

## بررسی تاثیر عوامل هندسی بر عملکرد حرارتی یک محفظه ذخیره انرژی حاوی مواد تغییر فاز دهنده با لوله‌های ربع دایروی: مطالعه عددی دو بعدی

امیرحسین سفیدگر<sup>۱</sup>، محمد پسندیده فرد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، amirhosein.sefidgar@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، mpfard@ferdowsi.um.ac.ir

### چکیده

مصرف نیز مزید بر علت است که این نوع انرژی کمتر مورد توجه باشد. گرچه انرژی حاصل از گرمای زمین (زمین گرمایی) در فصل گرم بسیار قابل توجه است، در فصول سرد کارایی کمتری داشته و بهره‌برداری از آن مقرون به صرفه نیست. بنابراین این نوع از انرژی باید در فصول گرم بهره‌برداری و ذخیره شود و در فصول سرد از آن استفاده شود. ساخت نیروگاه‌های زمین گرمایی گران بوده و اثرات نامطلوب بسیاری دارد.

همانطور که بیان شد وابستگی به شرایط آب و هوایی نقطه ضعف مشترک همه انرژی‌های تجدید پذیر است. بنابراین گرایش به سمت ذخیره سازی حرارتی این نوع انرژی گسترش یافته است. مواد تغییر فاز دهنده موادی هستند که می‌توانند مقدار زیادی انرژی گرمایی را در طی سه مرحله در خود ذخیره و دفع نمایند. مرحله ذخیره سازی ذوب یا شارژ سیستم نامیده شده و مرحله دفع انجماد یا تخلیه نیز نامیده می‌شود [۱]. مواد تغییر فاز دهنده در انبوهی از کاربردها مورد استفاده می‌شوند که شامل مدیریت حرارتی قطعات الکترونیکی<sup>۱</sup> و کامپیوترها [۲، ۳]، خنک‌کاری باتری‌ها<sup>۲</sup> [۴، ۵]، مدیریت گرمایی صفحات فتوولتائیک/فتوولتائیک حرارتی است. همچنین همان‌طور که بیان شد محفظه‌های ذخیره انرژی گرمایی نیز از کاربردهای گسترده این مواد است. مواد تغییر فاز دهنده با نقطه ذوب پایین هم در خنک‌کاری آزاد و تهویه مطبوع در منازل و ساختمان‌های تجاری مورد استفاده قرار گرفته است. مواد تغییر فاز دهنده از نوع آلی یا از نوع غیر آلی دارای هدایت حرارتی بسیار پایینی هستند که استفاده از آن‌ها کاهش راندمان سیستم را به دنبال دارد. در دهه‌های اخیر راه‌های فراوانی به منظور بهبود شارژ و تخلیه محفظه‌های ذخیره انرژی توسط دانشمندان ارائه شده است. ترکیب نانوذرات با هدایت حرارتی بالا در ماده تغییر فاز دهنده خالص [۶]، استفاده از مواد جامد متخلخل در بین ماده تغییر فاز دهنده، استفاده از سطوح گسترده و تغییر شکل

در این مقاله عددی دو بعدی، تاثیر هندسه و شکل قرارگیری لوله داخلی یک مبدل حرارتی بر فرآیند انجماد ماده تغییر فاز دهنده به کمک روش حجم کنترل در محفظه ذخیره انرژی بررسی شد. ابتدا دو هندسه مختلف برای سطح مقطع لوله ارائه شد، مقطع ربع دایره‌ای و دایره کامل. نتایج نشان داد که لوله با مقطع ربع دایره‌ای بهتر و دارای زمان انجماد کوتاه‌تری نسبت به لوله با مقطع دایره کامل است. پس از آن چهار هندسه مختلف برای قرارگیری لوله‌ها در کنار یکدیگر بیان شد و نتایج عددی برای هر کدام از آنها ارائه گردید. افزایش زاویه چرخش همیشه مطلوب نیست و بستگی به مقادیر هندسی دیگر نیز دارد. در زاویه کمتر، هندسه با مقدار کمتر Y نتیجه بهتری دارد. یعنی زمان انجماد کوتاه‌تری دارد.

