



بررسی عددی ذوب شدن مواد تغییر فاز دهنده نانو درون محفظه مثلثی

ابوالفضل نعمت‌پور کشتلی، محسن شیخ‌الاسلامی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۹
بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۲۱
پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۲/۰۴

کلمات کلیدی:

مواد تغییر فاز دهنده نانو
مواد تغییر فاز دهنده
نانوذرات
آنتروپی
ذوب
جابجایی طبیعی

خلاصه: در این مقاله به بررسی عددی رفتار ذوب مواد تغییر فاز دهنده در یک میدل حرارتی دو لوله‌ای دوبعدی پرداخته شده است. فضای داخلی بین پوسته و لوله با استفاده از آن-ایکوسین و ذرات مس به ترتیب به عنوان مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات پر شده است و آب به عنوان سیال گرم در لوله داخلی جریان دارد. برای بررسی اثر نانوذرات در سرعت انتقال حرارت، ذرات مختلفی از نانوذرات مس به مواد تغییر فاز دهنده پایه افزوده شده است. همچنین اثر آنتروپی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نانوذرات باعث افزایش هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده نانو نسبت به مواد تغییر فاز دهنده معمولی می‌شود. زمان ذوب مواد تغییر فاز دهنده با افزایش دما از ۴۰ به ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش زمان ذوب تا ۵۳ و ۷۶ درصد می‌گردد. همچنین افزایش نانوذره با کسر حجمی ۰/۰۴ به مواد تغییر فاز دهنده در این سه دما باعث کاهش زمان ذوب تا ۲۰ درصد می‌گردد. افزایش هدایت حرارتی مؤثر در کاهش تولید آنتروپی سیستم، بسیار بیشتر از کاهش گرمای ویژه و حرارت نهان نانو مواد تغییر فاز دهنده است.

۱- مقدمه

مواد را می‌توان برای ذخیره گرمایش منفعل^۱ استفاده کرد. ضعف عمده مواد تغییر فاز دهنده مربوط به هدایت حرارتی کم آن‌ها است. که مانع از سرعت بالای شارژ و تخلیه شار حرارتی می‌شود. این نوع مواد دارای خواص مفید بسیاری از جمله منبع حرارت در دمای ثابت، بازیابی گرما با افت دما و ذخیره‌سازی بالا چگالی و نقطه ذوب است. که مطابق با برنامه‌های کاربردی، فشار بخار کم (۱ بار) در دمای عملیاتی، و ثبات شیمیایی و غیر خوردگی است. این خصوصیات، شرایط استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند ذخیره حرارتی انرژی خورشیدی [۱-۲]، مدیریت حرارتی دستگاه‌های الکترونیکی [۳-۱]، ذخیره حرارتی در ساختمان‌ها [۴]، خنک‌کننده موتورها [۵] امکان‌پذیر ساخته است. پس از بررسی مطالعات انجام شده توسط تلکس و ریموند [۶]، اولین مطالعه مواد تغییر فاز در دهه ۱۹۴۰ انجام شد. همچنین چندین کار تا دهه ۱۹۷۰ گزارش شده است. پس از آن، اولین مطالعه مواد تغییر فاز دهنده توسط بارکمن و وستلین [۷] برای استفاده در ساختمان‌ها ارائه شده است. سوکولف و کیزمن [۸] کاربرد مواد

با افزایش جمعیت جهانی، استفاده از انرژی‌های فسیلی با سرعت زیاد افزایش می‌یابد. به نوبه خود نیز به گرم شدن و کاهش لایه محافظ اوزون کمک می‌کند. برای ایجاد شرایط امن محیط زیست و برای تقاضای افزایش انرژی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و باد روز به روز در حال افزایش است. برای استفاده مؤثر از منابع انرژی، برخی از انواع دستگاه‌های ذخیره انرژی لازم است. در این راستا، انرژی خورشیدی که یک منبع متناوب انرژی آزاد است، نیز باید برای استفاده بعدی ذخیره شود. در میان تکنیک‌های مختلف ذخیره انرژی حرارتی، سیستم انرژی حرارتی نهان^۱ با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده^۲ مناسب در طی سه دهه گذشته مورد بررسی بوده است. مواد تغییر فاز دهنده به دلیل جذب مقدار زیادی انرژی به عنوان گرمای ناپیوسته در دمای انتقال فاز بسیار مورد توجه هستند. این

- 1 Latent Thermal Energy System
- 2 Phase Change Material

3 Passive Heat Storage

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mohsen.sheikhholeslami@nit.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



طرفی زمان انجماد اولیه را افزایش می‌دهد و زمان انجماد کل را کاهش می‌دهد. آن‌ها نشان دادند که با افزودن نانوذرات آلومینا با کسر حجمی ۰/۲ درصد، زمان انجماد نانوسیال آلومینا-آب را می‌توان تا ۲۰/۵ درصد کاهش داد. ابراهیمی [۱۵] در سال ۲۰۱۷، اثر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس به عنوان عامل خنک‌کننده بر عملکرد یک نمونه فتوولتائیک، به صورت تجربی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده خالص به طور قابل توجهی موجب کاهش دمای سطح از ۵۸/۳۴ تا ۵۱/۷ سانتی‌گراد می‌شود. علاوه بر این داده‌ها نشان داده اند که افزودن نانوذرات اکسید مس^۴ به مواد تغییر فاز دهنده خالص موجب افزایش بهره‌وری خنک‌کننده و قدرت تولید شده می‌شود. در سال ۲۰۱۱، اثرات دمای ورودی آب و همچنین نرخ جریان جرمی بر عملکرد حرارتی و ذخیره حرارتی مواد تغییر فاز دهنده در مبدل پوسته و لوله، توسط تاو و هی [۱۶] تحلیل شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که زمان ذوب مواد تغییر فاز دهنده زمانی که دمای متوسط ورودی و متوسط جریان ورودی در یک ساعت ثابت است، با افزایش دمای ورودی اولیه آب و نرخ جریان جرم ورودی اولیه آب کاهش می‌یابد. یازجی و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۴، در یک کار تجربی به بررسی فرآیند ذوب پارافین در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای با افزایش خروج از مرکزیت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش خروج از مرکزیت باعث بهبود اثرات جابه‌جایی طبیعی شده و این امر تاثیر قابل توجهی در کاهش زمان ذوب خواهد داشت. عساری و همکاران [۱۸] سال ۲۰۱۷، در این پژوهش به بررسی تجربی تاثیر افزودن نانوذرات اکسید مس و همچنین اثر خارج از مرکز بودن بر فرایند ذوب مواد تغییر فاز دهنده (پارافین واکس) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با پایین آوردن لوله داخلی مبدل حرارتی و افزودن نانوذرات، می‌توان فرایند ذوب شدن (شارژ) پارافین واکس و همچنین ذخیره انرژی حرارتی و کارایی مبدل حرارتی را به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید. ایرانی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۷، به صورت عددی تحلیل حرارتی دیوار خورشیدی مجهز به ماده تغییر فاز حاوی نانو ذرات را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که به واسطه افزودن نانولوله‌های کربنی و نانوذرات کروی اکسید آلومینیوم به ماده تغییر فاز دهنده پایه، بهبود مناسبی در عملکرد حرارتی دیوار خورشیدی حاصل می‌شود. برای نانولوله‌های کربنی با کسر حجمی ۳ درصد راندمان حرارتی دیوار خورشیدی به اندازه ۹ درصد افزایش یافته است. اگر در یک سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، صرفه‌جویی در مقدار خاصی از انرژی در نظر

