# اثر جهت جریان سیال انتقال گرما بر عملکرد گرمایی مخازن عمودی پوسته و لوله حاوی ماده تغییرفازدهنده هنگام فرآیندهای ذخیرهسازی و تخلیه

**اردلان شفیعی غازانی**\* استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایرانف shafiei.ardalan@sut.ac.ir امیرحسین غلام زاده و دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، gholamzadehamirhossein3@gmail.com

#### چکیدہ

در این مطالعه، با استفاده از شبیهسازی عددی، اثر جهت جریان سیال انتقال گرما بر عملکرد گرمایی مخزن عمودی حاوی ماده تغییرفازدهنده از نوع پوسته و لوله در هنگام فرآیندهای ذخیرهسازی و تخلیه بررسی شده است. سه ضخامت مختلف اما با حجم یکسان برای ناحیه پوسته در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که با کاهش ضخامت پوسته، به دلیل افزایش طول و سطح تبادل گرمایی و کاهش مقاومت رسانش گرمایی داخل ماده تغییرفازدهنده، زمان ذوب و انجماد کاهش مییابد. به طوری که با کاهش قطر پوسته از cm ۲/۲ به ۲۹ ۱۹ مران ذوب به میزان ۲۳٪ و زمان انجماد به میزان ۲۹٪ کاهش مییابد. همچنین نتیجه گیری شد که اگرچه تغییر جهت جریان از رو به پایین به رو به بالا در هنگام ذوب ، زمان ذوب کامل را تا ۱۵/۹٪ کاهش مییابد. به پایین به دلیل عملکرد بهتر در ذخیرهسازی انرژی گرمایی محسوس، دارای نرخ بالاتری از ذخیرهسازی انرژی گرمایی است. در مورد فرآیند انجماد نیز نتیجه مشابهی برای عملکرد بهتر در ذخیره سازی انرژی به دست آمد.

**واژههای کلیدی:** ذخیرهسازی انرژی، تخلیه انرژی، ماده تغییرفازدهنده، پوسته و لوله عمودی، جهت جریان، گرمای نهان.

## Effect of Heat Transfer Fluid Flow Direction on the Thermal Performance of Vertical Shell-and-Tube Heat Storage Tanks Containing Phase Change Material During Charging and Discharging Processes

A. Shafiei Ghazani	Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
A. H. Gholamzadeh	Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

#### Abstract

In this study, using numerical simulation, the effect of the heat transfer fluid flow direction on the thermal performance of a vertical shell-and-tube storage tank containing phase change material (PCM) was investigated during the charging and discharging processes. Three different shell thicknesses, but with the same volume, were considered. The results showed that with a decrease in shell thickness, due to the increased length and heat exchange surface area and the reduction in thermal conduction resistance within the PCM, the melting and freezing times decreased. Specifically, by reducing the shell diameter from 2.2 cm to 1.9 cm, the melting time decreased by 32% and the freezing time by 39%. It was also concluded that although changing the flow direction from downward to upward during melting reduces the total melting time by 15.9%, the downward flow direction, due to its better performance in storing sensible thermal energy, exhibits a higher rate of thermal energy storage. A similar result was obtained for the freezing process, where upward flow showed better performance in energy discharge.

Keywords: Energy Storage, Energy Discharge, Phase Change Material, Vertical Shell-and-Tube, Flow Direction, latent heat.

#### ۱– مقدمه

در سالهای اخیر با توجه به محدودیت سوختهای فسیلی و مشکلاتی از قبیل گرمایش جهانی و گازهای گلخانهای، استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی به دلیل صرفه اقتصادی و تولید آلاینده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ولی با توجه به عدم دسترسی دائمی به این نوع از منابع انرژی تجدیدپذیر، لازم است بخشی از انرژی دریافتی جهت استفاده در زمانی که در دسترس نیستند، ذخیرهسازی شود. انواع روشهای ذخیرهسازی انرژی گرمایی عبارتند از گرمای نهان [1]، گرمای محسوس [۲] و گرمای شیمیایی [۳]. ذخیرهسازی گرمای نهان به دلیل چگالی ذخیره انرژی بالا و صرفه اقتصادی بهترین گزینه محسوب می شود [۴]. ماده تغییرفازدهنده با

تغییر حالت از فاز مایع به فاز جامد، انرژی گرمایی را آزاد میکند. علاوه بر ذخیرهسازی انرژی، از مواد تغییرفازدهنده در آب شیرین کن خورشیدی [۵، ۶]، خنکسازی و کنترل دمای برد الکترونیکی [۷] و بهبود عملکرد گردآور خورشیدی [۸] استفاده می شود.

یکی از متداول ترین هندسههای ذخیرهسازی انرژی به روش گرمای نهان، پوسته و لوله است. از جمله مزیتهای مخازن پوسته و لوله برای ذخیرهسازی انرژی می توان به سطح تبادل گرمایی بالا، توزیع یکنواخت گرما، افت فشار کمتر، انعطاف پذیری در طراحی و قابلیت استفاده از مواد مختلف و هزینه نگهداری کمتر اشاره کرد. استفاده عملی از این باتریهای گرمایی مستلزم این است که فرآیند شارژ و تخلیه در کوتاهترین زمان ممکن صورت پذیرد. ولی اغلب مواد تغییرفازدهنده از رسانایی گرمایی پایینی برخوردارند که موجب می شود که فرآیندهای ذخیره سازی (ذوب) و تخلیه (انجماد) به آهستگی

<sup>&</sup>lt;sup>®</sup> نویسندگان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: shafiei.ardalan@sut.ac.ir تاریخ دریافت: ۲۲/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۲۲/۰۷/۳۰

صورت پذیرند. برای تسریع فرآیندهای شارژ و تخلیه روشهای مختلفی در ادبیات فن پیشنهاد شده است که از جمله این روشها میتوان به قرار دادن ماده تغییرفازدهنده در محیط متخلخل [۹]، افزودن پره [۱۰]، استفاده از لولههای گرمایی [۱۱]، اضافه کردن نانوذرات به ماده تغییرفازدهنده [۱۲]، میکرو و ماکروکپسوله کردن ماده تغییرفازدهنده و طراحی بهینه هندسه اشاره کرد.

قرار دادن ماده تغییرفازدهنده در محیط متخلخل مانند فومهای فلزی و گرافیت، گرچه در کاهش زمان ذوب و انجماد موثر است، اما باعث اشغال حجم زیادی از فضای داخلی مخزن ذخیرهساز شده و از طرفی از انتقال گرما به روش همرفت طبیعی جلوگیری می کند[۱۳]. اپولوت و همکاران [۱۴] دریافتند که با قرار دادن ۷۰ درصد فوم فلزی میتوان تقریبا تا ۲۵ درصد زمان ذوب را کاهش داد. ژاو و همکاران [۱۵] نیز به طور عددی مشاهده کردند که با استفاده از فوم گرافیتی با تخلخل ۲/۹، زمان ذوب و انجماد در مقایسه با ماده تغییرفازدهنده خالص به ترتیب ۵۸/۴ و ۲/۱۴ درصد کاهش می یابد.

