

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(9) (2020) 619-622 DOI: 10.22060/mej.2019.14767.5934



Numerical Investigation of Melting Nano-Enhanced Phase Change Materials in **Triangular Enclosure**

A. Nematpour Keshteli, M. Sheikholeslami*

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

ABSTRACT: This paper presents a numerical study of the melting of nano-enhanced phase change materials inside a triangular container using N-eicosane and copper particles as base material and nanoparticle, respectively. Nanoparticles are used in the process of heat transfer and improve lubrication performance. To investigate the effect of nanoparticles on the heat transfer rate, various particles of copper nanoparticles have been added to the base phase change materials. The increase in the performance of the heat transfer of nanoparticles in the solid state was more than the liquid state in the laminar flow and the natural convection heat transfer. Also, the effect of entropy has been investigated. The simulation results show that the nanoparticles cause an increase in the thermal conductivity of nano-enhanced phase change materials compared to conventional phase change material. Increasing thermal conductivity by reducing the latent heat, increases the rate of melting of nanoparticles. The time of the melting of the phase change material has significantly decreased with increasing nanoparticles. Increasing the thermal conductivity effective in reducing the entropy production of the system is much more than the reduction of the specific heat and the heat of fusion of nano-enhanced phase change materials.

Review History:

Received: 31 Jul. 2018 Revised: 11 Jan. 2019 Accepted: 4 Feb. 2019 Available Online: 23 Feb. 2019

Keywords:

Nano-enhanced Material Phase Change Material Nanoparticles Entropy Melting Natural convection

1-Introduction

(cc)

As global populations increase, the use of fossil fuels increases rapidly. Some energy storage devices are needed for efficient use of energy resources. In this regard, solar energy, which is an alternate energy source, should also be stored for reuse. Among the various thermal energy storage techniques, the latent thermal energy system has been studied using the appropriate phase change material over the past three decades. Phase Change Materials (PCM) are very much considered due to a large amount of energy absorbed as a discontinuous heat at constant phase transition temperatures. These materials can be used for passive heat storage. The main weakness of the phase change material is their low thermal conductivity. Which prevents the high speed of charge and discharge of thermal flux. This feature allows phase change materials to be used in many industrial applications such as solar thermal storage [1-2] thermal management of electronic devices [3], thermal storage in buildings [4]. Subsequently, the first study of phase change materials was presented by Barakman and Westin [5] for use in buildings.

2- Numerical Procedure and Boundary Conditions

Fig. 1 shows the physical configuration of the double-tube heat exchanger, which has an inner tube with diameter (di) of 1.7 mm, and an externally balanced triangular tube with a height of 19.5 mm and a 6 mm base. an annulus space is filled with Nanoparticle-Enhanced Phase Change Material (NEPCM) and PCM in solid phase. Also, water is used as the Heat Transfer

*Corresponding author's email: mohsen.sheikholeslami@nit.ac.ir

Fluid (HTF) that flows through the inner tube and exchanges heat with NEPCM. The initial temperature below the solidus of the phase change material is considered to be 298.15. the temperature of container wall is maintained at 313.15, 318.15 and 328.15 K for temperature difference of 5°C, 10°C and 20°C, respectively. Adiabatic boundary conditions are considered in the outer tube walls. The condition of non-slip and non-permeability in the solid interface and internal and external pipe walls can be expressed. Adiabatic boundary conditions are considered in the outer tube walls.

3- Numerical Model and Mathematical Formulation

In order to simplify physical and mathematical equations, the following assumptions are considered. The porous enthalpy





Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article $(\mathbf{i} \otimes \mathbf{i})$ is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode. 619



Fig. 2. Variation of liquid fraction versus time for various volume fractions and different wall temperatures

Table 1. Thermal energy generation rate of the storing system

Time (min)	Ø=0.04	Ø=0
1	28.98	28.37
2	18.22	17.26
3	13.06	12.82
4	11.32	10.55

method is used to model the phase change process [6]: Continuity:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{1}$$

Momentum:

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

Energy:

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

The density of the nanofluid is given by:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_p + \phi\rho_n \tag{4}$$

Thermal energy generation rate is given by:

$$S_{h}^{m} = \frac{k}{T^{2}} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^{2} \right]$$
(5)

Frictional energy generation rate is given by:



Fig. 3. Variation of temperature versus time for the various volume fraction of nanoparticle and constant wall temperature at ΔT =20°C.