تغییر فاز دهنده را در یک کالکتور خورشیدی برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ ارائه کردند. یک بررسی مفید از ذخیره انرژی حرارتی به وسیله مواد تغییر فاز دهنده توسط زالبا و همکاران [۹] ارائه شد. آن‌ها انواع مواد تغییر فاز دهنده را بر اساس انتقال حرارت، خصوصیات مواد و کاربردهای آن طبقه‌بندی کردند. در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان علاقه زیادی به استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش هزینه‌های سوخت‌های فسیلی نشان داده‌اند. اکثر مطالعات تجربی و عددی آن‌ها مربوط به صرفه‌جویی در انرژی در سازه‌های ساختمان و گردآورنده‌های خورشیدی می‌باشد. خدادادی و ژانگ [۱۰] اثر هدایت را بر ذوب محدودی در یک کانال بصورت عددی بررسی کردند. آن‌ها از فرمول‌بندی آنتالپی تک دامنه و قانون دارسی برای شبیه‌سازی پدیده تغییر فاز و تخلخل استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان ذوب در ناحیه بالای کره، به علت انتقال حرارت هدایت افزایش یافته است. آنها همچنین تأثیر عدد پرانتل را بر الگوهای جریان و ذوب بررسی کردند. خدادادی و حسینی‌زاده [۱۱] مطالعه‌ای عددی در مورد بهبود ذخیره انرژی حرارتی با استفاده از نانوذرات مواد تغییر فاز دهنده^۱ انجام دادند. آن‌ها نانوذرات مس را به عنوان ذرات نانو مورد استفاده قرار دادند که هدایت حرارتی مواد پایه را افزایش داد. همچنین آن‌ها با استفاده از نانوذرات مواد تغییر فاز دهنده به جای مواد تغییر فاز دهنده معمولی، سرعت آزاد شدن گرما را بالاتر می‌برند. ابوالقاسمی و همکاران [۱۲] افزایش انتقال حرارت واحد ذخیره‌سازی حرارتی که شامل مواد تغییر فاز دهنده و نانو ذرات است را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزودن نانو ذرات به مواد تغییر فاز دهنده، هدایت گرمای موثر مواد تغییر فاز دهنده را افزایش می‌دهد. با این حال، گرمای ویژه و حرارت ناپایدار مواد تغییر فاز دهنده کاهش می‌یابد. مزیت افزایش هدایت حرارتی مؤثر در کاهش تولید آنتروپی سیستم، بسیار بیشتر از کاهش گرمای ویژه و حرارت ناپایدار نانومواد تغییر فاز دهنده است. پسوپادی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۷ تحقیقاتی گسترده در زمینه کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان‌ها در راستای مدیریت انرژی در واحدهای تجاری و ساختمانی انجام دادند. وو و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۹ نانوسیال آلومینا-آب^۲ را به عنوان یک ماده تغییر فاز جدید برای ذخیره انرژی حرارتی سیستم‌های خنک‌کننده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات آلومینا^۳ (اکسید آلومینیوم) به طور قابل توجهی میزان درجه حرارت بیش از حد آب را کاهش می‌دهد، از

1 Nanoparticle-Enhanced Phase Change Material

2 Al₂O₃-H₂O

3 Al₂O₃

می‌تواند بیان شود. از طرفی انتقال حرارت بین مایع انتقال گرما و سطح لوله داخلی وجود دارد. شرایط مرزی آدیاباتیک در دیواره‌های لوله بیرونی در نظر گرفته شده است.

خواص مواد تغییر فاز دهنده و نانوذره در جدول ۱ ارائه شده است.

۳- معادلات حاکم

به منظور ساده‌سازی معادلات فیزیکی و ریاضی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است. تلفات ویسکوزیته در سیال انتقال حرارت ناچیز در نظر گرفته شده است. همچنین جریان سیال به صورت دوبعدی، آرام و غیرقابل تراکم است. تلفات حرارتی در پوسته بیرونی ناچیز است (پوسته بیرونی عایق است). از مقاومت حرارتی پوسته داخلی صرف‌نظر می‌گردد. خواص ترموفیزیکی سیال انتقال‌دهنده حرارت و ماده تغییر فاز دهنده ثابت در نظر گرفته شده‌اند. از تغییرات حجمی ناشی از تغییر فاز صرف‌نظر می‌گردد. به منظور مدل‌سازی فرآیند تغییر فاز از روش آنتالپی متخلخل استفاده می‌شود [۲۰]. در این روش کسر مایع ذوب در هر تکرار محاسبه می‌گردد. ناحیه خمیری ناحیه‌ای است که در آن تخلخل با ذوب ماده تغییر فاز دهنده از ۰ تا ۱ افزایش پیدا می‌کند. به هنگامی که ناحیه‌ای به طور کامل منجمد گردد تخلخل صفر گشته و سرعت جریان در این ناحیه تا صفر کاهش پیدا می‌کند. در طی فرآیند تغییر فاز مواد تغییر فاز دهنده جامد ذوب شده و به مایع تبدیل خواهد شد. زمانی که مواد تغییر فاز دهنده بطور کامل ذوب می‌شود، کسر مایع عدد ۱ و زمانی که این مواد کاملاً جامد است، کسر مایع ۰ است. در طول این زمان بازه کسر مایع بین ۰ و ۱ می‌باشد.

در مسائل تغییر فاز معادلات حاکم عبارتند از معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی که بصورت زیر بیان می‌شود.

