نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۱۱۶، جلد ۵۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، صفحه ۶۵-۷۵ – پژوهشی کامل DOI: 10.22034/jmeut.2026.67963.3575

مطالعه عددی و بهینه سازی یک مبادله‌کن گرمایی برپایه مواد تغییر فاز دهنده

مسعود جلیلیان کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، masoudjalilian2022@gmail.com
کورش جواهرده* استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، javaherdeh@guilan.ac.ir
علیرضا اسدی صدیق دانشجوی دکتری، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، alireza_asadi90@yahoo.com

چکیده
در این مطالعه، فرایندهای ذوب و انجماد در طول زمان در یک واحد ذخیره انرژی گرمایی نهان با استفاده از یک مبادله‌کن گرمایی صفحه‌ای مبتنی بر مواد تغییرفازدهندهٔ پارافینی بررسی شده است. این تحلیل عددی به‌صورت دوبعدی، در شرایط جریان لایه‌ای و ناپایا با استفاده از روش حجم محدود انجام گرفته است. در ابتدا چهار حالت زاویه اریب ۱۵،۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای فرایند ذوب با دماهای ورودی مختلف سیال انتقال گرما(۵۰ ،۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و برای فرایند انجماد با دماهای ورودی مختلف سیال انتقال گرما (۵، ۱۰و ۱۵ درجه سلسیوس) بررسی و صحت سنجی شده است. نتایج نشان می‌دهند که زاویه اریب ۶۰ درجه، عملکرد بهینه تری نسبت به سایر زوایای اریب در دو فرایند ذوب و انجماد نشان می‌دهد و همچنین در فرایند ذوب دمای بالاتر و در فرایند انجماد دمای پایین تر سیال انتقال گرما، عملکرد مطلوب تری را دارا هستند. نوآوری این تحقیق شامل استفاده از زوایای متفاوت اریب در طراحی صفحات مبادله‌کن گرمایی به همراه بهره‌گیری از چندین ماده تغییرفازدهنده متفاوت در یک واحد ذخیره‌سازی انرژی، برای یک مبادله‌کن گرمایی صفحه ای است. هدف تحقیق حاضر این است که با ایجاد تغییراتی در هندسه مبادله‌کن گرمایی و استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، بتوان آهنگ انتقال گرما و بازده گرمایی ان را افزایش و بهینه نمود.

واژه‌های کلیدی: فرایندهای ذوب و انجماد، نانوسیال، مواد تغییرفازدهنده، ذخیره انرژی گرمای نهان، مبادله‌کن گرمایی ، مطالعه عددی، بهینه سازی.

Numerical study and optimization of a heat exchanger based on phase change materials

M. Jalilian Faculty of Mechanical engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
K. Javaherdeh Faculty of Mechanical engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
A. R. asadi seddigh Campus Faculty,University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract
In this study, the melting and freezing processes in a latent heat energy storage unit using a plate heat exchanger based on phase change materials (PCMs) were investigated. The numerical analysis was conducted in two dimensions under laminar and unsteady flow conditions using the finite volume method. Four zigzag angles 15°, 30°, 45°, and 60° were examined for both melting and freezing processes. The heat transfer fluid (HTF) inlet temperatures were set at 60°C, 50°C, and 70°C for melting and 5°C,10°C and 15°C for freezing. The results were then validated. The findings indicate that the 60° zigzag angle delivers more optimal performance compared to the other angles in both melting and freezing processes. Additionally, it exhibits better efficiency in melting at higher temperatures and freezing at lower temperatures. Innovation of this article is using zigzag angles and different angles beside taking benefit from different phase change material in a thermal energy storage unit for a heat exchanger. The purpose of this paper is about optimizing heat transfer processes with improvement in design of heat exchanger to get better results as output.
Keywords: Melting and freezing processes, nanofluids, phase change materials, latent heat energy storage, heat exchanger, numerical study, optimization.

۱-مقدمه

اتلاف گرما در کاربرد های مختلف دربرگیرنده طیف وسیعی از دماهای بسیار پایین (حدود ۱۵ تا ۷۰ درجه سلسیوس در تاسیسات ساختمان‌ها) تا دماهای بسیار بالا (حدود۱۶۰۰درجه سلسیوس در کارخانه‌های آهن‌سازی و فولادسازی) میباشد. استفاده موثر و کارآمد از چنین منابع گرمایی نیاز به ذخیره انرژی گرمایی دارد. [۱] در طول سه دهه گذشته، ذخیره انرژی گرمایی مواد تغییر فازدهنده به دلیل چگالی انرژی گرمایی بالا در واحد حجم/ جرم و پتانسیل آنها برای کاربرد در تجهیزات مختلف مهندسی با دامنه های دمایی متفاوت، توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. [۲] ذخیره سازی گرمای نهان می تواند عملکرد و قابلیت اطمینان بالایی را همراه با مزایای ظرفیت ذخیره سازی بالا و پایدار از خود نشان می‌دهد[۳]. در روش ذخیره سازی گرما به صورت گرما نهان از آنجا که چگالی ذخیره سازی در مقایسه با ذخیره سازی بصورت گرما محسوس بالا می‌باشد و لذا با مقدار ماده ذخیره ساز کمتری میتوان گرمای نهان بیشتری را ذخیره نمود. [۴] میزان بزرگی انرژی مورد بحث را میتوان با مقایسه ظرفیت ذخیره سازی محسوس بتن برابر یک کیلوژول بر کیلو گرم کلوین و آب برابر ۱۹/۴ کیلوژول بر کیلوگرم کلوین، با گرمای نهان ماده تغییر فاز دهنده ای مانند موم پارافین برابر ۱۲۴ کیلوژول بر کیلوگرم نشان داد[۵]. در واقع می توان گفت که مواد تغییر فاز دهنده دارای آنتالپی تغییر فاز بالایی هستند[۶].

مواد تغییر فاز دهنده موادی هستند که می‌توانند مقادیر قابل توجهی انرژی گرمایی را در طی تغییر فاز خود جذب، ذخیره و انگاه

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: javaherdeh@guilan.ac.ir
تاریخ دریافت: ۰۴/۰۴/۱۰
تاریخ پذیرش: ۰۵/۰۲/۰۷

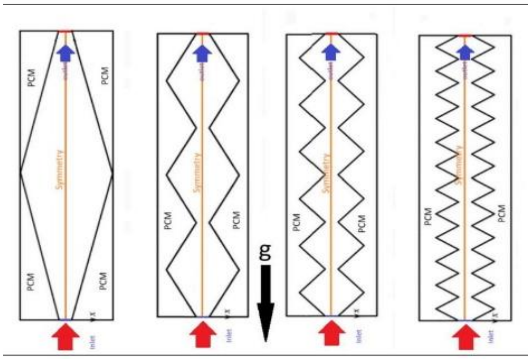
آزاد کنند که این اتفاق معمولاً بین حالت جامد و مایع اتفاق می‌افتد[۷]. این مواد دارای نقاط ذوب و انجماد در دماهای ثابت بوده که آنها را برای مدیریت گرمایی بسیار مؤثر می‌سازد. به عبارتی مواد تغییر فاز دهنده شبیه باتری های گرمایی قابل شارژ هستند. [۸] مواد تغییر فاز دهنده با تغییر فاز از جامد به مایع یا بالعکس، گرما را در دمای ثابت جذب یا آزاد می‌کنند. این ویژگی به مبادله‌کن گرمایی اجازه می‌دهد تا دمای پایدارتری را حفظ کنند و مدیریت گرمایی را در فرایندهایی که کنترل دما حیاتی است، بهبود می‌بخشد. [۹] در یک مبادله‌کن گرمایی صفحه‌ای، صفحات در یک قاب مونتاژ می‌شوند و با پیچ ومهره‌های سفت کننده فشرده می‌شوند و یک سری کانالهای موازی ایجاد می‌کنند که سیالات درمسیر کانال‌ها جریان می‌یابند. یک سیال در کانال‌های فرد و سیال دیگر در کانال‌های زوج جاری می‌شوند. موجدار بودن صفحات باعث ایجاد تلاطم می‌شود که یک عامل کلیدی در افزایش ضرایب انتقال گرما و کاهش تشکیل مناطق با حداقل آهنگ گرما می باشد[۱۰] .

