینامیکی [۲۹]:

$$\mu_{np\text{pcm}} = 0.983 e^{(12.959\varphi)} \mu_{\text{pcm}} \quad (11)$$

ضریب هدایت گرمایی موثر توسط رابطه ای که وجیها و همکاران [۱۳] در سال 2010 ارائه کردند محاسبه می شود. این رابطه، ترکیبی است از تئوری ماکسول و حرکت براونین که توسط رابطه زیر معرفی می شود:

(۳) شبکه بندی غیر یکنواختی که در محاسبات از آن استفاده شده را نشان می‌دهد. در این محاسبات برای معادله تصحیح فشار از زیر برنامه PRESTO و برای ترکیب کردن عوامل سرعت و فشار از الگوریتم PISO استفاده می‌شود. نکته قابل توجه این است که برای جدا سازی متغیرها در معادله انرژی و مومنتوم از روش upwind مرتبه دوم استفاده شده است. به منظور تعریف وابستگی به دما برای خواص ترموفیزیکی مواد تغییر حالت دهنده، یک سری تابع UDF معرفی شده و توسط نرم افزار مورد استفاده قرار گرفته است. گام زمانی برای حل غیردائم در چند مرحله محاسبه اولیه، برابر با 0.001 در نظر گرفته شده است. این گام زمانی بعد از چند مرحله به مقدار 0.1 افزایش پیدا خواهد کرد. حد همگرایی برای معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب 10^{-3} ، 10^{-3} و 10^{-6} در نظر گرفته می‌شود و برای بدست آوردن این حد از دقت، تعداد محاسبات در هر گام زمانی برابر با ۱۰ مرحله تنظیم شده است. عوامل ضریب زیر تخفیف برای معادلات مومنتوم، انرژی، تصحیح فشار و کسر مایع به ترتیب برابر با 0.5 ، 0.3 ، 1 و 1 در نظر گرفته شده‌اند.

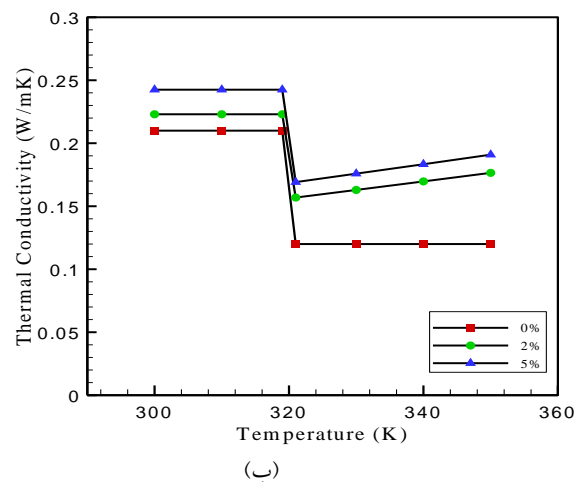
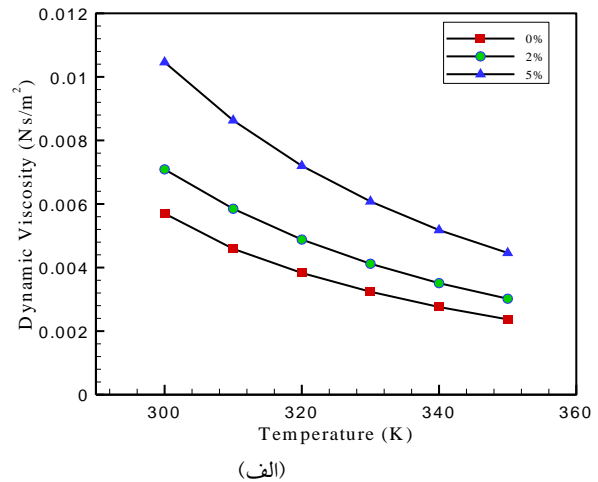


شکل (۳) شبکه غیر یکنواخت مورد استفاده در محاسبات

۳-۵- استقلال از شبکه

شکل (۴) نشان دهنده فرآیند بررسی استقلال از شبکه، جهت اطمینان از دقت و سرعت در نتایج بدست آمده است.

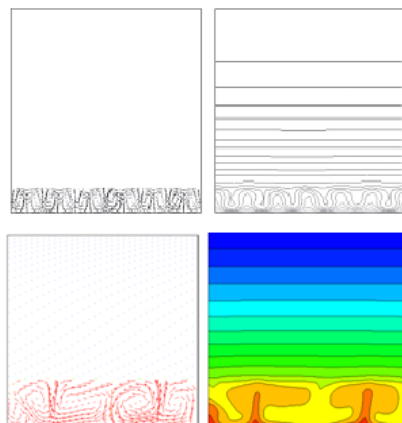
شکل مهمی می‌تواند بر میزان و روند فرآیند ذوب اثر گذار باشد به ویژه زمانی که جابجایی طبیعی، مکانیسم غالب در انتقال حرارت سیستم محسوب می‌شود. با توجه به شکل (۲-ب) هدایت حرارتی با افزایش درصد وزنی نانو ذرات، افزایش یافته و با افزایش دما کاهش می‌یابد.