نصب پرمها با افزایش ناحیه تبادل گرمایی، فرآیند ذوب و انجماد ماده تغییرفازدهنده را تسریع میکند. البته این روش نیز مانند محیط متخلخل باعث کاهش حجم موثر مخزن ذخیرهساز میشود [۱۶]. هوانگ و لیو [۱۷] به صورت سهبعدی سیستم های ذخیره انرژی گرمایی نهان را بررسی کردند و دریافتند که با استفاده از پرههای درختی شکل، زمان انجماد و ذوب نسبت به پرههای مستطیلی ۴۹/۲ و ۳۴/۵ درصد کاهش می یابد.

افزودن نانوذرات به ماده تغییرفازدهنده از طریق افزایش رسانایی گرمایی موثر، نرخ انتقال گرما را افزایش می دهد. کشتلی و همکاران [۱۸] به صورت عددی و دوبعدی، رفتار انجماد مواد تغییر فاز با نانوذرات معداد و چیدمان لولههای داخلی را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که با افزودن نانوذرات، زمان انجماد کاهش می یابد. البته، گرانروی مؤثر ماده تغییر فاز دهنده نیز در اثر افزودن نانوذرات افزایش یافته و در نتیجه، انتقال گرما به روش همرفت طبیعی تضعیف می شود [۱۹]. از نانوذرات رایج می توان به گرافیت، گرافن، نانولولههای کربنی و نانوذرات اکسید فلزی اشاره کرد.

علاوه بر روشهای فوق، طراحی بهینه هندسه مخزن پوسته و لوله نیز میتواند از طریق تقویت همرفت آزاد، باعث بهبود نرخ ذوب و انجماد شود [۲۰]. شن و همکاران [۲۱] و لو و همکاران [۲۲] نشان دادند که با استفاده از پوسته مخروطی، زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در مخزن پوسته و لوله عمودی کاهش مییابد. همچنین کراوان و همکاران [۳۳] بهصورت تجربی و عددی فرآیند ذوب را در مخازن با پوسته استوانهای و لوله به شکل نازل و دیفیوزر مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که لوله بهصورت نازل باعث کاهش زمان ذوب می شود. سودهی و همکاران [۲۴] نیز ترکیب پوسته استوانهای و مخروطی با مجرای جریان همگرا و واگرا را در هفت حالت مختلف مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که استفاده از پوسته مخروطی با مجرای همگرا بهترین عملکرد را در کاهش زمان ذوب در میگرا

شفیعی غازانی و همکاران [۲۵] در بررسی مخازن عمودی با ترکیب پوسته مخروطی و استوانهای و جریان از بالا به پایین، نشان دادند که کاهش حجم ماده تغییر فاز دهنده در نیمه پایینی مخزن، به

کاهش بیشتر زمان ذوب منجر میشود. گرچه مخروطی شدن پوسته به دلیل تقویت همرفت طبیعی باعث کاهش زمان ذوب میشود، اما در فرآیند انجماد که انتقال گرما به روش رسانایی گرمایی غالب است، میتواند منجر به افزایش زمان انجماد شود.

در کنار این روشها، جهت جریان سیال انتقال گرما نیز تأثیر چشمگیری دارد. حسن و همکاران [۲۶] مطالعهای آزمایشگاهی، تأثیر جهت جریان را برای پوسته استوانهای و مجراهای همگرا، واگرا و یکنواخت بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که زمانی که جهت جریان مخالف جهت گرانش باشد، زمان ذوب کاهش مییابد. همچنین گوا و همکاران [۲۷] اثر جهت جریان ورودی بر زمان ذوب را بهصورت عددی و در ارتفاعهای مختلف مخزن بررسی کردند. برای مقایسهی دقیق حالتهای مختلف، حجم ماده تغییرفازدهنده در همه شرایط یکسان در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که زمان ذوب در جریان این، با افزایش ارتفاع لوله و افزایش سطح انتقال گرما بین سیال و ماده تغییرفازدهنده، زمان ذوب کاهش مییابد. با این حال، پس از رسیدن به ارتفاع معینی، جهت جریان سیال انتقال گرما تأثیر چندانی بر زمان ذوب نخواهد داشت.

با مرور تحقیقات انجامشده، میتوان دریافت که بیشتر مطالعات بر روشهای تسریع فرآیند ذوب تمرکز داشتهاند، در حالی که تأثیر این روشها بر فرآیند انجماد کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که مخازن ذخیره گرمای نهان در واقع نوعی باتری گرمایی محسوب میشوند، عملکرد بهینه آنها هم در فرآیند ذخیرهسازی (ذوب) و هم فرآیند نخلیه (انجماد) اهمیت دارد. بنابراین، لازم است هر دو فرآیند ذوب و انجماد در ارزیابی تأثیر روشهای مختلف بر بهبود عملکرد مخزن مدنظر قرار گیرند. در مطالعه حاضر، بهصورت عددی اثر جهت جریان سیال انتقال گرما بر هر دو فرآیند ذوب و انجماد در مخزن ذخیرهسازی گرمای نهان از نوع پوسته و لوله بررسی خواهد شد. با ثابت نگهداشتن حجم ماده تغییرفازدهنده، تأثیر جهت جریان بر زمان ذوب و انجماد در مخازن با ارتفاعهای مختلف نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

# ۲- تعریف مسئله ۲-۱- مدل فیزیکی

شکل ۱ دل فیزیکی یک واحد ذخیره انرژی گرمای نهان از نوع پوسته و لوله عمودی را نشان میدهد که در این مقاله در سه حالت مختلف بررسی شده است. مخزن اول به عنوان حالت پایه، دارای پوستهای با قطر ۲۰۴ و ارتفاع ۳۰ ۲۰ است. مخزن دوم با قطر پوسته ۳/۸ cm و مخزن سوم با قطر ۲۰۰ ۵ در نظر گرفته شدهاند. در در مخازن دوم و سوم، ارتفاع به گونهای انتخاب شده است که حجم ماده تغییرفازدهنده در هر دو مخزن برابر با حجم ماده تغییرفازدهنده در مخزن اول باشد. جریان سیال انتقال گرما درون لوله فولادی ضد زنگ، در هر دو حالت همسو با گرانش و خلاف جهت گرانش بررسی و تحلیل می شود.

RT35، پارافین RT35، طبق آزمایش تجربی گزارش شده در مرجع [۲۸]، پارافین RT35 به عنوان ماده تغییرفازدهنده استفاده می شود که در فضای حلقوی بین

پوسته و لوله فولادی محصور شده است. در جدول ۱، خواص ترموفیزیکی ماده تغییرفازدهنده و سیال انتقال گرما ارائه شده است. لازم به توضیح است که گرمای ویژه ماده تغییرفازدهنده بهصورت تابعی تکهای خطی از دما در نظر گرفته شده است. به این ترتیب که در دماهای کمتر از دمای انجماد ( $^{20} \, r_s = T$ ) گرمایی ویژه برابر با  $r_s$ و در دماهای بالاتر از ذوب کامل ( $^{20} \, r_s = T$ ) گرمای ویژه با میانیابی بین و در دماهای بالاتر از ذوب کامل ( $^{20} \, r_s = T$ ) برابر با میانیابی بین مقادیر  $r_{s,s}$  و محاسبه میشود. همچنین، شایان ذکر است که در مارجع مختلف [ $^{7}$ ,  $^{7}$ – $^{7}$ ] مقادیر مختلفی برای برخی از خواص ماده تغییرفازدهنده ارائه شده است. به همین دلیل، در این مطالعه خواص این ماده در بازهای از مقادیر موجود به نحوی انتخاب شده است تا بیشترین تطابق با نتایج تجربی حاصل شود.



