



افزایش عملکرد حرارتی سیستم ذخیره‌سازی گرمای نهان با استفاده از پره‌های موج‌دار و تغییر هندسه لوله

رحمن حمید، زهرا مهردوست*

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: za.mehrdoost@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

چکیده

در این پژوهش بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان با استفاده از پره‌های موج‌دار و تغییر هندسه لوله حاوی سیال انتقال حرارت به صورت عددی بررسی شده است. سیستم مورد بررسی از نوع مبدل حرارتی پوسته و لوله بوده و پارافین RT35 به عنوان ماده تغییر فاز دهنده به کار گرفته شده است. با ثابت در نظر گرفتن سطح مقطع کل لوله و پره‌ها و همچنین حجم ماده تغییر فاز دهنده، تأثیر شکل لوله حاوی سیال انتقال حرارت و پره طراحی شده بر فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد پره‌های موج‌دار باعث تسریع فرآیند تغییر فاز در مقایسه با پره‌های مستقیم متداول می‌شوند. زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده با استفاده از پره موج‌دار ۹/۳۳٪ در مقایسه با پره مستقیم کاهش می‌یابد. تغییر هندسه لوله حاوی سیال انتقال حرارت از دایره‌ای به شکل گلبرگ برای بهبود بیشتر عملکرد حرارتی سیستم ذخیره انرژی گرمای نهان پیشنهاد شده است. سرعت ذوب ماده تغییر فاز دهنده با افزایش تعداد گلبرگ‌ها افزایش می‌یابد. زمان ذوب کامل برای لوله با هفت گلبرگ تا ۶۶/۷٪ در مقایسه با لوله دایره‌ای با پره‌های موج‌دار و ۶۹/۸٪ نسبت به حالت مینا با پره‌های مستقیم کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: ماده تغییر فاز دهنده، ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان، پره موج‌دار، انتقال حرارت.

مقدمه

سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان به دلیل ظرفیت بالای ذخیره‌سازی انرژی یک فناوری امیدوار کننده برای اصلاح عدم تعادل بین عرضه و تقاضای انرژی است [۱-۳]. مواد تغییر فاز دهنده به عنوان محیط ذخیره انرژی در این سیستم‌ها استفاده می‌شوند که در آن‌ها مقدار زیادی انرژی در طول فرآیند تغییر فاز ذخیره و آزاد می‌شود [۴-۶]. در میان انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان، نوع مبدل پوسته و لوله به دلیل عملکرد حرارتی بالا، فشردگی و فناوری قابل انطباق بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۷]. مهم‌ترین چالش سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان، رسانایی گرمایی ضعیف مواد تغییر فاز دهنده است که منجر به کاهش راندمان شارژ و تخلیه در این سیستم‌ها می‌شود [۸]. روش‌های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت در این سیستم‌ها استفاده می‌شود، مانند به‌کارگیری پره‌ها [۹ و ۱۰]، استفاده از فوم‌های فلزی [۱۱]، افزودن نانوذرات به ماده تغییر فاز دهنده [۱۲-۱۴]، تغییر هندسه لوله‌ها [۱۵ و ۱۶] و استفاده از سیستم‌های چند لوله‌ای [۱۷]. ساختارهای مختلفی از پره‌ها به عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای افزایش عملکرد حرارتی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان پیشنهاد شده است. راتود و همکاران [۱۸] تأثیر استفاده از پره‌های طولی بر انتقال حرارت ماده تغییر فاز دهنده در یک سیستم پوسته و لوله ذخیره‌ساز انرژی گرمای نهان به صورت تجربی بررسی نمودند و نشان دادند با استفاده از سه پره، زمان انجماد و ذوب به ترتیب ۴۳/۶٪ و ۲۵/۴٪ کاهش می‌یابد. پارسازاده و همکاران [۱۹] اثر پره‌های صفحه دایره‌ای را بر فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در واحد ذخیره انرژی پوسته و لوله مطالعه کردند و نتیجه گرفتند کمترین زمان ذوب کامل برای پره با زاویه ۳۵ درجه بدست می‌آید. آلی و همکاران [۲۰] فرآیند انجماد ماده تغییر فاز دهنده را با استفاده از پره‌های طولی موج‌دار بررسی کردند. نتایج نشان داد پره‌های طولی موج‌دار پیشنهاد شده زمان کل تخلیه در سیستم را تا ۳۵٪ در مقایسه با پره‌های مستقیم کاهش می‌دهد. لیو و همکاران [۲۱] از یک پره طولی مثلثی در واحد ذخیره‌سازی انرژی گرمای