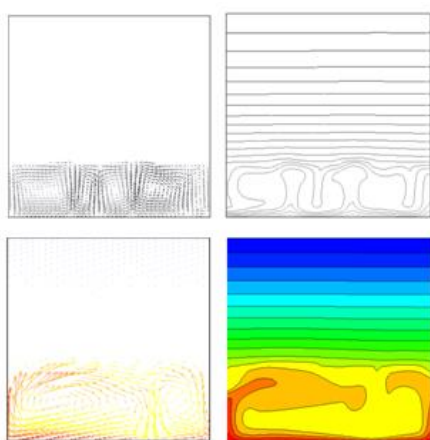
شکل (۲) (الف) تغییرات لزجت دینامیکی و (ب) تغییرات ضریب هدایت گرمایی بر حسب تابعی از دما برای واکس پارافینی که در آن از نانو ذرات اکسید آلومینیم با درصدهای مختلف جرمی استفاده شده است.

۳-۴- روند حل مسئله

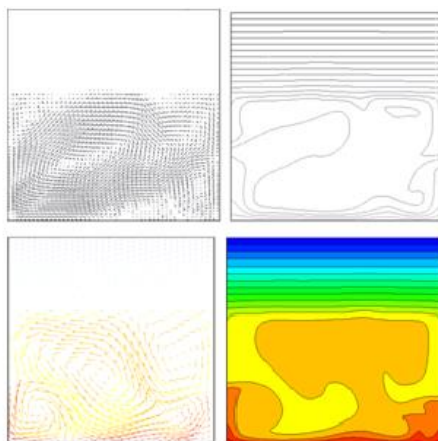
معادلات حاکم ذکر شده در بخش قبلی در جهت شرایط اولیه و مرزی، مورد حل قرار می‌گیرند. حل گر مربوط به این کار، با روش حجم محدود (استفاده از نرم افزار فلوئنت و گمیت)، معادلات مربوط به جریان را حل می‌کند. شکل



(الف) زمان ۵۰۰ ثانیه



(ب) زمان ۱۰۰۰ ثانیه



(ج) زمان ۳۰۰۰ ثانیه

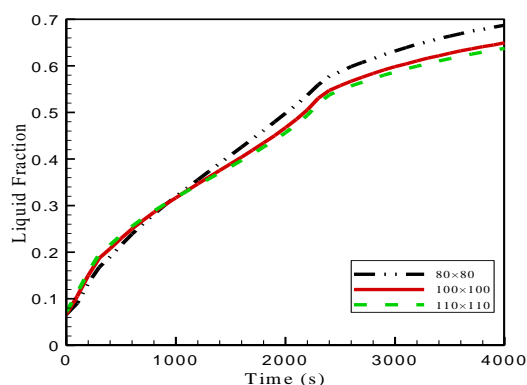
شکل (۵) مقایسه نتایج به دست آمده برای واکنش پارافینی به همراه

۲ درصد نانو ذره Al_2O_3 در حفره افقی بر حسب بردارهای

سرعت (تصاویر دست چپ) و خطوط همدم (تصاویر دست راست) با

نتایج آراسو و همکاران [۱۷]

در این بررسی از چیدمان نوع اول با در صد وزنی صفر برای ذرات Al_2O_3 استفاده شده است. سه مدل مختلف از شبکه بندی در این بررسی مورد استفاده قرار گرفته؛ 80×80 ، 100×100 و 110×110 . بررسی ها به وضوح نشان داد که درصد اختلاف بین مقدار کسر مایع در مدل دوم و سوم شبکه بندی، بسیار ناچیز است، لذا برای فرآیند محاسبات، جهت اعمال دقت و سرعت کافی از مدل دوم شبکه بندی 100×100 استفاده شده است.