Fig. 4. Variation of frictional energy generation rate versus time for various volume fraction of nanoparticle and different wall

temperatures

$$S_{f}^{\prime\prime\prime} = \frac{\mu}{T^{2}} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_{x}}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial v_{x}}{\partial y} \right)^{2} \right] + \left(\frac{\partial v_{x}}{\partial y} + \frac{\partial v_{y}}{\partial x} \right)^{2} \right\}$$
(6)

4- Results and Discussion

The liquid fraction in the melting process at various times for different volume fractions and for three Stefan units are 0.05, 0.1 and 0.2 for different temperature (Δ T) of 5°C, 10°C and 20°C, respectively, is shown in Fig. 2 Stefan (Ste) number describes the operating conditions of the melting converter.

The temperature changes calculation compared to time for temperature at 20°C and 0.04 wt% are shown in Fig. 3 The results show that with a volume fractional change from 0 to 0.04 wt%, the temperature of the phase change material with

a 0.04 wt% at a constant time is greater. Also, at full melting time, the temperature of the phase transition material with a volume fraction of 0 is higher than 0.04 wt%.

In Table 1, a comparison is made to determine the rate of thermal entropy generation with time for a Stephen number is 0.05, ΔT of 5°C The rate of entropy production increases first and then decreases with time. The heat entropy generation rate increases by changing the volume fraction from 0 to 0.04 wt% at a constant time.

Fig. 4 Comparison to determine the variation in the time of the melting of phase change material in terms of the frictional energy generation rate for 0.04 wt% volume fraction was investigated. The results show that higher friction entropy rates are higher in Stefan numbers. When the temperature difference is small, the frictional energy generation rate cannot be more than that.

5- Conclusions

Comparing the results for increasing the Stefan number, it is observed that increasing the number of Stefan has a much greater effect on reducing the melting time. Increasing the Stefan number increases the temperature difference between the inlet fluid and the phase change material, which increases the potential of hot fluid to melt. Therefore, increasing the Stefan number from 0.05 to 0.1 and from 0.05 to 0.2 decreases the melting time to 53% and 76% percent. Also, by increasing the volume fraction of nanoparticle up to 0.04 wt% to phase change materials in three Stefan decreases the melting time by up to 20%.

References

- M.A. Cuevas-Diarte, T. Calvet-Pallas, J.L. Tamarit, H.A.J. Oonk, D. Mondieig, Y. Haget, Nuevos materials 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] 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.
- [6] 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.

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۹، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۵۰۷ تا ۲۵۲۰ DOI: 10.22060/mej.2019.14767.5934

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

ابوالفضل نعمت پور كشتلى، محسن شيخ الاسلامى*

دانشكده مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي نوشيرواني بابل، بابل، ايران.

خلاصه: در این مقاله به بررسی عددی رفتار ذوب مواد تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی دو لولهای دوبعدی پرداخته شده است. فضای داخلی بین پوسته و لوله با استفاده ازان –ایکوسین و ذرات مس به ترتیب بهعنوان 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 ۲۰/۴ به مواد تغییر فاز دهنده در این سه دما باعث کاهش زمان ذوب تا ۲۵ و ۲۶ 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.