شکل ۱- سه مخزن ذخیره گرمای نهان در نظر گرفته شده و جهتهای جریان سیال انتقال گرما

RT35	کی	فيزي	ترموه	واص	'- خو	جدول ۱	

خاصیت ترموفیزیکی	ماده تغییر فاز دهنده	سیال انتقال گرما	خاصیت ترموفیزیکی	ماده تغییر فاز دهنده
$\rho \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	٧٧٠	٧٧٠	$\beta \left[\frac{1}{K}\right]$	•/•• ١
$c_{p,s}\left[\frac{J}{kg.K}\right]$	۱۸۰۰	-	$L\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	14.
$c_{p,l}\left[\frac{J}{kg.K}\right]$	74	4174	<i>T<sub>s</sub></i> [°C]	۳۰
$k\left[\frac{W}{m.K}\right]$	٠/٢	• /۶	$T_l$ [°C]	٣٩
$\mu\left[\frac{kg}{m.s}\right]$	•/••٣٨	•/•• ١		

با توجه به تقارن محوری مسئله، جهت صرفهجویی در هزینه محاسباتی، میتوان میدان محاسباتی را طبق شکل ۲ بصورت دوبعدی در نظر گرفت. همچنین پارامترهای هندسی مدل فیزیکی در شکل ۲ نشان داده شدهاند. پارامترهای R ، ۲ و H به ترتیب نشاندهنده شعاع داخلی لوله، شعاع پوسته و ارتفاع مخزن هستند. جدول ۲ مقادیر پارامترهای هندسی برای حالتهای مختلف بررسی شده در این مطالعه



جدول ۲- مشخصات هندسی برای سه مخزن در نظر گرفته شده

	مخزن یک	مخزن دو	مخزن سه
H (cm)	۴۰/۰۰	۵۸/۸۵	۲٩/۲۶
r (cm)	٠/٧۵	۰/۷۵	٠/٧۵
R (cm)	۲/۲۰	١/٩٠	۲/۵۰
$\delta$ (cm)	٠/٢۵	٠/٢۵	۰/۲۵
V <sub>HTF</sub> (cm <sup>3</sup> )	۲۰/۶۸	1.4/	۵۱/۲۰
V <sub>PCM</sub> (cm <sup>3</sup> )	471/00	421/00	421/00

در جدول ۲، پارامترهای ۵، V<sub>HTF</sub> و V<sub>PCM</sub> به ترتیب معرف ضخامت جداره لوله فولادی، حجم داخلی لوله فولادی و حجم ماده تغییرفازدهنده هستند. برای مقایسه عملکرد سه مخزن در طول فرآیندهای ذخیرهسازی و تخلیه، حجم ماده تغییرفازدهنده در هر سه مخزن بهصورت یکسان در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۲- معادلات حاکم

شبیهسازی مسئله با فرضیات زیر صورت پذیرفته است:

- جریان سیال انتقال گرما و ماده تغییرفازدهنده مایع به صورت لایهای، ناپایا، نیوتنی و تراکمناپذیر فرض شده است.
- برای در نظر گرفتن اثرات همرفت آزاد در ماده تغییرفازدهنده مذاب از تقریب بوزینسک استفاده شده است.
- از تغییر حجم ماده تغییرفازدهنده حین ذوب و انجماد و نیز
   از اثرات اتلاف لزجت صرفنظر شده است.
- فرض شده است که در سطح مشترک دیواره خارجی لوله و ماده تغییرفازدهنده و نیز در سطح مشترک دیواره داخلی لوله و سیال انتقال گرما، اصل عدم لغزش سرعت و دما برقرار است.
- برای شبیهسازی فرآیندهای ذوب و انجماد از روش آنتالپی-تخلخل استفاده شده است.

بر اساس مفروضات فوق، معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی برای ماده تغییرفازدهنده به ترتیب بهصورت معادلات (۱) تا (۳) نوشته میشوند [۲۲]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

(4)

(۵)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} &= -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \beta(T - T_{\text{ref}}) \\ &- \frac{(1 - \lambda)^2}{\lambda^3 + \varepsilon} A_{\text{mush}} \mathbf{u} \end{aligned} \tag{Y}$$

$$\boldsymbol{\rho} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{t}} + \boldsymbol{\rho} \nabla \cdot (\mathbf{u} \mathbf{H}) = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla \mathbf{T})$$

که در آن  $\mu$ ,  $\mu$ ,  $\eta$ ,  $\mu$  و  $\rho$ ,  $\mu$  ترتیب بیانگر آنتالپی، دما، فشار، بردار سرعت و چگالی ماده تغییرفازدهنده هستند. همچنین،  $\mu$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $\eta$  و  $\Lambda$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $\eta$  و  $\Lambda$ ,  $\mu$  اس  $\Lambda$  همچنین،  $\mu$ ,  $\mu$  اس  $\Lambda$  $\Lambda$  اس  $\Lambda$  $\Lambda$  می ایت ناحیه نیمه جامد می باشند. ثابت ناحیه نیمه جامد یک پارامتر عددی است که میزان مقاومت ثابت ناحیه نیمه جامد در برابر جریان سیال را مشخص می کند. مقدار آن در مطالعه حاضر، برابر با  $\Lambda$   $^{8}$  kg/m<sup>5</sup>.s در نظر گرفته شده است. آنتالپی H از فرمول زیر به دست می آید:

$$\mathbf{H} = \mathbf{h} + \Delta \mathbf{H}$$

به طوری که h و ΔH به ترتیب نشاندهنده آنتالپی محسوس و آنتالپی نهان میباشند که با استفاده از فرمول های زیر محاسبه میشوند:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T} c_{p,PCM} dT$$
  
$$\Delta H = \lambda L$$

$$\lambda = \begin{cases} T - T_s \\ T_l - T_s \\ 1 \\ 1 \\ T > T_s \end{cases} \qquad T_s \leq T \leq T_l \qquad (6)$$

که در آن،  $T_L$ ،  $T_L$  و  $T_S$  دمای سلول محاسباتی، دمایی که ماده تغییرفازدهنده در بالاتر از آن به صورت کامل مایع است و دمایی که ماده تغییرفازدهنده در پایین تر از آن به طور کامل جامد است، می باشند.

معادلات حاکم بر جریان سیال انتقال گرما مشابه معادلات حاکم بر ماده تغییرفازدهنده (معادلات (۱) تا (۳)) هستند با این تفاوت که دو جمله انتهایی در سمت راست معادله تکانه یعنی جمله نیروی شناوری و جمله تخلخل ناشی از انجماد و ذوب، حذف می شوند. همچنین، در معادله انرژی، آنتالپی فقط بر اساس انرژی محسوس محاسبه می شود.