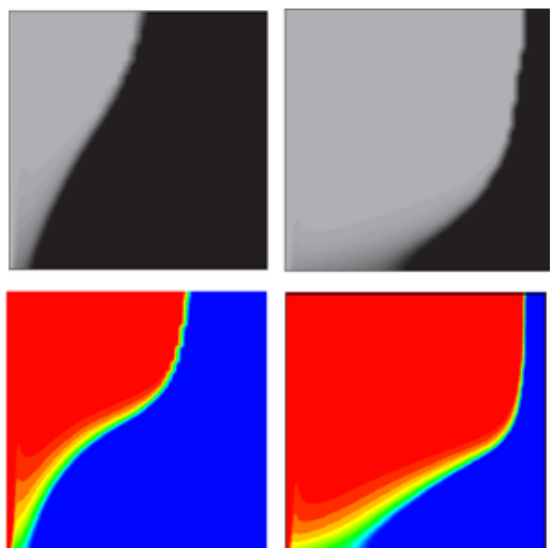


شکل (۴) بررسی تغییرات شبکه بندی بر کسر مایع در مورد

چیدمان نوع اول چشمه-چاه

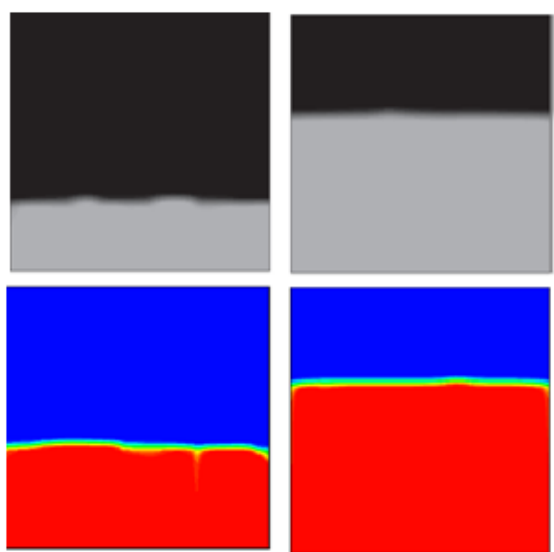
۴- اعتبار سنجی نتایج

برای تایید میزان دقت نتایج، مدل واکنش پارافینی به همراه ۲ درصد نانو ذره اکسید آلومینیوم شبیه سازی شده و نتایج بدست آمده در سه زمان مختلف با داده های آراسو و همکاران [۱۷] مقایسه شده است. در مورد اول مقایسه، دیواره گرم در دمای $330^\circ C$ درجه کلویین و دیواره سرد در $300^\circ C$ درجه کلویین ثابت نگه داشته شده اند و دو دیواره باقی مانده به لحاظ گرمایشی، شرایط آدیاباتیک در مورد آنها اعمال شده است. در مورد دوم مقایسه، حفره مربعی به اندازه $90^\circ C$ درجه خلاف عقربه های ساعت، چرخانده شده و نتایج بر حسب خطوط جریان، شکل صفحات بین نواحی جامد و مایع و همچنین خطوط دما ثابت، ارائه شده است (شکل های ۵ تا ۸).



(الف) ۳۰۰۰ ثانیه (ب) ۱۰۰۰ ثانیه

شکل (۷) مقایسه صفحات بین نواحی جامد و مایع برای حفره عمودی در کار آراسو و همکاران (تصاویر بالایی) با صفحات بین نواحی جامد و مایع در کار ارائه شده (تصاویر پایینی) در دو زمان ۳۰۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه

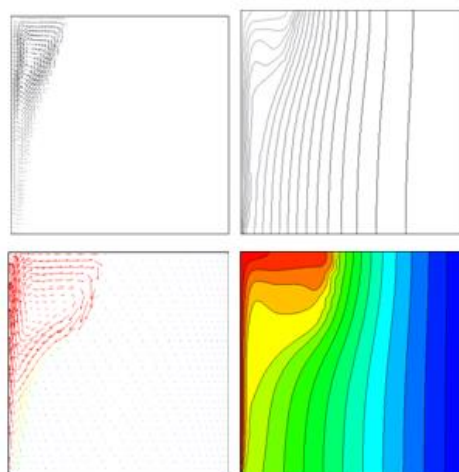


(الف) ۳۰۰۰ ثانیه (ب) ۱۰۰۰ ثانیه

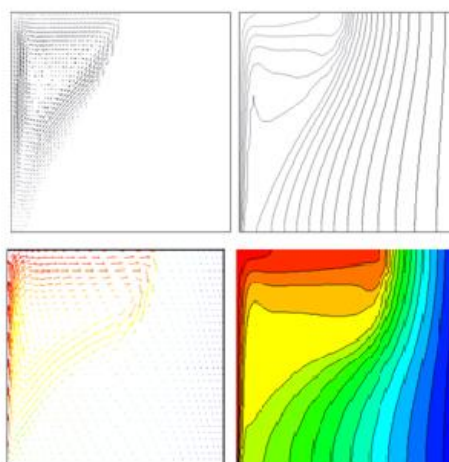
شکل (۸) مقایسه صفحات بین نواحی جامد و مایع برای حفره افقی در کار آراسو و همکاران (تصاویر بالایی) با صفحات بین نواحی جامد و مایع در کار ارائه شده (تصاویر پایینی) در دو زمان ۳۰۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه

۵- بحث پیرامون نتایج

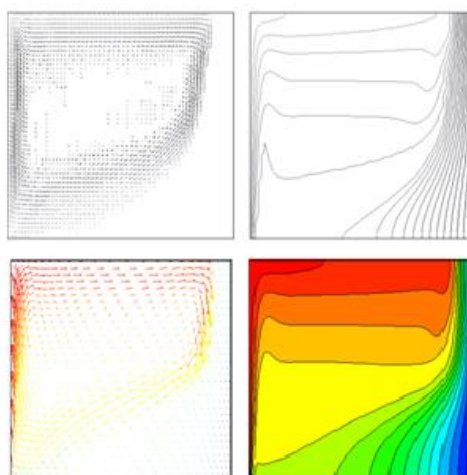
در کار ارائه شده، فرآیند ذوب ترکیبات تغییر فاز دهنده (واکس پارافینی) حاوی نانو ذرات (NePCM)، در یک حفره مربعی تحت زوایای مختلف، در اثر اعمال دو جفت



(الف) زمان ۵۰۰ ثانیه



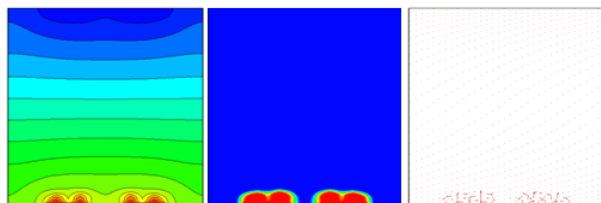
(ب) زمان ۱۰۰۰ ثانیه



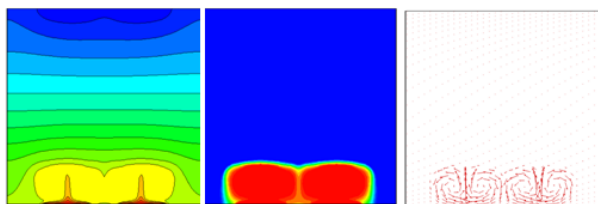
(ج) زمان ۳۰۰۰ ثانیه

شکل (۶) مقایسه نتایج به دست آمده برای واکس پارافینی به همراه ۲ درصد نانو ذره Al_2O_3 در حفره عمودی بر حسب بردارهای سرعت (تصاویر دست چپ) و خطوط همدم (تصاویر دست راست) با نتایج آراسو و همکاران [۱۷]

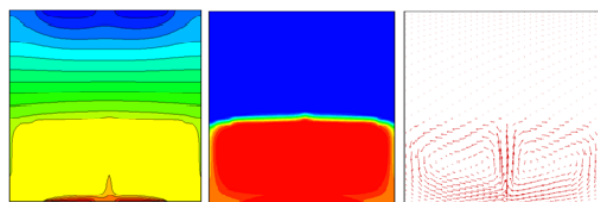
از مناطق پایینی است و همین مسئله باعث پیشرفت هرچه بیشتر فرآیند ذوب در این مناطق خواهد شد.