۳-۱ پیوستگی

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

۳-۲ مومنتوم

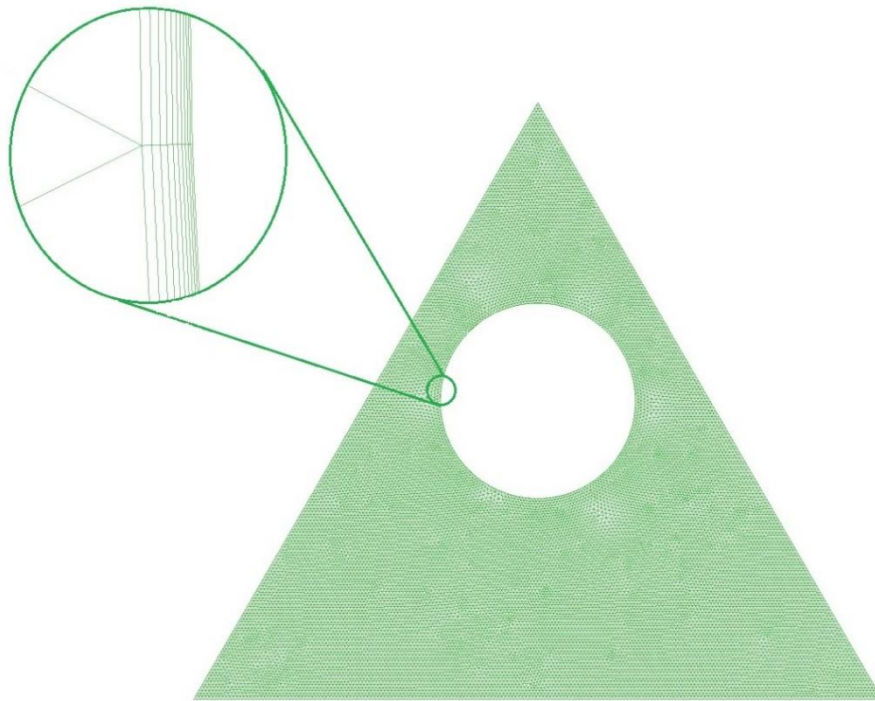
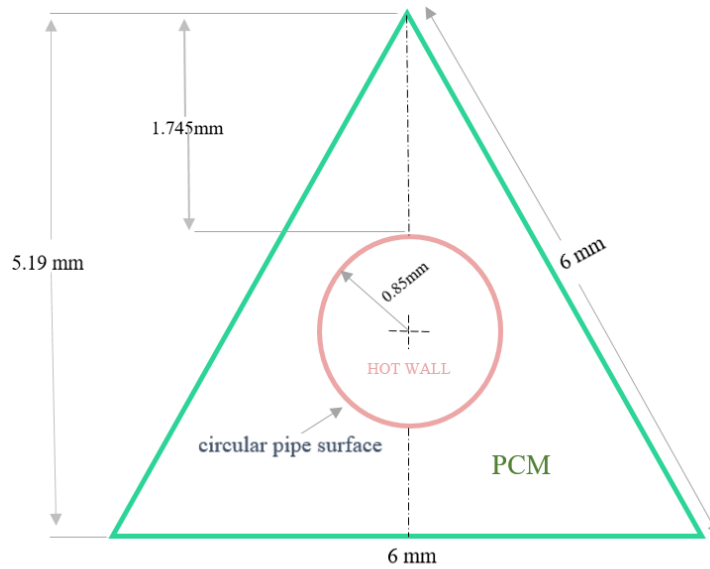
$$\frac{\partial V}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} \left(-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \beta (T - T_{ref}) \right) + \vec{S}_i \quad (2)$$

۳-۳ انرژی

گرفته شود، کاهش انرژی ذخیره شده می‌تواند با استفاده از نانومواد تغییر فاز دهنده بیشتر جبران شود. در میان تکنیک‌های مختلف ذخیره انرژی حرارتی، سیستم انرژی حرارتی نهان که با استفاده از ماده تغییر فاز مناسب مواد تغییر فاز دهنده در طی سه دهه گذشته تحت بررسی بوده است. با توجه به سادگی و هزینه پایین این دستگاه‌ها، در سراسر جهان در مورد سیستم‌های انرژی حرارتی نهان فعالیت‌های تحقیقاتی قابل توجهی وجود دارد. در این راستا، استفاده مختلف مبدل‌های حرارتی برای افزایش انتقال حرارت بین مواد تغییر فاز دهنده و سیال انتقال حرارت پیشنهاد شده است. در چنین دستگاه‌هایی، در طول دوره ذخیره‌سازی انرژی، مواد تغییر فاز دهنده به عنوان ذخیره‌کننده انرژی عمل می‌کنند، در حالی که سیال انتقال حرارت منبع انرژی حرارتی از خورشید است. در طول دوره بازیابی انرژی، روند متوقف می‌شود، مواد تغییر فاز پس از آن به عنوان منبع ذخیره عمل می‌کند تا گرما را برای استفاده مورد نظر اعمال کند. در این مقاله، یک مطالعه عددی از ذوب نانوذرات مواد تغییر فاز دهنده در یک کانال مثلثی ارائه شده است. اثر کسر حجمی مختلف نانوذرات (۰، ۰/۰۴) و بر میزان ذوب برای سه درجه حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر آنتروپی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو به مواد تغییر فاز دهنده، نرخ بالای ذوب در مقایسه با مواد تغییر فاز دهنده معمولی را به عنوان یک نتیجه از هدایت حرارتی دارا است. همچنین زمان ذوب به نسبت قابل توجهی کاهش یافته است. جزئیات روش‌های محاسباتی در بخش‌های زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- بیان مسئله

یک دید کلی از مدل فیزیکی مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. شکلی از مقطع عرضی یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای نامنظم است. شامل حلقه‌ای به شکل دلخواه است که توسط یک لوله داخلی دایره‌ای با قطر ۱/۷ میلی‌متر تشکیل شده است. و یک لوله مثلثی بیرونی متعادل که دارای ارتفاع ۵/۱۹ میلی‌متر و پایه ۶ میلی‌متر است. مساحت مقطع لوله بیرونی برابر با مقطع عرضی یک سیلندر است. از این‌رو، سطح مواد تغییر فاز دهنده مقطعی بین هندسه مورد مطالعه برابر است با فضای بین سطح مقطع داخلی و خارجی. مواد تغییر فاز دهنده فضای بین دو لوله داخلی و لوله مثلثی را اشغال کرده است. سیال با دمای‌های ثابت (۳۱۳/۱۵، ۳۱۸/۱۵، ۳۲۸/۱۵ کلوین) وارد لوله داخلی می‌شود. دمای اولیه پایینتر از دمای جامد مواد تغییر فاز دهنده، ۲۹۸/۱۵ کلوین در نظر گرفته شده است. شرط عدم لغزش و غیر نفوذپذیری در رابطه با جامد و دیواره‌های لوله داخلی و بیرونی



شکل ۱: شکل فیزیکی دامنه شبیه‌سازی پر شده از مواد تغییر فاز دهنده

Fig. 1. The physical shape represents the simulation domain filled with phase change material.

به در روابط (۴) و (۵) به ترتیب آورده شده است:

۳-۴- آنتالپی محسوس

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dt \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho C_p} \nabla h \right) \quad (3)$$

آنتالپی کل مواد برابر است با مجموع آنتالپی محسوس h و حرارت نهان ΔH

Table 1. The properties of phase change material and copper nanoparticles.

جدول ۱: خواص مواد تغییر فاز دهنده و نانوذره مس

خواص	واحد	مواد تغییر فاز دهنده	واحد	نانو ذره
دمای ذوب	°C	۳۶ (۳۵-۳۷)	-	-
ظرفیت ذخیره گرما	kJ/kg	۳۴۷/۶	-	-
چگالی	kg/m ³	۷۷۰	kg/m ³	۸۹۵۴
ضریب انبساط حجمی	K ⁻¹	۰/۰۰۹	K ⁻¹	۱/۶۷× ۱۰ ^۵
ظرفیت گرمایی ویژه	kJ/kg.K	۲۴۶۰	kJ/kg.K	۲۸۳
ویسکوزیته سینماتیکی	m/s	۱/۶۷× ۱۰ ^۵	-	-
رسانایی گرمایی	W/m.K	۰/۱۵، ۰/۲۴	W/m.K	۴۰۰

۳-۵- آنتالپی

۳-۷- قانون دارسی

$$S_i = \frac{A_{mush}(1-\beta)^2}{\beta^3 + 0.001} u_i \quad (۸)$$

$$H = h + \Delta H \quad (۵)$$

Amush ثابت ناحیه خمیری است. ثابت ناحیه خمیری از ۱۰۴ تا ۱۰۷ تغییر می‌کند. ثابت ناحیه خمیری، دامنه میرایی را مشخص می‌کند. مقادیر بزرگتر این ثابت بیانگر شیب سریع تر میرایی سرعت بوده و مقادیر خیلی بزرگ آن می‌تواند باعث ایجاد نوسان در حل گردد. در این پژوهش ثابت ناحیه خمیری ۱۰۵ در نظر گرفته شد.