### واژه‌های کلیدی

کارایی حرارتی، مواد تغییر فاز دهنده، فرآیند انجماد، مبدل حرارتی

### مقدمه

در دهه‌های اخیر گرایش دولت‌ها به سمت انرژی‌های پاک گسترش یافته است. گرچه این انرژی‌ها نیز نقاط ضعفی دارند. انرژی خورشیدی به عنوان سرچشمه همه انرژی‌های پاک، هزینه‌های اولیه، نصب و نگهداری بالایی دارند. همچنین سیستم‌های خورشیدی به شرایط آب و هوای محل استفاده وابسته اند. هزینه بالای ذخیره سازی آن در قالب الکتروسیته به شدت زیاد است. به صورت کلی می‌توان بیان کرد سیستم‌های خورشیدی فضای بسیار زیادی را اشغال می‌کنند و چگالی انرژی کمی دارند. انرژی بادی نیز مانند انرژی خورشیدی به شرایط آب و هوایی وابسته است. آلودگی صوتی، هزینه زیاد نصب و تعمیرات، از دیگر معایب آن است. انرژی حاصل از امواج آب که از انرژی بادی نشأت می‌گیرد نیز کاملاً به شرایط محیطی و آب و هوایی وابسته است. هزینه انتقال انرژی از محل ساحل (محل تولید) تا محل

<sup>1</sup> Electronic component

<sup>2</sup> Batteries

هندسه محفظه از جمله این راه‌ها است. مبدل‌ها یا همان محفظه‌های ذخیره انرژی به کمک مواد تغییر فاز دهنده، در تابش خورشید انرژی گرمایی را در خود ذخیره کرده (ذوب/شارژ) و سپس در عدم وجود خورشید از خورد رها (تخلیه/انجماد) می‌کنند. بر مبنای طبقه‌بندی های ارائه شده، این سیستم‌ها از دیدگاه ذخیره سازی سرما و گرما، مدت زمان شارژ و تخلیه، مکانیسم ذخیره گرما (نهان و محسوس) طبقه بندی شده اند. در این قسمت به بررسی پژوهش‌های مرتبط با تغییر هندسه به منظور بهبود انتقال حرارت پرداخته می‌شود.

تاثیر تغییرات هندسه لوله حاوی سیال کاری شامل افزودن سطوح گسترده، سطوح گسترده طولی و تغییر شکل هندسه حاوی ماده تغییر فاز دهنده بر فرآیند تغییر فاز (ذوب و انجماد) آکوسن، به عنوان ماده تغییر فاز دهنده غیرآلی، توسط درزی<sup>۳</sup> و همکاران [۷] به صورت دو بعدی بررسی شد. تعداد سطح گسترش یافته ۵ الی ۲۰، درصد حجمی نانوذرات تا ۴٪ و شکل لوله‌های دایروی، بیضی افق/عمودی در پژوهش آن‌ها بررسی شده و آن‌ها بیان کردند افزایش تعداد سطوح گسترش یافته و درصد نانوذرات افزوده شده موجب بهبود قابل توجه فرآیند ذوب/انجماد شده و استفاده از لوله با شکل بیضی رفتار متفاوتی را بر فرآیند تغییر فاز می‌گذارد. در مدلی که لوله بیضوی دارای نسبت طول به عرض ۲/۵ و ۱/۵ باشد تاثیر آب بر فرآیند شارژ و تخلیه قابل توجه‌تر است.

یوان<sup>۴</sup> و همکاران [۸] در مطالعه عددی دو بعدی با در نظر گرفتن ۸۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای مرز مبدل و زاویه ۰ تا ۴۵ به عنوان زاویه سطوح گسترش یافته رفتار تغییر فاز لورییک اسید<sup>۵</sup> را در یک مبدل بررسی کردند. افزایش زاویه سطوح از ۰ الی ۴۵ درجه نشان داد تغییر زیادی بر کاهش یا افزایش زمان تغییر فاز ایجاد نمی‌شود در عین حال بیشینه کاهش زمان در زاویه صفر صورت گرفت. لازم به ذکر است در زاویه ۴۵، به دلیل دور شدن بخش جامد ماده تغییر فاز دهنده، تاثیر بر انتقال گرما کاهش می‌یابد.