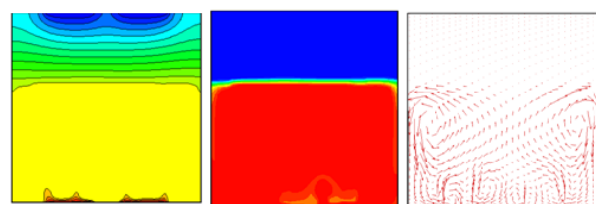
(الف) ۱۰۰ ثانیه



(ب) ۵۰۰ ثانیه



(ج) ۲۰۰۰ ثانیه



(د) ۴۰۰۰ ثانیه

شکل (۸) تصاویر دست راست: بردارهای سرعت، تصاویر

وسط: خطوط دما ثابت و تصاویر دست چپ: شکل صفحات بین نواحی

جامد و مایع، مربوط به چیدمان نوع اول برای واکنش پارافینی با صفر

درصد وزنی نانو ذره اکسید آلومینیوم

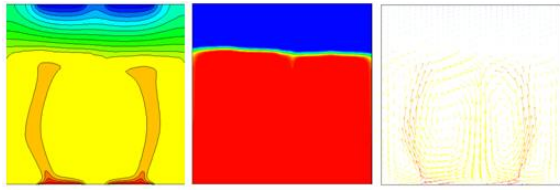
۵-۱-۲- خطوط دما ثابت

در مراحل اول فرآیند ذوب، شکل کلی خطوط همدمای کاملاً موازی به نظر می‌رسد و این حالت برای تمامی درصدهای وزنی ۰، ۲ و ۵ اکسید آلومینیوم به طور یکسان تکرار می‌شود. این اتفاق بیانگر این مسئله است که در این مرحله هدایت حرارتی، فرآیند حاکم بر روند انتقال حرارت سیستم است. قابل ذکر است که انتقال حرارت جابجایی

منبع حرارتی چاه-چشمه بر روی دیواره های افقی، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی اثر تغییر در موقعیت المان‌های چاه-چشمه روی دیوارهای افقی بر نسبت کسری مایع، چهار چیدمان مختلف از المانهای مذکور بکار گرفته شده است. در مورد اول چشمه ها و چاه ها به طور جداگانه روی دیوارهای افقی قرار گرفته اند. شرایط محیطی در مورد دوم بدین صورت است که المان های چشمه و چاه بطور متناوب روی دیوارهای افقی چیده شده اند. در چیدمان سوم، چشمه ها در سمت چپ المان های چاه قرار گرفته و نهایتاً در مورد شکل چهارم بررسی، عناصر چشمه و چاه همه در پایین دیوارهای افقی قرار می‌گیرند.

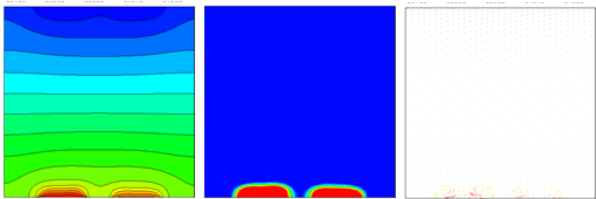
۵-۱-چیدمان اول

نتایج مربوط به چیدمان اول در شکل‌های (۸) تا (۱۲) نشان داده شده‌اند. این نتایج برای درصدهای وزنی ۰، ۲ و ۵ اکسید آلومینیوم، بر حسب بردارهای سرعت، کسر مایع، شکل صفحات بین نواحی جامد و مایع و همچنین خطوط دما ثابت، ارائه شده‌اند. در مراحل اول فرآیند ذوب شکل کلی صفحات بین نواحی جامد و مایع کاملاً مسطح به نظر می‌رسد و این حالت برای تمامی درصدهای وزنی ۰، ۲ و ۵ اکسید آلومینیوم به طور یکسان تکرار می‌شود. با گذشت زمان شکل این صفحات بیشتر و بیشتر به سمت روندی بی‌نظم سوق پیدا می‌کند، به این ترتیب که هرچه قدر فرآیند ذوب به سمت کامل شدن پیش روی دارد، انتقال حرارت جابجایی طبیعی هم گسترش پیدا خواهد کرد. در انتقال حرارت جابجایی طبیعی، حرکت توده‌های سیال به دلایل گوناگونی از جمله اثر بویانسی امکان پذیر می‌شود، به این صورت که توده‌های گرم به نواحی بالایی و توده‌های سرد سیال به مناطق پایینی حفره انتقال پیدا می‌کنند. در نتیجه این حرکت، می‌توان گفت که دما در مناطق بالایی حفره، بیشتر