مبادله‌کن‌های گرمایی صفحه‌ای با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده عموما در کاربردهایی با بار گرمایی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد با تنظیم بارهای گرمایی و کاهش اندازه سیستم‌های دفع گرما مورد نیاز، مدیریت گرمایی مؤثری را فراهم می‌آورند[۱۱]. این کاربرد در مواردی که سیستم‌های خنک کننده سنتی بسیار حجیم هستند یا قادر به تأمین قابلیت اطمینان لازم در زمانهای اوج عملیات تبادل گرما نمی‌باشند، حیاتی است [۱۲]. مبادله‌کن گرمایی صفحه‌ای واشردار با واشرهای با کیفیت بالا برای بستن صفحات به هم برای جلوگیری از نشتی و هدایت سیالات به کانالهای متناوب معمولا کاربرد بیشتری دارند. این مبادله‌کن‌های گرمایی به دلیل سهولت در تعمیر و نگهداری قابل توجه هستند، زیرا صفحات به راحتی برای تمیز کردن، گسترش دادن یا جایگزینی جدا می‌شوند و به طور مؤثر هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهند [۱۳] .تطبیق پذیری مبادله‌کن گرمایی صفحه‌ای با واشر صنعتی به آن اجازه می‌دهد تا برای طیف وسیعی از کاربردها، از وظایف ساده با نیازهای گرمایی پایین تا کارکرد در شرایط سخت که نیاز به عملکرد بالا دارند، طراحی شود[۱۴]. مبادله‌کن‌های گرمایی صفحه‌ای لحیم‌شده معمولاً در چگالنده‌ها، تبخیرکن‌ها، کولرهای نفتی یا گازی و سایر عملکردهای گرمایش یا سرمایش در صنایع مختلف استفاده می‌شوند[۱۵] . مبادله‌کن‌های گرمایی صفحه‌ای جوش داده شده به طور گسترده در صنایع نفت، شیمیایی، کارخانه‌های صنایع فولاد، نیروگاه‌ها، متالورژی و سایر زمینه‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.[۱۶-۲۳]

نوآوری این تحقیق شامل استفاده از زوایای اریب و زوایای مختلف در طراحی مبادله‌کن گرمایی ، به همراه بهره گیری از چندین ماده تغییرفازدهنده در یک واحد ذخیره سازی انرژی، برای یک مبادله‌کن گرمایی نوع صفحه ای است. هدف تحقیق حاضر این است که آهنگ انتقال گرمایی با ایجاد تغییراتی در هندسه مبادله‌کن گرمایی افزایش یافته و بازده گرمایی آن بهینه گردد.

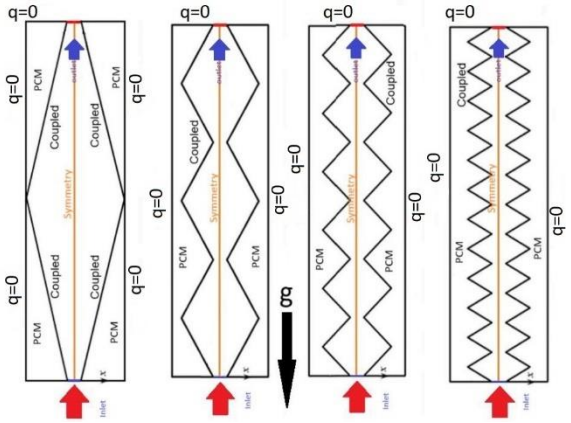
۲- مشخصات مسئله

مسئله مورد نظر در بررسی پیش‌رو، مطالعه یک مبادله‌کن گرمایی صفحه‌ای مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده است. در این مبادله‌کن گرمایی ، کانال‌های کناری با مواد تغییر فازدهنده پر شده و سیال انتقال گرما (آب خالص) حین تبادل گرما از کانال میانی عبور می‌کند. طول مبادله‌کن گرمایی مورد بررسی برابر ۳۵۵/۸ میلیمتر و عرض آن ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد. برای حالت ذوزنقه‌ای که به آن می‌پردازیم نیز طول مبادله‌کن گرمایی برابر ۳۵۵/۸۸ و قاعده پایین و بالا به ترتیب ۱۰۰ و ۱۵۰ میلیمتر می‌باشد. این مبادله‌کن گرمایی با زوایای مختلف اریب مورد تحلیل قرار گرفته است. چهار زاویه مختلف برای پیکربندی اریب کانال شامل ۱۵،۳۰ ۴۵، و ۶۰ درجه مورد مطالعه قرار گرفته است و این زوایا به ترتیب در شکل ۱ نشان داده شده‌اند:



شکل ۱- مبادله‌کن گرمایی با صفحات کانال دارای زوایای اریب مختلف در مطالعه حاضر از راست به چپ به ترتیب ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه

۳- شرایط مرزی حاکم بر مسئله



شکل ۲- شرایط مرزی حاکم (استفاده شده) برای سیال انتقال گرما و مواد تغییر فاز دهنده

همانطور که در شکل۲ مشخص است، هندسه کاملاً متقارن بوده و به همین دلیل برای صرفه‌جویی در محاسبات، از نیمی از هندسه به کمک شرط مرزی تقارن استفاده شده است. جداره بیرونی کانال مبادله‌کن گرمایی عایق درنظر گرفته می‌شود.جدارها هم همدما فرض می‌شوند.هنگامی که مبادله‌کن گرمایی به صورت عمودی قرار دارد،

برای ناحیه ورودی سیال انتقال گرما جاری در کانال میانی از شرط مرزی ورودی، سرعت ثابت استفاده می‌شود و برای خروجی سیال انتقال گرما از شرط مرزی خروجی فشاری بهره برداری می‌شود.

در این هندسه، جنس دیواره های خارجی سمت محیط از جنس آلومینیوم و جنس کانال‌های اریب بین سیال(آب خالص) و مواد تغییر فاز دهنده از مس می باشد که ضخامت دیواره‌های مسی ۲ میلیمتر در نظر گرفته شده است. دمای سیال انتقال گرما برای حالات مختلف شارژ گرما در دمای ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس فرض می‌شوند که برای تضمین شروع عملیات ذوب در مواد تغییر فازدهنده با حالت کاملاً جامد، کافی است زیرا دمای انجماد آن ۲۹ درجه سلسیوس می‌باشد. برای حالات مختلف تخلیه گرما نیز دمای سیال انتقال گرما را بین ۵ تا ۱۵ درجه سلسیوس درنظرگرفته می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که انجماد از ماده تغییرفازدهنده با حالت کاملاً مایع شروع می‌شود، زیرا دمای ذوب این ماده ۳۶ درجه سلسیوس است. بنابراین، شرایط اولیه به صورت زیر فرمول بندی می‌شود.

$$t = 0 \rightarrow \{ u = 0\ m/s, v = 0\ m/s, T_{\text{ورودی}} = 15°C_{\text{ذوب}} \}$$
$$u = 0, v = 0, T_{\text{ورودی}} = 50°C_{\text{انجماد}}$$

شرایط مرزی برای ورودی و خروجی کانال نیز می‌توان به صورت زیر فرمول بندی شود:

$$\text{برای ورودی} \rightarrow \{ u = 0\ m/s, v = 0.0272\ m/s,\ T_{\text{ورودی}} = 50°C_{\text{ذوب}} \}$$
$$u = 0\ m/s, v = 0.0272\ m/s, T_{int} = 15°C_{\text{انجماد}}$$
$$\text{برای خروجی} \rightarrow \dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$
$$T_{Plate,in,pcm} = T_{Plate,in,fluid}$$
$$q''_{Aluminium_wall_out} = 0$$

ضخامت جداره ذوزنقه (اولین شکل از سمت چپ در شکل‌های ۱ و ۲) دارای ضخامتی ناچیز است، بنابراین دمای دو طرف آن یکسان فرض می‌شود. دو شرط مرزی اخری به موازنه گرمایی بین صفحات اریب کانال و ماده تغییرفازدهنده اشاره دارد. بدیهی است که نیروی گرانش در جهت خلاف جریان سیال در نظر گرفته شده است.

۴- معادلات حاکم

فرایندهای ذوب و انجماد بخشی از مجموعه گسترده مرتبط با مسائل انتقال گرما هستند که شامل تغییر فازهایی مانند فرایندهای ریخته‌گری، تولید آلیاژهای با خواص بهبودیافته و ذخیره‌سازی انرژی می‌شوند. این مسائل معمولاً با تبدیل فاز یک ماده با جذب و آزادسازی انرژی گرمایی در سطح مشترک همراه هستند. مکانیزم غالب برای جذب یا آزادسازی انرژی معمولاً رسانش و همرفت است. سیستم‌های تغییر فاز مایع - جامد ویژگی مشترکی دارند. دو فاز با خواص ترموفیزیکی متفاوت توسط ناحیه‌ای مشترک که با پیشروی تغییر فاز حرکت می‌کند، از یکدیگر جدا می‌شوند. این جبهه در حال حرکت موجب تولید جریان در نزدیکی سطح مشترک و جریان طبیعی در توده مذاب می‌شود. با توجه به اینکه این مرز متحرک جامد - مایع بطور پیش فرض نامشخص است، در نتیجه این مسائل معمولاً غیرخطی هستند و به طبع حل آنها نسبت به مسائل تک‌فازی دشوارتر می شود.

