

بررسی عددی دو بعدی تاثیر شکل لوله داخلی بر فرآیند انجماد ماده تغییر فاز دهنده به کمک روش حجم کنترل در محفظه ذخیره انرژی

امیرحسین سفیدگر^۱، محمد پسندیده فرد^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، amirhosein.sefidgar@gmail.com

^۲ استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، mpfard@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

در این پژوهش 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. در این پژوهش لوله داخلی به چهار قسمت مساوی (چهار ربع دایره) تقسیم شد. پنج هندسه با ابعاد مختلف برای این لوله داخلی در نظر گرفته شده است. فرآیند انجماد برای هندسه شماره ۱ و مقدار کسر مایع در آن در سه زمان مختلف بررسی و تعیین شد. همچنین، در یک زمان ثابت (۳۰ دقیقه پس از شروع)، کسر مایع برای پنج هندسه مذکور تحقیق و بررسی شد. هندسه شماره ۱ دارای بالاترین نرخ انجماد و در نتیجه کمترین زمان لازم برای انجماد کامل می‌باشد.

واژه های کلیدی

ماده تغییر فاز دهنده، پارافین، مبدل حرارتی، محفظه ذخیره انرژی، سیال کاری

مقدمه

در دهه‌های اخیر به دلیل معایب سوخت‌های فسیلی، تمایل به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار زیاد شده است. این انرژی‌ها شامل انرژی خورشید، باد، زمین‌گرایی، امواج آب^۱ و بيو انرژی (زیست‌انرژی) است. عدم توازن در طبیعت مهم‌ترین عیب انرژی خورشیدی به‌عنوان بزرگترین انرژی در دسترس و تجدیدپذیر است. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان باتری حرارتی می‌تواند عدم توازن را رفع کند. در حین اوج تابش نور خورشید انرژی حرارتی ذخیره (ذوب) و سپس در عدم تابش انرژی گرمایی (انجماد) خارج می‌شود. در واقع این وظیفه (دفع-جذب انرژی) توسط محفظه‌های ذخیره انرژی انجام می‌شود. مواد تغییر فاز دهنده انرژی گرمایی را به توسط

دو روش گرمای محسوس و گرمای نهان^۳ در خود ذخیره/آزاد می‌کنند [۱]. در روش اول انرژی گرمایی با افزایش دمای جسم همراه است و بدون تغییر فاز. ذخیره‌سازی در این روش تابعی از دمای جسم، ظرفیت گرمایی ویژه آن و جرم است. در روش دوم فرآیند ذخیره سازی با تغییر فاز در دمای ثابت صورت می‌گیرد. این مواد شامل آلی، غیر آلی و ترکیبی از آلی-غیرآلی است. هر یک از مواد تغییر فاز دهنده معایب و مزایایی دارند [۱]. مواد آلی دارای مزایایی شامل سازگاری خوب با محیط زیست^۴، قابلیت بازیافت، گرمای نفوذ زیاد بسیار و در دسترسی است. مواد آلی دارای معایبی شامل اشتعال پذیر بودن و رسانایی حرارتی بسیار کم است. همچنین مواد غیر آلی نیز دارای مزایایی شامل در دسترسی با قیمت کم، تغییر حجم بسیار کم هنگام ذوب و انجماد و گرمای زیاد نفوذ است. خوردگی عیب غیر آلی است. سامانه‌هایی که حاوی یک ماده تغییر فاز دهنده هستند، به دلیل هدایت حرارتی (k) بسیار پایین، کارای کمی دارند که این از سرعت کم ذوب و انجماد نشأت می‌گیرد. راه‌های افزایش سرعت ذوب و انجماد شامل ایجاد تغییر در هندسه محفظه (هدف این پژوهش)، افزودن نانوذرات فلزی-غیرفلزی [۲] و استفاده از محیط‌های متخلخل [۳] است. در این قسمت به بررسی پژوهش‌های گذشته پرداخته می‌شود.