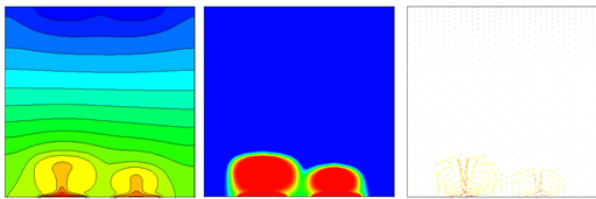


(د) ۴۰۰۰ ثانیه

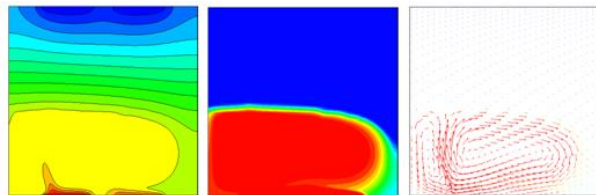
شکل (۱۰) تصاویر دست راست: بردارهای سرعت، تصاویر وسط: خطوط دما ثابت و تصاویر دست چپ: شکل صفحات بین نواحی جامد و مایع، مربوط به چیدمان نوع اول برای واکنس پارافینی با ۲ درصد وزنی نانو ذره اکسید آلومینیوم



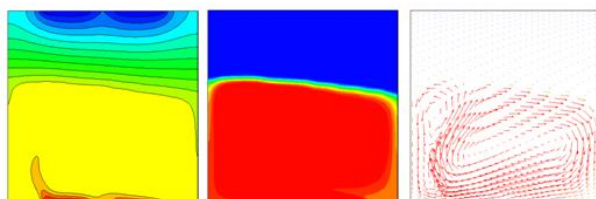
(الف) ۱۰۰ ثانیه



(ب) ۵۰۰ ثانیه



(ج) ۲۰۰۰ ثانیه



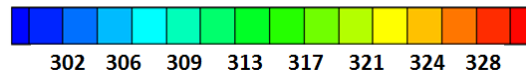
(د) ۴۰۰۰ ثانیه

شکل (۱۱) تصاویر دست راست: بردارهای سرعت، تصاویر وسط: خطوط دما ثابت و تصاویر دست چپ: شکل صفحات بین نواحی جامد و مایع، مربوط به چیدمان نوع اول برای واکنس پارافینی با ۵ درصد وزنی نانو ذره اکسید آلومینیوم

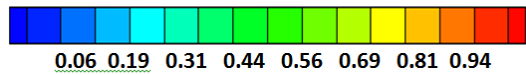
طبیعی، روند ذوب را به سمت سمت نواحی بالایی سوق می دهد. با گذشت زمان، بهم ریختگی در شکل کلی خطوط همدم، بیانگر این مهم است که به تدریج انتقال حرارت جابجایی طبیعی، فرآیند حاکم بر روند انتقال حرارت سیستم خواهد شد.

۵-۱-۳- بردارهای سرعت

در مراحل اول، فرآیند ذوب واکنس پارافینی مخلوط با درصد وزنی نانو ذرهاکسید آلومینیوم، از نواحی نزدیک به منابع گرم آغاز می شود. در اثر این اتفاق، یک سری چرخش های ساعت گرد نسبتا مشابه بوجود می آید که به تدریج گسترش پیدا خواهند کرد. در نظر داشته باشیم که معیار کانتور دما شکل (۹-الف) و معیار کانتور شکل صفحات شکل (۹-ب) مشخص شده اند.

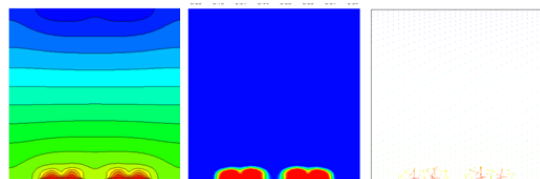


(الف)

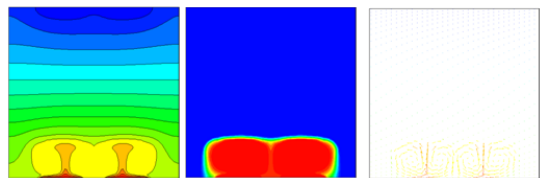


(ب)

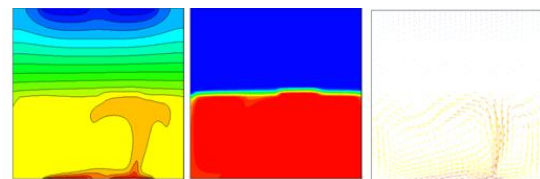
شکل (۹) (الف) معیار کانتور دما، (ب) معیار کانتور شکل صفحات