۴-۱- معادلات حاکم بر مسئله

معادلات حاکم در دستگاه مختصات دکارتی که در آن u ،v و w نشانگر مؤلفه های سرعت در راستاهای x ،y و z باشند، به صورت زیر است:

معادله بقاء جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \qquad (۱)$$

معادلات بقاء ممنتوم جهت x

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla.(\rho u V) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla.(\mu \nabla u) + S \qquad (۲)$$

معادلات بقاء ممنتوم جهت y

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla.(\rho u V) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla.(\mu \nabla v) - \rho g \beta (T - T_{ref}) + S \qquad (۳)$$

معادله انرژی

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla.q + \varphi \qquad (۴)$$

۴-۲- مواد تغییرفازدهنده

جدول ۱ به بررسی مشخصات مواد تغییر فازدهنده مورد استفاده در این مقاله می‌پردازد:

جدول ۱- مشخصات مواد تغییرفازدهنده

ماده	چگالی(kg/m^3)	گرمایی ویژه (kJ/kg. K)	رسانایی گرمایی (W/m. K)
PCM1 (Li_2CO_3-K_2CO_3)	۱۹۹۰	۱۶۰۰	۰/۶
PCM2 (RT-22)	۸۲۵	۲۰۰۰	۰/۲
PCM3 (RT-26)	۸۱۵	۲۰۰۰	۰/۲
PCM4 (RT-27)	۸۷۰	۲۴۰۰	۰/۲۴

۵- روش حل عددی

برای همبندی(کوپلینگ) بین فشار و سرعت از حلگر نیمه-ضمنی استفاده می‌کنیم. این حلگر در واقع همان همان حلگر SIMPLE می‌باشد . در این حلگر از حدس اولیه یا تکرار های قبلی برای محاسبه گرادیان فشار و از معادله مومنتوم برای محاسبه میدان سرعت استفاده می‌شود. از مدلPRESTO برای تصحیح معادله فشار استفاده می‌شود و برای معادلات سرعت و فشار نیز از مدل QUICK استفاده می‌شود. در این مطالعه از ضریب زیرتخفیف Under relaxation برای فشار ،سرعت، انرژی و کسر مایع به ترتیب ۱ ، ۰/۷ ،۰/۳ و۰/۹در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر حد باقیمانده ها برای معادله انرژی $۱۰^{-۶}$ و برای معادلات مومنتوم و پیوستگی مقدار $۱۰^{-۴}$ در نظر گرفته شده است. عدد رینولدز جریان ۲۷۶/۴۴ در نظر گرفته شده است.

فرضیات مدل‌سازی:

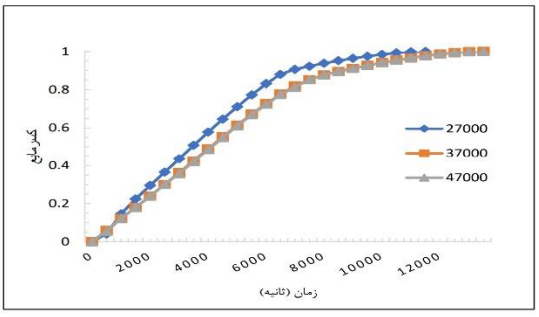
در این بخش به برخی از فرضیات متداول اتخاذ شده در مدل‌سازی کنونی ارائه می‌شود.

- مکانیزم انتقال گرما و جریان سیال (آب خالص) گذرا و وابسته به زمان است.
- دامنه تقارن هندسی و هیدرودینامیکی بصورت محوری و دوبعدی است.
- نیروی گرانش با داشتن همرفت طبیعی در مدل وارد شده است

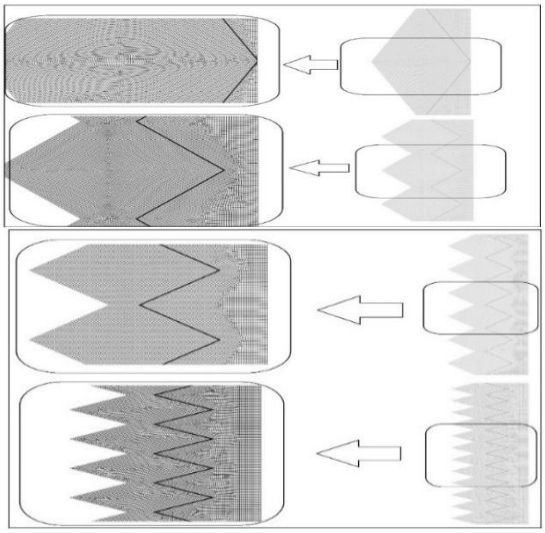
- باتوجه به عدد رینولدز پایین جریان کاملا لایه‌ای باید در نظر گرفته میشود.
- مواد تغییرفازدهنده از نوع یک سیال نیوتنی و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است.
- خواص ترموفیزیکی مواد تغییرفازدهنده به تغییرات دمایی وابسته است.
- چگالی مواد تغییرفازدهنده در طول تبدیل فاز از جامد به مایع و برعکس تغییر می‌کند.
- مقاومت گرمایی تماسی بین مواد تغییرفازدهنده جامد، مایع و دیواره‌ها ناچیز در نظر گرفته می‌شود.
- دیواره‌ها را میتوان به صورت دیوارهای نازک در نظر گرفت که با حل معادله رسانش گرمای یک‌بعدی یا به طور ضمنی برای توصیف دقیق‌تر میدان دما مدل‌سازی شده است.
- اثر کشش سطحی بین فازهای مختلف نادیده گرفته شده است.

۶- شبکه محاسباتی و استقلال حل از شبکه

دانه‌بندی (مش‌بندی) مناسب و صحیح در حل مسائل عددی، یکی از مهم‌ترین جنبه‌ها به شمار می‌آید. یکی از چالش‌های اصلی روش‌های عددی، ایجاد شبکه‌ای است که نه آنقدر درشت باشد که منجر به تولید نتایج نادرست شود و نه آنقدر ریز که حجم محاسبات و زمان حل را بی اندازه افزایش دهد، به‌ویژه با توجه به ماهیت گذرای مسئله و نیاز به حل آن در هر گام زمانی که کسری از ثانیه است، اهمیت دانه‌بندی بهینه بسیار بیشتر از مسائل پایا می‌باشد. در این مدل، از شبکه‌بندی مربعی به دلیل مزایای آن نسبت به شبکه‌بندی مثلثی برای هندسه استفاده شده است. همچنین، به دلیل متقارن بودن هندسه و برای کاهش زمان محاسبات، تنها نصف هندسه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل۳ استقلال مش از شبکه‌بندی محاسباتی را نشان می‌دهد. دانه‌بندی برای چهار زاویه اریب مختلف ۱۵ ، ۳۰ ، ۴۵و ۶۰ درجه در شکل ۴ نمایش داده شده است. در طی تبادل گرما، لایه مرزی لایه‌ای در سطوح مشترک سیال انتقال گرما و مواد تغییر فاز دهنده شکل می‌گیرد.



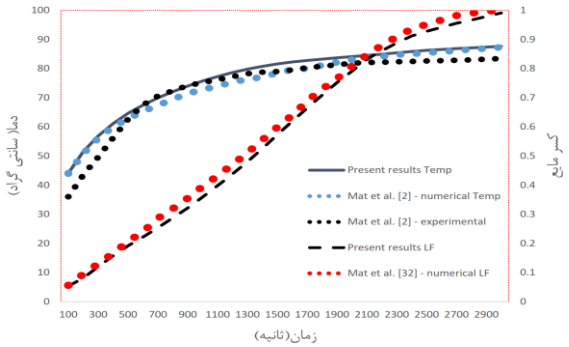
شکل ۳- روند ذوب برای زاویه اریب ۱۵ درجه با تعداد شبکه های ۲۷۰۰۰، ۳۷۰۰۰ و ۴۷۰۰۰ سلول



شکل ۴- شبکه بندی هندسه کانال های اریب ۱۵ و ۳۰ و ۴۵ و ۶۰ درجه

۷- صحت‌سنجی نتایج

برای اینکه نتایج حاصل از شبیه سازی صورت گرفته قابل اتکا باشند باید صحت نتایج به دست آمده تأیید گردد. برای راستی آزمایی نتایج، تابع کسر مایع و دمای میانگین در مقاله مت و همکاران [۲] مجددا شبیه سازی شده و نتایج عددی حاضر با نتایج گزارش شده در مرجع مذکور مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که خطای شبیه‌سازی حاضر و نتایج موجود در مرجع [۲] در تمامی موارد زیر ۲٪ است. مت و همکاران [۲] در یک مبادله‌کن گرمایی ذخیره سازی گرمای نهان دو لوله درون هم را با استفاده از ماده RT58 به عنوان ماده تغییرفازدهنده با شرط مرزی دمای دیواره ثابت، تجزیه و تحلیل کردند. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است با مقایسه نتایج حاضر با نتایج تجربی و عددی ارائه شده مرجع [۲] برای دما و کسر مایع، می‌توان به اعتبار این کد در نرم افزار Fluent مطمئن شد.