در یک مطالعه عددی تاثیر شرایط مرزی متناوب و متغیر در دیواره مبدل با زمان بر دو نوع سیستم گرمایی حاوی ماده تغییر فاز دهنده توسط صادقی و همکاران [۹] با کمک نرم افزار فلوئنت انجام شد. در سیستم اول آن‌ها یک نوع ماده تغییر فاز دهنده و در سیستم دوم آن‌ها پنج نوع ماده تغییر فاز دهنده به صورت همزمان قرار داده شد. اعمال شرط تناوبی بر مبدل حرارتی حاوی یک لایه ماده تغییر فاز دهنده باعث نوسانات دما با دامنه کم شد. براساس نتیجه گیری آن‌ها استفاده از محفظه ذخیره انرژی با ۵ نوع ماده تغییر فاز دهنده فرآیند

تخلیه (انجماد) تا ۹۵٪ بهبود دارد. لازم به ذکر است بهبود انتقال حرارت سیستم شامل ۳ و ۱ لایه ماده تغییر فاز دهنده ۸۰٪ و ۶۲٪ است.

پوراکیبر و درزی [۱۰] در یک پژوهش عددی و دو بعدی نشان دادند افزایش تعداد لوله های حاوی سیال کاری موجب بهبود انتقال حرارت در حجم ثابت ماده تغییر فاز دهنده می‌شود. در پژوهش آن‌ها هندسه دایروی و بیضوی محفظه ذخیره انرژی گرمایی مبدل استفاده شد. مطالعه آن‌ها نشان داد زمان کامل تغییر فاز به ترتیب ۲۳۲ دقیقه و ۶۲ دقیقه در دو مدل بهینه کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند زمان کامل ذوب و تخلیه سیستم به ترتیب حدود ۹۲٪ و ۹۴٪ کاهش می‌یابد. حداد و ایچاکونه [۱۱] نیز با بررسی تاثیر شکل محفظه ذخیره گرمای دوزنقه‌ای شکل، تاثیر موج‌دار کردن را بر فرآیند شارژ سیستم حائل اکوسان بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد اگر چه با ایجاد موج و افزایش دامنه موج دمای ماده تغییر فاز دهنده و به تبع آن نرخ شارژ افزایش می‌یابد، تاثیر افزایش دمای مرز محسوس‌تر است. شبیه‌سازی دو بعدی عددی و مطالعه تاثیر استفاده از نانوسیال درصد حجمی ۰-۴ به عنوان سیال و ماده تغییر فاز دهنده با نانو ذرات اکسید مس در بازه ۰ تا ۷٪ در یک مبدل گرمایی پوسته لوله حاوی پارافین خالص توسط پارسزاده و دوان [۱۲] بررسی شد. آن‌ها بیان نمودند با افزایش درصد نانوسیال از ۰ تا ۴٪، میزان سرعت شارژ سیستم ۰/۴٪ افزایش یافته است. اما با افزودن نانوذرات به ماده تغییر فاز دهنده این زمان بیش از ۲٪ کاهش می‌یابد. با انتخاب روغن نارگیل و پارافین و RT-18 به عنوان مواد تغییر فاز دهنده رایج و ارزان، الجتلاه<sup>۶</sup> و همکاران [۱۳] تاثیر افزودن نانوذرات مس اکسید را بر فرآیند تغییر فاز بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند تغییر ماده تغییر فاز دهنده از RT18 به نارگیل سرعت شارژ سیستم را افزایش و افزودن نانوذرات تاثیر چندانی بر سرعت ذوب/انجماد ندارد. آن‌ها تاثیر نقطه ذوب را بیشتر از افزودن نانوذرات دانستند.