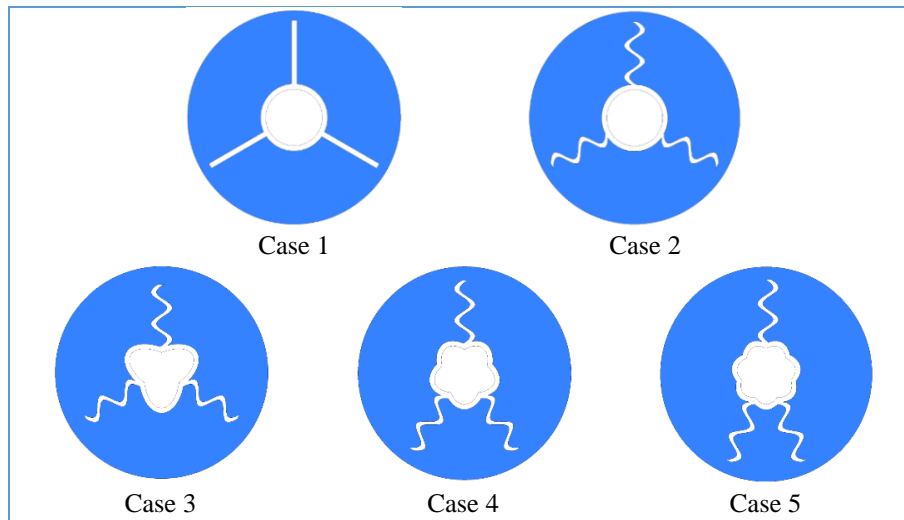


نهان استفاده کردند و نتیجه گرفتند زمان انجماد در مقایسه با پره‌های مستطیلی متداول $38/30\%$ کاهش می‌یابد. هوانگ و یائو [۲۲] یک پره طولی - دوزنقه‌ای به منظور بهبود فرآیند انجماد پیشنهاد کردند. پره پیشنهادی ترکیبی از پره‌های طولی و دوزنقه‌ای بود که بر اساس دنباله فیبوناچی توزیع شدند. سه آرایش مختلف از پره‌های پیشنهادی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد زمان انجماد ماده تغییر فزاینده با استفاده از پره‌های اصلاح شده با دنباله فیبوناچی $45/28\%$ در مقایسه با پره‌های مستطیلی کاهش می‌یابد. صفری و همکاران [۲۳] تأثیر استفاده از پره‌های مستقیم و شاخه‌ای را بر سرعت ذوب ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله به صورت تجربی و عددی مطالعه کردند. آن‌ها دریافته‌اند پره‌های شاخه‌ای به دلیل سطح انتقال حرارت بزرگتر و انحراف جریان‌های همرفتی، عملکرد بهتری نسبت به پره‌های مستقیم دارند. لیو و همکاران [۲۴] یک پره نردبانی شکل برای بهبود فرآیند تغییر فاز در سیستم ذخیره انرژی طراحی کردند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که پره‌های نردبانی زمان کل ذوب را $52/2\%$ در مقایسه با پره‌های مستقیم کاهش می‌دهند. هوانگ و همکاران [۲۵] از پره‌های درختی شکل برای بهبود راندمان حرارتی سیستم ذخیره انرژی چند لوله‌ای استفاده نمودند و نتیجه گرفتند زمان ذوب و انجماد کامل با استفاده از این پره‌ها در مقایسه با سیستم‌های متداول به ترتیب 29% و 22% کاهش می‌یابد. خدر و همکاران [۲۶] تأثیر استفاده از پره‌های قوسی شکل را بر بهبود فرآیند تغییر فاز یک سیستم ذخیره پوسته و لوله به صورت عددی مطالعه نمودند و دریافته‌اند زمان ذوب کامل تا 58% بهبود می‌یابد. بوژلین و همکاران [۲۷] فرآیند ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده را در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای افقی مجهز به پره‌های مستقیم و تابیده بررسی کردند. نتایج نشان داد زمان ذوب و انجماد برای پره‌های تابیده به ترتیب 10% و 14% نسبت به پره‌های مستقیم، و 15% و 40% نسبت به حالت بدون پره کاهش می‌یابد.

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد مطالعات بسیاری به منظور افزایش عملکرد حرارتی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان با استفاده از انواع پره‌ها در محیط ماده تغییر فاز دهنده انجام شده است. با این وجود، بهبود فرآیند انتقال حرارت در واحدهای ذخیره‌سازی انرژی با طراحی پره‌های جدید و نوآورانه به بررسی و مطالعه بیشتری نیاز دارد. در این پژوهش به منظور افزایش راندمان تغییر فاز در سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان، پره‌های موج‌دار طراحی شده و عملکرد حرارتی آن‌ها با پره‌های مستقیم متداول مقایسه شده است. همچنین، تأثیر تغییر هندسه لوله حاوی سیال انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. لوله‌های گلبرگ شکل در چند حالت مختلف به منظور بررسی تغییر طراحی لوله بر فرآیند ذوب ماده تغییر فزاینده پیشنهاد شده و با لوله دایره‌ای مقایسه شده است.

مدل هندسی

هندسه مورد بررسی در این پژوهش یک مبدل حرارتی پوسته و لوله برای ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان است. آب گرم به عنوان سیال انتقال حرارت درون لوله جریان دارد و ماده تغییر فزاینده فضای حلقوی درون پوسته را پر می‌کند. قطر لوله خارجی 121 میلی‌متر، قطر لوله داخلی $32/1$ میلی‌متر و مساحت هر پره 108 میلی‌متر مربع است. جنس لوله و پره‌ها، مس در نظر گرفته شده است. پارافین RT35 به عنوان ماده تغییر فزاینده انتخاب شده است و خواص ترموفیزیکی آن در جدول (۱) آورده شده است [۲۸]. شکل (۱) پنج حالت مختلف در نظر گرفته شده برای تحلیل را نشان می‌دهد. حالت اول با سه پره مستقیم متصل شده به سطح بیرونی لوله حاوی سیال انتقال حرارت، به عنوان حالت پایه انتخاب شده است و به منظور بررسی اثر شکل پره بر فرآیند ذوب ماده تغییر فزاینده، با حالت دوم که دارای پره‌های موج‌دار است مقایسه می‌شود. تأثیر هندسه لوله حاوی سیال انتقال حرارت در حالت‌های سه تا پنج مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی اثر تغییر شکل لوله بر فرآیند تغییر فاز، لوله‌های گلبرگی شکل طراحی شده و با لوله دایره‌ای مقایسه می‌شوند.



شکل ۱: شماتیک حالت‌های هندسی مختلف

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فازدهنده RT35 [۲۸]

خاصیت	نماد	مقدار	واحد
دمای انجماد	T_s	۳۰۲	K
دمای ذوب	T_l	۳۰۸	K
چگالی (جامد)	ρ_s	۷۶۰	$(kg.m^{-3})$
چگالی (مایع)	ρ_l	۸۸۰	$(kg.m^{-3})$
گرمای ویژه در فشار ثابت	C_p	۲۰۰۰	$(J.kg.K^{-1})$
ضریب رسانش حرارتی	k	۰/۲	$(W.mK^{-1})$
ویسکوزیته دینامیکی	μ	۰/۰۲۳	$(kg.m^{-1}s^{-1})$
گرمای نهان ذوب	L_f	۱۷۰۰۰۰	$(J.kg^{-1})$

معادلات حاکم

برای مدل‌سازی فرآیند تغییر فاز از روش آنتالپی-تخلخل استفاده شده است. در این روش دامنه محاسباتی به صورت یک محیط متخلخل مدل‌سازی می‌گردد که مقدار تخلخل در آن برابر با کسر مایع است که از صفر تا یک در ناحیه خمیری تغییر می‌کند. جریان گذرا، تراکم‌ناپذیر و آرام ماده تغییر فاز دهنده توسط معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی توصیف می‌شود [۲۹]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \rho \beta (T - T_{ref}) g_i + S_i \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3)$$



در معادلات فوق، u_i سرعت ماده تغییر فازدهنده، ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیکی، p فشار، g_i شتاب گرانش و H آنتالپی کل است. روش آنتالپی - تخلخل به طور صریح جبهه ذوب را ردیابی نمی‌کند، بلکه کسر مایع که بر اساس تعادل آنتالپی محاسبه می‌شود، برای ردیابی سطح مشترک جامد و مایع استفاده می‌شود. در طی فرآیند تغییر فاز سه ناحیه متمایز در نظر گرفته می‌شود: ناحیه جامد، ناحیه مایع و ناحیه خمیری که در آن کسر مایع از صفر تا یک تغییر می‌کند. S_i در معادله مومنتوم برای شبیه‌سازی اثر تغییر فاز در فرآیند انتقال حرارت جابجایی اضافه شده است و به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۰]:

$$S_i = A_{mush} \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + \varepsilon} u_i \quad (4)$$

در رابطه فوق، λ کسر مایع و A_{mush} ثابت ناحیه خمیری است که از 10^4 تا 10^7 تغییر می‌کند. در این پژوهش ثابت ناحیه خمیری 10^5 در نظر گرفته شده است. ε عددی کوچکتر از $0/001$ برای جلوگیری از صفر شدن مخرج در کسر حجمی صفر است.