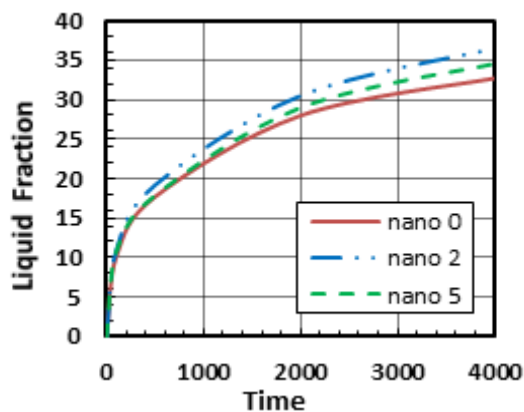
(الف) ۱۰۰ ثانیه



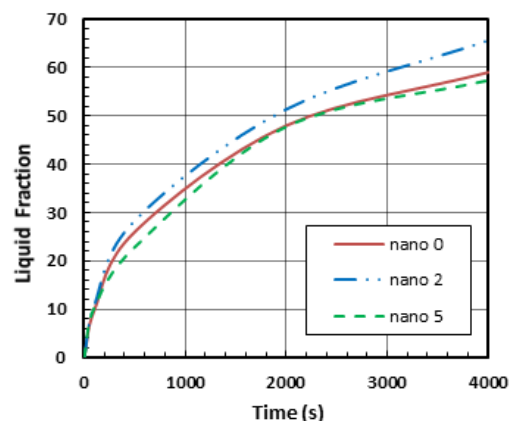
(ب) ۵۰۰ ثانیه



(ج) ۲۰۰۰ ثانیه



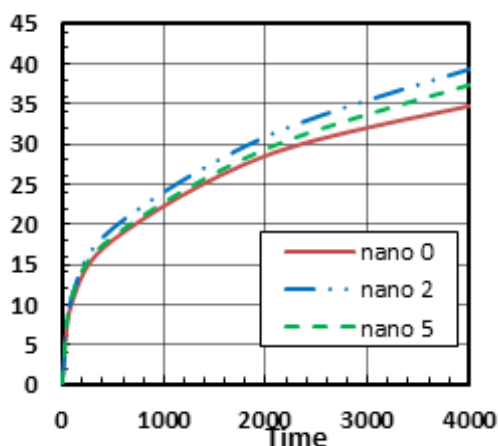
چیدمان دوم



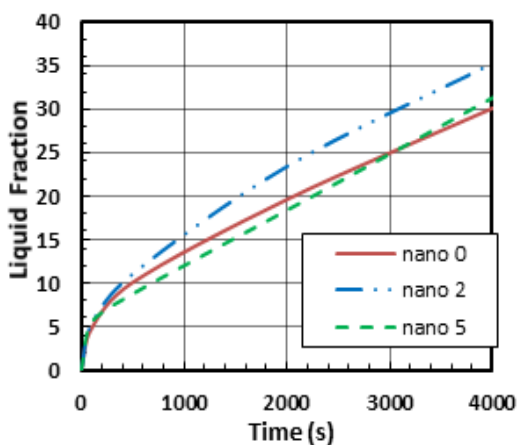
شکل (۱۲) تغییرات کسر مایع برای ۰، ۲ و ۵ درصد وزنی نانو ذره اکسید آلومینیوم در چیدمان نوع اول

۵-۱-۴- کسر مایع

در واکنش پارافینی، نرخ ذوب برای چیدمان اول افزایش پیدا می‌کند. این رفتار برای سایر چیدمان‌ها هم بطور مشابه در شکل (۱۳) تکرار می‌شود. بر اساس شکل (۲-الف) لزجت دینامیکی با افزایش درصد وزنی نانو ذرات افزایش یافته و با افزایش دما کاهش می‌یابد. با توجه به این شکل، افزایش ویسکوزیته دینامیکی توسط غلظت نانو ذرات، در دماهای پایین ملموس تر است. توسعه لزجت دینامیکی به شکل مهمی می‌تواند بر میزان و روند فرآیند ذوب اثر گذار باشد به ویژه زمانی که جابجایی طبیعی، غالب در انتقال حرارت سیستم محسوب می‌شود. در دماهای پایین لزجت دینامیکی تاثیر منفی بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی دارد، لذا این پدیده می‌تواند اثر مثبت افزایش هدایت حرارتی را از بین ببرد. با توجه به این توضیحات، دلیل اینکه چرا با افزایش بکارگیری نانو ذرات در واکنش پارافینی تا ۵ درصد، نرخ ذوب کاهش می‌یابد، مشخص می‌شود. در مراحل اول فرآیند ذوب، شکل کلی صفحات بین نواحی جامد و مایع کاملاً مسطح به نظر می‌رسد و این حالت برای تمامی درصدهای وزنی ۰، ۲ و ۵ اکسید آلومینیوم به طور یکسان تکرار می‌شود.



چیدمان سوم

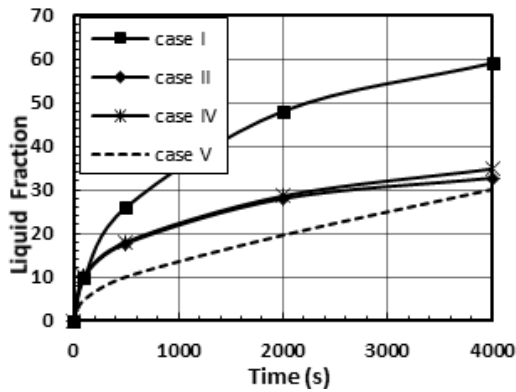


چیدمان چهارم

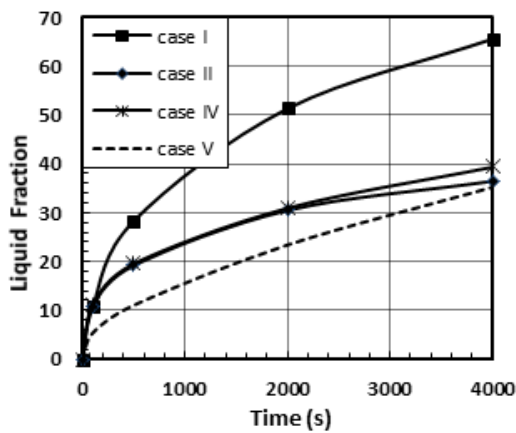
شکل (۱۳) تغییرات کسر مایع برای ۰، ۲ و ۵ درصد وزنی نانو ذره