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

مواد را می توان برای ذخیره گرمایش منفعل ^۳ استفاده کرد. ضعف عمده مواد

تغیر فاز دهنده مربوط به هدایت حرارتی کم آنها است. که مانع از سرعت

بالای شارژ و تخلیه شار حرارتی می شود. 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 [۲–۱]، مدیریت

حرارتی دستگاههای الکترونیکی [۳–۱]، ذخیره حرارتی در ساختمانها [۴]،

خنک کننده موتورها [۵] امکان پذیر 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 ساختمان ها ارائه شده است. سوکولف وکیزمن [۸] کاربرد مواد

۱ – مقدمه

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 موثر 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 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

(Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کی کی ایسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کی کی ایسانس آفرینندگی مردمی (Bttps://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

¹ Latent Thermal Energy System

² Phase Change Material

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: mohsen.sheikholeslami@nit.ac.ir

³ Passive Heat Storage

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 همكاران [٩] 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 می باشد. خدادادی و ژانگ [۱۰] اثر هدایت را بر ذوب محدودی در یک کانال بصورت عددی بررسی کردند. آنها از فرمول بندی آنتالیی 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 أزاد 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 كاهش مىيابد. مزيت افزايش هدايت حرارتى مؤثر در كاهش توليد أنتروپى 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. نتايج آنها نشان ميدهد كه افزودن نانوذرات ألومينا " (اكسيد ألومينيوم) به طور قابل توجهی میزان درجه حرارت بیش از حد آب را کاهش میدهد، از

طرفی زمان انجماد اولیه را افزایش میدهد و زمان انجماد کل را کاهش مىدهد. أنها نشان دادند كه با افزودن نانوذرات ألومينا با كسر حجمي ۰/۲ درصد، زمان انجماد نانوسیال آلومینا-آب را می توان تا ۲۰/۵ درصد کاهش داد. ابراهیمی [۱۵] درسال ۲۰۱۷، اثر استفاده از مواد تغییر فازدهنده و نانوذرات اکسید مس به عنوان عامل خنک کننده بر عملکرد یک نمومه 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 سانتی گراد می شود. علاوه بر این دادهها نشان داده اند که افزودن نانوذرات اکسید مس ^۴ به مواد تغییر فاز دهنده خالص موجب افزایش بهرهوری خنک کننده و قدرت تولید شده می شود. 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 هي [١۶] تحليل شده است. نتايج آنها نشان داد كه 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 می یابد. یازیچی 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 جابهجابی طبیعی شده و این امر تاثیر قابل توجهی در کاهش زمان ذوب خواهد داشت. عصاری 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 ملاحظه ای بهبود بخشید. ایرانی و همکاران [۱۹] درسال 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 می شود. برای نانولوله های 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

¹ Nanoparticle-Enhanced Phase Change Material

² Al₂O₃-H₂O

³ Al_2O_3

گرفته شود، کاهش انرژی ذخیره شده می تواند 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 مبدلهاي حرارتي براي افزايش انتقال حرارت بين مواد تغيير فاز دهنده و سیال انتقال حرارت پیشنهاد شده است. در چنین دستگاههایی، در طول دوره ذخیرهسازی انرژی، مواد تغییر فاز دهنده به عنوان ذخیره کننده انرژی عمل میکند، در حالیکه سیال انتقال حرارت منبع انرژی حرارتی از خورشید است. در طول دوره بازیابی انرژی، روند متوقف می شود، مواد تغییر فاز پس از آن به عنوان منبع ذخیره عمل می کند 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 می گیرد.

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 (۵/۱۳، ۵/۱۸، ۱۵/۱۸ کلوین) وارد لوله داخلی میشود. دمای اولیه پایینتر از دمای جامد مواد تغییر فاز دهنده، ۵/۱۸ کلوین در نظر گرفته شده است. شرط عدم لغزش و غیر نفوذپذیری در رابطه با جامد و دیوارههای لوله داخلی و بیرونی

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 می گردد. خواص ترموفیزیکی سیال انتقال دهنده حرارت و ماده تغییر فاز دهنده ثابت در نظر گرفته شدهاند. از تغییرات حجمی ناشی از تغییر فاز صرفنظر میگردد. به منظور مدلسازى فرآيند تغيير فاز از روش أنتالبى متخلخل استفاده مىشود [۲۰]. در این روش کسر مایع ذوب در هر تکرار محاسبه می گردد. ناحیه خمیری ناحیه ای است که در آن تخلخل با ذوب ماده تغییر فاز دهنده از تا ۱ افزایش پیدا می کند. به هنگامی که ناحیه ای به طور کامل منجمد گردد تخلخل صفر گشته و سرعت جریان در این ناحیه تا صفر کاهش پیدا می کند. 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 می شود، 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.