آنتالپی کل به صورت مجموع آنتالپی نهان و محسوس محاسبه می‌شود:

$$H = h + \Delta H \quad (5)$$

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

$$\Delta H = \lambda L_f \quad (7)$$

در معادلات فوق، C_p ظرفیت گرمایی، h_{ref} آنتالپی مرجع در دمای مرجع و L_f گرمای نهان ماده تغییر فازدهنده است. کسر حجمی λ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \text{if } T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{if } T_s < T < T_l \\ 1 & \text{if } T \geq T_l \end{cases} \quad (8)$$

که در آن T_s و T_l دمای انجماد و ذوب ماده تغییر فاز دهنده را نشان می‌دهند.

شرایط مرزی و روش حل عددی

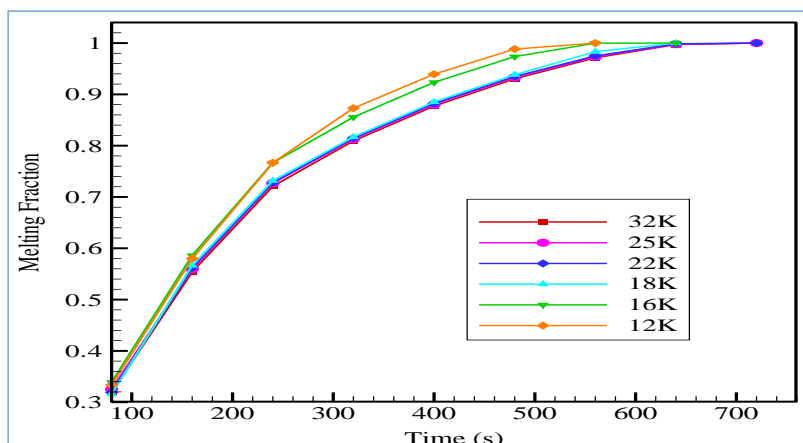
دمای اولیه سیستم 300 درجه کلوین تنظیم شده است. دمای ثابت 358 درجه کلوین که بالاتر از دمای ذوب ماده تغییر فازدهنده است، برای دیواره لوله داخلی حاوی سیال انتقال حرارت اعمال شده است. دیواره خارجی مبدل حرارتی به صورت آدیاباتیک و شرط عدم لغزش در مرزها در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی جریان درون ماده تغییر فازدهنده به صورت دوبعدی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام شده است. برای حل معادلات حاکم، از حل گر فشار محور گذرا استفاده شده است. طرح تفکیک کوئیک برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و انرژی به کار گرفته شده است. برای کوپل فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. معادلات تصحیح فشار با استفاده از طرح پرس تو حل شده است. مقادیر ضرایب تخفیف معادلات فشار، مومنتوم، انرژی و کسر مایع به ترتیب $0/3$ ، $0/7$ ، 1 و $0/9$ تنظیم شده است.

مطالعه شبکه، گام زمانی و اعتبارسنجی

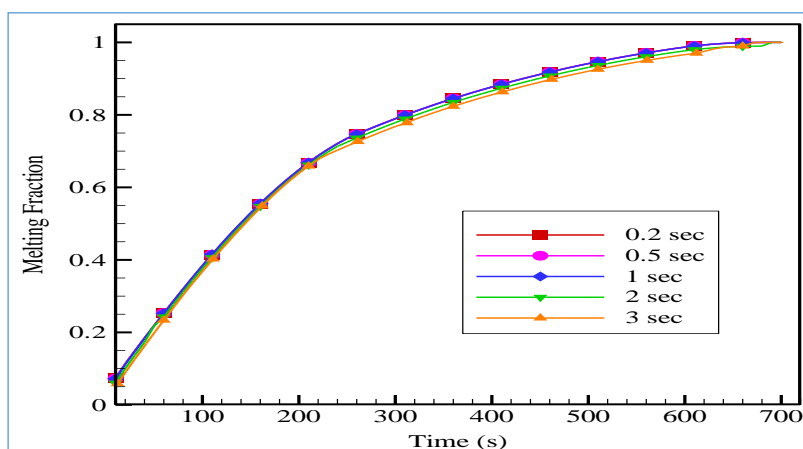
به منظور بررسی استقلال حل عددی از اندازه شبکه، کسر مایع در زمان‌های مختلف برای شش شبکه بررسی شده است. شبکه تولید شده از نوع بی‌سازمان است. شکل (۲) نمودار کسر مایع را برای شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، از شبکه چهارم به بعد تغییر قابل ملاحظه‌ای در کسر مایع مشاهده نمی‌شود. بنابراین شبکه چهارم با تعداد 22526 سلول انتخاب شده است. بررسی استقلال از گام زمانی جهت محاسبه دقت نتایج از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شکل (۳)



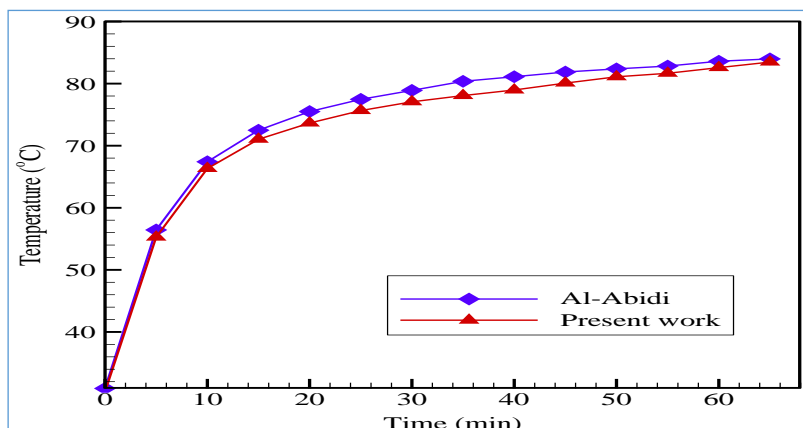
نمودار کسر مایع برای پنج گام زمانی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار کسر حجمی مشاهده می‌شود که نتایج پس از گام زمانی ۰/۵ ثانیه تغییر نخواهند کرد. بنابراین گام زمانی ۰/۵ ثانیه برای انجام شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شده است. برای اعتبارسنجی حل عددی ماده تغییر فازدهنده، نتایج شبیه‌سازی عددی با کار تجربی العبیدی و همکاران [۱] مقایسه شده است که در آن، فرآیند ذوب ماده تغییر فازدهنده RT82 در یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای با پره‌های مستقیم بررسی شده است. شکل (۴) تغییرات دمای متوسط ماده تغییر فازدهنده بر حسب زمان بدست آمده از شبیه‌سازی عددی را با نتایج تجربی العبیدی و همکاران مقایسه می‌کند. بیشترین مقدار خطا کمتر از ۳ درصد است.