اکسید آلومینیوم در چیدمان‌های نوع دوم، سوم و چهارم

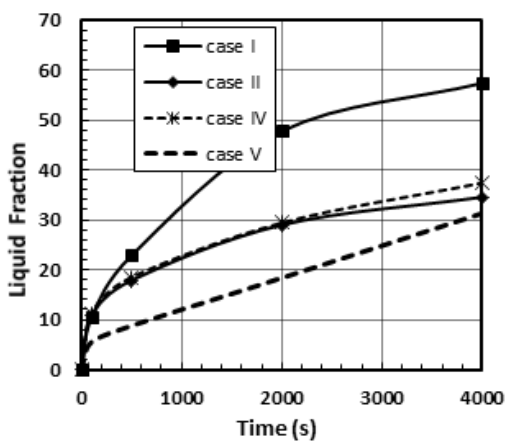
با گذشت زمان شکل این صفحات بیشتر و بیشتر به سمت روندی بی‌نظم سوق پیدا می‌کند، به این ترتیب هرچقدر که فرآیند ذوب به سمت کامل شدن پیش روی دارد، انتقال حرارت جابجایی طبیعی هم گسترش پیدا خواهد کرد. در



شکل (۱۴) تغییرات کسر مایع در چیدمان‌های مختلف برای بکارگیری صفر درصد نانو ذره اکسید آلومینیوم



شکل (۱۵) تغییرات کسر مایع در چیدمان‌های مختلف برای بکارگیری ۲ درصد نانو ذره اکسید آلومینیوم



شکل (۱۶) تغییرات کسر مایع در چیدمان‌های مختلف برای بکارگیری ۵ درصد نانو ذره اکسید آلومینیوم

۶- نتیجه گیری

در کار ارائه شده، فرآیند ذوب ترکیبات حاوی نانو ذرات (NePCM) در یک حفره مربعی تحت زوایای مختلف، در

انتقال حرارت جابجایی طبیعی، حرکت توده‌های سیال به دلایل گوناگونی از جمله اثر بویانسی امکان پذیر می‌شود، به این صورت که توده‌های گرم به نواحی بالایی و توده‌های سرد سیال به مناطق پایینی حفره انتقال پیدا می‌کنند. در نتیجه این حرکت می‌توان گفت که دما در مناطق بالایی حفره بیشتر از مناطق پایینی است و همین مسئله باعث پیشرفت هرچه بیشتر فرآیند ذوب در این مناطق خواهد شد.

شکل (۱۳) مقدار ماده ذوب شده را برای تمامی درصد‌های وزنی ۰، ۲ و ۵ اکسید آلومینیوم در چیدمان‌های دوم، سوم و چهارم نشان می‌دهد. اگرچه بطور کیفی، شکل صفحات بین نواحی جامد و مایع در تمامی درصد‌های وزنی نانو ذره اکسید آلومینیوم، یکسان به نظر می‌رسد، اما در واقع، برای هر کدام از درصد‌های وزنی، مقادیر متفاوتی از ماده تغییر حالت دهنده، ذوب می‌شود. باتوجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد وزنی نانو ذرات تا ۲ درصد، نرخ ذوب شدن مخلوط مورد نظرهم افزایش مییابد. با افزایش دوباره درصد بکارگیری نانو ذرات به ۵ درصد، نرخ ذوب کاهش پیدا خواهد کرد و به مقدار مربوط به حالت واکس پارافینی خالص باز می‌گردد.

۵-۲ تاثیر انواع چیدمان‌ها بر نرخ ذوب

مقایسه بین چیدمان‌های مختلف (همه درصد‌های وزنی نانو ذره اکسید آلومینیوم) نشان می‌دهد که نرخ ذوب برای زمان ۴۰۰۰ ثانیه مطابق شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) در موارد اول و چهارم به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار است.

α	کسر مایع	اثر اعمال دو جفت منبع حرارتی چاه-چشمه بر روی دیواره
μ	ویسکوزیته دینامیکی (Ns/m^2)	های افقی، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است.
ρ	چگالی (kg/m^3)	معادلات حاکم با استفاده از یک شبکه بندی غیر یکنواخت
\bar{t}	تانسور تنش (المان تنش)	به وسیله روش حجم محدود و آنتالپی متخلخل حل می-شوند.
φ	کسر حجمی نانو ذره	نتایج نشان می دهند که نرخ ذوب برای زمان فرآیند
C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت (J / kg K)	۴۰۰۰ ثانیه، در موارد اول و چهارم به ترتیب دارای بیشترین
g	شتاب گرانشی (m / s^2)	و کمترین مقدار است. تاثیر در صد بکارگیری نانو ذرات
		هم مورد بررسی قرار گرفت که بر طبق نتایج، برای ماده با ۲
		درصد بکارگیری نانو ذرات، بیشترین نرخ ذوب را خواهیم
		داشت.

مراجع:

- [1] Farid M.M., Khudhair A.M., Razack S.A.K., Al-Hallaj S., A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No.9-10, 2004, pp. 1597-1615.
- [2] Zhou D., Zhao C.Y., Tian Y., Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy*, Vol. 92, 2012, pp.593-605.
- [3] Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H., Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 3, 2003, pp.251-283.
- [4] Atul S., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13 , 2009, pp. 318-345.
- [5] Meng E., Yu, Zhan G., He Y., Experimental and numerical study of the thermal performance of a new type of phase change material room, *Energy Conversion and Management*, 74 ,2013, pp.386-394.
- [6] Zhang Y., Chen Z., Wang Q., Wu Q., Melting in an enclosure with discrete heating at a constant rate, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6 ,1993, pp.196-201.
- [7] Faraji M., El Qarnia H., Numerical study of melting in an enclosure with discrete protruding heat sources, *Applied Mathematics Modeling*, Vol. 34, 2010, pp.1258-1275.