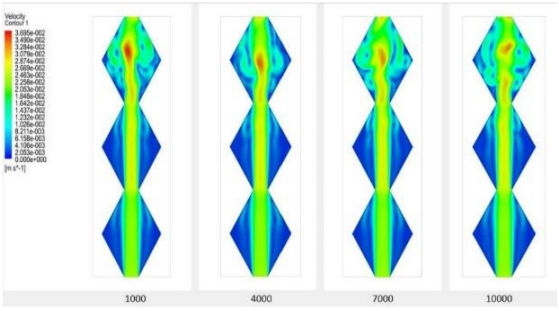


شکل ۵- تغییرات کسر مایع و میانگین دمایی مطالعه مت و همکاران [۲] برای صحت سنجی نتایج عددی مطالعه حاضر

۸- اثر زاویه اریب برای سیال انتقال گرما داخل کانال

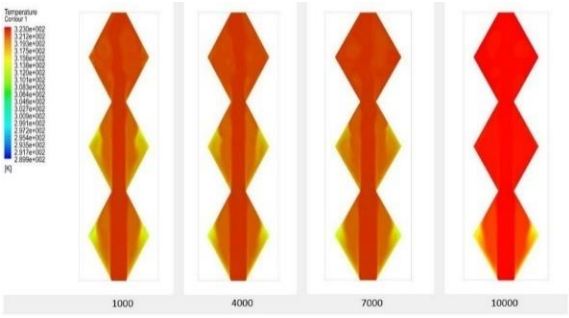
دو مقدار مختلف از زاویه اریب (۳۰ و۶۰ درجه) برای بررسی اثرات زاویه اریب بر شکل جریان سیال و تغییرات دمایی ان در چهار دوره زمانی ۱۰۰۰، ۴۰۰۰ ، ۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ تغییرات شکل جریان برای زاویه اریب ۳۰ درجه آورده شده

است. همانطور که مشاهده می‌شود جریان به حالت توسعه یافته رسیده است و تغییرات چندانی در گذر زمان مشاهده نمی‌شود. به علت شکل هندسی کانال و عدد رینولدز استفاده شده، جریان به شکل پر فشار از نواحی ابتدایی عبور کرده و در ناحیه انتهایی قبل از خروج از مبادله‌کن گرمایی جریان تا حدی آشفته شده که باعث آهنگ انتقال گرما بیشتر و سرعت ذوب بالاتر در ناحیه خروجی کانال می‌شود.



شکل ۶- کانتور سرعت سیال انتقال گرما درکانال با زاویه اریب ۳۰ درجه

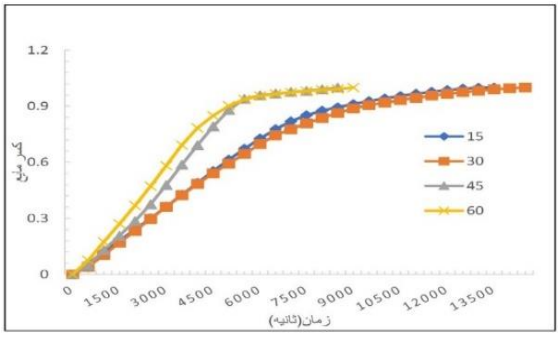
در شکل ۷ تغییرات دمای جریان برای زاویه اریب ۳۰ درجه آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در گذر زمان دمای کانال به تدریج بالا رفته و در دوره زمانی ۱۰۰۰ ثانیه به بعد که حدودا ذوب به مراحل پایانی خودش نزدیک می‌شود جریان به شکل توسعه یافته دمایی می‌رسد . اما در طول مبادله‌کن گرمایی با توجه به شکل ۷ دمای نواحی انتهایی نسبت به نواحی ابتدایی از دمای بالاتری برخوردار است.



شکل ۷- کانتور دمای سیال انتقال گرما درکانال با زاویه اریب ۳۰ درجه

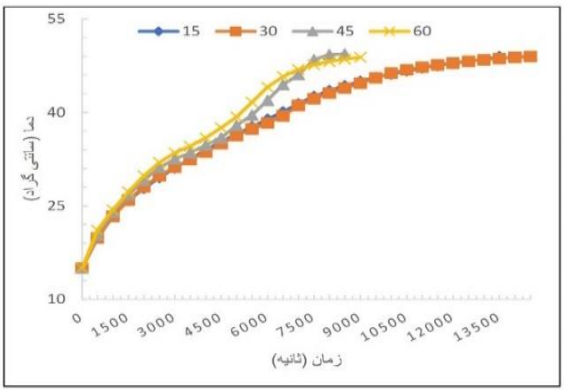
۹- اثر زاویه اریب در کانال مواد تغییرفازدهنده در فرایند ذوب

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، جبهه ذوب به‌صورت مجموعه‌ای از خطوط مستقیم و موازی با دیواره‌های اریب دیده می‌شود. این به دلیل این است که برای زمانهای کمتر از ۲۰۰۰ ثانیه، مکانیزم اصلی انتقال گرما بین سیال انتقال گرما بخش میانی کانال و مواد تغییر فاز دهنده به‌صورت رسانش است. با گذشت زمان، نقش همرفت طبیعی وقتی نمایان می‌شود که بخش داغ مواد تغییر فاز دهنده ذوب شده و تحت تأثیر نیروی شناوری شروع به حرکت به سمت بالا نماید.



شکل ۸- تغییرات کسر مایع و روند ذوب برای چهار زاویه اریب ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه

با گذشت زمان، همرفت طبیعی به عنوان یک مکانیزم انتقال گرما کمکی برای ذوب مواد تغییرفازدهنده خود را معرفی می‌کند، بطوریکه به گسترش ذوب سریع‌تر در ناحیه بالایی کانال مواد تغییرفازدهنده نسبت به ناحیه پایین می‌گردد. پس از حدود یک ساعت (۳۶۰۰ ثانیه)، جبهه ذوب به آرامی شکل یکنواخت خط مستقیم و موازی با دیواره خود را از دست می‌دهد به‌طوری‌که با گذشت زمان بیشتر، مقدار کسر حجمی مواد مذاب بیشتر شده و در جهت عرض کانال ماده تغییر فاز گسترش می یابد. با توجه به نقش مؤثرتر همرفت طبیعی نسبت به رسانش، فرایند ذوب زودتر در قسمت بالایی کانال به اتمام میرسد، که این مورد را در شکل ۹ برای زمان ۶۰۰۰ ثانیه می‌توان مشاهده نمود. مواد تغییرفازدهنده مجاور دیواره‌های اریب در نیمه بالایی به دلیل گردش بهتر(به‌علت وجود نیروی شناوری بیشتر) و تغییر چگالی بالاتر، باعث می‌شود ماده تغییرفازدهنده از حالت جامد به مذاب گرم بیشتری تبدیل گردد و ماده جامد سریع‌تر ذوب شود؛ بنابراین، به دلیل همین گردش بهتر جریان به واسطه همرفت ازاد مشاهده می‌شود که در زمان ۶۰۰۰ ثانیه، کل نیمه بالایی ذوب شده ولی نیمه پایینی به زمان بیشتری برای ذوب نیاز دارد.

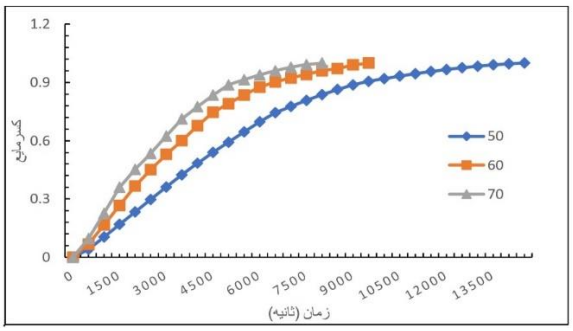


شکل ۹- تغییرات دما با زمان برای چهار زاویه اریب ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه

۱۰- تأثیرات دمای ورودی سیال انتقال گرما

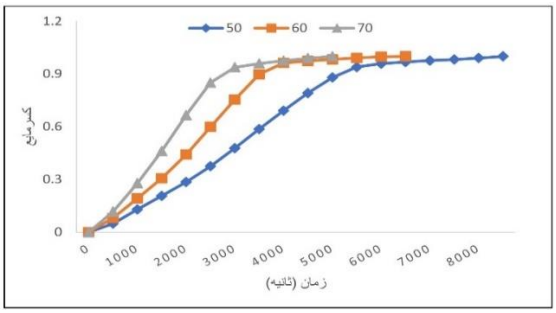
در این بخش، تأثیر دمای ورودی سیال انتقال گرما بر توسعه منحنی کسر مایع و مشخصات دمای متوسط در فرایند ذوب بررسی شده است. برای این منظور، دماهای ورودی ۵۰،۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس در عدد رینولدز۲۷۶/۴۴ انتخاب شده و اثرات آنها بر زمان