شکل ۲: نمودار کسر مایع برای شبکه‌های مختلف



شکل ۳: نمودار کسر مایع برای گام‌های زمانی مختلف



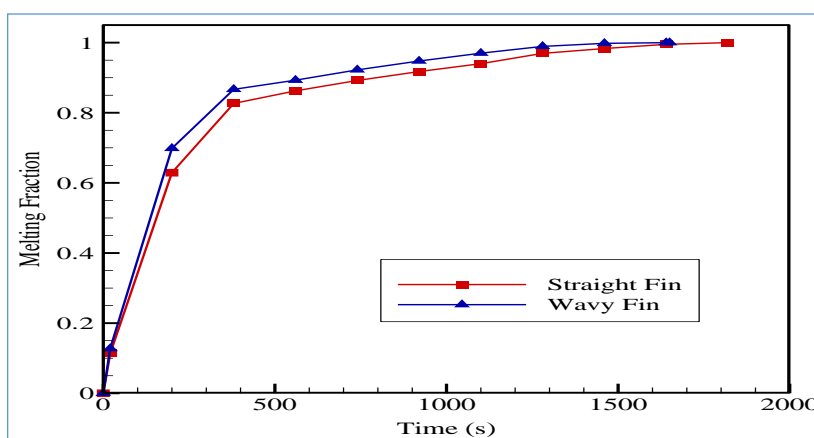
شکل ۴: مقایسه شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی مرجع [۱]



نتایج شبیه‌سازی عددی

بررسی اثر شکل پره بر فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده

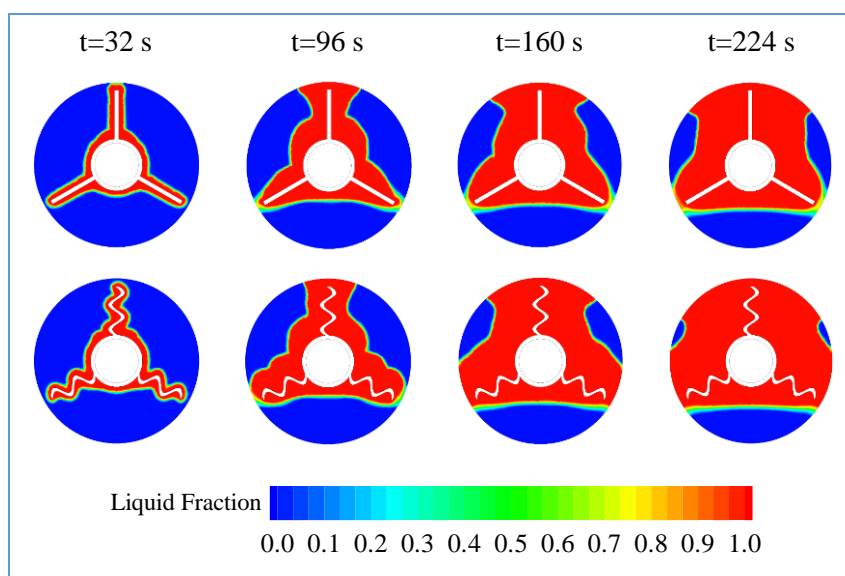
در این بخش تأثیر شکل پره بر فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده بررسی شده است. در حالت اول، سه پره مستقیم به سطح خارجی لوله حاوی سیال انتقال حرارت متصل شده است. در حالت دوم، پره پیشنهادی در این پژوهش که هندسه موج دار دارد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در شکل (۵) تغییرات کسر مایع ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان برای دو نوع پره نشان داده شده است. اگرچه در ابتدای فرآیند ذوب کسر مایع برای هر دو نوع پره به سرعت افزایش می‌یابد، پره موج دار نرخ ذوب سریع‌تری را نشان می‌دهد. زیرا علیرغم ثابت بودن سطح مقطع کل برای هر دو نوع پره، پره موج دار سطح انتقال حرارت بزرگتری نسبت به پره مستقیم دارد. زمان کل ذوب ماده تغییر فاز دهنده با استفاده از پره‌های موج دار نسبت به پره های مستقیم، ۹/۳۳٪ کاهش یافته است.



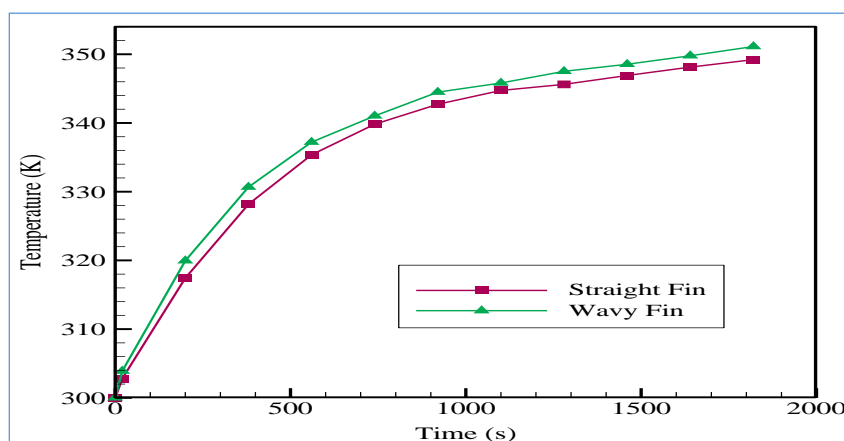
شکل ۵: تغییرات زمانی کسر مایع برای شکل‌های مختلف پره

کانتورهای کسر مایع برای دو نوع پره در زمان‌های مختلف در شکل (۶) نمایش داده شده است. در گام اولیه فرآیند ذوب، ماده تغییر فاز دهنده جامد در مجاورت دیواره‌های لوله پره‌دار با جذب مستقیم گرما ذوب می‌شود و یک لایه مایع نازک در اطراف دیواره لوله و پره‌ها تشکیل می‌شود. در مرحله اولیه، انتقال حرارت هدایت مکانیزم غالب است و اثر انتقال حرارت جابجایی ناچیز است. با گذشت زمان، حجم ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده افزایش می‌یابد و انتقال حرارت جابجایی به مکانیزم غالب انتقال حرارت تبدیل می‌شود. با ادامه فرآیند ذوب و تسریع انتقال حرارت توسط جابجایی، ماده تغییر فاز دهنده مذاب به دلیل اثرات شناوری به سمت بالا حرکت می‌کند. در آخرین مرحله، ناحیه بالایی پوسته توسط ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده، پر شده است و مقدار کمی از ماده تغییر فاز دهنده جامد در ناحیه پایین پوسته باقی می‌ماند که به آرامی توسط مکانیزم هدایت ذوب می‌شود. همانطور که می‌شود، فرآیند ذوب در حالت دوم با پره‌های موج دار سریعتر از حالت اول با پره های مستقیم انجام می‌شود.

