

بررسی عددی اثر افزایش تعداد و چیدمان لوله داخلی درون مبادله‌کن گرمایی سه لوله‌ای بر رفتار انجماد مواد تغییر فاز دهنده با نانو ذرات Al_2O_3

ابوالفضل نعمت پور کشتلی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران،
a.nematpour5885@gmail.com

محسن شیخ الاسلامی*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، m_sh_3750@yahoo.com

چکیده

در این مقاله به بررسی عددی رفتار انجماد مواد تغییر فاز دهنده در یک مبادله‌کن گرمایی سه لوله‌ای افقی دو بعدی پرداخته شده است. فضای بین پوسته و لوله‌ها با RT82 به عنوان مواد تغییر فاز دهنده پر شده است و آب به عنوان سیال گرم در لوله داخلی و خارجی جریان دارد. هدف از این مطالعه، تاثیر افزایش اندازه لوله داخلی در راستای عمودی و افقی با ثابت ماندن حجم مواد تغییر فاز دهنده به عنوان یک پارامتر هندسی و همچنین تاثیر دما به عنوان پارامتر جریانی می‌باشد. همچنین در این مطالعه به بررسی تاثیر نانو ذره روی فرآیند انجماد ماده تغییر فاز دهنده پرداخته شده است. نتایج نشان دهنده این واقعیت است با افزودن نانو ذره زمان انجماد کاهش یافته می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش لوله داخلی کاهش قابل توجهی در زمان انجماد قابل مشاهده است. برای چیدمان هندسی عمودی با دو و سه لوله داخلی نسبت به حالت چیدمان جریان با یک لوله داخلی زمان انجماد به ترتیب ۱۵٪ و ۳۰٪ کاهش یافته است. **واژه‌های کلیدی:** مواد تغییر فاز دهنده، مبادله‌کن گرمایی، انتقال گرما، انجماد، جابجایی طبیعی.

Numerical Investigation of the Effect of Increasing Number and Arrangement of Inner Tube in a Triplex Tube Heat Exchanger on Solidification Behavior of Phase Change Material using Al_2O_3 nanoparticles

A. Nematpour Keshteli

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

M. Sheikholeslami

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Abstract

In this paper a two dimensional numerical study of solidification of phase change material (PCM) in a triplex tube heat exchanger is studied. Water is used as heat transfer fluid (HTF) which flows through the inner and outer tubes while the shell side is filled with RT82 as the PCM. The purpose of this numerical study is to increase the internal tube size vertically and horizontally with the constant volume of phase change material as a geometric parameter and also the effect of temperature as a flow parameter. Also, in this study, the effect of nanoparticles on the solidification process of phase change material has been investigated. The results show that the solidification time has decreased with the addition of nanoparticles. Also, the results indicate that with an increase in the internal tube, a significant decrease in solidification time is observed. Vertical geometric arrangement with two and three internal tubes compared to the flow arrangement with an internal tube of solidification time has decreased by 15% and 30%, respectively.

Keywords: Phase change material, Heat exchanger, Heat transfer, Solidification, Natural convection.

مهم‌ترین نوع انرژی‌های نو می‌باشد، که در اکثر نقاط جهان در دسترس است. یکی از روش‌های نگهداری و ذخیره این نوع انرژی، استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌باشد. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، یکی از فناوری‌های مهم برای استفاده مجدد از انرژی می‌باشند. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به این صورت است که انرژی مازاد تولید شده در ساعات کم باری در سیستم ذخیره کننده انباشته شده و می‌تواند نیاز ساعات‌های کمبود انرژی را جبران کند. یکی از مهمترین روش‌ها ذخیره‌سازی، ذخیره سازی بصورت گرما است. این روش ذخیره‌سازی قابلیت ترکیب شدن با سیستم‌های رایج تولیدگرما و همچنین سیستم‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی را دارا می‌باشد. یکی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، ذخیره‌سازی بصورت نهان است. از مزایای استفاده از روش نهان می‌توان به گرمای نهان ذوب بالا، محدوده وسیع دمای تغییر فاز و تغییر دمایی اندک به هنگام ذوب و انجماد نام برد. از طرفی به دلیل بالا بودن مقدار گرمای نهان در مواد

۱- مقدمه

امروزه با افزایش جمعیت جوامع و با توجه به نیاز به انرژی در بخش‌های مختلف، استفاده از انرژی را با مشکل بزرگی روبرو ساخته است. همچنین مصرف بی رویه و روزافزون انرژی، نیاز به تولید هر چه بیشتر آن را ضروری می‌سازد. که این امر موجب مصرف سوخت‌های تجدید ناپذیر از جمله سوخت‌های فسیلی می‌شود و از طرفی استفاده بیش از حد از این نوع سوخت در اکو سیستم مشکل ایجاد می‌کند و به دنبال آن افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای و بروز مشکلات زیست محیطی می‌شود. تلاش جهت رسیدن به فناوری‌های جدید به منظور برطرف کردن نگرانی‌ها در مورد مشکلات زیست محیطی، کمبود انرژی و هزینه‌های بالای تولید آن به نگرانی‌های علمی تبدیل شده است. از این رو توجه دانشمندان به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر معطوف گردیده است. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشید از

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m_sh_3750@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۲۵

تغییر فاز دهنده، این روش امکان ذخیره‌سازی انرژی گرمایی را در حجم کم امکان پذیر می‌سازد. این خصوصیات اجازه می‌دهد که مواد تغییر فاز دهنده در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند ذخیره گرمایی انرژی خورشیدی [۲-۱]، مدیریت گرمایی دستگاه‌های الکترونیکی [۳-۱]، ذخیره گرمایی، در ساختمان‌ها [۴]، خنک کننده موتورها [۵] استفاده شود.

