

شبیه‌سازی فرایندهای انجماد و ذوب برای کاربرد در سیستم‌های ذخیره انرژی نهان

ویدا آزادیخواه

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، v.azadikhah@urmia.ac.ir

نادر پورمحمود*

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، n.pormahmod@urmia.ac.ir

ایرج میرزایی

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، i.mirzaee@urmia.ac.ir

چکیده

در مقاله حاضر فرایندهای ذوب و انجماد PCM در یک مخزن مستطیلی پره‌دار در حضور همرفت طبیعی و به همراه شرایط مرزی زمان‌مند، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور دو مدل عددی بر اساس روش‌های آنتالپی و ردگیری جبهه و در قالب روش بولتزمن شبکه‌ای جهت شبیه‌سازی فرایند تغییر فاز توسعه داده می‌شود. به منظور تجزیه و تحلیل اطلاعات از نرم افزار Fluent استفاده می‌شود. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تغییر شکل هندسی ایجاد شده در مبادله‌کن‌دولوله‌ای ساده تأثیر مثبت نداشته و نمی‌تواند مشکل ذوب نشدن پارافین‌های جامد باقی مانده در نیمه‌پایینی فضای حلقوی، پس از اتمام فرایند ذوب را حل کند. در دمای 69.9°C ذخیره سازی انرژی با شدت مناسبی انجام می‌شود اما بعد از این زمان شیب نمودارهای مربوط به ذخیره سازی انرژی گرمایی و کسر پارافین ذوب شده کم می‌شود. پس زمان ۶۰ دقیقه برای عدد رایلی 1.09×10^6 زمانی خاص است در این مطالعه به این زمان خاص زمان آستانه گفته می‌شود در صورتی که برای اعداد رایلی 1.67×10^6 زمان آستانه ۵۰ دقیقه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ذخیره انرژی نهان، فرایند ذوب، پارافین، روش بولتزمن، تغییر فاز جامد-مایع، مبادله‌کن دو لوله‌ای.

Simulation of the freezing & melting processes for use in Latent Heat Storage (LHS) systems

V. Azadikhah
N. Pourmahmoud
I. Mirzaee

Department of Mechanical Engineering, Urmia university, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, Urmia university, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, Urmia university, Urmia, Iran

Abstract

The present article examines the melting and freezing processes of PCM in a vane rectangular tank in the presence of natural displacement and along with time-dependent boundary conditions. For this purpose, two numerical models are developed based on enthalpy and front tracking methods and in the form of lattice Boltzmann method (LBM) to simulate the phase change process. Fluent software is used to analyze the data. According to the results of the research, the change in the geometrical shape created in the simple double tube converter did not have a positive effect and caused a lower percentage of paraffin to melt at the end of the process, and it cannot solve the problem of solid paraffin remaining in the lower half of the annular space not melting. after the completion of the melting process. At a temperature of 69.9°C , energy storage is carried out with a suitable intensity, but after this time, the slope of the graphs related to thermal energy storage and the fraction of melted paraffin decreases. So, the time of 60 minutes for the Rayleigh number 1.09×10^6 is a special time. In this study, this special time is called the threshold time, while for the Rayleigh numbers 1.67×10^6 , the threshold time is 50 minutes.

Keywords: latent energy storage, melting process, paraffin, Boltzmann method, solid-liquid phase change, Two-pipe converter

۱- مقدمه

انجماد به همراه سایر پارامترهای مسئله از جمله دما و میدان سرعت نامشخص بوده و باید در کنار آن‌ها محاسبه شود [۷-۱۰]. روش‌های مختلفی در این ارتباط معرفی شده‌اند که به ترتیب اهمیت عبارت‌اند از: روش آنتالپی، روش ردگیری جبهه و روش‌های مبتنی بر ایستا کردن جبهه. از میان این روش‌ها، روش آنتالپی به دلیل عدم نیاز به ردگیری جبهه تغییر فاز محبوبیت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها بدست آورده است [۱۱]. در کنار این مزیت مهم، عدم امکان بررسی اثرات دینامیکی متقابل دو فاز مایع و جامد، استفاده از این روش را دچار مشکل می‌کند. این مشکل در مواردی بروز می‌کند که فاز جامد در فاز مایع شناور است. در این موارد استفاده از روش ردگیری جبهه علیرغم پیچیدگی‌های بیشتر، راهگشا خواهد بود [۱۲].