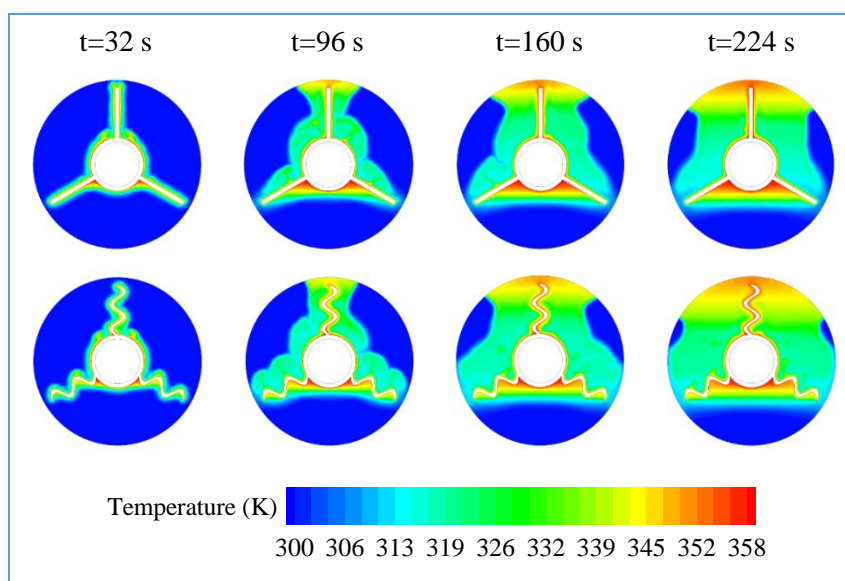
شکل (۷) تغییرات دمای متوسط ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان را برای دو نوع پره نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود از زمان شروع فرآیند ذوب، حالت دوم با پره‌های موج دار دارای دمای متوسط بالاتری است. کانتورهای دمای ماده تغییر فاز دهنده برای دو نوع پره در زمان‌های مختلف در شکل (۸) نمایش داده شده است. به دلیل توزیع پره‌های متصل به لوله حاوی سیال انتقال حرارت، دمای ماده تغییر فاز دهنده در نزدیکی پره‌ها افزایش یافته و به تدریج در فضای پوسته گسترش می‌یابد. با گذشت زمان، ماده تغییر فاز دهنده مذاب به سمت بالای پوسته حرکت می‌کند که منجر به افزایش دما در بالای پره‌ها می‌شود. مقایسه کانتورها نشان می‌دهد حجم ماده تغییر فاز دهنده جامد برای حالت دوم با پره‌های موج دار به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت در مقایسه با حالت اول کمتر است. بنابراین، پره‌های موج دار برای بررسی تأثیر شکل لوله حاوی سیال انتقال حرارت در بخش بعد در نظر گرفته شده است.



شکل ۶: کانتور کسر مایع برای شکل‌های مختلف پره



شکل ۷: تغییرات زمانی دمای متوسط برای شکل‌های مختلف پره

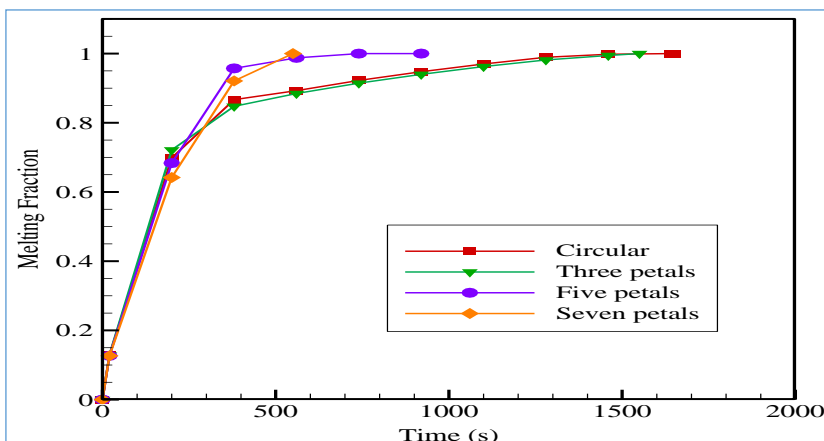


شکل ۸: کانتور دما برای شکل‌های مختلف پره



بررسی اثر شکل لوله سیال انتقال حرارت بر فرآیند ذوب ماده تغییر فازدهنده

به منظور بررسی اثر تغییر طراحی لوله حاوی سیال انتقال حرارت بر فرآیند ذوب، لوله‌های به شکل گلبرگ پیشنهاد شده و با لوله دایره‌ای مقایسه شده‌اند. تعداد گلبرگ‌ها در سه حالت سه، پنج و هفت گلبرگ در نظر گرفته شده است و حجم ماده تغییر فازدهنده در همه حالت‌ها یکسان است. تغییرات کسر مایع بر حسب زمان در چهار حالت مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد لوله‌های به شکل گلبرگ در مقایسه با لوله دایره‌ای، کسر مایع بالاتری دارند. با افزایش تعداد گلبرگ‌ها، سطح انتقال حرارت افزایش می‌یابد و منجر به تسریع فرآیند ذوب می‌شود.