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

۳- ۱- پیوستگی (۱) $\nabla \cdot \vec{V} = 0$

۳– ۲– مومنتوم

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

۳- ۳- انرژى



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



به در روابط (۴) و (۵) به ترتیب آورده شده است:
۳ – ۴ – آنتالپی محسوس
$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T} c_p dt$$
 (۴)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{V}h\right) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho C_p} \nabla h\right) \tag{(7)}$$

$$\Delta H$$
 آنتالپی کل مواد برابر است با مجموع آنتالپی محسوس h و حرارت نهان

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

جدول 1: خواص مواد تغییر فاز دهنده و نانوذره مس

نانو ذره	واحد	مواد تغيير فاز دهنده	واحد	خواص
-	-	(۳۷–۳۵) ۳۶	°C	دمای ذوب
-	-	8467/8	kJ/kg	ظرفيت ذخيره كرما
1904	kg/m ³	٧٧٠	kg/m ³	چگالی
۱/۶۷× ۱۰ ^۵	K-1	•/••٩	K-1	ضريب انبساط حجمي
۳۸۳	kJ/kg	748.	kJ/kg.K	ظرفیت گرمایی ویژه
-	-	۱/۶۷×۱۰ ^۵	m/s	ويسكوزيته سينماتيكي
۴۰۰	W/m.K	۰/۱۵ ،۰/۲۴	W/m.K	رسانایی گرمایی

۳– ۵– آنتالپی

$$S_{i} = \frac{A_{mush} (1 - \beta)^{2}}{\beta^{3} + 0.001} u_{i}$$
(A)

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.

فرضیاتی که در شبیه سازی برای نانوذره مواد تغییر فاز دهنده لحاظ شده است عبارتند از: ۳- ۸- چگالی

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_p + \phi\rho_n \tag{9}$$

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

$$(c_p\beta)_{nf} = (1-\phi)(c\rho)_p + \phi(c\rho)_{np} \tag{11}$$

$$H = h + \Delta H \tag{(a)}$$

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

$$\Delta H = \beta L \tag{(5)}$$

که ΔH می تواند از صفر(جامد) تا یک (مایع) تغییر کند. به همین منظور، کسر حجمی ذوب به صورت رابطه (۲) تعریف می گردد [۲۱]: ۳- ۶- کسر حجمی

$$\begin{split} \beta &= \frac{\Delta H}{l} = 0 & \text{if } T < T_s \\ \beta &= \frac{\Delta H}{l} = 0 & \text{if } T > T_l & (\forall) \\ \beta &= \frac{\Delta H}{l} = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & \text{if } T_s < T < T_l \end{split}$$

Ts و₁T به ترتیب نشاندهنده دمای ابتدایی و انتهایی محدوده ذوب ماده تغییر فاز دهنده میباشد. همچنین در رابطه (۲) _م. ترم چشمه است که به علت اثرات تغییر فاز در انتقال حرارت جابهجابی به رابطه مومنتوم اضافه میشود که در رابطه (۸) آورده شده است.