چالش مهم دیگر در شبیه‌سازی فرایند تغییر فاز، در نظر گرفتن اثرات همرفت طبیعی درون فاز مایع می‌باشد. در نظر گرفتن این اثرات مستلزم حل همزمان معادلات تکانه و انرژی است. این موضوع با توجه به متغیر بودن موقعیت جبهه تغییر فاز، سبب پیچیدگی بیشتر حل

استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی نهان به عنوان ایده‌ای کارا در مدیریت منابع و مصارف انرژی مورد توجه و کاربرد گسترده مهندسی و محققین قرار گرفته است [۱-۳]. به طوریکه کارایی آن در سیستم‌های گرمایشی-سرمایشی ساختمان‌ها، باتری‌های گرمایی و مخازن ذخیره انرژی در نیروگاه‌های خورشیدی به اثبات رسیده است [۴]. کارایی بالای این سیستم‌ها به ظرفیت بالای ذخیره انرژی و همچنین ثابت بودن دمای تغییر فاز ارتباط داده می‌شود [۵]. از آنجا که در این سیستم‌ها فرایند تغییر فاز جامد-مایع (و برعکس) اتفاق می‌افتد، مطالعه این سیستم‌ها به بررسی مسئله ذوب/انجماد منجر می‌شود [۶]. دو چالش اساسی در مسائل تغییر فاز جامد-مایع وجود دارد. اولین موضوع در ارتباط با محاسبه موقعیت جبهه ذوب/انجماد پدیدار می‌شود، که این موضوع به ماهیت غیرخطی فرایند تغییر فاز ارتباط پیدا می‌کند، چرا که در این نوع مسائل، موقعیت جبهه ذوب/

* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: n.pormahmod@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

همزمان معادلات تکانه و انرژی می‌شود [۱۳-۱۵]. در این زمینه سه روش مختلف جهت تفکیک دو فاز جامد و مایع به شرح زیر پیشنهاد شده‌است. در روش اول، میدان سرعت را در کل میدان محاسباتی بدست آورده و سپس بر اساس موقعیت جبهه ذوب/ انجماد، میدان سرعت در فاز جامد را صفر در نظر می‌گیرند. در روش دیگر، لزجت سیال به صورت تابعی از فاز جامد (یا مایع) به نحوی تعریف می‌شود که مقدار آن در فاز جامد به صورت مجازی یک مقدار بسیار بزرگ اختیار کند. این موضوع سبب ناچیز شدن سرعت در فاز جامد می‌شود. همچنین در روش سوم، از مفهوم میدان متخلخل بهره گرفته می‌شود. به این معنی که برای فاز مایع، تخلخل یک، برای فاز جامد، تخلخل صفر و برای ناحیه خمیری بین دو فاز تخلخلی بین صفر و یک در نظر گرفته می‌شود. سپس با در نظر گرفتن نیروی خارجی متناسب با تخلخل و نفوذپذیری میدان، معادلات تکانه حل می‌شود.

هی و همکاران [۱۶] رفتار ذوب کپسول های پارافین در یک محفظه استوانه ای که بوسیله آب داغ احاطه شده‌است را بررسی کرده‌اند. نتایج آزمایش نشان دهنده سرعت بیشتر فرآیند ذوب در ناحیه بالای استوانه نسبت به بخش پایینی استوانه بوده‌است. همچنین با وارد کردن اثر همرفت طبیعی در حل عددی مطابقت خوبی بین نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی مشاهده شده‌است.

فان و همکاران [۱۷] کار مشابهی را بر روی ذوب پارافین در یک لوله عمودی در آرایش پوسته انجام داده‌اند. در این آزمایش PCM از سمت دیواره داخلی گرم شده‌است. آن‌ها مشاهده کردند PCM ذوب شده به صورت شعاعی به سمت بیرون بسط پیدا کرده و منطقه مخروطی شکلی را بوجود آورده است.