همچنین شایان ذکر است که معادله رسانش گرمای گذرا نیز برای جداره لوله فولادی حل میگردد.

#### ۲-۳- شرایط اولیه و مرزی

مطابق آزمایشات لانگئون و همکاران [۲۸]، دمای اولیه و ورودی برای ذوب به ترتیب برابر با  $2^{\circ}$  ۲۲ و  $2^{\circ}$  ۵۲ در نظر گرفته شده است، در حالی که برای فرآیند انجماد، دماها به ترتیب  $2^{\circ}$  ۲۵ و  $2^{\circ}$  ۲۲ در هستند. دبی حجمی جریان سیال انتقال گرما برابر با 1/19 ml/s می باشد. همچنین، دیواره جانبی پوسته بهعنوان عایق در نظر گرفته شده است. تعامل گرمایی متقابل بین سطوح مشترک ماده تغییرفازدهنده و دیواره خارجی لوله، و همچنین بین سیال انتقال گرما و دیواره داخلی لوله، به ترتیب به صورت معادلات (۲) و (۸) بیان می شود:

$$T_{pipewall}\Big|_{inner} = T_{\rm HTF} \tag{Y}$$

$$\mathbf{k}_{\text{pipewall}} \frac{\partial T_{\text{pipewall}}}{\partial n} \bigg|_{inner} = \mathbf{k}_{\text{HTF}} \frac{\partial T_{\text{HTF}}}{\partial n}$$

$$T_{pipewall}\Big|_{outer} = T_{PCM}$$

$$k_{pipewall} \frac{\partial T_{pipewall}}{\partial n}\Big|_{outer} = k_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial n}$$
(A)

#### ۲-۴- شاخصهای عملکردی

کل انرژی ذخیره شده در هر لحظه در ماده تغییرفازدهنده برابر است با مجموع انرژی محسوس (Q<sub>s</sub>) و انرژی نهان (Q<sub>L</sub>) که تا آن لحظه ذخیره شده است:

$$Q_{\text{total}}(t) = Q_{s}(t) + Q_{L}(t) \tag{9}$$

که 
$$Q_{
m s}(t)$$
و  $Q_{
m L}(t)$  را میتوان با استفاده از معادلات زیر محاسبه کرد:

$$Q_{s}(t) = \int_{V} \rho_{PCM} c_{p,PCM} (T - T_{initial}) dV \qquad (1 \cdot )$$

$$Q_{L}(t) = \int_{V} \rho_{PCM} \lambda L \, dV \tag{11}$$

در معادلات فوق  $V c_p$  و T<sub>initial</sub> به ترتیب نمایانگر گرمای ویژه، حجم و دمای اولیه ماده تغییرفازدهنده هستند. همچنین حداکثر ظرفیت ذخیرهسازی گرمایی را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:  $Q_{max} = \rho_{PCM}V_{PCM}c_{p,PCM}(T_{initel} - T_{initial})$ +  $\rho_{PCM}V_{PCM}L$ 

همچنین عدد ناسلت به صورت زیر تعریف می شود:

$$Nu(t) = \frac{q'' D_{tube}}{(T_{in} - \bar{T}_m)k_{PCM}}$$
(17)

که در آن  $\overline{T}_m$ ،  $\overline{T}_m$  و  $k_{PCM}$  و  $M_{Lube}$ ،  $T_{in}$ ،  $\overline{T}_m$  زوب ماده تغییرفازدهنده، دمای ورودی سیال انتقال گرما، قطر بیرونی لوله، شار گرمایی متوسط روی دیواره خارجی لوله و رسانایی گرمایی ماده تغییرفازدهنده را نشان میدهند.

#### ۳- حل عددی

ابتدا میدان حل با استفاده از شبکهبندی سازمانیافته به سلولهای محاسباتی تقسیمبندی میشود. معادلات حاکم بر میدان حل با استفاده از نرم افزار تجاری Ansys Fluent 2022 R2 حل گردیده است. الگوریتم SIMPLE و روش PRESTO به ترتیب برای کوپلینگ فشار-سرعت و فشار انتخاب شدهاند. همچنین از روش بالادست مرتبه دوم برای گسستهسازی جمله همرفت در معادلات انرژی و تکانه استفاده شده است. جملات پخش نیز بصورت مرتبه دوم گسستهسازی میشوند. معیارهای همگرایی برای معادلات پیوستگی و تکانه برابر با <sup>۲</sup>۰۰۰ و برای معادله انرژی برابر با <sup>۲</sup>۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

#### ۳-۱- استقلال از مش و گام زمانی

برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به اندازه سلولهای محاسباتی و گام زمانی، استقلال از شبکهبندی و گام زمانی مورد بررسی قرار میگیرد. برای این منظور سه شبکهبندی مختلف با تعداد سلول ۹۴۵۰ ۱۸۷۰۹ و ۳۷۵۰۰ تولید شده و زمان لازم برای ذوب ۸۰٪ و ۲۹٪ و همینطور زمان لازم برای انجماد تا رسیدن به کسر حجمی مایع ۲۰٪ و

۱٪ در جدول ۳ گزارش شده است. علاوه بر این، شبیهسازی فرآیند ذوب و انجماد با سه مقدار مختلف برای گام زمانی، یعنی ۰/۵، ۰/۱ و ۰/۰۵ ثانیه انجام شده و نتایج آن در جدول ۴ ارائه گردیده است.

•						
فر آیند ذوب						
تعداد سلول	گام زمانی (ثانیه)	زمان رسیدن به λ = ۰/۸ (دقیقه)	خطای نسبی (٪)	زمان رسیدن به λ = ۰/۹۹ (دقیقه)	خطای نسبی (٪)	
۹۷۵۰	۰/۵	۵۶/۳۰۳	-	97/422	-	
۱۸۷۰۹	۰/۵	56/414	•/١٩٧	٩٧/٩٧٨	۰/۵۷۱	
۳۷۵۰۰	۰/۵	68/464	•/•۶٧	۹۸/۳۵۳	•/٣٨٣	
		انجماد	فرآيند			
تعداد سلول	گام زمانی (ثانیه)	زمان رسیدن به λ = ۰/۲ (دقیقه)	خطای نسبی (٪)	زمان رسیدن به λ = ۰/۰۱ (دقیقه)	خطای نسبی (٪)	
۹۷۵۰	•/1	126/921	-	γλ/λλγ	-	
١٨٧٠٩	•/١	184/940	•/• •	γλ/λ٩λ	•/•79	
۳۷۵۰۰	۰/۱	184/989	•/• ) )	YX/٩٠Y	•/••۵	

جدول ۳– بررسی استقلال از شبکهبندی برای فر آیندهای ذوب و انحماد

رسی استقلال از گام زمانی برای فرآیندهای ذوب و انجماد	ں ¥- برر	جدول
--	----------	------