شکل ۹: تغییرات زمانی کسر مایع برای هندسه‌های مختلف لوله

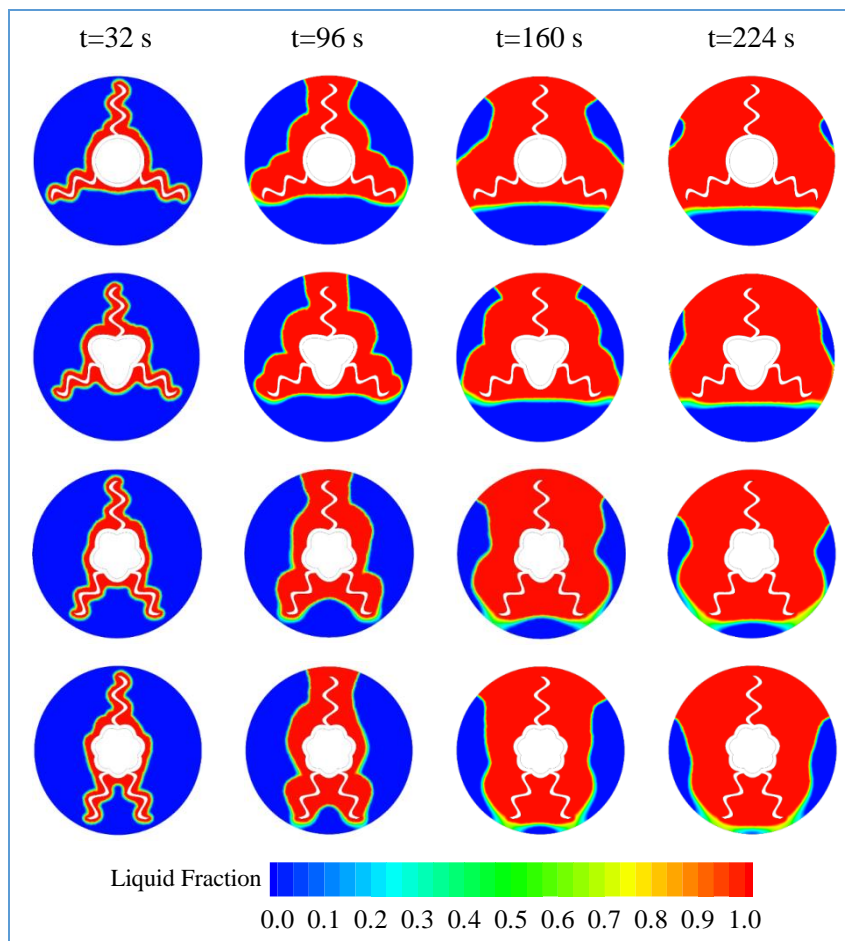
شکل (۱۰) کانتورهای کسر مایع را برای لوله دایره‌ای و لوله‌های گلبرگی شکل نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد حجم ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده در لوله‌های اصلاح شده به شکل گلبرگ در مقایسه با لوله دایره‌ای شروع به افزایش می‌کند. در طول فرآیند تغییر فاز، ناحیه مذاب در لوله دایره‌ای کندتر از لوله‌های اصلاح شده پیشروی می‌کند. کانتورهای کسر مایع نشان می‌دهند سرعت فرآیند ذوب با افزایش تعداد گلبرگ‌ها افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود، سرعت ذوب برای لوله با هفت گلبرگ به دلیل سطح تماس بزرگتر بین لوله و ماده تغییر فازدهنده نسبت به سایر حالت‌ها بیشتر است. در مراحل پایانی فرآیند تغییر فاز، در حالت لوله با هفت گلبرگ حجم قابل توجهی از ماده تغییر فازدهنده ذوب شده است، در حالی که ناحیه پایین پوسته با لوله دایره‌ای حاوی مقدار بیشتری از ماده تغییر فازدهنده جامد است.

در شکل (۱۱) تغییرات دمای متوسط ماده تغییر فازدهنده بر حسب زمان برای لوله‌های گلبرگی شکل با لوله دایره‌ای مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دمای متوسط با افزایش تعداد گلبرگ‌ها افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش سطح انتقال حرارت، گرمای بیشتری به ماده تغییر فازدهنده انتقال یافته و فرآیند ذوب سریعتر انجام می‌شود. در حالت لوله با هفت گلبرگ، زمان ذوب کامل $66/7\%$ در مقایسه با لوله دایره‌ای کاهش می‌یابد. کانتورهای دما در زمان‌های مختلف در شکل (۱۲) نشان داده شده است. دمای ماده تغییر فاز دهنده در مجاورت لوله حاوی سیال انتقال حرارت و پره‌ها به سرعت افزایش می‌یابد در حالی که در نواحی دورتر، افزایش دما کندتر است. با توجه به کانتورها، نرخ انتقال حرارت در لوله‌های گلبرگی شکل بیشتر از لوله دایره‌ای است. همه حالت‌ها با لوله اصلاح شده نرخ افزایش دمای متوسط سریعتر و توزیع دمای یکنواخت‌تری دارند که به دلیل سطح انتقال حرارت بیشتر است و این اثر با افزایش تعداد گلبرگ‌ها، افزایش می‌یابد. در مراحل پایانی فرآیند ذوب، دمای ماده تغییر فازدهنده در ناحیه پایینی پوسته برای لوله با هفت گلبرگ بیشتر است.

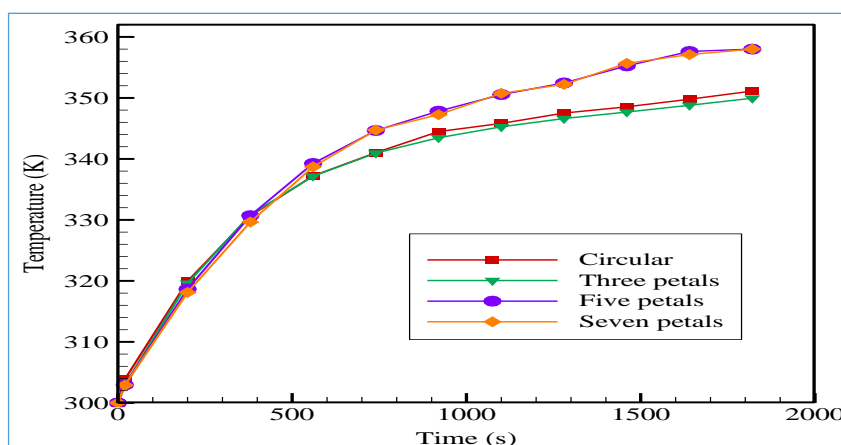
شکل (۱۳) مقایسه زمان ذوب کامل را برای همه حالت‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن حالت اول با لوله دایره‌ای و پره‌های مستقیم به عنوان حالت مبنا، درصد کاهش زمان کل ذوب برای هر حالت مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از پره‌های موج‌دار باعث کاهش زمان ذوب می‌شود. زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده در سیستم ذخیره انرژی گرمای نهان با لوله دایره‌ای و با استفاده از پره موج‌دار $9/33\%$ نسبت به پره مستقیم کاهش یافته است. همچنین،