یان و همکاران [۱۸] به ارائه مدلی عددی بر پایه المان محدود و شبکه بندی متحرک برای شبیه‌سازی فرایند تغییر فاز (ذوب و انجماد) به همراه همرفت طبیعی پرداختند. در مدل آن‌ها از روشی مشابه روش آنتالپی برای حل معادله انرژی و موقعیت یابی جبهه انجماد، بهره گرفته شده‌است. با این وجود آنها با بهره گیری از مزیت شبکه بندی متحرک، به افزایش دقت محاسبات در ناحیه مرز بین دو فاز اقدام کرده‌اند. ضعف این روش آن است که برای تولید شبکه در هر گام زمانی دومعادله دیفرانسیل جزئی حل می‌شود، اما تعداد کل نقاط برای حل مسئله کاهش می‌یابد. مدل ارائه شده در می‌داند کارتی اعمال و با نتایج موجود مقایسه شده‌است.

اگروال و همکاران [۱۹] به بررسی عددی تأثیرات همرفت طبیعی در انتقال گرما اطراف یک استوانه افقی در فرایند تغییر فاز و موقعیت جبهه انجماد پرداختند. آن‌ها با اعمال روش حجم کنترل در شبکه بی سازمان، مسئله انتقال گرما حول استوانه به همراه مواد تغییر فاز دهنده را حل کردند. نتایج آن‌ها برای دو شرط مرزی دما ثابت و شار ثابت بر روی سطح خارجی استوانه، گزارش شده‌است. صحت سنجی مدل عددی مورد استفاده، توسط داده‌های تجربی موجود برای ذوب گالیوم داخل یک محفظه مستطیلی، صورت پذیرفت. طبق نتایج آن‌ها که با داده‌های تجربی موجود مقایسه شده‌است، در زمانهای آغازین ذوب گالیوم، موقعیت جبهه ذوب عمودی است که با افزایش زمان و افزایش اثرات همرفت طبیعی، جبهه ذوب به صورت انحنادار تغییر می‌کند.

پانیسیلوام و همکاران [۲۱] روش بولتزمن شبکه ای را جهت شبیه‌سازی فرایند تغییر فاز به کمک روش آنتالپی توسعه دادند. بدین

منظور آن‌ها با افزودن یک جمله به معادله برخورد، اثرات تغییر فاز را به صورت یک جمله چشمه وارد محاسبات نمودند. همچنین آن‌ها به کمک بسط چاپمن-انساکاک تطابق میان معادله بولتزمن گسسته شده و معادله انرژی را نشان دادند.

آمیدو و همکاران [۲۲] با توسعه معادله گسسته بولتزمن، به مطالعه فرایند تغییر فاز پرداختند. برای این کار آن‌ها با استفاده از مفهوم روش آنتالپی، و پس از حل میدان دما، موقعیت جبهه انجماد را بدست آوردند. از آنجا که در مدل آن‌ها از اثرات انتقال گرمای همرفت صرف نظر شده، برای محاسبه میدان دما تنها یک تابع توزیع f برای حل معادله انرژی معرفی شده‌است. همچنین آن‌ها با استفاده از بسط چاپمن-انساکاک نشان دادند که با افزودن جمله چشمه گرمایی به معادله بولتزمن گسسته، معادله ماکروسکوپی انرژی به همراه جمله چشمه بدست خواهد آمد.

حسابالا و همکاران [۲۳] روش بولتزمن شبکه ای را برای حل میدان دما و پوشش دادن فرایند تغییر فاز، به کمک روشی مشابه روش آنتالپی، توسعه دادند. آن‌ها مسئله ذوب PCM داخل یک مخزن مستطیلی را برای سه شرط مرزی مختلف نوع دوم حل کردند.