مقدار گرمایی نهان به صورت گرمای نهان ماده، L ، طبق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$\Delta H = \beta L \quad (۶)$$

فرضیاتی که در شبیه‌سازی برای نانوذره مواد تغییر فاز دهنده لحاظ شده است عبارتند از:

که ΔH می‌تواند از صفر (جامد) تا یک (مایع) تغییر کند. به همین منظور، کسر حجمی ذوب به صورت رابطه (۷) تعریف می‌گردد [۲۱]:

۳-۶- کسر حجمی

۳-۸- چگالی

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_p + \phi\rho_n \quad (۹)$$

$$\beta = \frac{\Delta H}{l} = 0 \quad \text{if } T < T_s$$

$$\beta = \frac{\Delta H}{l} = 0 \quad \text{if } T > T_l \quad (۷)$$

۳-۹- ضریب انبساط حجمی

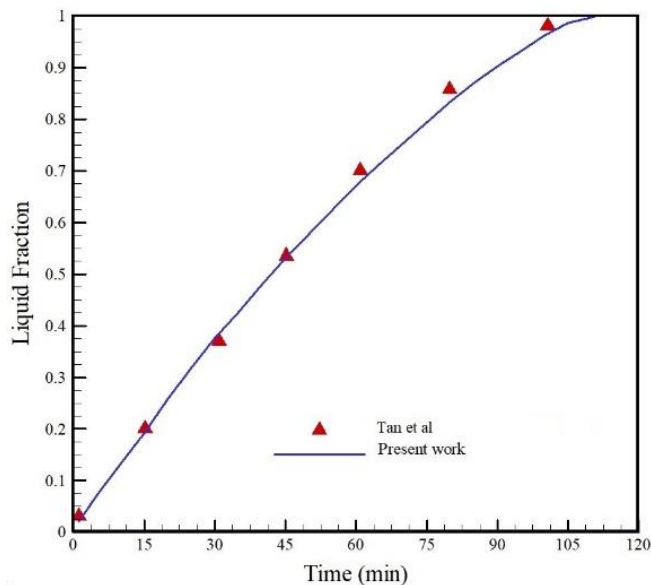
$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\beta\rho)_p + \phi(\beta\rho)_n \quad (۱۰)$$

$$\beta = \frac{\Delta H}{l} = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \quad \text{if } T_s < T < T_l$$

۳-۱۰- ظرفیت گرمایی ویژه

T_s و T_l به ترتیب نشان‌دهنده دمای ابتدایی و انتهایی محدوده ذوب ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد. همچنین در رابطه (۲) S_i ترم چشمه است که به علت اثرات تغییر فاز در انتقال حرارت جابه‌جایی به رابطه مومنتوم اضافه می‌شود که در رابطه (۸) آورده شده است.

$$(c_p\beta)_{nf} = (1-\phi)(c_p\beta)_p + \phi(c_p\beta)_n \quad (۱۱)$$



شکل ۲: مقایسه نمودار زمان مطالعه حاضر با نتایج عددی تن و همکاران [۲۲].

Fig. 2. Comparison of the time chart of the present study with the numerical results of Tan et al. [22].

فشار، انرژی حرارتی و کسر مایع به ترتیب به ۰/۴، ۰/۳، ۱ و ۰/۹ انتخاب شده است. برای سه عدد استفان^۱ مختلف همچنین برای درصد وزنی ۰ و ۰/۴ درصد در نظر گرفته شده است. جهت بررسی تاثیر تعداد مش بر حل عددی سه شبکه مختلف با ۲۵۰۰۰ و ۳۵۰۰۰ و ۴۵۰۰۰ سلول و همچنین مشهای مختلف به لحاظ تعداد لایه مرزی کنار دیواره مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت بهترین مش لایه مرزی و همچنین ۳۵۰۰۰ مش به عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. همچنین گام زمانی برای شبیه سازی ۰/۱ ثانیه انتخاب شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنوم ۱۰-۳ و معادله انرژی ۶-۱۰ در نظر گرفته شده است.

۴-۲- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج مدل حاضر با نتایج عددی خدادادی و حسینزاده [۲۲] مقایسه شده است. با توجه به شکل ۲ نتایج از دقت خوبی برخوردارند.

۵- نتیجه عددی و بحث

در این قسمت به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی مواد تغییر فاز دهنده پرداخته شده است. تغییرات محاسبه کسر مایع در مقایسه با زمان برای سه عدد استفان ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ (تفاوت دما در ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی گراد) به ترتیب در شکل ۳ نشان داده شده است. عدد استفان شرایط کارکرد

۳-۱۱- ویسکوزیته

$$\mu_{np} = \frac{\mu_p}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (12)$$

۳-۱۲- رسانایی گرمایی

$$K_{np} = k_0 + k_d$$

$$\frac{k_0}{k_p} = \frac{K_n + 2k_p - 2\phi(k_p - K_n)}{K_n + 2k_p - \phi(k_p - K_n)} \quad (13)$$

$$k_d = C'(\rho c_p)_{np} |\nu| \phi d_n$$

ثابت بالا تعیین شده به صورت تجربی پس از کار واکاوی و کواجی ارزیابی می شود [۲۱].