در یک مطالعه سه‌بعدی، یک مبدل حرارتی پوسته و لوله حاوی ماده متخلخل با تخلخل ۰/۹۵ تا ۰/۸۵ توسط لیو^۵ و همکاران [۴] به منظور بهبود ذوب پارافین با نقطه ذوب ۵۸ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد با کاهش اندازه بر تعداد منافذ ماده متخلخل از ۱۰ به ۳۰، سطح مفید انتقال گرما افزایش و در نتیجه میزان ذوب پارافین افزایش می‌یابد. بررسی عددی اثر ماده متخلخل مسی و نانوذرات آلومینیوم اکسید در مرجع [۵] توسط مهدی و

³ Sensible/latent heat storage

⁴ Good compatibility

⁵ Liu

¹ Wind energy

² Wave energy

انسوفور صورت گرفت. آن‌ها بیان کردند بدون محیط متخلخل، زمان انجماد ماده تغییر فاز دهنده با دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد حدود ۴۰۳ دقیقه است. با اضافه کردن نانوذرات مورد مطالعه ۳٪ و ۸٪ حجمی، زمان به حدود ۳۷۱ و ۳۲۴ دقیقه کاهش می‌یابد. در مرحله بعد آن‌ها بیان کردند استفاده از محیط متخلخل با تخلخل ۰/۹۸ زمان را حدود ۷۴ درصد کاهش داده است. در حضور هم‌زمان محیط متخلخل و نانوذرات ۸٪ نیز زمان انجماد حدود ۷۸ درصد کاهش یافته است. گرچه استفاده از محیط متخلخل زمان ذوب را به شدت کاهش می‌دهد، اما با توجه به اشغال فضای مبدل ظرفیت حرارتی آن‌را کاهش می‌دهد.

با توجه به نقطه ضعف محیط‌های متخلخل، گرایش به سمت نانوذرات بیشتر شده است. به عنوان مثال حسین‌زاده و همکاران [۶] اثر افزودن نانوذره مس ۲٪ و ۴٪ و دمای دیواره ۵ تا ۱۵ سانتی‌گراد را بر ماده تغییر فاز دهنده با نقطه ذوب ۲۷ درجه در یک ظرف کروی شکل بررسی کرده و بیان کردند در اختلاف دمای دیواره با ماده تغییر فاز دهنده ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سرعت ذوب ۲٪ و ۴٪ به ترتیب ۵ دقیقه، ۳ دقیقه و ۲ دقیقه کاهش می‌یابد. مهدی و انسوفور [۷] در یک پژوهش عددی ارزشمند به بررسی تاثیر اضافه کردن نانوذرات آلومینیوم اکسید در درصد‌های ۳٪ تا ۸٪ در ماده تغییر فاز دهنده با نقطه ذوب ۸۲ درجه سانتی‌گراد پرداختند. آن‌ها بیان کردند زمان مورد نیاز برای دمای دیواره ۶۵ و ۷۰ درجه به ترتیب حدود ۵ و ۶/۷ ساعت است. این زمان با اضافه کردن نانوذرات آلومینیوم با درصد حجمی ۳٪، ۵٪ و ۸٪ زمان انجماد به ترتیب ۸٪، ۱۲٪ و ۱۷٪ کاهش می‌یابد. گرچه افزودن نانوذرات بهبود قابل توجهی دارد، در پژوهش‌های آزمایشگاهی پایداری نانوذره در ماده تغییر فاز دهنده سخت و غیراقتصادی است. بنابراین گرایش به سمت تغییر هندسه و افزایش سطح انتقال حرارت افزایش یافته است.

در یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی العبدی^۶ و همکاران [۸] شش مدل متفاوت از محفظه‌های ذخیره انرژی با سطوح گسترده داخلی و خارجی برای بهبود انجماد پارافین نقطه ذوب ۸۲ درجه انجام دادند. در مطالعه آن‌ها طول سطوح گسترده بین ۱۰ تا حدود ۴۸ میلی‌متر و تعداد آن بین ۴ تا ۸ متغیر بود. با انتخاب مدل بهینه، آن‌ها بیان کردند زمان انجماد کامل ۳۶ درصد کاهش دارد. سپس مت^۷ و همکاران [۹] در یک سامانه مشابه به بررسی ذوب پرداختند و بیان کردند زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده به کمک سطوح گسترده داخلی و خارجی کاهش ۶۰ دقیقه‌ای دارد. ضمن اینکه نتایج آن‌ها نشان می‌دهد استفاده از سطوح گسترده داخلی و خارجی به ترتیب

زمان کامل تغییر فاز را در حالت شارژ و تخلیه به ترتیب ۵۴ و ۵۲ دقیقه کاهش می‌دهد. فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده پارافین با نقطه ذوب ۵۰ درجه سانتی‌گراد به کمک شش مدل متفاوت هندسه مبدل حرارتی به صورت سه بعدی و عددی توسط گرزین^۸ و همکاران [۱۰] صورت گرفت. آن‌ها بیان کردند زمانی که ۸۰ درصد پارافین در لوله داخلی و ۲۰ درصد آن در لوله خارجی مبدل قرار بگیرد بهترین کارایی را دارد. گرزین و همکاران [۱۱] در مطالعه‌ای دیگر، تاثیر هندسه و اضافه کردن نانوذرات مس ۲٪ و ۴٪ را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند در مدل ۴۰ درصد پارافین در داخل مبدل، و با اضافه کردن نانوذرات مس ۲٪ و ۴٪، زمان شارژ سامانه به ترتیب ۵ و ۹ دقیقه کاهش یافته است. پوراکیب و همکاران [۱۲] از مدل تقسیم لوله حاوی سیال کاری در حجم ثابت ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله به منظور بهبود فرآیند ذوب/انجماد بهره بردند. نتایج آن‌ها نشان داد در سه مدل بهینه مبدل به ترتیب زمان شارژ و تخلیه سامانه حدود ۱۶ (۲۳۲) و ۱۷۸ (۶۲) دقیقه کاهش یافته است. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد با استفاده از محیط متخلخل زمان شارژ و تخلیه کامل به ترتیب حدود ۹۲ و ۹۴ درصد کاهش یافته است.

بر اساس آنچه بیان شد استفاده از محیط متخلخل موجب افزایش سرعت تغییر فاز و بهبود عملکرد مبدل شده و همچنین کاهش ظرفیت کل حرارتی و هزینه زیاد را به دنبال دارد. افزودن نانوذرات فلزی و غیرفلزی به دلیل بهبود هدیت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده خلص نیز گرچه بهبودهای قابل توجهی دارند، 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 است. در این پژوهش عددی و دو بعدی فرآیند انجماد ماده تغییر فاز دهنده در مدل جدیدی از مبدل‌های حرارتی حاوی مواد تغییر فاز دهنده با ۴ لوله داخل ربع دایروی بررسی می‌شود که در طی آن تاثیر پارامترهای هندسی آن بررسی می‌شود.

معادلات حاکم و فرضیات حل

در این مطالعه عددی دو بعدی که توسط نرم‌افزار انسیس فلونت با روش حجم کنترل انجام شده است، یک مبدل گرمایی حاوی مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در طی فرآیند انجماد بررسی شده و نتایج از دیدگاه کسر مایع و دما ارائه می‌شود. به منظور بررسی و مطالعه نتایج حاضر، معادلات و فرضیات حاکم بر مسئله در این بخش ارائه می‌شود. معادلات حاکم مورد استفاده در حوزه حل که توسط نرم‌افزار فلونت حل می‌شود شامل معادله پیوستگی، معادله اندازه حرکت (مومنوم) و