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 شد است. سوکولف و کیزمن [۸] کاربرد مواد تغییر فاز دهنده را در یک گردآورنده خورشیدی برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ ارائه کردند. یک بررسی موثر از ذخیره انرژی گرمایی به وسیله مواد تغییر فاز دهنده توسط زالبا و همکاران [۹] ارائه شد. آن‌ها انواع مواد تغییر فاز دهنده را بر اساس انتقال گرما، خصوصیات مواد و کاربردهای آن طبقه بندی کردند. مطالعات زیادی در خصوص مواد تغییر فاز دهنده در مبادله‌کن گرمایی ارائه شده است. یکی از محدودیت‌های استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی نهان با مواد تغییر فاز دهنده، رسانایی گرمایی پایین آن می‌باشد. لذا راهکارهای برای کاهش زمان فرآیند و افزایش انتقال گرما ارائه شده است. یکی از روش‌های افزایش انتقال گرما که در این پژوهش نیز لحاظ شده است، می‌توان به بهبود چیدمان لوله‌ها در مبادله‌کن گرمایی حاوی مواد تغییر فاز دهنده [۱۰] و بهبود عملکرد ذخیره‌سازی انرژی گرمایی از راه تغییر چیدمان و تغییر مسیر جریان‌های جابه‌جایی [۱۱] اشاره کرد. خدادادی و ژانگ [۱۲] در سال ۲۰۰۱ اثر رسانش را بر ذوب محدودی در یک کانال کروی عددی بررسی کردند. آن‌ها از فرمول بندی آنتالپی تک دامنه و قانون دارسی برای شبیه سازی پدیده تغییر فاز و تخلخل استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان ذوب در ناحیه بالای کره، به علت انتقال گرمای رسانش افزایش یافته است. آن‌ها همچنین تأثیر عدد پراکتل را بر الگوهای جریان و ذوب بررسی کردند. مدانو و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۹ به طور تجربی بررسی خصوصیات انتقال گرمای مختلف سیستم‌های ذخیره سازی مواد تغییر فاز دهنده کوچک در طی فرایندهای ذوب و انجماد به منظور استفاده بالقوه آنها در سیستم‌های کوچک اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان داد که مبادله‌کن گرمایی دو لوله با مواد تغییر فاز دهنده که در یک ماتریس گرافیت تعبیه شده، دارای بالاترین مقدار ضریب انتقال گرما بود. ساری و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۹ بصورت آزمایشگاهی در یک سیستم ذخیره سازی انرژی بصورت پوسته و لوله به بررسی فرآیند انجماد و ذوب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان دهنده این واقعیت است که در طی فرآیند ذوب آهنگ انتقال گرما به علت اثر جابه‌جایی طبیعی نسبت به فرآیند انجماد بیشتر است. در سال ۲۰۱۱ اثرات دمای ورودی آب و همچنین دبی جرمی بر عملکرد حرارتی و ذخیره حرارتی مواد تغییر فاز دهنده در مبادله‌کن پوسته و لوله، توسط تاو و هی [۱۵] تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد 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. یازیچی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۴ در یک کار تجربی به

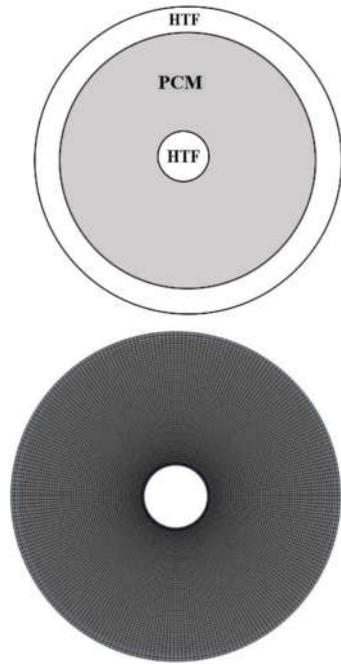
بررسی فرآیند انجماد پارافین در یک مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله‌ای با افزایش خروج از مرکزیت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با خارج شدن از مرکز لوله داخلی، یا به سمت بالا یا پایین از مرکز پوسته بیرونی، باعث بهبود انتقال گرما و این امر تأثیر قابل توجهی در کاهش زمان فرآیند خواهد داشت. همانطور که اشاره شده است یکی از راهکارهای افزایش آهنگ انتقال گرما در مبادله‌کن گرمایی افزایش تعداد لوله‌های انتقال گرما می‌باشد. اسماعیل و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۴ به بررسی عددی انجماد در یک سیلندر افقی حاوی مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش دمای سیال ورودی زمان انجماد مواد تغییر فاز دهنده بطور قابل توجهی کاهش یافته است بنابراین مواد تغییر فاز دهنده بیشتری منجمد شده است. آگینیم و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۰ به بررسی عددی، تأثیر چهار لوله سیال انتقال دهنده^۱ (HTF) درون یک مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده بر آهنگ انتقال گرما پرداختند. و همچنین چیدمان‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها می‌تواند از انتقال گرما در راستای محوری چشم پوشی کرد. کارگر و بنی اسدی [۱۸] به بررسی تحلیل عملکرد مبادله‌کن گرمایی فوق گرمایش در سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی نیروگاه خورشیدی بخار مستقیم با مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با افزایش تعداد ماژول‌های ماده تغییر فاز دهنده از یک تا سه عدد، میزان بازگشت ناپذیری کاهش می‌یابد و راندمان سیستم یک تا سه درصد افزایش می‌یابد. ضیاپور وهشترودی اصل [۱۹] به بررسی تأمین انرژی گرمایی سالیانه نوع جدیدی از گلخانه‌های خورشیدی با استفاده از بازتابنده و ذخیره‌ساز گرمایی حاوی مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از عایقی قوی در دیواره‌های گلخانه، انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز گرمایی، می‌تواند گرمای لازم برای گرمایش گلخانه را در تمامی فصول تأمین کند و نیاز به منبع گرمایی جانبی را منتفی سازد. عیسی پور و همکاران [۲۰] اثرات چیدمان لوله‌های داخلی بر روی فرآیند ذوب و انجماد مواد تغییر فاز دهنده درون مبادله‌کن‌های گرمایی چند لوله را مورد مطالعه قرار دادند. مهدی و همکاران [۲۱] به بررسی استفاده از نانو ذرات و پره برای بهبود فرآیند انجماد مواد تغییر فاز دهنده در مبادله‌کن گرمایی سه لوله‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات به تنهایی و یا ترکیبی از نانوذرات با پره‌ها به طور قابل توجهی فرآیند انجماد را بهبود می‌بخشد. در این پژوهش، به بررسی فرآیند انجماد، تأثیر افزایش لوله‌های داخلی، چیدمان لوله‌ها، تأثیر جابه‌جایی طبیعی، تأثیر دمای ورودی و همچنین افزودن نانو ذره در یک مبادله‌کن سه لوله‌ای حاوی مواد تغییر فاز دهنده، به منظور بهبود عملکرد ذخیره سازی انرژی پرداخته شده است.

۲- مدل فیزیکی و ترموفیزیکی مسئله

یک دید کلی از مدل‌های فیزیکی مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. شکلی از مقطع عرضی یک مبادله‌کن گرمایی سه لوله‌ای

¹ Heat Transfer Fluid

برای شرایط اولیه نیز، دمای اولیه ماده تغییر فاز دهنده، ۳۶۳/۱۵ کلوین و کسر مایع ۱ در نظر گرفته شده است (شکل ۲).