ذوب و شار ذخیره سازی گرمایی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش دمای ورودی سیال انتقال گرما به طور مستقیم بر کاهش زمان ذوب و افزایش میزان ذخیره سازی گرمایی تأثیر می‌گذارد. با افزایش دمای ورودی از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس، زمان ذوب به میزان ۲۶/۱۳ ٪کاهش یافته و به ۶۵۰۰ ثانیه کاهش می‌یابد. این کاهش زمان به دلیل افزایش اختلاف دما بین سیال و نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده است که موجب تسریع در فرآیند ذوب می‌شود. به همین ترتیب، با افزایش دما به ۷۰ درجه سلسیوس، زمان ذوب به ۵۰۰۰ ثانیه کاهش یافته که نشان‌دهنده کاهش ۴۳٪ در زمان ذوب نسبت به دمای ورودی ۵۰ درجه سلسیوس می باشد. (شکل ۱۰)



شکل ۱۰-تغییرات کسر مایع برای زاویه اریب ۴۵ درجه با دماهای ورودی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس سیال انتقال گرما

علاوه بر این، تأثیر دمای ورودی بر میزان ذخیره‌سازی گرمای نیز به وضوح در مواد تغییر فاز دهنده در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. با افزایش دمای ورودی از ۵۰ درجه سلسیوس به ۶۰ درجه سلسیوس، میزان شار انرژی ذخیره شده از ۲۶۸/۶ وات به ۳۹۲/۵ وات افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش ۴۶/۱۳٪ در شار ذخیره‌سازی گرمایی است. این افزایش به دلیل بهبود آهنگ انتقال گرما و افزایش دمای میانگین مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد. همچنین، با افزایش دما به ۷۰ درجه سلسیوس، میزان شار ذخیره‌سازی گرمایی به ۵۴۷/۷۹ وات می‌رسد که افزایش ۱۰۳٪ نسبت به دمای ورودی ۵۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد.

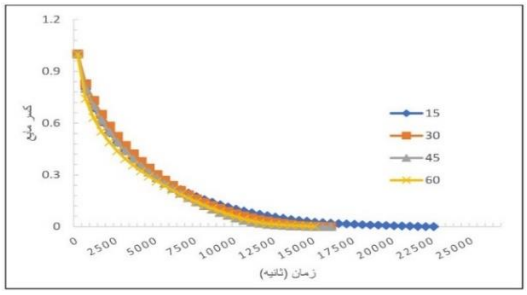


شکل ۱۱- تغییرات کسر مایع بر حسب زمان برای زاویه اریب ۶۰ درجه با دماهای مختلف ورودی سیال انتقال گرما (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس)

این نتایج نشان می‌دهند که افزایش دمای ورودی سیال انتقال گرما به طور قابل توجهی باعث بهبودی در عملکرد گرمایی سیستم می‌شود. در واقع، زمان ذوب کاهش یافته و میزان ذخیره‌سازی گرمایی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش کارایی و بهبود عملکرد گرمایی در دماهای بالاتر است. بنابراین، برای بهینه سازی عملکرد سیستم و افزایش بازدهی، پیشنهاد می‌شود که دمای ورودی سیال انتقال گرما با توجه به نیازهای خاص سامانه مورد طراحی، بهینه‌سازی گردد.

۱۱- اثر زاویه اریب صفحات کانال برمواد تغییر فازدهنده در فرایند انجماد

نتایج نشان می‌دهند که استفاده از زاویه اریب بالاتر، عملکرد بهتری در فرایند انجماد و بازیابی گرما دارد. زاویه ۶۰ درجه بطور خاص، ظرفیت بازیابی گرما را ۳۱/۹٪ و آهنگ بازیابی گرما را ۱۲۹٪ در مقایسه با زاویه اریب ۱۵درجه افزایش می‌دهد. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که که زاویه اریب ۱۵ درجه به دلیل وجود مواد تغییر فاز با فاصله زیادتر از دیواره سیال انتقال گرما زمان انجماد را طولانی‌تر می‌کند. به طور کلی، زاویه اریب بالاتر موجب افزایش سرعت انجماد و آهنگ بازیابی گرما بیشتر به دلیل داشتن ناحیه بزرگتری از تبادل گرمایی خواهد شد.



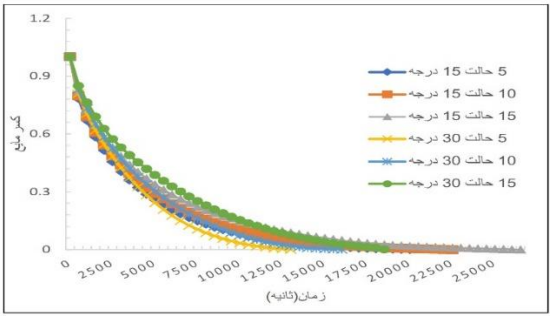
شکل ۱۲-تغییرات کسر مایع برای چهار زاویه اریب ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در فرایند انجماد

در نتیجه برای بهینه سازی عملکرد سیستم‌های گرمایی و ارتقاء بازدهی، بهتر است که زاویه اریب در طراحی کانال‌های مواد تغییرفازدهنده به دقت انتخاب و بهینه‌سازی شود تا بهترین نتایج از نظر آهنگ انجماد و بازیابی گرما حاصل گردد.

۱۲- تأثیرات دمای ورودی سیال انتقال گرما بر فرایند انجماد

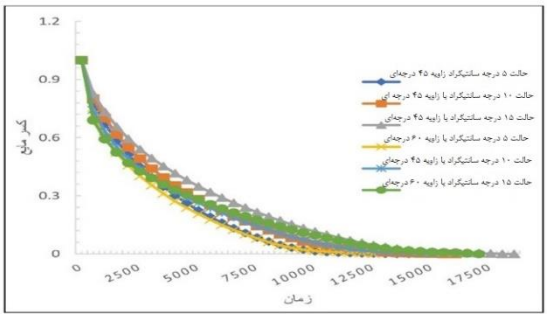
برای بررسی تأثیر دمای ورودی سیال انتقال گرما جاری در بخش مرکزی کانال بر روند انجماد مواد تغییرفازدهنده، سه دمای مختلف (۵ ،۱۰ و ۱۵ درجه سلسیوس) در عدد رینولدز جریان ۲۷۶/۴۴ در نظر گرفته شدند. این بررسی به تحلیل زمان انجماد و تغییرات دما پرداخته و نشان می‌دهد که دمای پایین‌تر ورودی سیال انتقال گرما تأثیرات قابل توجهی بر سرعت انجماد و میانگین دمای مواد تغییر فاز دهنده دارد. نتایج شکل ۱۳ نشان می‌دهند که با کاهش دمای ورودی سیال انتقال گرما، زمان انجماد کاهش می‌یابد و دمای متوسط مواد تغییر فاز دهنده کاهش می‌یابد. این به دلیل افزایش اختلاف دمای نسبی بین دمای ورودی سیال انتقال گرما و دمای انجماد مواد تغییر فاز دهنده

است که موجب افزایش سرعت انجماد و کاهش دمای متوسط مواد در حال انجماد می‌شود.



شکل ۱۳- تغییرات کسر مایع و روند انجماد برای دو زاویه اریب ۱۵ و ۳۰ درجه با دماهای متفاوت سیال انتقال گرما (۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سلسیوس)

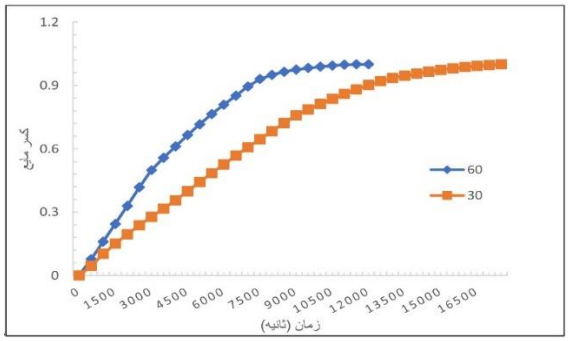
شکل ۱۴ روند انجماد را برای زاویه‌های اریب ۴۵ و ۶۰ درجه و دماهای ورودی ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. مطابق با نتایج شکل ۱۴، انجماد مواد تغییر فاز دهنده در زاویه ۶۰ درجه با دمای ورودی ۱۰ درجه سلسیوس به ۱۵۰۰۰ ثانیه زمان نیاز دارد، در حالی که برای زاویه ۳۰ درجه با همان دمای ورودی، زمان انجماد به ۱۶۰۰۰ ثانیه می‌رسد.