⁶ Al-Abidi

⁷ Mat

⁸ Gorzin

معادله انرژی است [۷, ۱۴, ۱۵]. در ذیل معادلات بیان شده به ترتیب آمده است:

$$\nabla V = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + V \cdot \nabla \cdot u = -\frac{1}{\rho_{npcm}} \nabla P + \frac{\mu_{npcm}}{\rho_{npcm}} \nabla^2 u + A_{mush} u \frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \chi} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + V \cdot \nabla \cdot v = -\frac{1}{\rho_{npcm}} \nabla P + \frac{\mu_{npcm}}{\rho_{npcm}} \nabla^2 v + \beta_{npcm} g (T - T_{ref}) + A_{mush} v \frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \chi} \quad (۳)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\Delta H)}{\partial t} + \nabla \cdot (Vh) = \nabla \cdot \left(\frac{k_{npcm}}{(\rho C_p)_{npcm}} \nabla H \right) \quad (۴)$$

به طور کلی در معادلات ۱ تا ۴، u و v سرعت ماده تغییر فاز دهنده در راستای x و در راستای y است. μ ویسکوزیته دینامیکی، P فشار حاکم و A ضریب ناحیه ماشی در حین تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده است. این ضریب که یک عدد ثابت است و با تغییرات دما و زمان ثابت می ماند، میزان میرایی را کنترل و از ایجاد خطا حین حل جلوگیری می کند. در این پژوهش براساس مقالات معتبر مقدار 10^{-6} انتخاب شده است. در روابط بالا نماد χ مقدار ثابت به منظور جلوگیری از خطای بی نهایت حاصل از تقسیم عدد بر صفر است. همچنین ρ چگالی ماده تغییر فاز دهنده است.

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_s \\ (T - T_s) / (T_1 - T_s) & \text{if } T_s < T < T_1 \\ 1 & \text{if } T > T_1 \end{cases} \quad (۵)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (۶)$$

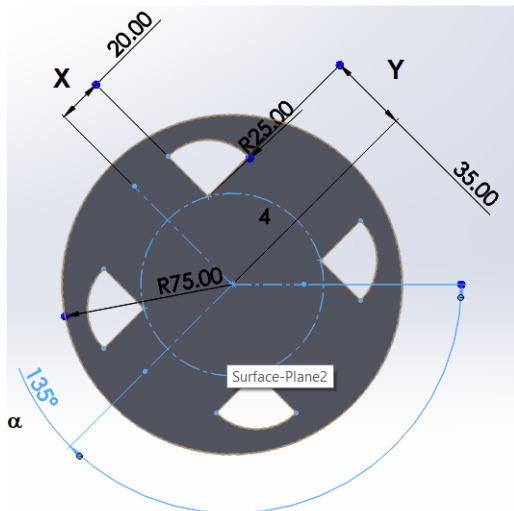
در معادله ۵، γ نیز مقدار ذوب (کسر مایع) در حین فرآیند ذوب/انجماد است. لازم به ذکر است در معادله ۶، h آنتالپی محسوس و H گرمای محسوس بوده که مقدار گرمای محسوس براساس h در دمای مرجع (۲۷۳/۱۵) تعیین می شود. در این پژوهش عددی دو بعدی از حلگر مبتنی بر فشار استفاده می شود. از روش جداسازی معادلات سیمپل برای حل همزمان سرعت و فشار استفاده می شود. کوئیک برای حل و جداسازی هر دو معادله ناوراستوکس و انرژی

استفاده می شود. روش لازم برای جداسازی و اصلاح فشار پرستو^{۱۱} است. ضرایب آرامش^{۱۲} و معیار همگرایی حل براساس مقالات معتبر بیان شده به شرح ذیل است [۱۴, ۱۵]:

- فشار = ۰/۳
- انرژی = ۰/۹
- چگالی و مقدار ذوب = ۱ و ۰/۹
- معیار همگرایی برای اندازه حرکت = 10^{-5}
- معیار همگرایی انرژی = 10^{-8}
- معیار همگرایی پیوستگی = 10^{-5}

مشخصات هندسی

در این پژوهش لوله یک مبدل گرمایی حاوی مواد تغییر فاز دهنده به چهار قسمت مساوی تقسیم می شود. شکل ۱ مقطع این لوله را نشان می دهد که به چهار قسمت مساوی تقسیم شده است و از درون هر کدام از آنها جریان سیال آب با دمای ثابت عبور می کند. هندسه مختلف برای این لوله در نظر گرفته شده است. ابعاد این ۵ هندسه در جدول ۱ ارائه شده است. در بین این ابعاد، زاویه α ثابت می ماند و فقط مقادیر X و Y تغییر می کنند.