شکل ۲- شکل فیزیکی محفظه پر شده از مواد تغییر فاز دهنده و نمایی از شبکه

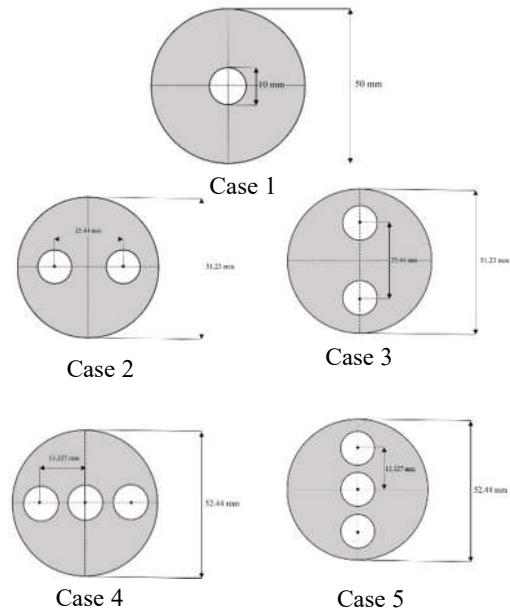
۴- مدل سازی و معادلات

۴-۱- مدل سازی

در این مقاله شبیه سازی عددی به کمک نرم افزار Fluent انجام شده است. شبکه و هندسه مورد نظر در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. مدل لایه‌ای برای لزجت و الگوریتم SIMPLE برای کوپل کردن سرعت و فشار استفاده انتخاب شده است. تلفات لزجی در سیال انتقال گرما ناچیز در نظر گرفته شده است. همچنین جریان سیال به صورت غیر قابل تراکم است. از مقاومت حرارتی پوسته داخلی صرف نظر می‌گردد. برای پارامترهای سرعت، اصلاح فشار، انرژی گرمایی و کسر مایع به ترتیب ۰/۴، ۰/۳، ۱ و ۰/۹ انتخاب شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنوم 10^{-3} و معادله انرژی 10^{-6} در نظر گرفته شده است. برای تاثیر جابه‌جایی طبیعی می‌توان برای محاسبه چگالی ماده، از مدل تقریب بوزینسک استفاده کرد که بتوان سریع‌تر همگرا بشود. در تقریب بوزینسک، چگالی را در همه معادلات ثابت در نظر می‌گیرد به جز نیروی شناوری در معادله مومنوم که در این حالت چگالی از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$\rho = \rho_0(1 - \beta \Delta T) \quad (1)$$

ی^۱ (TTHX) است و سیال انتقال دهنده (HTF) از لوله داخلی و خارجی می‌گذرد. همانطور که گفته شد در این پژوهش از ماده RT82 به عنوان مواد تغییر فاز دهنده و نانو ذره Al_2O_3 استفاده شده است. خواص ترموفیزیکی این ماده در جدول ۱ [۲۲] آمده است. با توجه به شکل ۱ لوله داخلی با ضخامت ۱/۲ میلی‌متر و لوله خارجی با ضخامت ۲ میلی‌متر برای همه مدل‌ها در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- سطح مقطع چیدمان‌ها

جدول ۱- خواص مواد تغییر فاز دهنده RT82 و نانو ذره Al_2O_3

Al_2O_3	مواد تغییر فاز دهنده	خاصیت
-	-۳۵۸/۱۵ (K) ۳۵۰/۱۵	دمای ذوب
-	۱۷۶ (Kj/kg)	گرمای نهان
۳۶۰۰ (Kg.m ⁻³)	۷۷۰-۹۵۰ (Kg.m ⁻³)	چگالی
۳۶ (W/m ^۱ . K ⁻¹)	۰/۲ (W/m ^۱ . K ⁻¹)	رسانایی گرمایی
-	۰/۰۰۱ (K ⁻¹)	ضریب انبساط حجمی
۷۶۵ (J.kg ⁻¹ .k ⁻¹)	۲۰۰۰ (J.kg ⁻¹ .k ⁻¹)	ظرفیت گرمایی ویژه
-	(kgm ⁻¹ s ⁻¹) ۰/۰۳۴۹۹	لزجت دینامیکی

۳- شرایط مرزی و شرایط اولیه

در این مطالعه از راستای طولی صرف نظر شده است و مسئله مورد نظر بصورت دو بعدی بررسی شده است. دمای سطح لوله‌های داخلی و خارجی سیال ثابت در نظر گرفته شده است. دمای دیواره‌ها حاوی سیال در طول محاسبات ۳۳۸/۱۵ درجه کلوین ثابت فرض شده است.

^۱ Triplex Tube Heat Exchanger

۲-۴- معادلات

به منظور مدل‌سازی فرآیند تغییر فاز از روش آنتالپی متخلخل استفاده می‌شود [۲۳]. در این روش کسر مایع ذوب در هر تکرار محاسبه می‌گردد. ناحیه خمیری ناحیه ای است که در آن تخلخل با ذوب ماده تغییر فاز دهنده از ۰ تا ۱ افزایش پیدا می‌کند. 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 است، کسر مایع عدد ۱ و زمانی که این مواد کاملا جامد است، کسر مایع ۰ است. در طول این زمان بازه کسر مایع بین ۰ و ۱ می‌باشد.

۲-۴-۱- پیوستگی

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

۲-۴-۲- مومنتوم

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{\rho} g \beta (T - T_{ref})) + \vec{S}_i \quad (3)$$

۲-۴-۳- انرژی

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho C_p} \nabla h \right) \quad (4)$$

آنتالپی کل مواد برابر است با مجموعاً آنتالپی محسوس (h) و حرارت نهان (ΔH) در معادله (۵) و (۶) به ترتیب آورده شده است:

۲-۴-۴- آنتالپی محسوس

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

$$H = h + \Delta H \quad (6)$$

مقدار گرمایی نهان (L)، طبق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد:

$$\Delta H = \beta L \quad (7)$$

که ΔH می‌تواند از صفر (جامد) تا یک (مایع) تغییر کند. به همین منظور، کسر حجمی به صورت رابطه (۸) تعریف می‌گردد [۲۴]:

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

$$\beta = \frac{\Delta H}{L} = 0 \quad \text{if } T > T_l$$

$$\beta = \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \quad \text{if } T_s < T < T_l \quad (8)$$

T_s و T_l به ترتیب نشان دهنده دمای ابتدایی و انتهایی محدوده ذوب ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد. همچنین در رابطه (۲)، β_i ترم چشمه است که به علت اثرات تغییر فاز در انتقال حرارت جابه جایی به رابطه مومنتوم اضافه می‌شود که در رابطه (۹) آورده شده است.

$$S_i = \frac{A_{mush} (1 - \beta)^2}{\beta^3 + 0.001} u_i \quad (9)$$

A_{mush} ثابت ناحیه خمیری است. ثابت ناحیه خمیری از 10^4 تا 10^7 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 10^5 در نظر گرفته شد.