شکل ۱۴-تغییرات کسر مایع و روند انجماد برای دو زاویه اریب ۴۵ و ۶۰ درجه با دماهای متفاوت سیال انتقال گرما (۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سلسیوس)

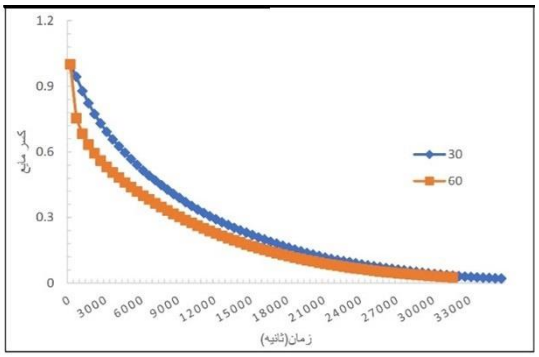
۱۳- بررسی و تحلیل کانال تک ذوزنقه‌ای

شکل ۱۵ روند ذوب را برای دو حالت زاویه اریب ۳۰ و ۶۰ درجه در مدل تک ذوزنقه‌ای نشان می‌دهد. نتایج این نمودار نشان می‌دهند که فرآیند ذوب در زاویه ۶۰ درجه به ۱۲۰۰۰ ثانیه زمان نیاز دارد، در حالی که در زاویه ۳۰ درجه، این زمان به ۱۷۵۰۰ ثانیه افزایش می‌یابد. این اختلاف زمانی حاکی از بهبود ۴۵٪ در سرعت فرآیند ذوب برای زاویه ۶۰ درجه نسبت به زاویه ۳۰ درجه است. این تفاوت قابل توجه در زمان ذوب به وضوح نشان‌دهنده تأثیر مثبت زاویه اریب بزرگتر بر تسریع فرآیند ذوب است. افزایش زاویه اریب منجر به افزایش منطقه انتقال گرما و بهبود تأثیر همرفت طبیعی می‌شود که در نتیجه سرعت ذوب را افزایش می‌دهد. بنابراین انتخاب زاویه مناسب برای طراحی کانال‌های مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی و بهبود کارایی کلی آنها کمک کند.



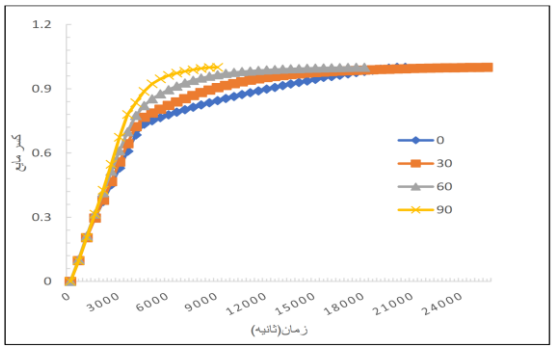
شکل ۱۵- تغییرات کسر مایع و روند ذوب برای حالت تک ذوزنقه ای با دو زاویه اریب ۳۰ و ۶۰ درجه

مطابق با نمودارهای شکل ۱۶، فرآیند انجماد کامل مواد تغییر فاز دهنده در زاویه ۶۰ درجه به ۳۱۵۰۰ ثانیه زمان نیاز دارد، در حالی که برای زاویه ۳۰ درجه این مقدار به ۳۵۰۰۰ ثانیه می‌رسد. این اختلاف نشان می‌دهد که تغییر زاویه اریب تنها در زمان های اولیه فرآیند انجماد تأثیرگذار است و پس از گذشت ۹۰۰۰ ثانیه، تأثیر آن کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶-تغییرات کسر مایع و روند انجماد برای حالت تک ذوزنقه ای با دو زاویه اریب ۳۰ و ۶۰ درجه

تفاوت‌های موجود در روند ذوب و دمای متوسط مواد تغییر فاز دهنده مطابق با شکل ۱۷ نشان می‌دهد که در حالت قرارگیری افقی مبادله‌کن گرمایی ، جبهه ذوب و دمای متوسط برای قسمت زیرین مواد تغییر فاز دهنده نسبت به قسمت بالایی آن در زمان های ابتدایی تبادل گرما از قدرت بیشتری برخوردار است. با افزایش زاویه قرارگیری مبادله‌کن گرمایی ، این تفاوت کاهش یافته و در نهایت در حالت ۹۰ درجه به صفر می‌رسد. این تفاوت تنها در زمان های اولیه ذوب مشهود است و هرچه زمان فرآیند ذوب بیشتر می‌شود، این تفاوت از بین می‌رود و برتری برای قسمت بالایی مواد تغییر فاز دهنده بروز می‌دهد.



شکل ۱۷- تغییرات کسر مایع در فرایند ذوب برای قرارگیری مبادله‌کن گرمایی تک ذوزنقه ای با زوایای ۰،۳۰،۶۰ و ۹۰ درجه ای نسبت به راستای افق دارای زاویه اریب ۶۰ درجه صفحات کانال

قرارگیری مبادله‌کن گرمایی در حالت افقی (۰ درجه) با زاویه اریب ۳۰ درجه صفحات کانال، ۱۵ ٪ افت فشار بیشتری نسبت به زاویه اریب ۶۰ درجه دارد. این امر نشان‌دهنده مزیت در کاهش افت فشار برای زاویه اریب ۶۰ درجه صفحات با حالت قرارگیری مبادله‌کن گرمایی به‌صورت افقی است. زاویه اریب ۳۰ درجه، افت فشار کمتری به ترتیب ۲۵٪، ۲۸ ٪ و ۲۰ ٪ نسبت به زاویه اریب ۶۰ درجه در زوایای قرارگیری مبادله‌کن گرمایی با زاویه ۳۰ ، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق را دارا است. افزایش زاویه مبادله‌کن گرمایی نسبت به حالت افق موجب افزایش افت فشار می‌شود.(جدول ۲)

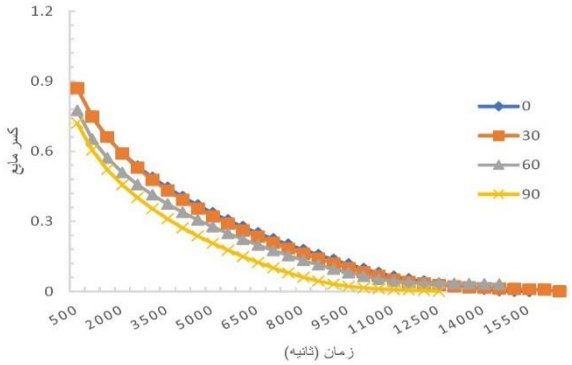
جدول ۲ افت فشار در کانال سیال در زوایای مختلف مبادله‌کن گرمایی و زاویه اریب ۳۰ و ۶۰ درجه‌ای

زاویه اریب	زاویه مبادله‌کن گرمایی			
	۰	۳۰	۶۰	۹۰
۳۰	۶۴/۵۲ پاسکال	۱۶۱/۲۷ پاسکال	۲۴۵/۳ پاسکال	۲۹۵/۹۲ پاسکال
۶۰	۵۶/۰۸ پاسکال	۲۰۱/۵۸ پاسکال	۳۱۴/۸۲ پاسکال	۳۵۵/۳۸ پاسکال

در عین حال، هرچه زاویه اریب صفحات بیشتر باشد، افت فشار برای مبادله‌کن گرمایی با قرارگیری در وضعیت افقی کمتر است. این امر به دلیل کاهش موانع و مسیر بازتر در مسیر جریان با زوایای بیشتر است. به عبارت دیگر، با افزایش زاویه اریب صفحات کانال، جریان سیال درمبادله‌کن‌های گرمایی دارای زاویه قرارگیری کمتر نسبت به افق، با مانع کمتری مواجه می‌شود و این موجب کاهش افت فشار در این شرایط می‌گردد.

۱۴- بررسی تأثیر زاویه قرارگیری مبادله‌کن گرمایی بر فرایند انجماد

در دوره زمانی اولیه (۵۰۰ ثانیه اول تبادل گرما) که به مرحله اولیه انجماد مربوط می‌شود،در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه مبادله‌کن گرمایی از حالت افقی به حالت عمودی، سرعت انجماد بهبود می‌یابد. مقدار کسر مایع برای زاویه‌های ۳۰ ،۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب ۰/۸۰۸، ۰/۸۷۵ و ۰/۷۶۱ است. بدین ترتیب، حالت عمودی (۹۰ درجه) عملکرد بهتری از نظر سرعت انجماد نسبت به سایر زوایا دارد. این بهبود عملکرد به دلیل شدن توزیع بهتر و بیشترگرما و جریان همرفت طبیعی در حالت عمودی است که به سریع شدن انجماد کمک می‌کند.



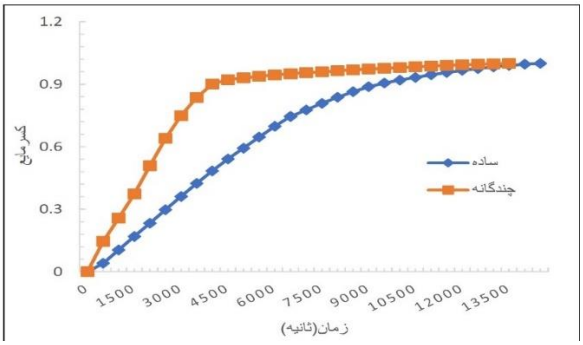
شکل ۱۸- تابع کسر مایع برای فرایند انجماد برای حالت زاویه انحراف مبادله‌کن گرمایی ۰، ۳۰ ، ۶۰ و ۹۰ درجه برای زاویه زیگزاگ ۶۰ درجه

با گذشت زمان بیشتری از فرایند انجماد یعنی دوره زمانی بیشتر ۲۰۰۰ ثانیه، روند انجماد به وضوح نشان می‌دهد که انجماد از پایین‌ترین قسمت‌ها شروع می‌شود، برخلاف فرآیند ذوب که از بالاترین قسمت‌ها شروع می‌شود. در حالت افقی و زاویه ۳۰ درجه، بخش بالای کانال (بالاترین قسمت) دمای بالاتری نسبت به بخش پایینی (پایین‌ترین قسمت) دارد و مقدار کسر مایع آن بیشتر است. این تفاوت به ویژه در زاویه قرارگیری ۶۰ درجه قابل توجه است که نشان می‌دهد زاویه اریب صفحات تأثیر قابل توجهی بر روند انجماد دارد. افزایش زاویه اریب صفحات کانال باعث می‌شود که گرما بطور مؤثرتری به قسمتهای پایینی انتقال یابد و بدین ترتیب روند انجماد تسریع شود.