شکل ۱: معرفی اندازه های پژوهش حاضر

جدول ۱: مشخصات

شماره هندسه	X (mm)	Y (mm)	α (deg)
1	20	5	45
2	20	35	45
3	5	20	45
4	35	20	45
5	20	20	45

¹ PRESTO

¹ Under-relaxation factors

⁹ SIMPLE

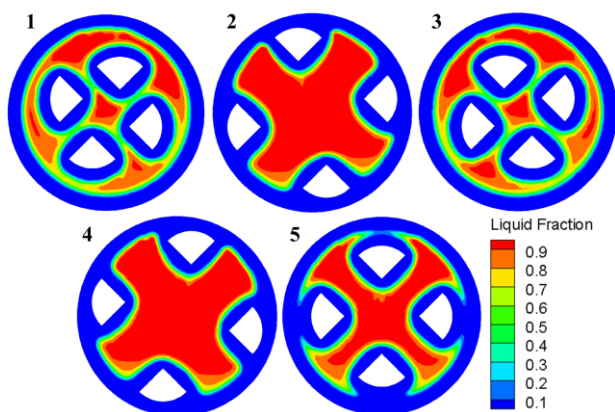
¹ QUICK

استقلال از شبکه

دقیق کسر مایع برای این پنج هندسه به ترتیب برابر است با $0/3230$ ، $0/4713$ ، $0/3308$ ، $0/4711$ و $0/3563$. مقدار کسر مایع کمتر نشان دهنده مقدار انجماد بیشتر ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد، لذا هندسه شماره ۱ به عنوان بهترین هندسه برای فرآیند انجماد انتخاب می‌شود. بهترین هندسه، هندسه‌ای است که زمان کوتاه‌تری برای انجماد کامل سپری کند.

برای مقایسه بهتر، ابتدا هندسه‌های شماره ۱ و ۲ را در نظر می‌گیریم که در آن‌ها مقادیر X و α یکسان است اما مقدار Y فرق می‌کند. مقایسه این دو نشان می‌دهد که هندسه با Y کمتر دارای نرخ انجماد بیشتر بوده و زمان کمتری نیاز دارد تا به انجماد کامل برسد. برای بررسی مقدار X هندسه‌های ۳ و ۴ مدنظر قرار داده می‌شوند که در این دو هندسه مقادیر Y و α ثابت و یکسان هستند. مشاهده می‌شود که در هندسه با مقدار X بیشتر نرخ انجماد کمتر می‌باشد و در نتیجه زمان بیشتری در حالت دوفازی سپری می‌کند. لذا، افزایش X هم مطلوب نیست و نتیجه می‌شود که هندسه با X کمتر زمان کوتاه‌تری تا فرآیند انجماد کامل سپری می‌کند.

مطلبی که در شکل ۲ دیده شد در این شکل نیز مشاهده می‌شود که لایه‌های بالاتر به دلیل چگالی کمتر دارای دمای بیشتر بوده و دیرتر منجمد می‌شوند.



شکل ۳: شکل دوبعدی مقدار PCM ذوب شده در طی فرآیند انجماد برای نمونه‌های ۱ تا ۵.