براساس آنچه بیان شد استفاده از محیط متخلخل موجب افزایش سرعت تغییر فاز و بهبود عملکرد مبدل می‌شود ولی کاهش ظرفیت کل گرمایی و هزینه زیاد را به دنبال خواهد داشت. افزودن نانوذرات فلزی/غیرفلزی به دلیل بهبود هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده خالص نیز گرچه بهبودهای را در سرعت ذوب/انجماد دارد، در پژوهش‌های آزمایشگاهی مراحل ساخت و پایدار سازی سختی را به همراه دارند. از بین همه روش بهبود، بنابراین تغییر هندسه به منظور افزایش نرخ تغییر فاز بهتر و موثرتر است. در این پژوهش عددی دو بعدی فرآیند انجماد ماده تغییر فاز دهنده در مدل جدیدی از

<sup>3</sup> Darzi

<sup>4</sup> Yaun

<sup>5</sup> Lauric acid

<sup>6</sup> Al-Jethelah

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (6)$$

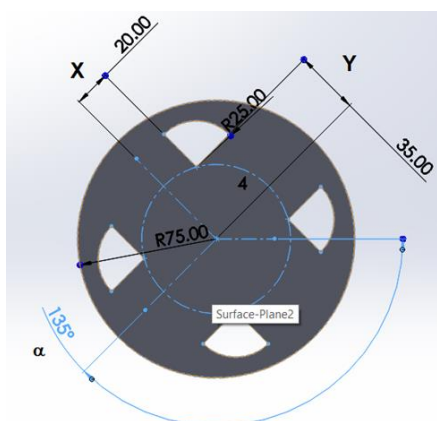
نمادهای  $u$  و  $v$  میزان سرعت در جهت  $x$  و راستای  $\theta$  است.  $\mu$ ،  $P$  و  $A$  به ترتیب میزان لزجت دینامیکی، فشار و ضریب ثابت ناحیه ماشی است. همچنین  $\rho$  میزان چگالی است.

معادله ۵ و ۶ به ترتیب میزان ذوب گرمای محسوس محاسبه می‌شود. روش‌های حل عددی، میزان ضرایب آرامش و مقادیر لازم جهت همگرایی عددی به شرح ذیل است [۱۵، ۱۶]:

- استفاده از روش SIMPLE برای گسسته سازی معادله فشار و اتصال سرعت/فشار
- روش QUICK جهت گسسته‌سازی انرژی و معادلات ناویراستوکس
- روش PRESTO برای اصلاح فشار
- ۰/۹ به عنوان ضریب آرامش برای انرژی و کسر
- ۰/۳ برای ضریب آرامش فشار
- ۱ برای ضریب آرامش
- معیار همگرایی اندازه معادله حرکت، معادله پیوستگی و معادله انرژی برابر  $10^{-5}$ ،  $10^{-5}$  و  $10^{-8}$  است.

### مشخصات هندسی

در این پژوهش لوله یک مبدل گرمایی حاوی مواد تغییر فاز دهنده برای کارایی بهتر به چهار قسمت مساوی تقسیم می‌شود. از درون هر کدام از آنها و همچنین از بیرون محفظه PCM فرض شده که جریان سیال آب با دمای ثابت عبور می‌کند. چهار هندسه مختلف قرارگیری برای این لوله داخلی در نظر گرفته می‌شود. جدول ۱ ابعاد چهار مدل مختلف قرارگیری این چهار قسمت از لوله را ارائه کرده است. پارامترهای  $X$ ،  $Y$  و  $\alpha$  مقادیری هستند که قابل تغییر می‌باشند. در بین ابعاد، مقدار  $X$  ثابت است و زاویه  $\alpha$  و مقدار  $Y$  تغییر می‌کند. شکل ۱ ابعاد مذکور را روش کل نشان می‌دهد.



شکل ۱: هندسه و ابعاد لوله با مقاطع ربع دایره‌ای.

مبدل‌های گرمایی حاوی مواد تغییر فاز دهنده با ۴ لوله داخل ربع دایره‌ای بررسی می‌شود. ابتدا هندسه این چهار لوله بررسی و بهترین هندسه انتخاب می‌شود. سپس در هندسه بهتر، تاثیر دو پارامتر هندسی (زاویه و فاصله از مرکز مبدل) بر فرآیند انجماد بررسی می‌شود.