۳– ۱۱ – ويسكوزيته

$$\mu_{np} = \frac{\mu_p}{(1-\phi)^{2.5}}$$
(17)

۳- ۱۲ - رسانایی گرمایی

$$K_{np} = k_{0} + k_{d}$$

$$\frac{k_{0}}{k_{p}} = \frac{K_{n} + 2k_{p} - 2\phi(k_{p} - K_{n})}{K_{n} + 2k_{p} - \phi(k_{p} - K_{n})}$$

$$k_{d} = C'(\rho c_{p})_{np} |v| \phi d_{n}$$
(17)

ثابت بالا تعیین شده به صورت تجربی پس از کار واکاو و کواجی ارزیابی میشود [۲۱].

۳- ۱۳ - نرخ تولید آنتروپی حرارتی

$$S_{h}^{\prime\prime\prime} = \frac{k}{T^{2}} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^{2} \right]$$
(14)

۳– ۱۴– نرخ تولید آنتروپی اصطکاکی

$$S_{f}^{\prime\prime\prime} = \frac{\mu}{T^{2}} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_{x}}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial v_{x}}{\partial y} \right)^{2} \right] + \left(\frac{\partial v_{x}}{\partial y} + \frac{\partial v_{y}}{\partial x} \right)^{2} \right\} (1\Delta)$$

۳– ۱۵– عدد بیجان

$$Be = \frac{S_h^{\bullet}}{S_t^{\bullet}} \tag{19}$$

۴- روش محاسباتی و اعتبارسنجی

۴- ۱- روش محاسباتی

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





فشار، انرژی حرارتی و کسر مایع به ترتیب به ۰/۰، ۳/۰، ۱ و ۰/۹ انتخاب شده است. برای سه عدد استفان ^۱ مختلف همچنین برای درصد وزنی ۰ و ۲۰/۴ 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 شبیهسازی ۱/۰ ثانیه انتخاب شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنتوم ۳–۱۰ 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، ۱/۰و ۰/۲ (تفاوت دما در ۵،۱۰ و ۲۰ سانتی گراد) به ترتیب در شکل ۳ نشان داده شده است. عدد استفان شرایط کارکرد

¹ Stefan Number



دمای مختلف.

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



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



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 سانتی گراد 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



ديوار.

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

$$Ste = \frac{c_{pl}(T_s - T_m)}{L} \tag{(1Y)}$$

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 استیفان 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 ۲۰/۴ به ترتیب برای تفاوتهای دما ۵ ،۱۰ و ۲۰ زمان ذوب ۳، ۱ و ۵/۵ دقیقه زود تر رخ میدهد. به علت افزایش هدایت حرارتی نانومواد تغییر فاز دهنده و تر رخ میدهد. به علت افزایش هدایت حرارتی نانومواد تغییر فاز دهنده و نقاز دهنده این واقعیت است که با افزایش درصد حجمی نانو به مواد تغییر 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 سانتی گراد (در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج



شکل \mathscr{R} : 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 $\Delta T=5$ $^{\circ}C$

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 سانتی گراد و کسر حجمی مختلف نانوذرات 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 ناحیهای خمیری است که در آن دمای بین ۵۰/۱۸ و ۳۱۰/۱۵ کلوین است. شکل نشان میدهد که بیشتر مناطق بین نانومواد 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

ناحیه به علت افزایش هدایت حرارتی نانو مواد تغییر فاز دهنده (به ویژه ناحیه خمیری) با افزایش میزان حجم نانوذرات گسترش مییابد.

شکل ۷ خطوطی از کسر مایع در داخل فضای مثلثی را در مراحل مختلف فرایند ذوب نشان میدهد. رنگ آبی و قرمز به ترتیب مواد تغییر فاز دهندههای جامد و مایع (ذوب شده) را نشان میدهد. در ابتدای فرایند دیده میشود که انتقال گرما از دیواره داغ به مواد تغییر فاز دهنده جامد موجب ذوب شدن یک لایه نازک مواد تغییر فاز دهنده میشود. 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 میشود، به ویژه بالای محفظه داغ. نتایج نشان میدهد



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 ΔT =10 $^{\circ}C$



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 جابه جایی طبیعی قابل مشاهده می شود و ذوب به علت تاثیرات بویانسی به سمت پایین محفظه حرکت می کند.