فرضیاتی که در شبیه سازی برای نانو ذره مواد تغییر فاز دهنده لحاظ شده است عبارتند از:

۲-۴-۵- چگالی

چگالی نانوسیال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_{pcm} + \phi \rho_s \quad (10)$$

۲-۴-۶- ضریب انبساط حجمی

ضریب انبساط حجمی برای نانوسیال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$(\rho \beta)_{nf} = (1 - \phi) (\beta \rho)_{pcm} + \phi (\beta \rho)_s \quad (11)$$

۲-۴-۷- ظرفیت گرمایی ویژه

$$(c_p \beta)_{nf} = (1 - \phi) (c_p)_{pcm} + \phi (c_p)_s \quad (12)$$

۲-۴-۸- ویسکوزیته دینامیکی

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{pcm}}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (13)$$

۲-۴-۹- گرمای نهان

گرمای نهان برای نانوسیال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$(\rho L)_{nf} = (1 - \phi) (L \rho)_{pcm} \quad (14)$$

۲-۴-۱۰- رسانایی گرمایی

$$K_{eff} = k_{nf_0} + k_d$$

$$\frac{k_{nf_0}}{k_{pcm}} = \frac{K_s + 2k_{pcm} - 2\phi(k_{pcm} - K_s)}{K_s + 2k_{pcnm} - \phi(k_{pcm} - K_s)} \quad (15)$$

$$k_d = b(\rho c_p)_{np} \sqrt{u^2 + v^2} \phi d_p$$

ثابت بالا تعیین شده به صورت تجربی پس از کار واکاوی و کواچی ارزیابی می‌شود [۲۵].

۵- اعتبارسنجی و استقلال از شبکه

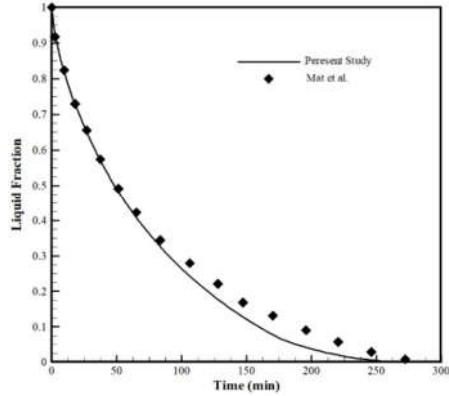
۵-۱- اعتبارسنجی

جهت اعتبار سنجی این پژوهش از مقاله مت و همکاران [۲۶] استفاده شده است. در مقاله مذکور یک مبادله‌کن گرمایی سه لوله‌ای مدل شده است. که سیال عامل از لوله داخلی و خارجی در جریان دارد و مواد تغییر فاز دهنده فضای بین دو سیال عامل را شامل شده است. نمودار شکل ۳ تغییرات کسر مایع نسبت به زمان در مقاله مذکور و مقادیر بدست آمده، در این پژوهش را نشان می‌دهد. تغییرات کسر مایع نسبت به زمان بدست آمده در این چیدمان جریان برای پژوهش انجام شده نسبت به مقاله مذکور از دقت خوبی برخوردار است. دلیل اختلاف این دو نمودار در ناحیه انتهایی می‌تواند انتخاب ثابت ناحیه آمیخته متفاوت در حل مسئله باشد. اما نتایج نشان دهنده این واقعیت است که رفتار کلی نمودار و زمان انجماد مواد تغییر فاز دهنده در نمودار مشابه است.

۶- نتایج

۶-۱- تاثیر چیدمان لوله‌ها بر زمان انجماد

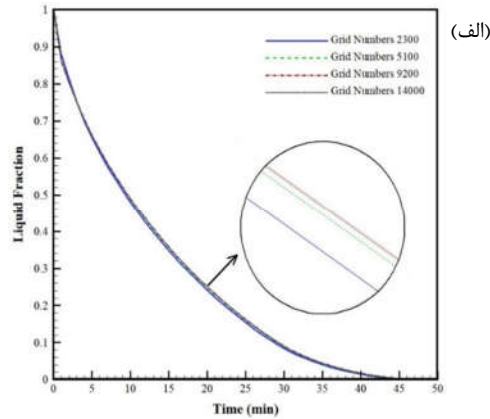
چیدمان ارائه شده یک مبادله‌کن سه لوله‌ای (TTHX) با یک، دو و سه لوله سیال انتقال دهنده (HTF) داخلی بصورت عمودی و افقی و یک لوله سیال انتقال دهنده (HTF) خارجی می‌باشد. از طرفی مرکز آن‌ها منطبق بر هم می‌باشد. در همه چیدمان‌ها، حجمی که در آن مواد تغییر فاز دهنده حضور دارد یکسان در نظر گرفته شده است. کانتور مربوط به کسر مایع و دما، جهت مقایسه رفتار جریان‌های ایجاد شده در زمان‌های مختلف به ترتیب در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. کانتورهای کسر مایع در شکل ۵ نشان دهنده این واقعیت است که سیال در اطراف سیال انتقال دهنده (HTF) داخلی و خارجی بطور یکنواخت در جهت‌های مختلف، منجمد می‌شود. در لحظات ابتدایی با گسترش ناحیه انجماد از دیواره‌ها، رسانش گرما مکانیزم غالب است. در طی فرآیند انجماد، جابه‌جایی طبیعی تنها در شروع فرآیند تاثیرگذار بوده و هر چه از زمان انجماد می‌گذرد، اثر جابه‌جایی طبیعی به سمت صفر میل می‌کند. در تمام چیدمان‌های جریان مشاهده می‌گردد که فرآیند انجماد در قسمت پایین، نسبت به نواحی بالا با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد. این حالت بخاطر ماهیت جابه‌جایی می‌باشد که باعث می‌شود فرآیند انجماد در قسمت پایین سریع تر رخ بدهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزایش لوله سیال انتقال دهنده (HTF) داخلی باعث بهبود قابل توجه در عملکرد فرآیند انجماد می‌شود. در چیدمان هندسه سه (آرایش شماره ۳) نسبت به چیدمان هندسه دو (آرایش شماره ۲) آهنگ انتقال گرما بهبود چشم‌گیری داشته است. از طرفی نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد قرار دادن لوله‌های انتقال دهنده (HTF) داخلی بصورت عمودی باعث تسریع در فرآیند انجماد می‌شود. در چیدمان هندسه پنج (آرایش شماره ۵) نسبت به چیدمان‌های دیگر نرخ انجماد مواد تغییر فاز دهنده بیشتر می‌باشد. همانطور که در کانتورهای توزیع کسر مایع مشخص است، در زمان $t=2100s$ در چیدمان هندسه پنج (آرایش شماره ۵) مواد تغییر فاز دهنده در محفظه کاملا منجمد شده است. نتایج نشان می‌دهد در تمامی زمان‌ها انتقال گرما در لوله‌های عمودی خیلی بیشتر از لوله‌های افقی است این امر بخاطر افزایش اثر جابه‌جایی طبیعی در لحظات اولیه فرآیند انجماد می‌باشد.