فر آيند ذوب					
تعداد سلول	گام زمانی (ثانیه)	زمان رسیدن به λ = ۰/۸ (دقیقه)	خطای نسبی (٪)	زمان رسیدن به λ = ۰/۹۹ (دقیقه)	خطای نسبی (٪)
١٨٢٠٩	۰/۵	59/414	I	٩٧/٩٧٨	-
١٨٢٠٩	•/\	56/411	•/••۵	۹۷/۹۷۵	•/••٣
١٨٧٠٩	٠/٠۵	56/411	•/•••	۹۷/۹۷۵	•/•••
		د انجماد	فرآين		
تعداد سلول	گام زمانی (ثانیه)	زمان رسیدن به λ = ۰/۲ (دقیقه)	خطای نسبی (٪)	زمان رسیدن به λ = ۰/۰۱ (دقیقه)	خطای نسبی (٪)
١٨٢٠٩	۰/۵	۲۸/۸۹۰	I	184/988	-
١٨٢٠٩	•/١	YX/X9X	•/• ١ •	184/940	•/••۶
١٨٢٠٩	٠/٠۵	γλ/λλγ	•/•14	124/920	۰/۰۱۶

طبق جدول ۳، فرآیند ذوب نسبت به انجماد حساسیت بیشتری نسبت به تعداد سلولهای محاسباتی دارد. به منظور کاهش خطای

نسبی به کمتر از ۲۰/۵، انتخاب تعداد سلول ۱۸۷۰۹ مناسب به نظر می سد. همچنین با بررسی دادههای جدول ۴ می توان نتیجه گرفت که حساسیت نتایج به تعداد سلولها است. در تعداد سلول ۱۸۷۰۹، انتخاب گام زمانی برابر با ۲/۱ ثانیه مناسب به نظر می آید و انتخاب گام زمانی کمتر از این باعث افزایش خطای گرد کردن و نیاز به تعداد تکرار بیشتر در هر گام زمانی می شود. در این مطالعه برای هر دو فر آیند ذوب و انجماد از تعداد سلول ۱۸۷۰۹ و گام زمانی ۲/۱ استفاده شده است.

#### ۲-۳- صحتسنجی با نتایج آزمایشگاهی

به منظور اطمینان از صحت فرضیات ارائه شده و معادلات مدل انتخابی، فرآیند ذخیره سازی و تخلیه انرژی تحت شرایط داده شده [۲۸] به صورت عددی شبیه سازی شده و با داده های تجربی در شکل ۳ مقایسه گردیده است. ابعاد مخزن دقیقا با حالت پایه ذکر شده در این مقاله یکسان است. آب به عنوان سیال انتقال گرما با دبی ۱/۷۶ ml/۶ وارد لوله فولادی داخل مخزن می شود و پارافین RT35 به عنوان ماده ارد لوله فولادی داخل مخزن می شود و پارافین RT35 به عنوان ماده انتقال گرما برای فرآیند ذوب به ترتیب برابر با  $^\circ$  ۲۲ و  $^\circ$  ۲۵ و برای فرآیند انجماد به ترتیب برابر با  $^\circ$  ۲۸ و  $^\circ$  ۲۰ در نظر گرفته شده است. سه ترموکوپل در ارتفاع m۲۱۲ و در سه موقعیت شعاعی d, s مایی مخزن به کار گرفته شده است. طبق مقایسه انجام یافته در شکل مای مخزن به کار گرفته شده است. طبق مقایسه انجام یافته در شکل ۳، تطابق قابل قبولی بین نتایج تجربی و نتایج عددی وجود دارد.



(نقطه a)، ۱۶/۶ mm (نقطه b) و ۱۹ mm (نقطه c) (الف) در حالت ذخیره (ب) در حالت تخلیه

## ۴- نتایج و بحث

در شکل ۴ الف، نمودار کسر حجمی مایع بر حسب زمان برای فرآیند ذوب در سه مخزن، در دو حالت جهت جریان سیال انتقال گرما از پایین به بالا و از بالا به پایین، نشان داده شده است. زمان ذوب برای مخزنهای یک، دو و سه در حالت جریان سیال انتقال گرما از بالا به پایین، به ترتیب برابر با ۱۰۵/۹، ۱/۷۲ و ۱۳۷۶ دقیقه است. با تغییر جهت جریان به حالت پایین به بالا، مقادیر زمان ذوب به ۹/۱۹، ۶/۰۷ و ۱۳۳/۸ دقیقه کاهش می یابد که نسبت به حالت جریان از بالا به پایین، به ترتیب کاهشهایی معادل ۵/۵/، ۱/۵/۱ و ۲/۳ را نشان می دهند.

نتایج دمای خروجی سیال انتقال گرما نشان میدهند که اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال، به جزء در لحظات ابتدایی فرآیند، حداکثر ۳ درجه بوده و این اختلاف دما با کاهش طول لوله کمتر نیز میشود. بنابراین، با کاهش قطر مخزن (یا کاهش ضخامت ماده تغییرفازدهنده) که منجر به افزایش طول لوله و سطح انتقال گرما میشود، زمان ذوب کاهش مییابد. همچنین، با افزایش ضخامت ماده تنییرفازدهنده، تأثیر جهت جریان بر عملکرد مخزن ذخیرهسازی کاهش مییابد. این امر به این دلیلی است که با کاهش طول لوله، اختلاف دمای ورودی و خروجی کاهش یافته و لوله تقریباً به صورت یک سطح دمای ثابت عمل میکند؛ به طوری که جهت جریان تاثیر چندانی بر عملکرد آن ندارد.

همچنین میتوان مشاهده کرد که در نیمه اول فرآیند ذوب، جریان رو به پایین عملکرد بهتری دارد، اما در نیمه دوم این روند معکوس شده و جریان رو به بالا برتری مییابد. در جریان رو به پایین، دمای قسمت بالایی لوله بیشتر از دمای قسمت پایینی است و این اختلاف دما با جهت همرفت طبیعی همخوانی دارد، که باعث تقویت همرفت طبیعی میشود. با این حال، با ادامه فرآیند ذوب و ذوب شدن بیش از ۷۰ درصد ماده تغییرفازدهنده، تنها بخش ذوبنشده در قسمت پایینی مخزن باقی میماند و مکانیزم غالب انتقال گرما به رسانش گرمایی تغییر مییابد. از این رو، جریان رو به بالا به دلیل دمای بالاتر سیال در قسمت پایینی، در ذوب بخش جامد باقیمانده موفق تر عمل میکند.

در شکل ۴ ب، نمودار کسر حجمی مایع بر حسب زمان برای فرآیند انجماد نشان داده شده است. برای جریان سیال انتقال گرمای رو به بالا، زمان انجماد برای مخازن یک، دو و سه به ترتیب برابر با ۱۴۰/۸ ۳/۶۸ و ۲۱۱/۲ دقیقه است. مخزن دوم به دلیل ارتفاع بیشتر و سطح تبادل گرمایی بالا، کمترین زمان انجماد را دارد. با تغییر جهت جریان به رو به پایین، این مقادیر به ۱۲۳/۰، ۷۹/۵ و ۱۸۸۸ دقیقه کاهش مییابند که نسبت به حالت جریان رو به بالا، به ترتیب کاهشهای ۱۷/۸، ۸/۶ و ۲۲/۴ دقیقهای را نشان میدهد. بنابراین، در حالت انجماد، تغییر جهت جریان تأثیر بیشتری بر کاهش زمان انجماد برای مخزن سوم که دارای ضخامت بیشتری است، دارد.