در شکل ۸ مقایسهای به منظور بررسی نرخ تولید آنتروپی حرارتی با زمان برای سه عدد استفان (تفاوت دما در ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی گراد) 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 سانتی گراد) 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 دریک زمان ثابت بیشتر میشود.



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

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



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

Ø=•	Ø=•/•F	زمان (دقيقه)
۲۸/۳۷	۲۸/۹۸	١
11/78	18/22	٢
17/87	۱۳/۰۶	٣
۱ • /۵۵	11/88	۴

8- نتيجه گيري

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 حسین زاده [۱۱] انجام شده است. نتایج شبيهسازي نشان دهنده افزايش ميزان ذوب نانومواد تغيير 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 می شود، زیرا انرژی به محیط زیست منتقل می شود و هدر می رود. افزودن نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده، هدایت گرمای موثر مواد تغییر فاز دهنده را افزایش داد. با این حال، گرمای ویژه و حرارت نهان مواد تغییر فاز دهنده کاهش می یابد. مزیت افزایش هدایت حرارتی مؤثر درکاهش تولید آنتروپی سیستم، بسیار بیشتر از کاهش گرمای 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. عملكرد واحد ذخيرهسازي حرارتي با افزايش غلظت نانوذرات درنانو مواد تغيير فاز دهنده بهبود مىيابد.

نتایج نشان میدهد افزایش عدد استفان تاثیر بسیار بیشتری بر روی كاهش 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 یتانسیل سیال گرم برای ذوب می گردد. بنابراین افزایش عدد استفان از ۰/۰۵ به ۰/۱۰ از ۰/۰۵ به ۰/۲ باعث کاهش زمان ذوب تا ۵۳ و ۷۶ درصد می گردد. همچنین افزایش نانوذره با کسر حجمی ۰/۰۴ به مواد تغییر فاز دهنده در سه استفان باعث کاهش زمان ذوب تا۲۰ درصد می گردد.

۷- فهرست علائم

	علائم انگلیسی
ناحیه خمیری ثابت، kgm ⁻³ s	A_{mush}
عدد استفان	Ste
عدد بيجان	Be
ثابت	C'
ظرفیت گرمایی، ¹ Jkg	C_p
قطر، mm	d
قطر نانو ذره، mm	d_n
ثابت گرانشی، ²⁻ ms	g
آنتالپی کل، ¹ -Jkg	Н
آنتالپی محسوس، J/kg	h
ضریب هدایت حرارتی، Wm ⁻¹ K ⁻¹	Κ
گرما نهان، J/kg	L
عدد پرانتل	Pr
عدد رایلی	Ra
ترم چشمه	S
نرخ تولید آنتروپی اصطکاکی، VK ⁻¹	S_{f}
نرخ توليد آنتروپی حرارتی، ¹⁻ WK	S_h
دما، K	Т
دما سطح، K	T_s
سرعت سیال، ms	v
	علائم يونانى
$\mathrm{K}^{ ext{-}1}$ ضریب انبساط گرمایی،	β
کسر حجمی	Ø
لزجت دینامیکی، kgm ⁻¹ s ⁻¹	μ
کسر مایع	λ
چگالی، ³⁻ kgm	ρ
ويسكوزيته سيال ²⁻ Nsm	μ
	زيرنويس
فا: مانع	1
نانوذر ه	n

WK-1

- نانومواد تغيير فاز دهنده np
- مواد تغيير فاز دهنده р
 - فاز جامد

S

- [9] B. Zalba, J.M. Marín, 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, Nanoparticleenhanced 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

- M.A. Cuevas-Diarte, T. Calvet-Pallas, J.L. Tamarit, H.A.J. Oonk, D. Mondieig, Y. Haget, Nuevos materials termoajustables, Mundo Científico (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.

منابع

(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. Avci, O. Aydin, 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),

بی موجعه محمد ا