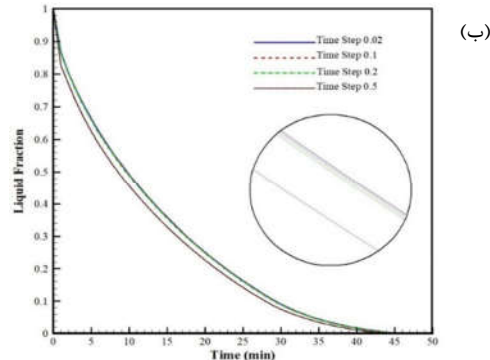
شکل ۳- تغییرات کسر مایع بر حسب زمان، محاسبه شده در مقاله مت و همکاران [۲۶] و این پژوهش

۵-۲- استقلال از شبکه

در این پژوهش مطالعات مربوط به استقلال از شبکه و استقلال از گام زمانی در شکل ۴ نشان داده شده است. جهت بررسی تاثیر تعداد مش و گام زمانی بر حل عددی سه شبکه مختلف با ۲۳۰۰، ۵۱۰۰، ۹۲۰۰ و ۱۴۰۰۰ سلول مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت ۹۲۰۰ مش به عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. همچنین گام زمانی برای شبیه سازی ۰/۱ ثانیه انتخاب شده است.

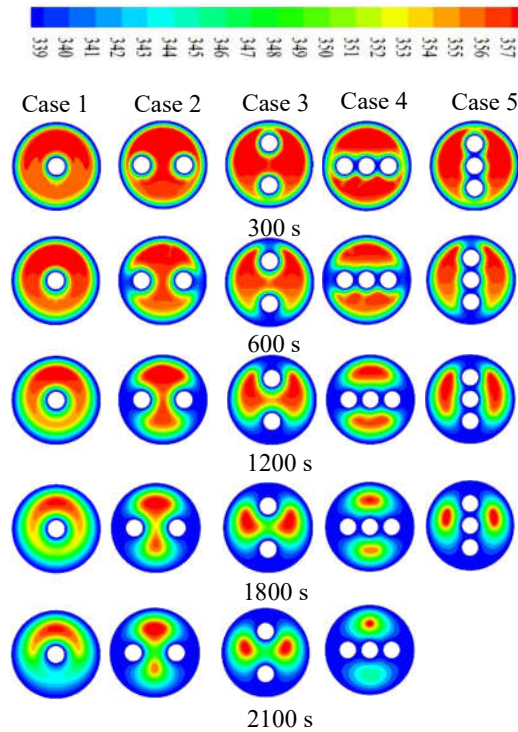


(الف)

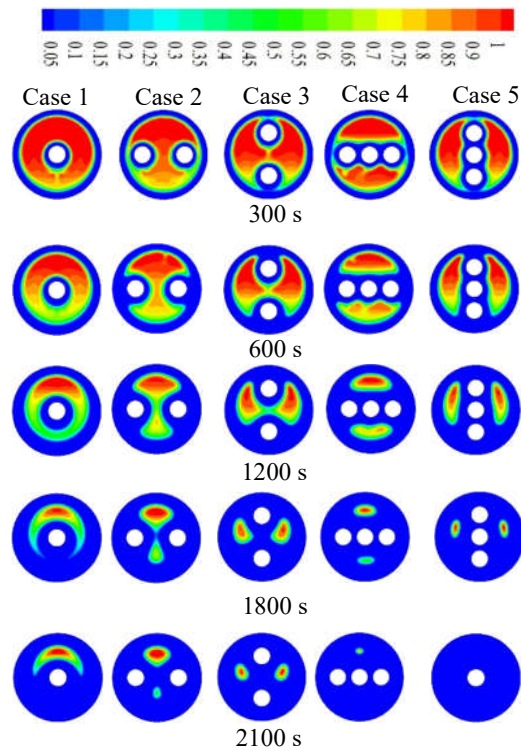


(ب)

شکل ۴- استقلال از شبکه (الف) استقلال حل از مش (ب) استقلال حل از گام زمانی



شکل ۶- کانتور دما در زمان‌های مختلف



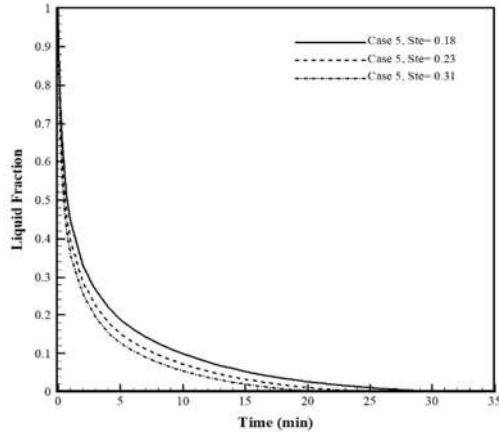
شکل ۵- کانتور کسر حجمی در زمان‌های مختلف

نمودار تغییرات توزیع کسر مایع برای چیدمان‌های جریان که به عنوان کمیتی برای آهنگ انتقال گرما فرآیند انجماد در نظر گرفته شده، در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نمودار می‌توان نتیجه گرفت به دلیل افزایش لوله سیال انتقال دهنده (HTF) در حجم ثابتی از مواد تغییر فاز دهنده، در چیدمان هندسی با دو و سه لوله سیال انتقال دهنده (HTF) داخلی بصورت عمودی و افقی شیب ناحیه خطی نمودار توزیع کسر حجمی نسبت به مبادله‌کن گرمایی با یک لوله سیال انتقال دهنده (HTF) داخلی بهبود یافته است. از طرفی پس از گذشت زمان از شروع فرآیند انجماد به دلیل وجود انتقال گرمای رسانش کند، شیب نمودار کم شده است و تغییرات کسر مایع بصورت خطی نمی‌باشد. نمودار نشان دهنده این واقعیت است که با قرار دادن دو و سه لوله سیال انتقال دهنده (HTF) (زمان انجماد بطور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است.