### فرضیات و معادلات حاکم بر حوزه حل

همان‌طور که مقدمه این مقاله بیان شده عوامل هندسی لوله حاوی سیال کاری در یک محفظه ذخیره انرژی به صورت دو بعدی و در حین فرآیند انجماد بررسی می‌شود. با توجه به اینکه از روش حجم کنترل<sup>۷</sup> استفاده می‌شود، نرم‌افزار فلوئنت (نسخه ۱۸/۲) انتخاب شده است. فرضیات:

• جریان ماده تغییر فاز دهنده حین تغییر فاز آرام و نیوتونی در نظر گرفته می‌شود.

• دمای دیواره محفظه معادل دمای سیال در نظر گرفته می‌شود.

• خواص ماده تغییر فاز دهنده در حین تغییر فاز ثابت است.

معادلات حاکم بر اساس مراجع [۱۴-۱۶] به شرح ذیل است:

پیوستگی:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

اندازه حرکت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + V \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho_{npcm}} \nabla P + \frac{\mu_{npcm}}{\rho_{npcm}} \nabla^2 u + A_{mush} u \frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \chi} \quad (2)$$

اندازه حرکت:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + V \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho_{npcm}} \nabla P + \frac{\mu_{npcm}}{\rho_{npcm}} \nabla^2 v + \beta_{npcm} g (T - T_{ref}) + A_{mush} v \frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \chi} \quad (3)$$

انرژی:

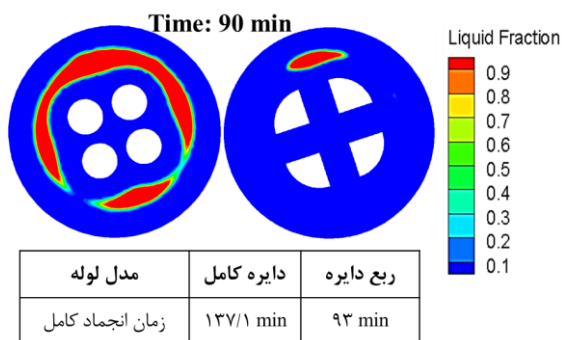
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\Delta H)}{\partial t} + \nabla \cdot (Vh) = \nabla \cdot \left( \frac{k_{npcm}}{(\rho C_p)_{npcm}} \nabla H \right) \quad (4)$$

کسر مایع  $\gamma$

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_s \\ (T - T_s) / (T_1 - T_s) & \text{if } T_s < T < T_1 \\ 1 & \text{if } T > T_1 \end{cases} \quad (5)$$

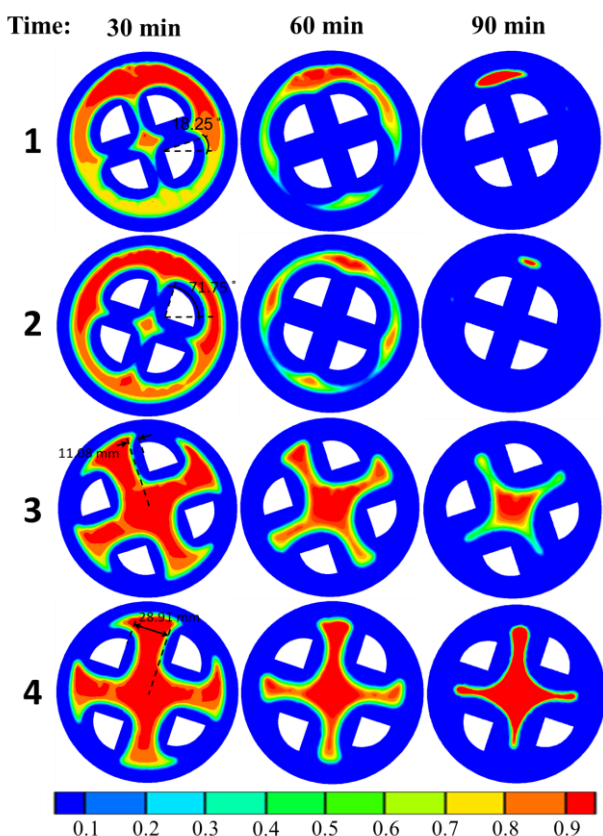
آنتالپی:

<sup>7</sup> Volume control



شکل ۳: مقدار PCM منجمد شده در لوله مقاطع ربع دایره‌ای و دایره کامل پس از ۹۰ دقیقه.