۳-۱۳- نرخ تولید آنتروپی حرارتی

$$S_h^m = \frac{k}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (14)$$

۳-۱۴- نرخ تولید آنتروپی اصطکاکی

$$S_f^m = \frac{\mu}{T^2} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

۳-۱۵- عدد بیجان

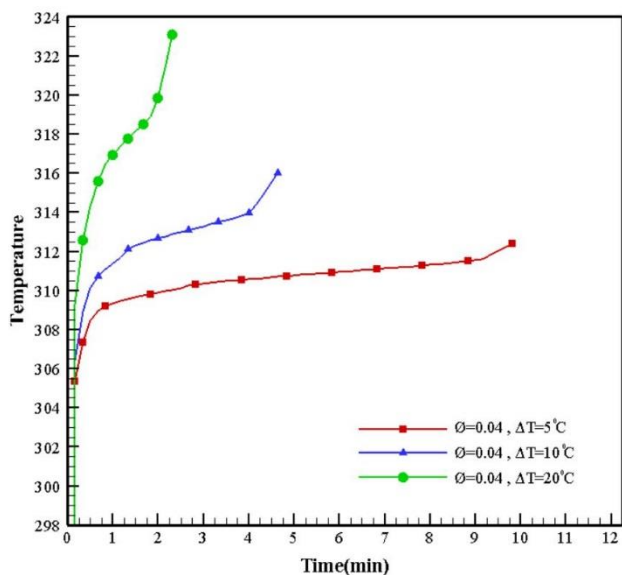
$$Be = \frac{S_h^*}{S_f^*} \quad (16)$$

۴- روش محاسباتی و اعتبارسنجی

۴-۱- روش محاسباتی

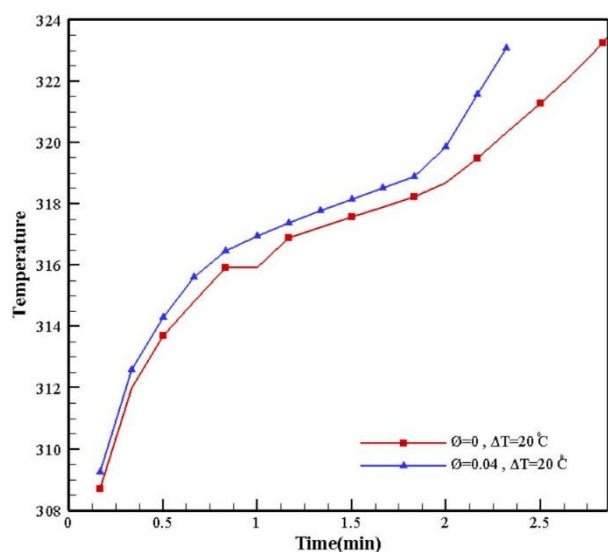
شبیه سازی عددی به کمک نرم افزار فلوئنت انجام شده است. در مسائل تغییر فاز، معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی مومنوم و انرژی می باشند. مدل آرام برای ویسکوزیته انتخاب شده است. برای اجزای سرعت، اصلاح

1 Stefan Number



شکل ۴: تغییر دما نسبت به زمان برای نانوذرات با کسر حجمی ثابت و دیوار در دمای مختلف.

Fig. 4. Variation of temperature versus time for constant volume fraction of nanoparticle and different wall temperature.

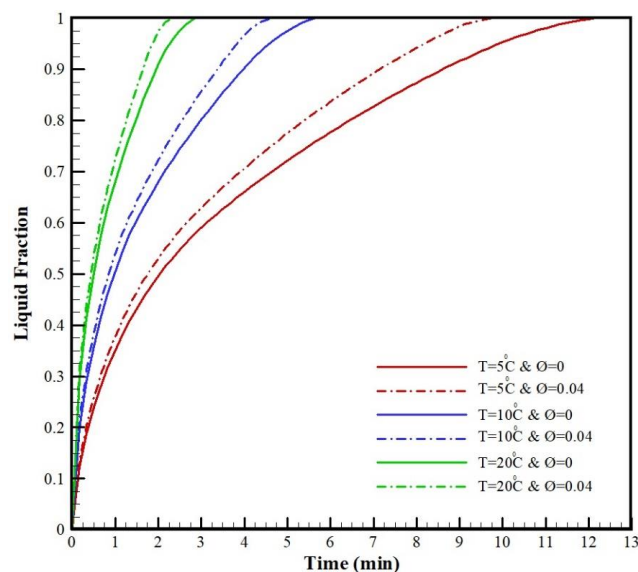


شکل ۵: تغییر دما نسبت به زمان برای نانوذرات با کسر حجمی متفاوت و دیوار با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد.

Fig. 5. Variation of temperature versus time for various volume fraction of nanoparticle and constant wall temperature at $\Delta T=20^\circ C$

نشان می‌دهد که دمای مواد تغییر فاز دهنده با افزایش دمای سطح، افزایش می‌یابد.

تغییرات محاسبه دما در مقایسه با زمان برای دما در ۲۰ سانتی‌گراد و کسر حجمی متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده این واقعیت است که با تغییرات کسر حجمی از ۰ به ۰/۰۴ دمای مواد تغییر



شکل ۳: تغییر کسر مایع نسبت به زمان برای کسر حجمی مختلف و دمای مختلف دیوار.

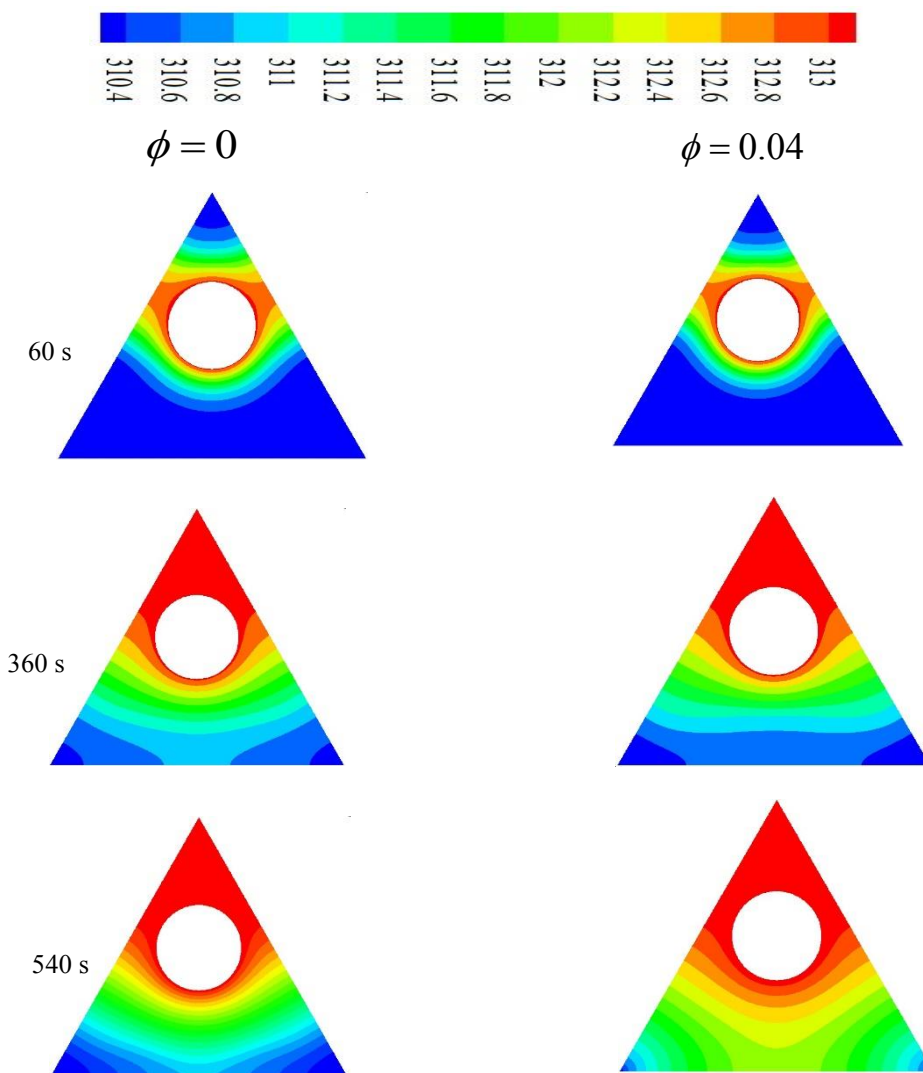
Fig. 3. Variation of liquid fraction versus time for the various volume fraction and different wall temperatures.