نتایج نشان می‌دهد با قرار دادن لوله داخلی از حالت افقی به حالت عمودی، آهنگ انتقال گرما افزایش یافته است، که این امر موجب انجماد سریع‌تر مواد تغییر فاز دهنده می‌شود. برای چیدمان هندسی عمودی با دو و سه لوله داخلی نسبت به حالت چیدمان جریان با یک لوله داخلی زمان انجماد به ترتیب ۱۵٪ و ۳۰٪ کاهش یافته است.

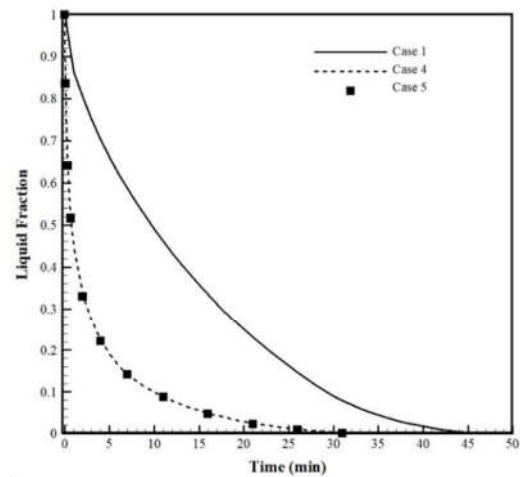
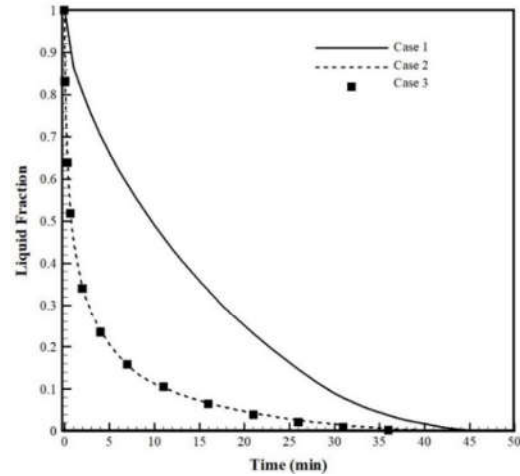
شکل ۶ نشان دهنده کانتور توزیع دما مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند انجماد از اطراف دیواره شروع شده و به داخل مواد تغییر فاز دهنده نفوذ می‌کند. در نتیجه به لایه نازک جامد در تماس با لوله‌ها و پوسته در اثر جابه‌جایی طبیعی به وجود می‌آید. نتایج نشان می‌دهد خطوط هم‌دمای انجماد تقریباً موازی با سطح انتقال گرما و لایه‌های انجماد قرار می‌گیرد.

متناسب با آن عدد استفان (Ste) افزایش می‌یابد. از طرفی این امر باعث بیشتر شدن آهنگ انتقال گرما می‌شود. با افزایش عدد استفان (Ste) که نشان دهنده اختلاف در دمای بین دمای ورودی سیال عامل و دمای میانگین انجماد مواد تغییر فاز دهنده، انتقال گرما به همان نسبت افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش عدد استفان (Ste) باعث اختلاف دمای سیال ورودی در لوله داخلی و خارجی و دمای متوسط مواد تغییر فاز دهنده می‌گردد. این امر باعث افزایش نرخ انجماد بیشتری می‌شود. بنابراین با افزایش عدد استفان (Ste) از ۰/۱۸ به ۰/۲۳ و ۰/۳۱ زمان انجماد به ترتیب ۱۹٪ و ۳۱٪ کاهش یافته است.



شکل ۸- کسر مایع در محفظه آرایش شماره ۵ برای اعداد استفان مختلف

شکل ۹ نشان دهنده کانتور کسر مایع برای چیدمان سه لوله‌ای داخلی (آرایش شماره ۵) بصورت عمودی در زمان‌های مختلف برای اعداد استفان (Ste) متفاوت می‌باشد. همانطور که از شکل مشخص است، در فرآیند انجماد رسانش گرما مکانیزم غالب می‌باشد. از طرفی در ابتدای فرآیند جابه‌جای طبیعی نیز تأثیر گذار بوده و با گذشت زمان تأثیر آن کم می‌شود. با مقایسه کانتورها در اعداد استفان (Ste) مختلف مشاهده می‌گردد که با افزایش عدد استفان (Ste) انجماد مواد تغییر فاز دهنده با نرخ بیشتری همراه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در زمان $t=1800s$ در عدد استفان (Ste) ۰/۲۳ و ۰/۳۱ فرآیند کامل شده است و مواد تغییر فاز دهنده بطور کامل انجماد شده است.



شکل ۷- کانتور کسر مایع در محفظه چیدمان شکل ۱ در مقایسه با آرایش‌های دیگر

۲-۶- تأثیر دمای سیال بر زمان انجماد

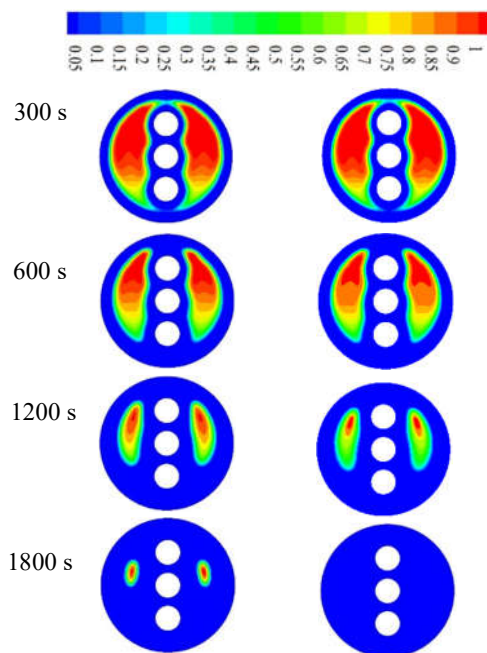
شکل ۸ نشان دهنده نمودار دما بر حسب تابعی از زمان برای سه دمای ورودی ۶۵، ۶۰، ۵۵ درجه سلسیوس مطابق با اعداد استفان^۱ (Ste) ۰/۱۸، ۰/۲۳ و ۰/۳۱ برای سه لوله سیال انتقال دهنده داخلی (آرایش شماره ۵) می‌باشد. عدد استفان (Ste) شرایط کارکرد مبادله‌کن گرمایی تحت انجماد را توصیف می‌کند. عدد استفان (Ste) طبق رابطه (۹) محاسبه می‌گردد:

$$Ste = \frac{c_p(T_m - T_{HTF})}{L} \quad (16)$$

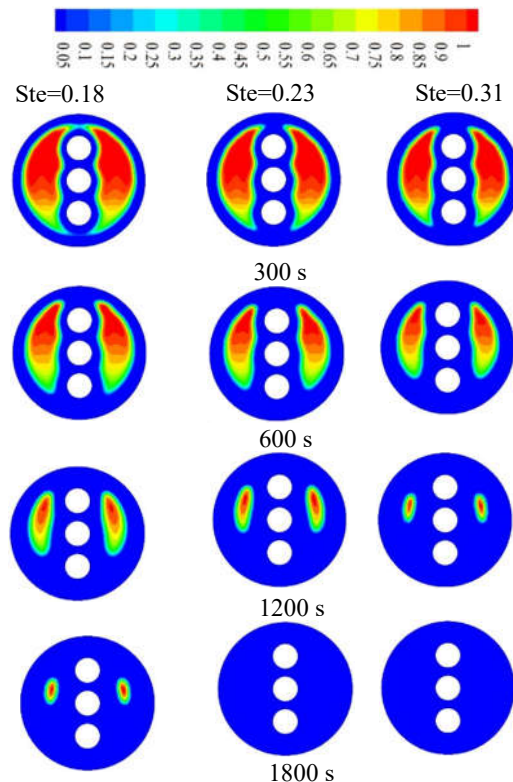
گرمای ویژه (C_p)، گرمای نهان و (L) دمای میانگین انجماد مواد تغییر فاز دهنده ($T_m = \frac{T_s + T_l}{2}$) و دمای سیال ورودی به لوله (T_{HTF})

پارامترهای برای تعیین عدد استفان (Ste) هستند. عدد استفان Ste نشان دهنده نسبت گرمای محسوس به گرمای نهان ذوب (انجماد) است. با افزایش اختلاف دمای بین سیال ورودی و دمای میانگین

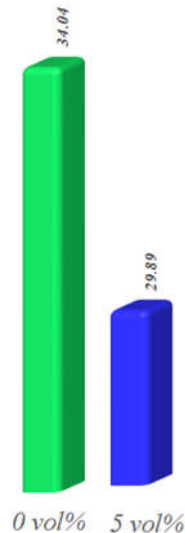
¹ Stefan Number



شکل ۱۰- کانئور کسر حجمی برای درصد وزنی مختلف در آرایش شماره ۵ برای اعداد استفان ۰/۱۸ در زمان‌های مختلف



شکل ۹- کسر مایع در محفظه آرایش شماره ۵ برای اعداد استفان مختلف در زمان‌های مختلف



شکل ۱۱- نمودار میله‌ای اثر افزودن نانو ذره بر مقدار زمان (دقیقه) در فرآیند انجماد

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی انجماد پارافین RT82 در یک مبادله‌کن سه لوله برای چیدمان هندسی، نانو ذره و دما سیال مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از این پژوهش شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. در طی فرآیند انجماد، جابه‌جایی طبیعی تنها در شروع فرآیند تاثیر گذار بوده و هر چه از زمان انجماد می‌گذرد اثر جابه‌جایی طبیعی کمتر می‌شود و مکانیزم غالب انرژی رسانش گرما می‌باشد.

کانئورهای لحظه‌ای کسر مایع در زمان‌های مختلف برای مبادله‌کن گرمایی سه لوله‌ای با افزودن نانو ذره و حالت بدون نانو ذره با درصد وزنی ۰ و ۵ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در ابتدای فرآیند، گردابه‌ها منطقه کوچکی از انجماد را در اطراف لوله‌های سیال انتقال دهنده تشکیل می‌دهند، بنابراین در ابتدا جابه‌جایی طبیعی مکانیزم غالب بوده است. با گذشت زمان و افزودن نانو ذرات به مواد تغییر فاز دهنده ناحیه گرم به سمت نیمه بالایی

محفظه حرکت کرده و گردابه گرمایی کوچکی را تشکیل می‌دهد. هرچه از زمان فرآیند می‌گذرد اثر رسانش گرما مکانیزم غالب می‌شود. همچنین نرخ انجماد در لحظات اولیه سریعتر بدست می‌آید. همانطور که قبلاً توضیح داده شد، سهم انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی در فرآیند انتقال گرمای بیشتر در طی لحظه‌های اول عملیات بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بهبود در پیشرفت انجماد قبل از جابه‌جایی طبیعی در تمام حالت‌های مورد مطالعه، قابل مشاهده است. نمودار زمان انجماد مواد تغییر فاز دهنده در راستای محوری مبادله‌کن گرمایی برای درصد وزنی‌های ۰ و ۵ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج مربوط به درصد وزنی مختلف نشان دهنده این واقعیت است که با افزایش درصد وزنی از ۰ به ۵ برای آرایش شماره ۵، زمان فرآیند انجماد حدوداً ۱۲ درصد کاهش یافته است.