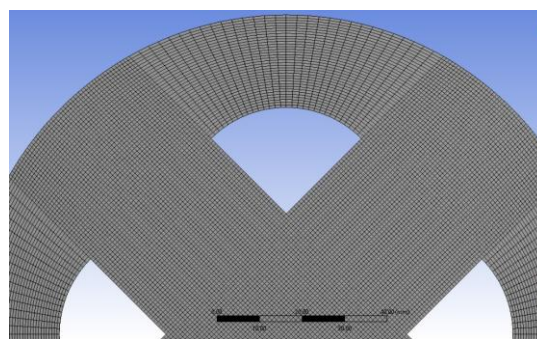
برای مقایسه چهار هندسه قرارگیری لوله‌ها، شکل ۴ فرآیند انجماد ماده تغییر فاز دهنده را در سه زمان ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه پس از شروع انجماد نشان می‌دهد. شکل ۴ نمودار دویعدی کسر مایع را به نمایش درآورده است. همانطور که مشاهده می‌شود، هندسه های ۱ و ۲ به دلیل کم بودن مقدار  $Y$  (نزدیک بودن چهار لوله به یکدیگر)، زمان کمتری نیاز دارد تا فرآیند انجماد را به اتمام برساند. علاوه بر مقادیر  $X$  و  $Y$  که در فرآیند انجماد PCM بسیار تاثیرگذار هستند، مقدار چرخش لوله‌ها (زاویه  $\alpha$ ) نیز تعیین کننده است. براساس این شکل، دلیل اختلاف قابل مشاهده در هندسه های ۱ و ۲ اثر همین چرخش میباشد. هندسه شماره ۲ با داشتن زاویه چرخش  $75/71$  درجه نسبت به هندسه شماره ۱ با زاویه  $25/18$  درجه دارای زمان انجماد کوتاه‌تری است.



جدول ۱: چهار هندسه مختلف قرارگیری لوله‌ها و ابعاد آن‌ها

شماره هندسه	$X$ (mm)	$Y$ (mm)	$\alpha$ (deg)
1	11.08	11.08	18.25
2	11.08	11.08	71.75
3	11.08	28.91	18.25
4	11.08	28.91	71.75

شکل ۲ شبکه بندی هندسه مقطع لوله را نشان می‌دهد که به صورت منظم انجام گرفته است. این شبکه بندی برای هر چهار هندسه ارائه شده جدول ۱ انجام شده است.



شکل ۲: مقطع لوله شبکه بندی شده.

### استقلال از شبکه

استقلال از شبکه برای چهار تعداد شبکه مختلف نشان داده شده در جدول ۲ انجام شده است. ملاحظه می‌شود که زمان انجماد کامل برای هندسه شماره ۲ از تعداد شبکه ۱۰۰۰۰ به بعد تغییری نکرده است. لذا این تعداد شبکه برای ادامه کار بسیار مناسب می‌باشد.

جدول ۲: استقلال از شبکه برای هندسه شماره ۲.