جدول ۳ به بررسی زمان انجماد کامل ماده تغییر فاز دهنده می‌پردازد. این جدول نشان می‌دهد که نرخ انجماد در هندسه‌های ۱ و ۳ بیشترین مقدار را دارد، لذا زمان کوتاه‌تری در فرآیند انجماد کامل طی می‌کند. بنابراین زمان انجماد کامل برای این دو هندسه دارای کمترین مقدار است و به ترتیب $92/83$ و 93 دقیقه می‌باشد. هندسه‌های ۲ و ۴ با زمان حدودی 306 دقیقه دارای بیشترین زمان انجماد می‌باشند. دلیل این موضوع دور بودن چهار مقطع از مرکز لوله می‌باشد. با بررسی تمام هندسه‌ها در فرآیند انجماد، می‌توان بیان

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 ۱ از تعداد شبکه 10000 به بعد تغییری نکرده است. لذا این تعداد شبکه برای ادامه کار بسیار مناسب می‌باشد.

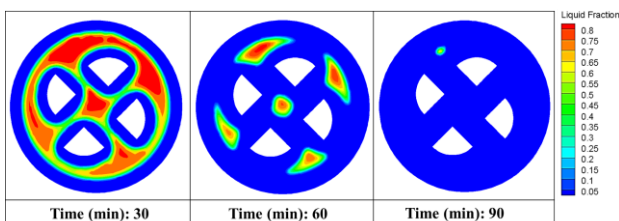
جدول ۲: استقلال از شبکه برای هندسه شماره ۱.

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

نتایج

نتایج دوبعدی در ابتدا برای هندسه شماره ۱ طی فرآیند انجماد انجام شد و شکل دوبعدی مقدار ذوب شده ماده تغییر فاز دهنده در سه زمان مختلف نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، براساس داده‌های تست، 30 دقیقه پس از شروع فرآیند انجماد کسر مایع $0/3230$ بدست می‌آید. یک ساعت پس از شروع فرآیند و یک ساعت و 30 دقیقه پس از آن نیز کسرهای مایع $0/0732$ و $0/0005$ رویت می‌شوند. در نهایت پس از زمان حدوداً $92/83$ دقیقه، انجماد کامل رخ می‌دهد.

در این سه زمان مختلف مشاهده می‌شود که قسمت‌های پایینی هندسه زودتر منجمد می‌شود و نیز قسمت‌های بالایی لوله دارای PCM مذاب بیشتری می‌باشد. دلیل این موضوع این است که چون PCM گرم‌تر چگالی کمتری دارد لذا به سمت بالا حرکت می‌کند و در نتیجه لایه‌های پایینی سردتر می‌مانند. به همین دلیل همیشه لایه‌های بالاتر دمای بیشتری داشته و دیرتر منجمد می‌شوند.



شکل ۲: شکل دوبعدی مقدار PCM ذوب شده در طی فرآیند انجماد برای نمونه شماره ۱

شکل ۳ توزیع ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده 30 دقیقه پس از شروع فرآیند را برای ۵ هندسه مختلف مذکور نشان می‌دهد. همانطور که بصورت شهودی قابل ملاحظه است، هندسه شماره ۱ و ۳ دارای بیشترین مقدار PCM انجماد شده می‌باشند. نزدیک بودن چهار لوله به مرکز دلیل انجماد بیشتر نسبت به هندسه‌های دیگر است. مقدار

کرد که هندسه شماره ۱ دارای بهترین هندسه برای فرآیند انجماد می‌باشد.

جدول ۳: زمان انجماد کامل PCM برای ۵ هندسه مختلف

شماره هندسه	۱	۲	۳	۴	۵
زمان انجماد کامل (دقیقه)	۹۲/۸۳	۳۰۶	۹۳	۳۰۶/۱۷	۱۸۰/۵

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

مهم‌ترین کارهای انجام شده در بررسی لوله یک مبدل گرمایی حاوی مواد تغییر فاز دهنده به شرح زیر می‌باشد:

- ابتدا ۵ هندسه مختلف لوله چهار قسمتی طراحی و شبکه بندی شد.
- فرآیند انجماد برای هندسه شماره ۱ و مقدار کسر مایع در آن در سه زمان مختلف بررسی و تعیین شد.
- در یک زمان ثابت (۳۰ دقیقه پس از شروع)، کسر مایع برای پنج هندسه مذکور تحقیق و بررسی شد.
- هندسه شماره ۱ دارای بالاترین نرخ انجماد و در نتیجه کمترین زمان لازم برای انجماد کامل می‌باشد.