- [3] Cabeza L.F., Roca J., Nogues M., Zalba B., Marin J.M., Transportation and Conservation of Temperature Sensitive Materials with Phase Change Materials, *State of the Art. IEA ECES IA Annex 17 2nd Workshop*, Ljubljana (Slovenia), 2002.
- [4] Koschenz M., Lehmann B., Development of a Thermally Activated Ceiling Panel with PCM for application in lightweight and Retrofitted Buildings, *Energy and buildings*, Vol. 36, p.p. 567-578, 2002.
- [5] Vasiliev L.L., Burak V.S., Kulakov A.G., Mishkinis D.A., Bohan P.V., Latent Heat Storage Modules for Preheating Internal Combustion Engines, Application to a Bus Petrol Engine, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, p.p. 913-923, 2000.
- [6] Telkes M., Raymond E., Storing Solar Heat in Chemicals-a Report on the Dover House, *Heat Vent*, Vol. 46, No. 11, p.p. 80-86, 1949.
- [7] Barkmann H.G., Wessling F.C., 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] Sokolov M., Keizman Y., Performance Indicators for Solar Pipes with Phase Change Storage, *Solar Energy*, Vol. 4, p.p. 339-346, 1991.
- [9] Zalba B., Marin 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, p.p. 251-283, 2003.
- [10] Agyenim F., Eames P., Smyth M., Heat Transfer Enhancement in Medium Temperature Thermal Energy Storage System Using a Multitube Heat Transfer Array, *Renewable Energy*, Vol. 35, p.p. 198-207, 2010.
- [11] Longeon M., Soupart A., Fourmigue J.F., Bruch A., Marty P., Experimental and Numerical Study of Annular PCM Storage in the Presence of Natural Convection, *Applied Energy*, Vol. 112, p.p.175-184, 2013.
- [12] Khodadadi J.M., Zhang Y., Effects of Buoyancy-Driven Convection on Melting within Spherical Containers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, p.p. 1605-1618, 2001.
- [13] Medrano M., Yilmaz M.O., Nogues M., Martorell L., Joan Roca, Cabeza Luisa F., Experimental Evaluation of Commercial Heat Exchangers for Use as PCM Thermal Storage Systems, *Applied Energy*, Vol.86, p.p. 2047-2055, 2009.
- [14] Sari A., Kaygusuz K., Thermal and heat transfer characteristics in latent heat storage system using lauric acid, *Energy Conversion and Management*. 43, P.P. 2493-2507, 2002.
- [15] Tao Y.B., He Y.L., Numerical Study on Thermal Energy Storage Performance of Phase Change Material Under Non- Steady-State Inlet Boundary, *Applied Energy* Vol. 8, P.P. 4172-4179, 2011.
- [16] Yusuf Yazici M., Avci M., Aydin O., Akgun M., On the Effect of Eccentricity of Horizontal Tube-in-Shell Storage nit on Solidification of PCM, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 64, p.p. 1-9, 2014.
- [17] Ismail K.A.R., Lino F.A.M., da Silva R.C.R., de Jesus A.B, Paixao L.C, experimentally validated two-dimensional numerical model for the solidification of PCM along a horizontal long tube, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 75, P.P. 184-193, 2014

[۱۸] کارگر م. و بنی اسدی الف. تحلیل عملکرد مبادله کن گرمایی فوق گرمایش در سیستم ذخیره سازی انرژی گرمایی نیروگاه خورشیدی بخار مستقیم. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۱، ص ۲۹۸-۳۰۶، ۱۳۹۷.

۲. افزایش تعداد لوله های انتقال گرمای داخلی باعث افزایش شیب نمودار کسر مایع در لحظات ابتدای فرآیند شده است. از طرفی در ناحیه که شیب نمودار کاهش می یابد بهبود عملکرد نسبت به ناحیه ابتدای کمتر شده است. این امر نشان دهنده این واقعیت است که ذخیره سازی انرژی در لحظات ابتدای فرآیند بخش قابل توجهی را به خود اختصاص داده است.

۳. نتایج نشان می دهد با قرار دادن لوله داخلی از حالت افقی به حالت عمودی، آهنگ انتقال گرما افزایش یافته است، که این امر موجب انجماد سریع تر مواد تغییر فاز دهنده می شود.

۴. افزایش عدد استفان (Ste) باعث اختلاف دمای سیال ورودی در لوله داخلی و خارجی و دمای متوسط مواد تغییر فاز دهنده می گردد. این امر باعث افزایش نرخ انجماد بیشتری می شود.

۵- نتایج مربوط به درصد وزنی مختلف نشان دهنده این واقعیت است که با افزایش درصد وزنی از ۰ به ۵، زمان فرآیند انجماد بطور قابل توجهی کاهش یافته است.

۸- نمادها

علائم انگلیسی

A_{mush}	ناحیه خمیری ثابت ($Kgm^{-3}s^{-1}$)
Ste	عدد استفان
C_p	گرمایی ویژه $\frac{J}{kg.c}$
g	ثابت گرانشی (ms^{-2})
H	آنتالپی کل (Jkg^{-1})
h	آنتالپی محسوس، (J/kg)
K	رسانایی گرمایی، ($Wm^{-1}K^{-1}$)
L	گرمای نهان (J/kg)
S	جمله چشمه
T	دما (K)
T_s	دما سطح (K)
v	سرعت سیال (ms^{-1})

علائم یونانی

β	ضریب انبساط گرمایی (k^{-1})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
λ	کسر مایع
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت سیال (Nsm^{-2})

زیر نویس

l	فاز مایع
s	فاز جامد

۹- مراجع

- [1] Cuevas-Diarte M.A., Calvet-Pallas T., Tamarit J.L., Oonk H.A.J., Mondieig D., Haget Y., *Nuevos materiales termo adjustable*, Mundo Cientifico, 2000.
- [2] Pal D., Joshi Y., Application of Phase Change Materials for Passive Thermal Control of Plastic Quad Flat Packages, a computational study, *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, Vol. 30, p.p. 19-34, 1996.

[۱۹] میرزایی ضیاپور ب. و هشترودی اصل الف.، تأمین انرژی گرمایشی سالیانه نوع جدیدی از گلخانه‌های خورشیدی با استفاده از بازتابنده‌های NIR و ذخیره‌ساز حرارتی حاوی PCM. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۶، ش. ۳، ص ۲۳۱-۲۳۶، ۱۳۹۵.

- [20] Esapour M., Hamzehzhad A., Rabienataj Darzi A. A., Jourabian M., Melting and solidification of PCM embedded in porous metal foam in horizontal multi-tube heat storage system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 171, P.P. 398-410, (2018)
- [21] Mahdi J.M., Nsofora E.C., Solidification enhancement of PCM in a triplex-tube thermal energy storage system with nanoparticles and fins, *Applied Energy*, Vol. 211, P.P. 975-986, (2018).
- [22] Rubitherm Technologies GmbH
- [23] Brent A.D., Voller V.R., Reid K.J., Enthalpy-porosity Technique for Modeling convection diffusion phase change: application to the melting of pure metal, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 13, P.P. 297-318, 1988.
- [24] Voller V.R. and Prakash C., Fixed Grid Numerical Modeling Methodology for Convection-Diffusion Mush Region Phase Change Problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 4, P.P. 1709-1719. 1987.
- [25] N. Wakao, S. Kaguei, "Heat and mass transfer in packed beds", New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1982, p.p. 175-205.
- [26] Mat S., Al-Abidi A. A., Sopian K., Sulaiman M. Y., Mohammad A. Th., Enhance Heat Transfer for PCM Melting in Triplex Tube with Internal-External Fin, *Energy Conversion and Management*, Vol. 74, p.p. 223-236, 2013