در فرآیند انجماد، به دلیل اینکه در جریان رو به بالا دمای سیال انتقال گرما در قسمت پایینی کمتر است و این گرادیان دما با جهت جریان طبیعی در داخل ماده تغییرفازدهنده هماهنگتر است، جریان رو به بالا در طول حدود ۲۵ درصد از کل زمان انجماد عملکرد بهتری

دارد. با این حال، در ادامه فرآیند، جریان رو به پایین به دلیل دمای کمتر در ورودی جریان، در انتقال گرمای رسانشی و انجماد بخش جامد باقیمانده در قسمت بالایی مخزن بهتر عمل میکند.



شکل ۴- نمودار کسرحجمی مایع بر حسب زمان برای سه مخزن ذخیرهسازی در دو حالت جهت جریان سیال انتقال گرما از پایین به بالا و از بالا به پایین (الف) در حالت ذخیره (ب) در حالت تخلیه

برای بررسی دقیق تر علل مشاهدات فوق، نمودار زمانی عدد ناسلت برای سه مخزن و دو جهت مختلف جریان در شکل ۵ الف برای فرآیند ذوب و در شکل ۵ ب برای فرآیند انجماد نشان داده شده است. عدد ناسلت بهنوعی معرف شار گرمایی بیبعد است. در ابتدای هر دو فرآیند ذوب و انجماد، بهدلیل وجود اختلاف دمای زیاد بین سطح خارجی لوله و ماده تغییرفازدهنده، عدد ناسلت بهطور چشمگیری افزایش مییابد. اما پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود، بهدلیل تشکیل لایه مرزی بین دیواره خارجی لوله و ماده تغییرفازدهنده، عدد ناسلت روند نزولی نسبت به زمان را نشان میدهد. در فرآیند انجماد، این روند نزولی میتواند به هموار شدن گرادیان دما در داخل ماده تغییرفازدهنده مرتبط باشد.

تفاوت بین عدد ناسلت در فرآیند ذوب و انجماد، شیب ملایم تر روند کاهشی عدد ناسلت در فرآیند ذوب پس از گذشت حدود ۲۰ دقیقه از آغاز آن است. این امر بهدلیل شدیدتر بودن همرفت آزاد در فرآیند ذوب نسبت به فرآیند انجماد است که انتقال گرما را بیشتر تقویت میکند.

علت زمان کمتر برای ذوب در حالتی که جهت جریان از پایین به بالا است، تقویت بیشتر همرفت آزاد میباشد. در شکل ۵ الف نیز

مشاهده می شود که پس از گذشت حدود ۲۰ دقیقه از ابتدای فرآیند، ناحیه نسبتاً همواری که به سبب همرفت آزاد ایجاد می شود، برای جهت جریان از پایین به بالا طولانی تر است. همچنین در حالت انجماد، جهت جریان از بالا به پایین —که در آن قسمت بالایی لوله سردتر از قسمت پایینی است —منجر به تقویت همرفت آزاد می گردد و نتیجه آن کاهش زمان انجماد خواهد بود.



در شکل ۶٬ کانتورهای کسر حجمی مایع (در نیمه راست) و کانتورهای دما (در نیمه چپ) برای فرآیند ذوب در بازههای زمانی ۱۵ دقیقهای نشان داده شدهاند. شکل ۶ الف مربوط به جهت جریان رو به بالا و شکل ۶ ب مربوط به جهت جریان رو به پایین است. در حدود یک ساعت اول فرآیند، سرعت پیشروی جبهه ذوب در حالت جریان رو به پایین بیشتر است. اما پس از این زمان، سرعت پیشروی جبهه ذوب در حالت جریان رو به بالا افزایش مییابد، بهطوری که ذوب قسمت جامد باقیمانده سریعتر از حالت جریان رو به پایین اتفاق میافتد. در واقع، مزیت جریان رو به بالا در ذوب سریعتر قسمت جامد باقیمانده در پایین مخزن مشهود است.

با مقایسه کانتورهای دما برای دو جهت جریان، میتوان نتیجه گرفت که پس از گذشت زمان یکسان، ماده تغییرفازدهنده در شرایط جریان رو به پایین به دمای بیشتری نسبت به حالت جریان رو به بالا میرسد. بنابراین، انرژی گرمایی محسوس بیشتری در این حالت ذخیره می گردد.

در شکل ۷، کانتورهای کسر حجمی مایع (در نیمه راست) و

کانتورهای دما (در نیمه چپ) برای فرآیند انجماد به ازای بازههای زمانی ۱۰۰۰ ثانیهای نشان داده شدهاند. در این فرآیند، جهت پیشروی جبهه انجماد بهصورت افقی است، در حالی که در فرآیند ذوب، جهت پیشروی جبهه ذوب عمدتاً بهصورت عمودی و رو به پایین میباشد. مکانیزم رسانش گرمایی بهصورت عمود بر سطح انتقال گرما و بهصورت افقی عمل میکند و این مکانیزم عامل اصلی انتقال گرما در فرآیند انجماد است. اما در فرآیند ذوب، به دلیل اهمیت بیشتر همرفت آزاد، جبهه ذوب بهصورت عمودی حرکت میکند.

با مقایسه کانتورهای فرآیند انجماد برای دو جهت مختلف جریان سیال انتقال گرما، میتوان نتیجه گرفت که در حدود ۶۰۰۰ ثانیه اول، پس از گذشت زمان مشخصی از آغاز فرآیند انجماد، لایه جامد تشکیل شده روی لوله در حالت جریان رو به بالا دارای ضخامت نسبتاً بیشتری نسبت به حالت جریان رو به پایین است. این امر با نمودار کسر حجمی مایع در شکل ۴ ب نیز تطابق کامل دارد.



شکل ۶- کانتورهای کسر حجمی (نیمه راست) و دما (نیمه چپ) در زمانهای مختلف برای فرآیند ذوب (الف) جهت جریان رو به بالا (ب) جهت جریان رو به پایین

گرچه بررسی روند ذوب و انجماد در ارزیابی عملکرد ذخیره و تخلیه مخازن گرمایی حائز اهمیت است و بهعنوان معیاری برای سنجش فرآیند ذخیره و تخلیه انرژی گرمای نهان به شمار میآید، باید توجه داشت که هدف اصلی ذخیره و تخلیهٔ حداکثر انرژی (چه نهان و چه محسوس) در کمترین زمان ممکن است.

برای ارزیابی عملکرد سه مخزن مورد مطالعه و جهت جریان سیال انتقال گرما در نرخ ذخیره انرژی گرمایی، نمودار زمانی گرمای نهان و گرمای محسوس ذخیره شده در حین فرآیند ذوب و انجماد بهترتیب

در شکلهای ۸ و ۹ گزارش شدهاند. لازم به ذکر است که شبیه سازی ها تا پایان کامل فرآیند ذوب یا انجماد انجام شدهاند. دلیل کوتاه تر بودن نمودارهای مربوط به جهت جریان از پایین به بالا در فرآیند ذوب و از بالا به پایین در فرآیند انجماد، به سرعت بیشتر اتمام ذوب یا انجماد در این جهتها نسبت به جهتهای دیگر مربوط می شود.