مثلت تحت ذوب را توصیف می‌کند. عدد استفان طبق رابطه (۱۷) محاسبه می‌گردد:

$$Ste = \frac{c_{pl}(T_s - T_m)}{L} \quad (17)$$

گرمای ویژه مایع، گرمای نهان و دمای ذوب مواد تغییر فاز دهنده و دمای سطح دیوار پارامترهای برای تعیین عدد استفان هستند. با استفاده از همان مواد تغییر فاز دهنده درون مثلث، یک دمای سطح بالاتر باعث افزایش عدد استفان بالاتر می‌شود. کسر مایع از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان جرم ذوب فعلی تقسیم بر جرم کل مواد تغییر فاز دهنده تعریف شده است. نتایج نشان‌دهنده این واقعیت است که زمان ذوب نانومواد تغییر فاز دهنده با افزایش کسر حجمی، کاهش می‌یابد. با تغییرات کسر حجمی از ۰ تا ۰/۰۴ به ترتیب برای تفاوت‌های دما ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ زمان ذوب ۳، ۱ و ۵/۰ دقیقه زود تر رخ می‌دهد. به علت افزایش هدایت حرارتی نانومواد تغییر فاز دهنده و کاهش گرمای نهان در مقایسه با مواد تغییر فاز دهنده معمولی است. شکل ۳ نشان‌دهنده این واقعیت است که با افزایش درصد حجمی نانو به مواد تغییر فاز دهنده زمان ذوب بصورت قابل توجهی کاهش می‌یابد.

تغییرات محاسبه دما در مقایسه با زمان برای سه عدد استفان (تفاوت دما در ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌گراد (در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج



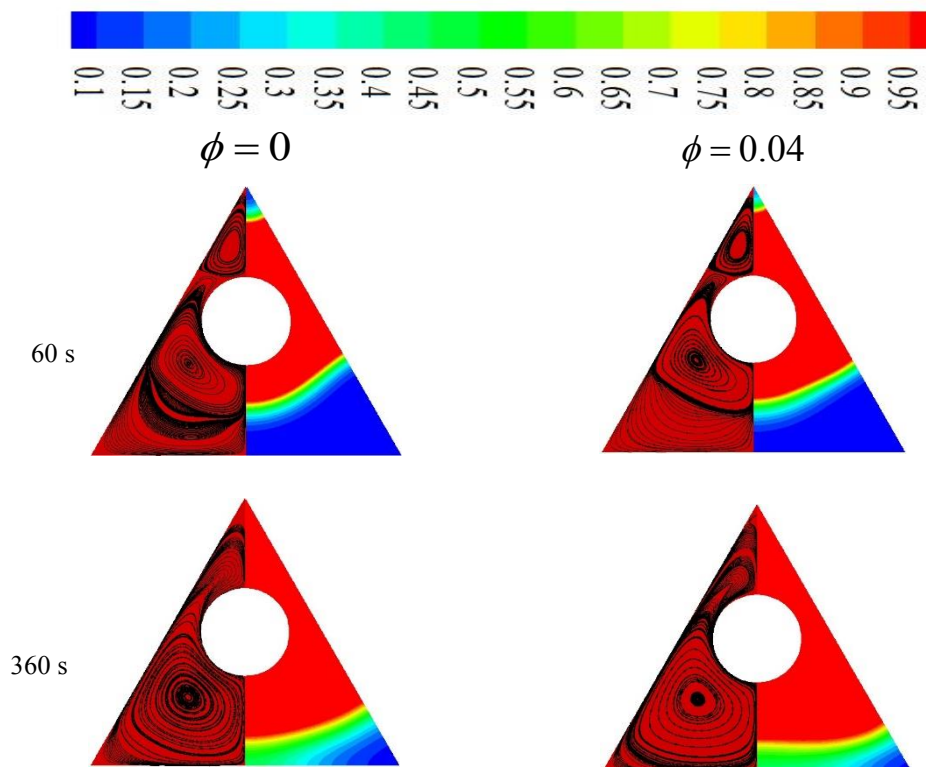
شکل ۶: محدوده دمایی جزئی برای کسر حجمی مختلف نانو ذرات در دمای ۵ درجه سانتیگراد.

Fig. 6. Detailed temperature contour for various volume fractions of nano-particle when $\Delta T=5^{\circ}C$

ناحیه به علت افزایش هدایت حرارتی نانو مواد تغییر فاز دهنده (به ویژه ناحیه خمیری) با افزایش میزان حجم نانو ذرات گسترش می یابد. شکل ۷ خطوطی از کسر مایع در داخل فضای مثلثی را در مراحل مختلف فرایند ذوب نشان می دهد. رنگ آبی و قرمز به ترتیب مواد تغییر فاز دهنده های جامد و مایع (ذوب شده) را نشان می دهد. در ابتدای فرایند دیده می شود که انتقال گرما از دیواره داغ به مواد تغییر فاز دهنده جامد موجب ذوب شدن یک لایه نازک مواد تغییر فاز دهنده می شود. هدایت گرما عامل اصلی انتقال حرارت است. در این رابطه، جبهه ذوب در اطراف دیوار داغ متقارن است. با گذشت زمان، سطح ذوب مواد تغییر فاز دهنده در اطراف سیلندر داغ ضخیم تر می شود، به ویژه بالای محفظه داغ. نتایج نشان می دهد

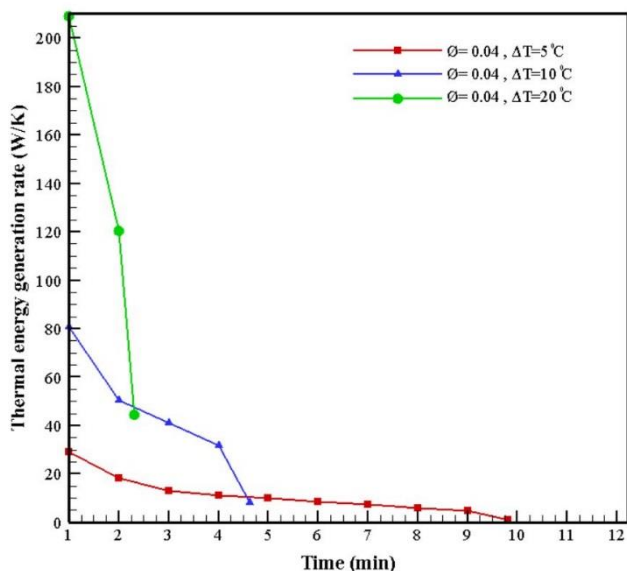
فاز دهنده با کسر حجمی ۰/۰۴ در یک زمان ثابت بیشتر است. همچنین در زمان ذوب کامل دما مواد تغییر فاز دهنده با کسر حجمی ۰ نسبت به ۰/۰۴ دمای بیشتری دارد.

کانتور دما مواد تغییر فاز دهنده برای اختلاف دمای ۵ درجه سانتیگراد و کسر حجمی مختلف نانو ذرات در شکل ۶ نشان داده شده است. مواد تغییر فاز دهنده جامد/مایع است که در آن درجه حرارت کمتر/بیشتر از ۳۰۸/۱۵ و ۳۱۰/۱۵ کلوین است. همچنین ناحیه های خمیری است که در آن دمای بین ۳۰۸/۱۵ و ۳۱۰/۱۵ کلوین است. شکل نشان می دهد که بیشتر مناطق بین نانو مواد تغییر فاز دهنده و دیوار داخلی مثلث (به جز لایه بسیار نازک در نزدیکی دیوار داغ) در ناحیه خمیری قرار دارند. می توان مشاهده کرد که این



شکل ۷: محدوده کسر مایع جزئی و زمینه خطوط سرعت برای کسر حجمی مختلف نانوذرات در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد.