فهرست علائم:

H	(W / mK)	آنتالپی ترکیب واکس پارافینی و نانو ذره
h	(J/kg)	آنتالپی محسوس
K	(W/mK)	هدایت حرارتی ترکیب واکس پارافینی و نانو ذره
L	(J/kg)	گرمای نهان
T_{liquidus}	(K)	دمای مایع
T_{solidus}	(K)	دمای جامد
P	(N/m^2)	فشار استاتیکی
T	(K)	دمای ترکیب واکس پارافینی و نانو ذره
T_{ref}		دمای مرجع
t	(s)	زمان
V	(m/s)	سرعت
ΔH	(J/kg)	گرمای نهان
κ	(J/K)	ثابت بولتزمن

- [17] Arasu A.V., Mujumdar A.S., Numerical study on melting of paraffin wax with Al₂O₃ in a square enclosure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, 2012, pp. 8–16.
- [18] Sebti S., Mastiani M., Mirzaei H., Dadvand A., Kashani S., Hosseini S.A., Numerical study of the melting of nano-enhanced phase change material in a square cavity, *Journal of Zhejiang University Science A*, Vol. 14, No. 5, 2013, pp. 307-316.
- [19] Ho C.J., Gao J.Y., An experimental study on melting heat transfer of paraffin dispersed with Al₂O₃ nanoparticles in a vertical enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 62, 2013, pp. 2–8.
- [20] Zeng Y., Fan L.W., Xiao Y.Q., Yu Z.T., Cen K.F., An experimental investigation of melting of nanoparticle-enhanced phase change materials (NePCMs) in a bottom-heated vertical cylindrical cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, 2013, pp. 111–117.
- [21] El-Hasadi Y.M.F., Khodadadi J.M., Numerical simulation of the effect of the size of suspensions on the solidification process of nanoparticle-enhanced phase change materials, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 135, No. 5, 2013, 052901.
- [22] N.S. Dhaidan, J.M. Khodadadi, T.A. Al-Hattab, S.M. Al-Mashat, Experimental and numerical investigation of melting of phase change material/nanoparticle suspensions in a square container subjected to a constant heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, 2013, pp. 672–683.
- [23] Dhaidan N.S., Khodadadi J.M., Al-Hattab T.A., Al-Mashat S.M., Experimental and numerical study of constrained melting of n-octadecane with CuO nanoparticle dispersions in a horizontal cylindrical capsule subjected to a constant heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 67, 2013, pp. 523–534
- [24] Dhaidan N.S., Khodadadi J.M., Al-Hattab T.A., Al-Mashat S.M., Experimental and numerical investigation of melting of NePCM inside an annular container under a constant heat flux including the effect of eccentricity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 67, 2013, pp. 455–468.
- [8] Kousksou T., Mahdaoui M., Ahmed A., Msaad A.A., Melting over a wavy surface in a rectangular cavity heated from below, *Energy*, Vol. 64, 2014, pp.212-219.
- [9] Khodadadi J.M., Hosseinizadeh S.F., Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, 2007, pp. 534–543.
- [10] Zeng J.L., Sun L.X., Xu F., Tan Z.C., Zhang Z.H., Zhang J., Zhang T., Study of a PCM based energy storage system containing Ag nanoparticles, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 87, 2007, pp. 369–373.
- [11] Wu S.Y., Wang H., Xiao S., Zhu D.S., An investigation of melting/freezing characteristics of nanoparticle-enhanced phase change materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 110, 2012, pp. 1127–1131.
- [12] Chow L.C., Zhong J.K., Thermal conductivity enhancement for phase change storage media, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, 1996, pp. 91–100.
- [13] Vajjha R.S., Das D.K., Measurement of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, 2009, pp. 4675–4682.
- [14] Ho C.J., Gao T.Y., Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-in-paraffin emulsion as phase change material, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No.5, 2009, pp.467-470.
- [15] Kashani S., Ranjbar A.A., Abdollahzadeh M., Sebti S., Solidification of nano-enhanced phase change material (NEPCM) in a wavy cavity, *Heat Mass Transfer*, Vol. 48, 2012, pp. 1155–1166.
- [16] Hosseinizadeh S.F., Rabienataj Darzi A.A., Tan F.L., Numerical investigations of unconstrained melting of nano-enhanced phase change material (NEPCM) inside a spherical container, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 41, 2012, pp. 77–83.

- [25] Jourabian M., Farhadi M., Sedighi K., On the expedited melting of phase change material (PCM) through dispersion of nanoparticles in the thermal storage unit, *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 67, 2014, pp. 1358-1372.
- [26] <http://www.fluent.com>.
- [27] Kandasamy R., Wang X.Q., Mujumdar A.S., Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, 2008, pp. 1047-1057.
- [28] Sasmito A.P., Kurnia J.C., Mujumdar A.S., Numerical evaluation of laminar heat transfer enhancement in nanofluid flow in coiled square tubes, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, No. 1, 2011, pp. 1-14.
- [29] Arasu A.V., Sasmito A.P., Mujumdar A.S., Numerical performance study of paraffin wax dispersed with Alumina in a concentric pipe latent heat storage system, *Thermal Science*, Vol. 17, 2013, pp. 419-430.
- [30] Vajjha R.S., Das D.K., Namburu P.K., Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al₂O₃ and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 31, 2010, pp. 613-621.