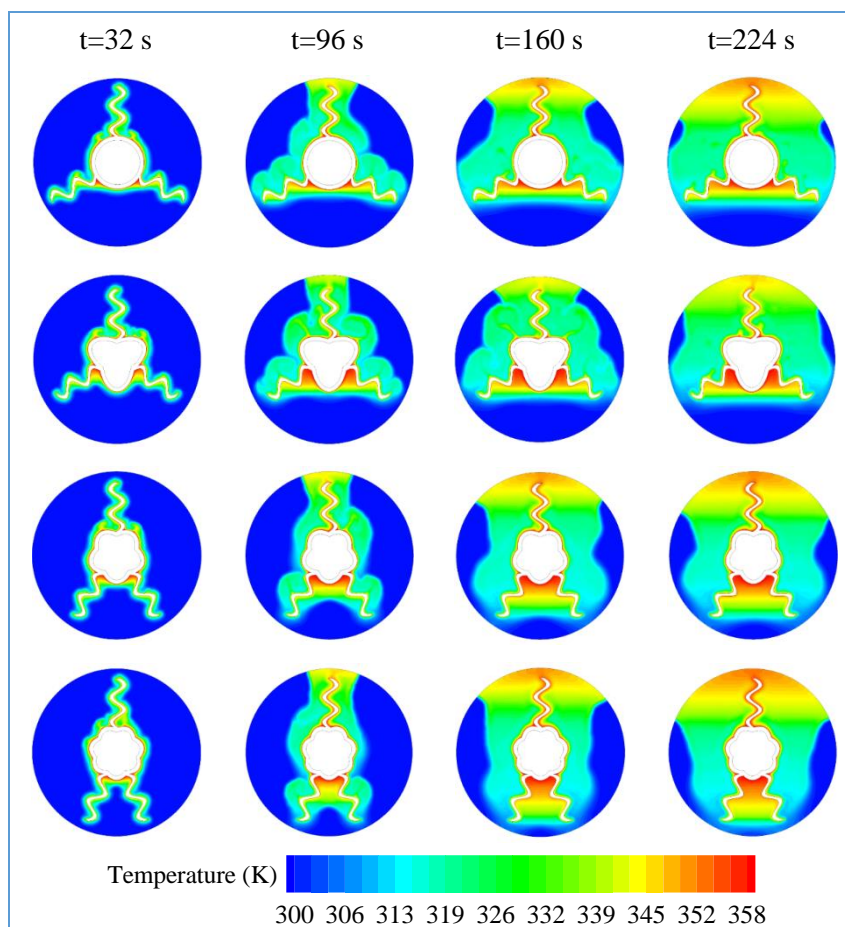
زمان ذوب در همه حالت‌ها با لوله گلبرگی شکل نسبت به لوله دایره‌ای کاهش یافته است. کمترین زمان ذوب کامل برای حالت ۵ با هفت گلبرگ مشاهده شد که ۶۹/۸٪ کمتر از حالت مینا است.



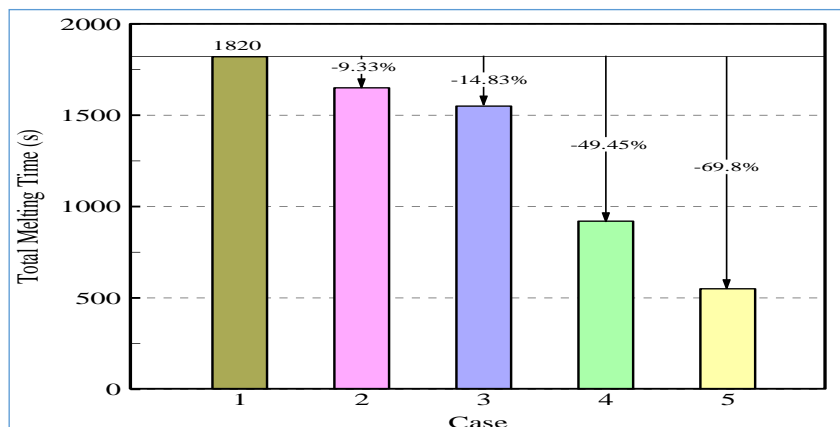
شکل ۱۰: کانتور کسر مایع برای هندسه‌های مختلف لوله



شکل ۱۱: تغییرات زمانی دمای متوسط برای هندسه‌های مختلف لوله



شکل ۱۲: کانتور دما برای هندسه‌های مختلف لوله



شکل ۱۳: زمان ذوب کامل برای حالت‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در این پژوهش افزایش عملکرد حرارتی سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی نهان با استفاده از پره‌های موج‌دار و تغییر هندسه لوله حاوی سیال انتقال حرارت با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. با ثابت در نظر گرفتن سطح مقطع کل لوله و پره‌ها و همچنین حجم ماده تغییر فاز دهنده، پنج حالت مختلف شبیه‌سازی شده است. ابتدا تأثیر شکل پره بر فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده بررسی شد. در مقایسه با پره‌های مستقیم متداول به عنوان حالت مبنا، پره‌های موج‌دار به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت زمان ذوب کامل را ۹/۳۳٪ کاهش می‌دهند. تغییر هندسه لوله حاوی سیال انتقال حرارت از