Fig. 7. Detailed liquid fraction and velocity fields contour for various volume fraction of nano-particle when $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$



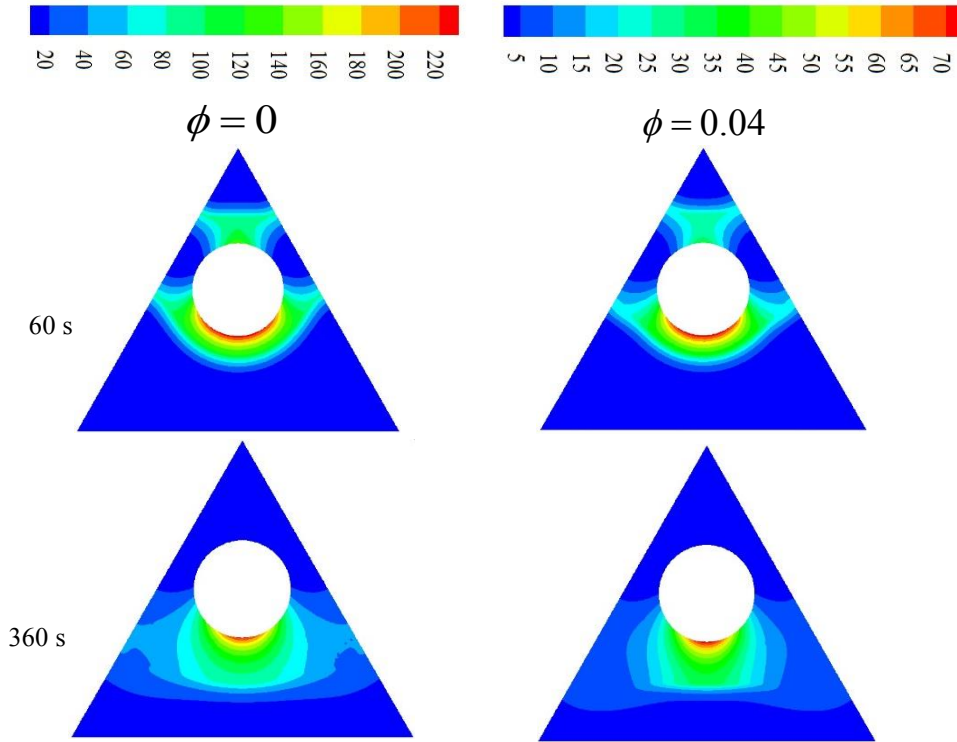
شکل ۸: تغییر نرخ تولید آنتروپی حرارتی نسبت به زمان برای نانوذرات با کسر حجمی متفاوت و دیوار در دمای مختلف.

Fig. 8. Variation of the thermal energy generation rate versus time for various volume fraction of nanoparticle and different wall temperatures.

که میزان ذوب در بخش بالا بسیار بیشتر از بخش پایین است. می‌توان از شکل، که خطوط ساده و درجه حرارت را نشان می‌دهد، به این نتیجه رسید، که با گذر زمان پایین محفظه داغ، اثر جابه‌جایی طبیعی قابل مشاهده می‌شود و ذوب به علت تاثیرات بویانسی به سمت پایین محفظه حرکت می‌کند.

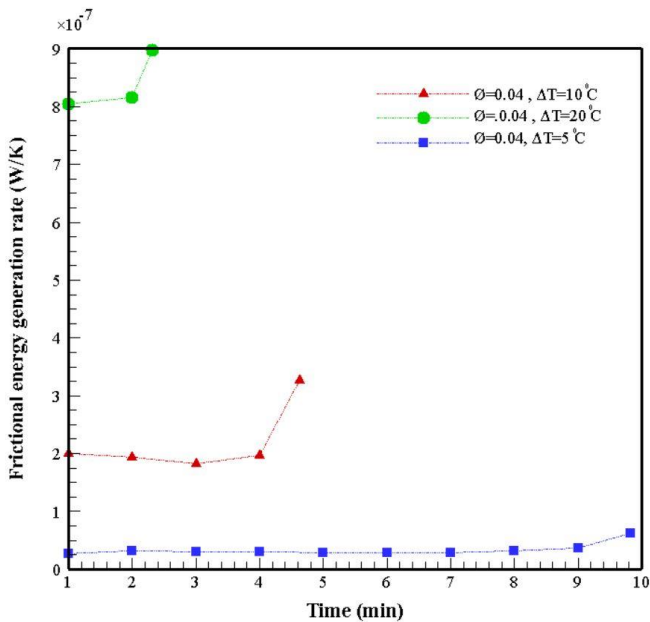
در شکل ۸ مقایسه‌ای به منظور بررسی نرخ تولید آنتروپی حرارتی با زمان برای سه عدد استفان (تفاوت دما در ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌گراد) را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد استفان نرخ تولید آنتروپی حرارتی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در یک کسر حجمی و عدد استفان ثابت با گذشت زمان نرخ تولید آنتروپی حرارتی کاهش می‌یابد.

در جدول ۲ مقایسه‌ای به منظور بررسی نرخ تولید آنتروپی حرارتی با زمان برای یک عدد استفان (تفاوت دما در ۵ سانتی‌گراد) را نشان می‌دهد. نرخ تولید آنتروپی حرارتی ابتدا افزایش می‌یابد و سپس با گذشت زمان، کاهش می‌یابد. نرخ تولید آنتروپی حرارتی با تغییر کسر حجمی از ۰ تا ۰/۰۴ در یک زمان ثابت بیشتر می‌شود.



شکل ۹: محدوده نرخ تولید آنتروپی حرارتی سرعت برای کسر حجمی مختلف نانوذرات در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد.

Fig. 9. Detailed thermal energy generation rate contour for various volume fraction of nano-particle when $\Delta T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$



شکل ۱۰: تغییر نرخ تولید آنتروپی اصطکاکی نسبت به زمان برای نانوذرات با کسر حجمی متفاوت و دیوار در دمای مختلف

Fig. 10. Variation of the frictional energy generation rate versus time for various volume fraction of nanoparticle and different wall temperatures.

Table 2. Thermal energy generation rate of the storing system.