نمودارهای انرژی نهان دقیقاً مشابه نمودارهای کسر حجمی گزارش شده در شکل ۴ هستند، زیرا طبق رابطه (۱۱)، انرژی نهان مستقیماً به کسر حجمی بستگی دارد. مطابق نمودارهای انرژی نهان، در فرآیند ذوب، ابتدا جهت جریان از بالا به پایین دارای نرخ ذخیرهسازی انرژی نهان بالاتری نسبت به جهت رو به بالا است. اما از زمان مشخصی به بعد، جهت جریان رو به بالا در ذخیرهسازی انرژی نهان موثرتر عمل میکند. زمانی که این تغییر روند اتفاق میافتد، به ضخامت مخزن بستگی دارد؛ هرچه ضخامت مخزن کمتر باشد، این تغییر روند زودتر رخ میدهد.

در فرآیند انجماد، جهت جریان رو به بالا دارای نرخ تخلیه بالاتری است، اما در لحظات انتهایی فرآیند تخلیه، تغییر روند اتفاق افتاده و نرخ تخلیه برای جریان رو به پایین بیشتر میشود.

با بررسی نمودارهای شکل ۹ در مورد نرخ ذخیره انرژی گرمای محسوس، میتوان نتیجه گرفت که جهت جریان رو به پایین طی فرآیند ذوب و جهت جریان رو به بالا طی فرآیند انجماد همواره دارای نرخ ذخیرهسازی بیشتری هستند. شایان ذکر است که طبق شکل ۶ الف، اختلاف نرخ ذخیرهسازی انرژی نهان توسط دو جهت مختلف

جریان قابل توجه است و با افزایش ضخامت ماده تغییرفازدهنده، این اختلاف بیشتر میشود.



شکل ۸- انرژی نهان ماده تغییرفازدهنده بر حسب زمان برای سه مخزن ذخیرهسازی در دو حالت جهت جریان سیال انتقال گرما از پایین به بالا و از بالا به پایین (الف) در حالت ذخیره (ب) در حالت تخلیه

روند زمانی ذخیره و تخلیه انرژی گرمایی کل برای هر سه مخزن در شکل ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. در مخزن ۲ که ماده تغییرفازدهندهای با ضخامت کمتر دارد، اختلاف بین دو جهت جریان بسیار کم است. گرچه از نظر نرخ ذخیرهسازی، در ابتدای فرآیند ذخیرهسازی، جهت جریان رو به پایین برتری دارد، اما در ادامه، جهت جریان رو به بالا برتری جزئی را نشان میدهد. با افزایش ضخامت ماده تغییرفازدهنده، برتری جهت جریان رو به پایین از نظر نرخ ذخیرهسازی انرژی به وضوح افزایش می یابد.

در فرآیند انجماد، جهت رو به بالا از نظر نرخ تخلیه انرژی عملکرد بهتری دارد و با افزایش ضخامت ماده تغییرفازدهنده، اختلاف بین دو جهت جریان بیشتر میشود. با این حال، در لحظات انتهایی فرآیند تخلیه کامل مخزن گرمایی، اختلاف بین دو جهت جریان تقریباً ناچیز و قابل چشمپوشی است. دانشگاه تبریز، شماره پیایی ۲۰۱۰ جلد ۴۵، شماره ۲۰ پاییز، ۲۰۴۲، صفحه ۲۰۱–۱۱۲ – پژوهشی کامل– اردلان شفیعی غازانی و امیرحسین غلام

<u>-</u>2

نشريه

مهندسي

مكانيك





شکل ۱۰- نسبت انرژی ماده تغییرفازدهنده بر انرژی کل قابل ذخیرهسازی بر حسب زمان برای سه مخزن ذخیرهسازی در دو حالت جهت جریان سیال انتقال گرما رو به بالا و رو به پایین (الف) در حالت ذخیره (ب) در حالت تخلیه

#### ۵-نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، به بررسی اثر جهت جریان سیال انتقال گرما بر عملکرد مخازن ذخیرهسازی گرمایی عمودی حاوی ماده تغییرفازدهنده هنگام فرآیندهای ذخیرهسازی و تخلیه پرداخته شد. برای این منظور سه مخزن با ضخامت ماده تغییرفازدهنده مختلف در نظر گرفته شده و فرآیندهای ذخیرهسازی (ذوب) و تخلیه (انجماد) بصورت عددی شبیهسازی شد. برای فراهم آوردن امکان مقایسه بین عملکرد گرمایی سه مخزن، مقدار یکسانی از حجم ماده تغییرفازدهنده در این پژوهش را در نظر گرفته شد. مهمترین نتایج بدست آمده در این پژوهش را میتوان به شرح زیر خلاصه نمود:

در صورت در نظر گرفتن زمان ذوب و انجماد کامل به عنوان معیار ارزیابی عملکرد مخزن گرمایی، جهت جریان رو به بالا هنگام ذوب، باعث کاهش زمان ذوب تا ۱۵/۸٪ نسبت به جهت جریان رو به پایین میشود. هر چقدر ضخامت مخزن کمتر باشد، تاثیر تغییر جهت جریان از رو به پایین به رو به بالا در کاهش زمان ذوب بیشتر میشود.

در فرآیند انجماد، با تغییر جهت جریان از رو به بالا به رو به پایین، کاهش ۱۱/۹٪ در زمان انجماد کامل مشاهده شد. نتایج نشان میدهد که هر چقدر ضخامت مخزن بیشتر باشد، تغییر جهت جریان از رو به بالا به رو به پایین در کاهش زمان انجماد کامل موثرتر است.

در صورت در نظر گرفتن نرخ ذخیره سازی یا تخلیه انرژی گرمایی به عنوان معیار ارزیابی عملکرد مخزن گرمایی، هنگام ذوب، جهت جریان رو به پایین نرخ ذخیره سازی بیشتری را بدست می دهد و با افزایش ضخامت مخزن ماده تغییرفازدهنده، اختلاف نرخ ذخیره سازی دو جهت جریان بیشتر می شود.

در فرآیند انجماد، جهت جریان رو به بالا از نظر نرخ تخلیه انرژی عملکرد بهتری از خود نشان میدهد و با افزایش ضخامت ماده تغییرفازدهنده، اثر تغییر جهت جریان از رو به پایین به رو به بالا در افزایش نرخ تخلیه انرژی بیشتر میشود. البته در لحظات انتهایی فرآیند تخلیه کامل مخزن گرمایی، اختلاف بین دو جهت جریان تقریبا ناچیز است.