دایره‌ای به شکل گلبرگ به منظور افزایش بیشتر عملکرد حرارتی سیستم ذخیره انرژی گرمای نهان پیشنهاد شده است. با افزایش تعداد گلبرگ‌ها، به دلیل سطح انتقال حرارت بزرگتر بین ماده تغییر فاز دهنده و لوله حاوی سیال انتقال حرارت، نرخ ذوب افزایش می‌یابد. زمان شارژ برای لوله با هفت گلبرگ تا ۶۶٪ نسبت به لوله دایره‌ای با پره‌های موج‌دار و ۶۹٪ نسبت به حالت مبنا با پره‌های مستقیم کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Al-Abidi, A.A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M.Y., Mohammad, A.Th., (2013). Internal and External Fin Heat Transfer Enhancement Technique for Latent Heat Thermal Energy Storage in Triplex Tube Heat Exchangers, *Applied Thermal Engineering* 53, pp 147-156.
- [2] Tao, Y.B., He, Y.-L., (2018). A Review of Phase Change Material and Performance Enhancement Method for Latent Heat Storage System, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93, pp 245-259.
- [3] Kothari, R., Ahmad, A., Chaurasia, S.K., Prakash, O., (2022). Experimental Analysis of The Heat Transfer Rate of Phase Change Material Inside a Horizontal Cylindrical Latent Heat Energy Storage System, *Material Science for Energy Technologies* 5, pp 208-216.
- [4] Joulin, A., Younsi, Z., Zalewski, L., Lassue, S., Rousse, D.R., Cavrot, J.-P., (2011). Experimental and Numerical Investigation of a Phase Change Material: Thermal Energy Storage and Release, *Applied Energy* 88, pp 2454-2462.
- [5] Agyenim, F., Hewitt, N., Emaes, P., Smyth, M., (2010). A Review of Materials, Heat Transfer and Phase Change Problem Formulation for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp 615-628.
- [6] Liu, C., Murray, R.E., Groulx, D., (2012). Experimental Study of Cylindrical Latent Heat Energy Storage Systems Using Lauric Acid as the Phase Change Material, *ASME 2012 heat transfer summer conference*, pp 447-456.
- [7] Ding, C., Pei, J., Wang, S., Wang, Y., (2023). Evaluation and Comparison of Thermal Performance of Latent Heat Storage Units with Shell-and-Tube, Rectangular and Cylindrical Configurations, *Applied Thermal Engineering* 218, 119364.
- [8] Qureshi, Z.A., Ali, H.M., Khushnood, S., (2018). Recent Advances on Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials for Energy Storage System: A Review. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 127, pp 838-56.
- [9] Ao, C., Yan, S., Hu, W., Zhao, L., Wu, Y., (2022). Heat Transfer Analysis of a PCM in Shell-and-Tube Thermal Energy Storage Unit with Different V-Shaped Fin Structures, *Applied Thermal Engineering* 216, 119079.
- [10] Li, J., Abdulghani, Z.R., Alghamdi, M.N., Sharma, K., Niyas, H., Moria, H., Arsalanloo, A., (2023). Effect of Twisted Fins on The Melting Performance of PCM in a Latent Heat Thermal Energy Storage System in Vertical and Horizontal Orientations: Energy and Exergy Analysis, *Applied Thermal Engineering* 219, 119489.
- [11] Shen, S., Zhou, H., Du, Y., Huo, Y., Rao, Z., (2023). Investigation on Latent Heat Energy Storage Using Phase Change Material Enhanced by Gradient-Porosity Metal Foam, *Applied Thermal Engineering*, 121760.
- [12] Sarani, I., Payan, S., Nada, S.A., Payan, A., (2020). Numerical Investigation of an Innovative Discontinuous Distribution of Fins for Solidification Rate Enhancement in PCM with and without Nanoparticles, *Applied Thermal Engineering* 176, 115017.
- [13] Sun, X., Liu, L., Mo, Y., Li, J., Li, C., (2020). Enhanced Thermal Energy Storage of a Paraffin-Based Phase Change Material (PCM) Using Nano Carbons, *Applied Thermal Engineering* 181, 115992.



- [14] Abdolahimoghadam, M., Rahimi, M., (2023). A Numerical Evaluation of a Latent Heat Thermal Energy Storage System in The Presence of Various Type of Nanoparticles, *Applied Thermal Engineering* 230, 120854.
- [15] Nie, C., Liu, J., Deng, S., (2021). Effect of Geometry Modification on The Thermal Response of Composite Metal Foam / Phase Change Material for Thermal Energy Storage, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 165, 120652.
- [16] Kumar, A., Verma, P., Varshney, L., (2022). An Experimental and Numerical study on Phase Change Material Melting Rate Enhancement for a Horizontal Semi-Circular Shell and Tube Thermal Energy Storage System, *Journal of Energy Storage* 45, 103734.
- [17] Hamid, R., Mehrdoost, Z., (2024). Thermal performance enhancement of multiple tubes latent heat thermal energy storage system using sinusoidal wavy fins and tubes geometry modification, *Applied Thermal Engineering* 245, 122750.
- [18] Rathod, M.K., Banerjee, J., (2015). Thermal Performance Enhancement of Shell and Tube Latent Heat Storage Unit Using Longitudinal Fins, *Applied Thermal Engineering* 75, 1084-92.
- [19] Parsazadeh, M., Duan, X., (2018). Numerical Study on The Effects of Fins and Nanoparticles in a Shell and Tube Phase Change Thermal Energy Storage Unit, *Applied Energy* 216, pp142-156.
- [20] Aly, K.A., El-Lathy, A.R., Fouad, M.A., (2019). Enhancement of Solidification Rate of Latent Heat Thermal Energy Storage Using Corrugated Fins, *Journal of Energy Storage* 24, 100785.
- [21] Liu, S., Peng, H., Hu, Z., Ling, X., Huang, J., (2019). Solidification Performance of a Latent Heat Storage Unit with Innovative Longitudinal Triangular Fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 138, pp 667-676.
- [22] Huang, X., Yao, S., (2021). Solidification Performance of a New Trapezoidal Longitudinal Fins in Latent Heat Thermal Energy Storage, *Case Studies in Thermal Engineering* 26, 101110.
- [23] Safari, V., Abolghasemi, H., Kamkari, B., (2021). Experimental and Numerical Investigations of Thermal Performance Enhancement in a Latent Heat Storage Heat Exchanger Using Bifurcated and Straight Fins, *Renewable Energy* 174, pp 102-121.
- [24] Liu, Z., Liu, Z., Guo, J., Wang, F., Yang, X., Yan, J., (2022). Innovative Ladder-Shaped Fin Design on a Latent Heat Storage Device for Waste Heat Recovery, *Applied Energy* 321, 119300.
- [25] Huang, Y., Song, L., Wu, S., Liu, X., (2022). Investigation on The Performance of a Multi-Tube Finned Latent Heat Thermal Storage Pool, *Applied Thermal Engineering* 200, 117658.
- [26] Khedher, N.B., Mahdi, J.M., Dulaimi, A., Chatroudi, I.S., Ebrahmnataj Tiji, M., Ibrahim, R.K., Yvaz, A., Talebizadehsardari, P., (2023). On the application of novel arc-shaped fins in a shell-and-tube type of latent heat storage for energy charge enhancement, *Journal of Energy Storage* 73, 108697.
- [27] Boujelbene, M., Mohammed, H.I., Sultan, H.S., Eisapour, M., Chen, Z., Mahdi, J.M., Carins, A., Talebizadehsardari, P., (2024). A comparison study of twisted and straight fins in enhancing the melting and solidifying rates of PCM in horizontal double-tube heat exchangers, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 151, 107224.
- [28] Sheikholeslami, M., Nematpour Keshteli, A., Shafee, A., (2020). Melting and Solidification within an Energy Storage Unit with Triangular Fin and CuO Nano Particles, *Journal of Energy Storage* 32, 101716.
- [29] ANSYS Academic Research, "ANSYS fluent theory guide," 2019.
- [30] Brent, A.D., Voller, V.R., Reid, K.J., (1988). Enthalpy-Porosity Technique for Modeling Convection-Diffusion Phase Change: Application to The Melting of a Pure Metal, *Numerical Heat Transfer* 13, pp 297-318.