تعداد شبکه	زمان انجماد کامل (دقیقه)
۵۰۰۰	۱۰۰
۱۰۰۰۰	۹۹/۶۶۷
۲۰۰۰۰	۹۹/۶۶۷
۴۰۰۰۰	۹۹/۶۶۷

### نتایج

ابتدا برای مشخص کردن هندسه مقطع لوله، دو مدل اولیه پیشنهاد شد: ربع دایره و دایره کامل. برای بررسی کارایی هر کدام، با فرض مساحت ثابت برای هر کدام، مطابق شکل ۳ دیده شد که هندسه ربع دایره زمان انجماد کوتاه‌تری دارد. در واقع شکل ۳ مقدار PCM منجمد شده پس از طی زمان ۹۰ دقیقه را نشان می‌دهد. PCM در هندسه دایره کامل در  $137/1$  دقیقه و در هندسه ربع دایره حدوداً  $93$  دقیقه طول می‌کشد تا انجماد کامل برای آن صورت گیرد. بنابراین هندسه ربع دایره ای به عنوان هندسه بهتر برای مراحل بعد انتخاب شد.

شکل ۴: چهار هندسه مختلف قرارگیری لوله‌ها در سه زمان مختلف.

برای هندسه های ۳ و ۴ نیز می‌توان به همین طریق بررسی انجام داد. افزایش زاویه در هندسه‌های ۱ و ۲ نشان داد که اثر مطلوبی بر نتایج دارد. اما این افزایش زاویه همیشه مطلوب نیست. برای مثال هندسه‌های ۳ و ۴ که دارای مقادیر  $X$  و  $Y$  یکسان هستند، با بررسی مقدار زاویه آنها این موضوع برداشت می‌شود که بین این دو مورد، هندسه با زاویه بیشتر (هندسه ۴) زمان انجماد بیشتری نسبت به هندسه با زاویه کمتر (هندسه ۳) دارد. برای تعیین تاثیر اندازه  $Y$  نیز با بررسی هندسه‌های ۱ و ۳ (که مقادیر  $X$  و  $\alpha$  یکسانی دارند) دریافت می‌شود که تاثیر اندازه  $Y$  به مراتب بیشتر از زاویه  $\alpha$  بوده و زمان فرآیند انجماد را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد، به این صورت که هندسه با مقدار  $Y$  بیشتر زمان انجماد طولانی تری دارد. در نهایت هندسه با زاویه ۷۱/۷۵ و مقدار  $Y$  ۱۱/۰۸ یعنی هندسه شماره ۲ دارای بهترین عملکرد بوده و زمان کوتاه‌تری در فرآیند انجماد دارد.

#### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

- ۱- لوله با مقطع ربع دایره‌ای هندسه بهتر بوده و دارای زمان انجماد کوتاه‌تری نسبت به لوله با مقطع دایره کامل است.
- ۲- با تغییر دو پارامتر هندسی ( $X$ ,  $\alpha$ ), چهار هندسه مختلف برای قرارگیری لوله‌ها در کنار یکدیگر بیان شد و نتایج عددی برای هر کدام از آنها ارائه گردید.
- ۳- به طور کل، افزایش مقدار  $X$  در یک زاویه ثابت، سبب افزایش زمان انجماد می‌شود.
- ۴- افزایش زاویه چرخش همیشه مطلوب نیست و بستگی به مقادیر هندسی دیگر نیز دارد.
- ۵- در زاویه کمتر، هندسه با مقدار کمتر  $X$  نتیجه بهتری دارد. یعنی زمان انجماد کوتاه‌تری دارد.

#### فهرست علائم

$A$	سطح محفظه ذخیره انرژی ( $m^2$ )
$Amush$	عدد ثابت در ناحیه خمیری
$Cp$	ظرفیت حرارتی ویژه (J/kg. K)
$g$	شتاب گرانشی ( $m/s^2$ )
$h$	آنتالپی محسوس ماده تغییر فاز دهنده

$\Delta H$

$k$

$r$

$d$

$u$

$v$

$T$

علائم یونانی

$\alpha$

$\beta$

$\Gamma$

$\mu$

$\rho$

زیرنویس‌ها

*initial*

*i*

*l*

*S*

*m*

*ref*

*w*

*in*

مخفف

*PCM*

*HTF*

*TES*

(J/kg. K)

گرمای نامحسوس ماده تغییر فاز دهنده

(J/kg. K)

هدایت حرارتی (W/m. K)

شعاع مبدل (m)

قطر مبدل (m)

سرعت در جهت شعاع مبدل (m/s)