فهرست علائم

A	سطح محفظه ذخیره انرژی (m^2)
A_{mush}	عدد ثابت در ناحیه خمیری
Cp	ظرفیت حرارتی ویژه ($J/kg \cdot K$)
g	شتاب گرانشی (m/s^2)
h	آنتالپی محسوس ماده تغییر فاز دهنده ($J/kg \cdot K$)
ΔH	گرمای نامحسوس ماده تغییر فاز دهنده ($J/kg \cdot K$)
k	هدایت حرارتی ($W/m \cdot K$)

r	شعاع مبدل (m)
d	قطر مبدل (m)
u	سرعت در جهت شعاع مبدل (m/s)
v	سرعت در جهت θ مبدل (m/s)
T	دما (K)

علائم یونانی

α	مقدار ذوب (یا کسر مایع)
β	ضریب انبساط حرارتی ماده تغییر فاز دهنده ($1/K$)
Γ	نفوذ گرمایی نامحسوس ($J/kg \cdot K$)
μ	لزجت دینامیکی ($kg/m \cdot s$)
ρ	چگالی (kg/m^3)

زیرنویس‌ها

$initial$	اولیه
i	لوله داخلی مبدل
l	فاز مایع
S	فاز جامد
m	لوله میانی
ref	مقدار مرجع
w	دیوار
in	ورودی
مخفف	
PCM	ماده‌ی تغییر فاز دهنده
HTF	سیال کاری
TES	محفظه/مبدل ذخیره‌ی انرژی حرارتی

مراجع

- [4] Liu Z, Yao Y, Wu H. Numerical modeling for solid-liquid phase change phenomena in porous media: Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage. *Applied Energy*. 2013;112:1222-32.
- [5] Mahdi JM, Nsofor EC. Solidification enhancement in a triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination. *Energy*. 2017;126:501-12.
- [6] Hosseinizadeh SF, Darzi AAR, Tan FL. Numerical investigations of unconstrained melting of nano-enhanced phase change material (NEPCM) inside a spherical

- [1] Nematpour Keshteli A, Sheikholeslami M. Nanoparticle enhanced PCM applications for intensification of thermal performance in building: A review. *Journal of Molecular Liquids*. 2019;274:516-33.
- [2] 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.
- [3] Yu C, Peng Q, Liu X, Cao P, Yao F. Role of metal foam on ice storage performance for a cold thermal energy storage (CTES) system. *Journal of Energy Storage*. 2020;28:101201.

- change material in a shell and multi-PCM-tube heat exchanger. *Journal of Energy Storage*. 2019;22:88-97.
- [12] Pourakabar A, Rabienataj Darzi AA. Enhancement of phase change rate of PCM in cylindrical thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*. 2019;150:132-42.
- [13] Haddad Z, Iachachene F. Melting characteristics of organic phase change material in a wavy trapezoidal cavity. *Journal of Molecular Liquids*. 2019:112132.
- [14] 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.
- [15] 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.
- container. *International Journal of Thermal Sciences*. 2012;51:77-83.
- [7] Mahdi JM, Nsofor EC. Solidification of a PCM with nanoparticles in triplex-tube thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*. 2016;108:596-604.
- [8] Al-Abidi AA, Mat S, Sopian K, Sulaiman MY, Mohammad AT. Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013;61:684-95.
- [9] Mat S, Al-Abidi AA, Sopian K, Sulaiman MY, Mohammad AT. Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins. *Energy Conversion and Management*. 2013;74:223-36.
- [10] Gorzin M, Hosseini MJ, Ranjbar AA, Bahrampoury R. Investigation of PCM charging for the energy saving of domestic hot water system. *Applied Thermal Engineering*. 2018;137:659-68.
- [11] Gorzin M, Hosseini MJ, Rahimi M, Bahrampoury R. Nano-enhancement of phase