در حالت قرارگیری مبادله‌کن گرمایی بصورت افقی با زاویه اریب ۳۰ درجه صفحات، بخش سمت چپ کانال (بالا دست جریان سیال انتقال گرما) حاوی مواد تغییر فاز دهنده نسبت به بخش سمت راست کانال (پایین دست جریان) مواد تغییر فاز دهنده، هم دمای بالاتری دارند هم مقدار کسر مایع انها از میانگین بالاتری برخوردار است که این امر در زاویه اریب ۶۰ درجه نمود بیشتری پیدا می‌کند.

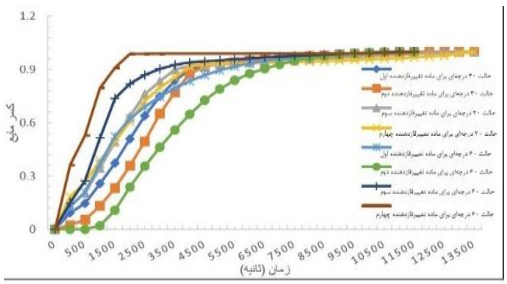
۱۵- بررسی فرایند ذوب و انجماد برای حالت استفاده از چند ماده تغییر فاز دهنده

شکل ۱۹ مقایسه ای بین مبادله‌کن گرمایی با زاویه اریب ۳۰ درجه صفحات با استفاده از دو نوع مختلف ماده تغییر فاز دهنده شامل مدل ساده (پارافین) و مدل چندگانه را نشان می‌دهد و ملاحظه می‌شود که زمان ذوب کلی انها تغییر انچنانی ندارد اما برای ذوب ۹۰ درصدی می‌توان مشاهده کرد که مدل ماده تغییر فاز دهنده با مدل چندگانه به ۴۰۰۰ ثانیه زمان نیاز است اما برای مدل ساده به ۹۵۰۰ ثانیه که همین امر بهبود زمان ذوب را تا ۱۱۱٪ نشان می‌دهد.



شکل ۱۹- تغییرات کسر مایع در یک مبادله‌کن گرمایی با زاویه اریب ۳۰درجه با مواد تغییر فاز دهنده متفاوت (ساده و چندگانه)

با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که حالت ۳۰ درجه در فرایند ذوب نسبت به حالت ۶۰ درجه روند ذوب همگراتر و منسجم‌تری را دارد. اما برای حالت ۶۰ درجه این انسجام کمتر به چشم می‌آید بطوریکه ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده اول در مقایسه با ذوب کامل با انواع دیگر مواد تغییر فاز دهنده به مدت زمان بیشتری نیاز دارد.



شکل ۲۰- تغییرات مایع در مبادله‌کن گرمایی با زاویه اریب ۳۰ و ۶۰ درجه با استفاده از انواع مواد تغییر فاز دهنده (ساده و چندگانه)

۱۶ - نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور اعتبارسنجی، فرایند ذوب در یک مبادله‌کن گرمایی سه لوله ای مشابه هندسه و شرایط مرزی مت و همکاران [۲] شبیه سازی شده است و نتایج تحقیق حاضر با نتایج انان مقایسه و صحت نتایج به دست آمده تأیید گردید. سپس به بررسی فرایند های ذوب و انجماد در چهار زاویه اریب صفحات کانال ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، حالت تک ذوزنقه‌ای، تأثیر زاویه قرارگیری مبادله‌کن گرمایی و تاثیر انواع مواد تغییر فاز دهنده(مدل‌های ساده و چندگانه) پرداخته شد. خلاصه نتایج به دست‌آمده از شبیه سازی عددی به شرح زیر می باشد:

۱- تأثیر زاویه اریب صفحات کانال بر زمان ذوب: تغییر زاویه اریب نقش مهمی در بهبود زمان ذوب ماده تغییرفازدهنده دارد. در زاویه ۶۰ درجه، زمان ذوب نسبت به زاویه ۱۵ درجه به میزان ۵۰ ٪ بهبود یافته است.

۲- تأثیر زاویه اریب بر زمان انجماد: زاویه اریب ۶۰ درجه نسبت به زاویه‌های ۱۵ و ۴۵ درجه، زمان انجماد را به ترتیب ۵۰٪ و ۸٪ بهبود می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که نقش زاویه اریب صفحات در بهبود فرآیندهای ذوب و انجماد قابل توجه می‌باشد.

۳- رابطه غیرخطی بهبود زمان ذوب با افزایش زاویه اریب صفحات: بهبود زمان ذوب با افزایش زاویه اریب به‌صورت غیرخطی می‌باشد، به‌طوری‌که تفاوت بین زاویه‌های اریب ۳۰ و ۴۵ درجه بسیار بیشتر از تفاوت بین ۱۵ و ۳۰ درجه است.

۴- مبادله‌کن گرمایی با کانال تک ذوزنقه‌ای: زمان ذوب در حالت تک ذوزنقه‌ای نسبت به حالت پایه (بدون صفحات اریب) ۲۰/۶۸٪ افزایش می‌یابد. اما انرژی ذخیره‌شده در این حالت مقدار ۴۷/۱۳٪ بوده که این مقدار بهبود برای آهنگ انرژی ذخیره شده نیز صورت می پذیرد.

۵- تأثیر زاویه قرارگیری مبادله‌کن گرمایی : نتایج نشان می‌دهند که مبادله‌کن گرمایی عمودی (زاویه ۹۰ درجه) نسبت به مبادله‌کن گرمایی افقی (۰درجه) کارایی گرمایی بالاتری دارد و زمان ذوب را ۴۲٪ بهبود می‌یابد.

۶- تأثیر دمای ورودی سیال انتقال گرما: هرچه دمای ورودی سیال انتقال گرما برای فرایند ذوب بیشتر و برای فرایند انجماد کمتر باشد، مدت زمان فرایندها کاهش یافته و وضعیت بهینه‌تری حاصل می‌شود.

۷- استفاده از مواد تغییرفازدهنده مدل چندگانه: استفاده از انواع دیگر مواد تغییرفازدهنده نسبت به مدل ساده یا پایه (پارافین)، موجب می‌شود زمان ذوب و انجماد نسبت به مدل ساده بهبود نسبی صورت گیرد.

۸- مراحل فرایند ذوب و انجماد: نمودارها نشان می‌دهند که فرایند ذوب و انجماد از سه مرحله زمانی سریع، آهسته و بسیار آهسته تشکیل شده است. در مرحله سریع حدود ۵۰٪ ماده تغییر فاز می‌دهد، در مرحله آهسته ۳۰٪ و در مرحله بسیار آهسته ۲۰ ٪ باقیمانده تغییر فاز می‌دهند. زمان تغییر فاز ماده در ۲۰٪ مرحله نهایی بیشتر از زمان تغییر فاز ۸۰٪ ماده در مراحل ابتدایی است که این باعث کاهش کارایی فرآیند می‌شود.

باتوجه به محدودیت‌های زمانی و منابع محاسباتی، بررسی تمامی شرایط ممکن در این مطالعه امکان‌پذیر نبوده است؛ بنابراین، برای ادامه تحقیقات و تکمیل نتایج به دست آمده، پیشنهاداتی ارائه می‌گردد که عبارتند از: بررسی تأثیر انواع مختلف مواد تغییرفازدهنده، انجام تحقیقات بیشتر برای مقایسه عملکرد مواد تغییرفازدهنده مختلف و تأثیر آنها بر کارایی سیستم ذخیره انرژی،تحلیل و شبیه‌سازی رفتار سیستم در دوره‌های زمانی طولانی‌تر برای بررسی پایداری و کارایی ذخیره انرژی در شرایط مختلف محیطی،استفاده از روشهای بهینه‌سازی برای طراحی بهینه‌تر مبادله‌کن‌های گرمایی با هدف کاهش زمان ذوب و افزایش کارایی کلی سیستم، استفاده از انواع مختلف پره‌ها برای کاهش زمان فرایند ذوب و انجماد مواد تغییر فاز دهنده.