سرعت در جهت  $\theta$  مبدل (m/s)

دما (K)

مقدار ذوب (یا کسر مایع)

ضریب انبساط حرارتی ماده تغییر فاز دهنده

(1/K)

نفوذ گرمایی نامحسوس (J/kg. K)

لزجت دینامیکی (kg/m. s)

چگالی ( $kg/m^3$ )

اولیه

لوله داخلی مبدل

فاز مایع

فاز جامد

لوله میانی

مقدار مرجع

دیوار

ورودی

ماده‌ی تغییر فاز دهنده

سیال کاری

محفظه/مبدل ذخیره‌ی انرژی حرارتی

Storage Unit. Applied Thermal Engineering. 2019:114684.

[2] Farzanehnia A, Khatibi M, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M. Experimental

[1] Mahdi MS, Mahood HB, Campbell AN, Khadom AA. Experimental Study on the Melting Behavior of a Phase Change Material in a Conical Coil Latent Heat Thermal Energy

- material in a wavy trapezoidal cavity. *Journal of Molecular Liquids*. 2019;112:132.
- [12] Parsazadeh M, Duan X. Numerical and statistical study on melting of nanoparticle enhanced phase change material in a shell-and-tube thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*. 2017;111:950-60.
- [13] Al-Jethelah M, Humaira Tasnim S, Mahmud S, Dutta A. Melting of nano-PCM in an enclosed space: Scale analysis and heatline tracking. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;119:841-59.
- [14] Mahdi JM, Nsofor EC. Solidification of a PCM with nanoparticles in triplex-tube thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*. 2016;108:596-604.
- [15] Mahdi MS, Mahood HB, Mahdi JM, Khadom AA, Campbell AN. Improved PCM melting in a thermal energy storage system of double-pipe helical-coil tube. *Energy Conversion and Management*. 2020;203:112238.
- [16] Mahdi JM, Mohammed HI, Hashim ET, Talebizadehsardari P, Nsofor EC. Solidification enhancement with multiple PCMs, cascaded metal foam and nanoparticles in the shell-and-tube energy storage system. *Applied Energy*. 2020;257:113993.
- investigation of multiwall carbon nanotube/paraffin based heat sink for electronic device thermal management. *Energy Conversion and Management*. 2019;179:314-25.
- [3] Alimohammadi M, Aghli Y, Alavi ES, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M. Experimental investigation of the effects of using nano/phase change materials (NPCM) as coolant of electronic chipsets, under free and forced convection. *Applied Thermal Engineering*. 2017;111:271-9.
- [4] Safdari M, Ahmadi R, Sadeghzadeh S. Numerical investigation on PCM encapsulation shape used in the passive-active battery thermal management. *Energy*. 2020;193:116840.
- [5] Joshy N, Hajiyan M, Siddique ARM, Tasnim S, Simha H, Mahmud S. Experimental investigation of the effect of vibration on phase change material (PCM) based battery thermal management system. *Journal of Power Sources*. 2020;450:227717.
- [6] Singh RP, Kaushik SC, Rakshit D. Melting phenomenon in a finned thermal storage system with graphene nano-plates for medium temperature applications. *Energy Conversion and Management*. 2018;163:86-99.
- [7] Rabienataj Darzi AA, Jourabian M, Farhadi M. Melting and solidification of PCM enhanced by radial conductive fins and nanoparticles in cylindrical annulus. *Energy Conversion and Management*. 2016;118:253-63.
- [8] Yuan Y, Cao X, Xiang B, Du Y. Effect of installation angle of fins on melting characteristics of annular unit for latent heat thermal energy storage. *Solar Energy*. 2016;136:365-78.
- [9] Sadeghi HM, Babayan M, Chamkha A. Investigation of using multi-layer PCMs in the tubular heat exchanger with periodic heat transfer boundary condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;147:118970.
- [10] Pourakabar A, Rabienataj Darzi AA. Enhancement of phase change rate of PCM in cylindrical thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*. 2019;150:132-42.
- [11] Haddad Z, Iachachene F. Melting characteristics of organic phase change