جدول ۲: میزان نرخ تولید آنتروپی حرارتی سیستم ذخیره‌سازی انرژی

$\phi=0$	$\phi=0.04$	زمان (دقیقه)
۲۸/۳۷	۲۸/۹۸	۱
۱۷/۲۶	۱۸/۲۲	۲
۱۲/۸۲	۱۳/۰۶	۳
۱۰/۵۵	۱۱/۳۲	۴

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی عددی رفتار ذوب مواد تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای دوبعدی پرداخته شده است. شبیه‌سازی گذار در داخل یک محفظه با لوله داخلی دایره‌ای و خارجی مثلثی انجام شده است. اعتبارسنجی آن با کار خدادادی و حسین‌زاده [۱۱] انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده افزایش میزان ذوب نانومواد تغییر فاز دهنده نسبت به مواد تغییر فاز دهنده معمولی به علت افزایش هدایت حرارتی و کاهش گرمای نهان است. این مطالعه شبیه‌سازی یک پتانسیل عالی برای استفاده از نانوذرات در مواد تغییر فاز دهنده را در برنامه ذخیره‌سازی انرژی گرمایی نشان می‌دهد. اکثریت آنتروپی در محیط ایجاد می‌شود، زیرا انرژی به محیط زیست منتقل می‌شود و هدر می‌رود. افزودن نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده، هدایت گرمایی موثر مواد تغییر فاز دهنده را افزایش داد. با این حال، گرمایی ویژه و حرارت نهان مواد تغییر فاز دهنده کاهش می‌یابد. مزیت افزایش هدایت حرارتی مؤثر در کاهش تولید آنتروپی سیستم، بسیار بیشتر از کاهش گرمایی ویژه و حرارت نهان نانومواد تغییر فاز دهنده است. اگر یک سیستم ذخیره‌سازی حرارتی در مقدار خاصی از انرژی صرفه‌جویی در نظر گرفته شود، کاهش انرژی ذخیره شده می‌تواند با استفاده از نانومواد تغییر فاز دهنده بیشتر ساخته شود. عملکرد واحد ذخیره‌سازی حرارتی با افزایش غلظت نانوذرات در نانو مواد تغییر فاز دهنده بهبود می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد افزایش عدد استفان تاثیر بسیار بیشتری بر روی کاهش زمان ذوب دارد. افزایش عدد استفان باعث افزایش اختلاف دمایی بین سیال ورودی و ماده تغییر فاز دهنده شده که این امر منجر به افزایش پتانسیل سیال گرم برای ذوب می‌گردد. بنابراین افزایش عدد استفان از ۰/۰۵ به ۰/۱ و از ۰/۰۵ به ۰/۲ باعث کاهش زمان ذوب تا ۵۳ و ۷۶ درصد می‌گردد. همچنین افزایش نانوذره با کسر حجمی ۰/۰۴ به مواد تغییر فاز دهنده در سه استفان باعث کاهش زمان ذوب تا ۲۰ درصد می‌گردد.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

ناحیه خمیری ثابت، $\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$	$Amush$
عدد استفان	Ste
عدد بیجان	Be
ثابت	C'
ظرفیت گرمایی، Jkg^{-1}	C_p
قطر، mm	d
قطر نانو ذره، mm	d_n
ثابت گرانشی، ms^{-2}	g
آنتالپی کل، Jkg^{-1}	H
آنتالپی محسوس، J/kg	h
ضریب هدایت حرارتی، $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	K
گرما نهان، J/kg	L
عدد پراوتل	Pr
عدد رایلی	Ra
ترم چشمه	S
نرخ تولید آنتروپی اصطکاکی، WK^{-1}	S_f
نرخ تولید آنتروپی حرارتی، WK^{-1}	S_h
دما، K	T
دما سطح، K	T_s
سرعت سیال، ms^{-1}	v

علائم یونانی

ضریب انبساط گرمایی، K^{-1}	β
کسر حجمی	\emptyset
لزجت دینامیکی، $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$	μ
کسر مایع	λ
چگالی، kgm^{-3}	ρ
ویسکوزیته سیال Nsm^{-2}	μ

زیرنویس

فاز مایع	l
نانوذره	n
نانومواد تغییر فاز دهنده	np
مواد تغییر فاز دهنده	p
فاز جامد	s

- [9] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, 23(3) (2003) 251-283.
- [10] J.M. Khodadadi, Y. Zhang, Effects of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(8) (2001) 1605-1618.
- [11] J.M. Khodadadi, S.F. Hosseinizadeh, Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34(5) (2007) 534-543.
- [12] M. Abolghasemi, A. Keshavarz, M.A. Mehrabian, Thermodynamic analysis of a thermal storage unit under the influence of nano-particles added to the phase change material and/or the working fluid, *Heat and Mass Transfer*, 48(11) (2012) 1961-1970.
- [13] A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management, *Applied Thermal Engineering*, 28(5) (2008) 556-565.
- [14] S. Wu, D. Zhu, X. Li, H. Li, J. Lei, Thermal energy storage behavior of Al₂O₃-H₂O nanofluids, *Thermochimica Acta*, 483(1) (2009) 73-77.
- [15] E. Ebrahimi, Experimental investigation of cooling performance enhancement of a photovoltaic module using a phase change material (PCM)-CuO nanoparticles, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52 (2) (2018) 1-10 (In Persian).
- [16] Y.B. Tao, Y.L. He, Numerical study on thermal energy storage performance of phase change material under
- [1] M.A. Cuevas-Diarte, T. Calvet-Pallas, J.L. Tamarit, H.A.J. Oonk, D. Mondieig, Y. Haget, Nuevos materiales termoajustables, *Mundo Cientifico* (2000) June.
- [2] D. Pal, Y. Joshi, Application of phase change materials for passive thermal control of plastic quad flat packages: a computational study, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 30(1) (1996) 19-34.
- [3] L.F. Cabeza, J. Roca, M. Nogues, B. Zalba, J.M. Marin, Transportation and Conservation of Temperature Sensitive Materials with Phase Change Materials, State of the art. In *Proceedings of the IEA ECES IA Annex 17 2nd Workshop*, Ljubljana, Slovenia, (2002) 3-5 April.
- [4] M. Koschenz, B. Lehmann, Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings, *Energy and Buildings*, 36(6) (2004) 567-578.
- [5] L.L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A. Mishkinis, P.V. Bohan, Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine, *Applied Thermal Engineering*, 20(10) (2000) 913-923.
- [6] M. Telkes, E. Raymond, Storing solar heat in chemicals, A Report on the Dover House. *Heat Vent*, 46 (1949) 79-86.
- [7] H.G. Barkmann, F. Wessling, Use of buildings structural components for thermal storage, *Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings*, Charlottesville (Virginia, USA), 1975.
- [8] M. Sokolov, Y. Keizman, Performance indicators for solar pipes with phase change storage, *Solar Energy*, 47(5) (1991) 339-346.

- (2019)131-140 (In Persian).
- [20] A.D. Brent, V.R. Voller, K.J. Reid, Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal, *Numerical Heat Transfer*, 13(3) (1988) 297-318.
- [21] V.R. Voller, C. Prakash, A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(8) (1987) 1709-1719.
- [22] F.L. Tan, S.F. Hosseinizadeh, J.M. Khodadadi, L. Fan, Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(15) (2009) 3464-3472.
- non-steady-state inlet boundary, *Applied Energy*, 88(11) (2011) 4172-4179.
- [17] M.Y. Yazici, M. Avcı, O. Aydın, M. Akgun, On the effect of eccentricity of a horizontal tube-in-shell storage unit on solidification of a PCM, *Applied Thermal Engineering*, 64(1) (2014) 1-9.
- [18] M.R Assari, Reza Nasiri, A. Alipoor, Experimental study of charge of paraffin wax along with nanoparticles in an eccentric double tube heat exchanger for storage energy in a solar water heater. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(6) (2019) 1403-1410 (In Persian).
- [19] M. Irani, F. Sarhaddi, A. Behzadmehr, Thermal Analysis of a Solar Wall Equipped to Nano Phase Change Material. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 51(4),