با توجه به اینکه هدف از استفاده از مخازن گرمایی، ذخیرهسازی انرژی است، نرخ ذخیرهسازی و تخلیه انرژی اهمیت بیشتری نسبت به زمان ذوب و انجماد دارد. در ادبیات فن، عملکرد مخزن گرمایی حاوی ماده تغییرفازدهنده اغلب تنها از نظر زمان ذوب و انجماد ارزیابی شده است. با این حال، با ارزیابی عملکرد مخزن گرمایی از نظر نرخ ذخیره و تخلیه انرژی، توصیه میشود جهت جریان رو به پایین در هنگام ذخیرهسازی و جهت جریان رو به بالا در هنگام تخلیه انرژی استفاده شود.

#### 8- مراجع

- Soltani H, Soltani M, Karimi H, Nathwani J. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage unit using a combination of fins and rotational mechanisms. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021;179:121667.
- [2] Gautam A, Saini R. A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications. Solar Energy. 2020;207:937-56.

[17] Huang Y, Liu X. Charging and discharging enhancement of a vertical latent heat storage unit by fractal tree-shaped fins. Renewable Energy. 2021;174:199-217.

[۱۸]نعمت پور کشتلی ا، شیخ الاسلامی م، بررسی عددی اثر افزایش تعداد و

چیدمان لوله داخلی درون مبادلهکن گرمایی سه لولهای بـر رفتـار انجمـاد مواد تغییر فـاز دهنـده بـا نـانو ذرات Al2O3، مجلـه مهندسـم , مکانبـک

- [19] Kibria M, Anisur M, Mahfuz M, Saidur R, Metselaar I. A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials. Energy conversion and management. 2015;95:69-89.
- [20] Sodhi GS, Jaiswal AK, Vigneshwaran K, Muthukumar P. Investigation of charging and discharging characteristics of a horizontal conical shell and tube latent thermal energy storage device. Energy Conversion and Management. 2019;188:381-97.
- [21] Shen G, Wang X, Chan A, Cao F, Yin X. Study of the effect of tilting lateral surface angle and operating parameters on the performance of a vertical shell-and-tube latent heat energy storage system. Solar Energy. 2019;194:103-13.
- [22] Lu B, Zhang Y, Zhu J, Zhang J, Sun D. Enhancement of the charging and discharging performance of a vertical latent heat thermal energy storage unit via conical shell design. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022;185:122393.
- [23] Korawan AD, Soeparman S, Wijayanti W, Widhiyanuriyawan D. 3D numerical and experimental study on paraffin wax melting in thermal storage for the nozzleand-shell, tube-and-shell, and reducer-and-shell models. Modelling and Simulation in Engineering. 2017;2017:9590214.
- [24] Sodhi GS, Kumar V, Muthukumar P. Design assessment of a horizontal shell and tube latent heat storage system: Alternative to fin designs. Journal of Energy Storage. 2021;44:103282.
- [25] Ghazani AS, Gholamzadeh A. The effect of conical shell and converging/diverging tube on the charging performance of shell and tube latent heat thermal energy storage system. Journal of Energy Storage. 2023;65:107262.
- [26] Hasan HA, Hassoon AS. Thermal performance investigation of finned latent heat storage of shell-and-tube, shell-and-nozzle, and shell-and-reducer models. Heat Transfer. 2023;52(7):4755-73.
- [27] Guo Z, Zhou W, Liu S, Kang Z, Tan R. Effects of Geometric Parameters and Heat-Transfer Fluid Injection Direction on Enhanced Phase-Change Energy Storage in Vertical Shell-and-Tube System. Sustainability. 2023;15(17):13062.
- [28] Longeon M, Soupart A, Fourmigué J-F, Bruch A, Marty P. Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection. Applied energy. 2013;112:175-184.
- [29] Dai H, Jiang J, Wang W, Wang Y, He S, Gao M. Comparative study on melting and solidification processes of vertical shell-and-tube phase change heat exchanger with an improved conical inner tube. Applied Thermal Engineering. 2023;235:121383.
- [30] Zhang S, Pu L, Xu L, Liu R, Li Y. Melting performance analysis of phase change materials in different finned thermal energy storage. Applied Thermal Engineering. 2020;176:115425.

- [3] Chen C, Xia Q, Feng S, Liu Q. A novel solar hydrogen production system integrating high temperature electrolysis with ammonia based thermochemical energy storage. Energy Conversion and Management. 2021;237:114143.
- [4] Qu J, Zuo A, Liu H, Zhao J, Rao Z. Three-dimensional oscillating heat pipes with novel structure for latent heat thermal energy storage application. Applied Thermal Engineering. 2021;187:116574.
- [۵] گشایشی ج، ادیبی طوسی س، بررسی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با کندانسور خارجی و منبع ذخیره انرژی گرمایی، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۹، د. ۵۰، ش. ۳. ص ۲۰۳-۱۹۵.
- [۶] گچکاران آ، جدا ف، طراحی و بهینه سازی یکپارچه آب شیرین کن خورشیدی با ذخیره سازی انرژی گرمایی به کمک مواد تغییر فاز دهنده، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۸، د. ۴۹، ش. ۱، ص ۲۳۵-۲۴۴.
- [٧] رستمیان ف، اعتصامی ن، حقگو م، کنترل دمای برد الکترونیکی با بکارگیری چاه گرمایی حاوی ماده تغییر فاز دهنده استئاریک اسید، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۴، ص ۴۳۳-۴۴۱.
- [۸] اشرفی م، محمدیون ح، دیبایی م، محمدیون م، بهبود عملکرد گردآور خورشیدی و افزایش بهره وری انرژی خورشید با بکارگیری مواد تغییر فازی، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۱، ۲۹-۳۸
- [9] Zhao C, Opolot M, Liu M, Bruno F, Mancin S, Flewell-Smith R, Hooman K. Simulations of melting performance enhancement for a PCM embedded in metal periodic structures. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021;168:120853.
- [10] He F, Yan B, Zou J, Hu C, Meng X, Gao W. Experimental evaluation of the effect of perforated spiral fins on the thermal performance of latent heat storage units. Journal of Energy Storage. 2023;58:106359.
- [11] Sharifi N, Faghri A, Bergman TL, Andraka CE. Simulation of heat pipe-assisted latent heat thermal energy storage with simultaneous charging and discharging. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015;80:170-9.
- [12] Mahdavi M, Tiari S, Pawar V. A numerical study on the combined effect of dispersed nanoparticles and embedded heat pipes on melting and solidification of a shell and tube latent heat thermal energy storage system. Journal of Energy Storage. 2020;27:101086.
- [13] Iasiello M, Mameli M, Filippeschi S, Bianco N. Metal foam/PCM melting evolution analysis: Orientation and morphology effects. Applied Thermal Engineering. 2021;187: 116572.
- [14] Opolot M, Zhao C, Hooman K, editors. Heat transfer enhancement in phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar power plants. 22nd Australasian Fluid Mechanics Conference, AFMC 2020; 2020: The University of Queensland.
- [15] Zhao C, Opolot M, Liu M, Bruno F, Mancin S, Hooman K. Phase change behaviour study of PCM tanks partially filled with graphite foam. Applied Thermal Engineering. 2021;196:117313.
- [16] Hosseinizadeh S, Tan F, Moosania S. Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins. Applied Thermal Engineering. 2011;31(17-18):3827-38.