۱۷- فهرست علائم

u, v, w	سرعت در راستای محور ها (m/s)
v	بردار سرعت(m/s)
t	زمان (s)
p	فشار(p)
Q	ظرفیت ذخیره گرمایی (J/K)
E	انرژی کل(J)
q	شار گرمایی (W/m^2)
h	آنتالپی (J)
in	ورودی
out	خروجی
T	دما(K)
S	جمله نیرو
ref	اندیس مرجع (اولیه) برای دما
m	جرم (kg)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
Cp	گرمای ویژه($\frac{J}{kg.K}$)
H	آنتالپی کل(j)
A	سطح (m^2)

علائم یونانی

ρ	چگالی($\frac{kg}{m^3}$)
μ	لزجت ($\frac{N.s}{m^2}$)
φ	تابع اتلافات
β	کسر مایع
β	ضریب انبساط حجمی(K^{-1})

۱۸- مراجع

[۱] حدیدی, امین, راستکار ابراهیم‌زاده, فراز, یاری دریامان, مرتضی. بررسی اثر دبی سیال بر عملکرد حرارتی و الکتریکی سامانه آب‌شیرین‌کن فوتوولتاییک–حرارتی مجهز به ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده در دو اقلیم ساحلی ایران .*مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*.1404; (): -. doi: 10.22034/jmeut.2026.65654.3518

[2] 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 Oct 1;74:223-36.

[۳] ویدا آزادیخواه , نادر پورمحمود حصار و ایرج میرزایی, "شبیه‌سازی فرایندهای انجماد و ذوب برای کاربرد در سیستم‌های ذخیره انرژی نهان," مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز, ۵۵ ۱ (۱۴۰۳): ۱۱-۲۰ , doi: 10.22034/jmeut.2024.62037.3425

[4] Agyenim F, Hewitt N, Eames P, Smyth M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). Renewable and sustainable energy reviews. 2010 Feb 1;14(2):615-28.

[5] Shukla A, Buddhi D, Sawhney RL. Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009 Oct 1;13(8):2119-25.

[6] Zalba B, Marín JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied thermal engineering. 2003 Feb 1;23(3):251-83.

[7] Mhadhbi M. Introductory chapter: Phase change material. Phase Change Materials and Their Applications. 2018 Aug 1:1-6.

[8] Annadurai G, Mathews AJ, Krishnan EN, Simonson CJ. A review of experimental methods to determine bioaerosol transfer in energy recovery ventilators. Applied Thermal Engineering. 2024 Mar 1;240:122322.

[9] Zhu J, Zhang W. Optimization design of plate heat exchangers (PHE) for geothermal district heating systems. Geothermics. 2004 Jun 1;33(3):337-47.

[10] Arsenyeva O, Tovazhnyanskyy L, Kapustenko P, Klemeš JJ, Varbanov PS. Review of developments in plate heat exchanger heat transfer enhancement for single-phase applications in process industries. Energies. 2023 Jun 27;16(13):4976.

[11] Raj VA, Velraj R. Heat transfer and pressure drop studies on a PCM-heat exchanger module for free cooling applications. International Journal of Thermal Sciences. 2011 Aug 1;50(8):1573-82.

[12] Tiari S, Qiu S, Mahdavi M. Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material. Energy Conversion and Management. 2015 Jan 1;89:833-42.

[13] Stathopoulos N, El Mankibi M, Issoglio R, Michel P, Haghighat F. Air–PCM heat exchanger for peak load management: Experimental and simulation. Solar Energy. 2016 Jul 1;132:453-66.

[14] Prieto MM, González B, Granado E. Thermal performance of a heating system working with a PCM plate heat exchanger and comparison with a water tank. Energy and Buildings. 2016 Jun 15;122:89-97.

[15] Chow TT, Lyu Y. Numerical analysis on the advantage of using PCM heat exchanger in liquid-flow window. Applied Thermal Engineering. 2017 Oct 1;125:1218-27.

[16] Wang Y, Wang L, Xie N, Lin X, Chen H. Experimental study on the melting and solidification behavior of erythritol in a vertical shell-and-tube latent heat thermal storage unit. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016 Aug 1;99:770-81.

[17] Elarem R, Mellouli S, Abhilash E, Jemni A. Performance analysis of a household refrigerator integrating a PCM heat exchanger. Applied Thermal Engineering. 2017;.33-125:1320

[18] Hu Y, Heiselberg PK. A new ventilated window with PCM heat exchanger—Performance analysis and design optimization. Energy and Buildings. 2018 Jun 15;169:185-94.

[19] Youssef W, Ge YT, Tassou SA. CFD modelling development and experimental validation of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral-wired tubes. Energy Conversion and Management. .510-157:498;2018

[20] Gholamibozanjani G, Farid M. Experimental and mathematical modeling of an air-PCM heat exchanger operating under static and dynamic loads. Energy and Buildings. 2019 Nov 1;202:109354.

[21] Palomba V, Brancato V, Frazzica A. Thermal performance of a latent thermal energy storage for exploitation of renewables and waste heat: An experimental investigation based on an asymmetric plate heat exchanger. Energy Conversion and Management. 2019 Nov 15;200:112121.

[۲۲] یوسفی شبانکاره تیره, میرجلیلی, سید علی آقا, علومی, سید امیرعباس, سلیم پور. مطالعه تجربی اثر افت فشار و انتقال حرارت چگالشی مبرد R-406a در لوله‌های مجهز به پره‌های دورپیچ در گام‌ها و طول‌های مختلف. مکانیک هوافضا. ۲۰۲۳ 106-93:(1)19;Apr 9.

[۲۳] رستمی محسن, فرج الهی امیرحمزه, قنبری مرتضی, نادری علی اصغر. شبیه سازی عددی اثر هندسه استفاده از لوله پره دار در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله.مکانیک هوافضا76-53 :2022.

[۲۴] گودرزی امیر. "آنالیز اگزرژی مبدل حرارتی فشرده گاز به مایع با کاربری خنک کن میانی در شرایط کاری مختلف. مکانیک هوافضا " ۲۰۲۰: ۸۵-۹۸.

[۲۵] طرفی.) یادداشت مهندسی) تأثیر طول لوله‌های انتقالی بر عملکرد سامانه بازیافت حرارت جریان-گردشی. مکانیک هوافضا. ۲۰۱۴ 2)10;22 Jun).

[26] Gürel B. A numerical investigation of the melting heat transfer characteristics of phase change materials in different plate heat exchanger (latent heat thermal energy storage) systems. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020 Feb 1;148:119117.

[27] Kruzel M, Bohdal T, Dutkowski K, Radchenko M. The effect of microencapsulated PCM slurry coolant on the efficiency of a shell and tube heat exchanger. Energies. 2022 Jul 15;15(14):5142.

[28] Li Q, Liu S, Sun X, Shen L, Cheng B, Xing H, Lin M. Numerical simulation of rapid heat storage in plate-fin phase change heat exchanger. In Journal of Physics: Conference Series 2024 May 1 (Vol. 2755, No. 1, p. 012039). IOP Publishing.

[29] Nagireddy PD, Shankar Vikas M, Sudi VS. Numerical Investigation of Phase-Changing Material Filled Shell and Tube Heat Exchanger with Fins. InInternational Conference on

Mechanical Engineering: Researches and Evolutionary Challenges 2023 Jun 23 (pp. 651-660). Singapore: Springer Nature Singapore.
[30] Ait Adine H, El Qarnia H. Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials. Applied mathematical modelling. 2009 Apr 1;33(4):2132-44.
[31] Wang WW, Zhang K, Wang LB, He YL. Numerical study of the heat charging and discharging characteristics of a shell-and-tube phase change heat storage unit. Applied Thermal Engineering. 2013 Sep 1;58(1-2):542-53.
[32] Agarwal A, Sarviya RM. An experimental investigation of shell and tube latent heat storage for solar dryer using paraffin wax as heat storage material. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2016 Mar 1;19(1):619-31.
[33] Kibria MA, Anisur MR, Mahfuz MH, Saidur R, Metselaar IH. Numerical and experimental investigation of heat transfer in a shell and tube thermal energy storage system. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2014 Apr 1;53:71-8.
[34] Fath HE. Heat exchanger performance for latent heat thermal energy storage system. Energy Conversion and Management. 1991 Jan 1;31(2):149-55.
[35] Gong ZX, Mujumdar AS. Finite-element analysis of cyclic heat transfer in a shell-and-tube latent heat energy storage exchanger. Applied thermal engineering. 1997 Jun 1;17(6):583-91.
[36] Esen M, Durmuş A, Durmuş A. Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials. Solar energy. 1998 Jan 1;62(1):19-28.
[37] Akgün M, Aydın O, Kaygusuz K. Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM. Energy conversion and management. 2007 Feb 1;48(2):669-78.
[38] Sari A, Kaygusuz K. Thermal performance of a eutectic mixture of lauric and stearic acids as PCM encapsulated in the annulus of two concentric pipes. Solar Energy. 2002 Jun 1;72(6):493-504.