خودا و همکاران [۲۴] با به کارگیری زمان رهاسازی چند گانه و تعریف دو تابع توزیع جداگانه برای مقادیر سرعت و دما، فرایند ذوب PCM را در محیط متخلخل شبیه‌سازی کردند. معادلات تکانه بر اساس فرض غیر داری و معادله انرژی به کمک روش آنتالپی حل شده‌است. پایین بودن رسانایی گرمایی مواد تغییر فاز دهنده، سبب به کارگیری روش‌هایی جهت افزایش آهنگ انتقال گرما از قبیل به کارگیری پره در مخازن حاوی PCM شده‌است. با قرار دادن پره در مخزن حاوی PCM و نیز در نظر گرفتن اثرات همرفت طبیعی، عملاً امکان ارائه پاسخ تحلیلی برای مطالعه فرایند تغییر فاز از بین می‌رود. باین وجود، در برخی مطالعات مرتبط با فرایند انجماد و با صرف نظر از همرفت طبیعی، پاسخ‌های تحلیلی قابل قبولی برای پیش‌بینی موقعیت جبهه انجماد و کسر ماده منجمد شده ارائه شده‌است. توجه به این نکته ضروری است که فرض ناچیز بودن اثرات همرفت طبیعی فقط در برخی شرایط انجماد مورد تأیید قرار گرفته‌است و قابل تعمیم به فرایند ذوب نیست.

در کار حاضر فرایند ذوب و انجماد PCM داخل یک مخزن مستطیلی پره‌دار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور مدل عددی جهت شبیه‌سازی فرایند تغییر فاز، توسعه داده شده و شرایط صحت آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مدل تحلیلی برای فرایند انجماد با شرایط مرزی زمان‌مند ارائه شده و با نتایج مدل عددی مقایسه می‌شوند. همچنین دو مدل عددی بر اساس روش بولتزمن شبکه‌ای معرفی و در شرایط مختلف از قبیل تغییر فاز در رسانش خالص، تغییر فاز به همراه همرفت طبیعی و تغییر فاز به همراه اثرات دینامیکی متقابل دو فاز، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. شکاف تحقیقاتی پژوهش حاضر عبارتست از:

الف) مدل‌سازی دقیق‌تر:

- توسعه مدل‌های دقیق تر برای در نظر گرفتن پدیده‌های پیچیده مانند همرفت طبیعی، رسوب گذاری و نفوذ. بهبود مدل‌سازی رفتار غیرتعادلی، مانند انجماد سریع و ذوب ناقص. در نظر گرفتن اثرات هندسه ی پیچیده مخازن و مواد تغییر فاز دهنده.

ب) افزایش کارایی محاسباتی:

در این پژوهش لو و همکارانش به بررسی اثر همرفت آزاد در یک حفره مربعی دو بعدی پرداخته‌اند و هندسه مورد نظر به این صورت می‌باشد که دیوار بالا و پایین آدیاباتیک و دیوار چپ و راست در دمای ثابت قرار دارند. مهمترین عامل مقایسه‌ای به منظور درک بهتر انتقال گرما و خصوصیات جریان همرفت آزاد داخل حفره بررسی توزیع عدد ناسلت بر روی دیواره‌ها است.

۴- آنالیز و بحث

۴-۱- توزیع دما و مکان ناحیه ماشی برای $Ra = 1/0.9 \times 10^6$ (دمای $69/9^\circ C$)

توزیع دمایی و مکان مرز متحرک برای دمای دیواره استوانه‌ای در دمای $69/9^\circ C$ برای سه زمان مختلف در شکل ۲ نشان داده شده‌است. برای حالتی که دمای دیواره استوانه داخلی $69/9^\circ C$ است $10^\circ C$ نسبت به دمای ذوب پارافین بیشتر است، پارافین جامد در ابتدا توسط فرآیند انتقال گرمای رسانشی شروع به ذوب شدن می‌کند.

مطابق نتایج بدست آمده می‌توان از شکل ۲ مشاهده کرد که با افزایش ناحیه مذاب تأثیر همرفت نسبت به فرآیند انتقال گرمای رسانشی افزایش می‌یابد. نیروی مقاومی توسط پارافین جامد موجود بر سر مسیر حرکت پارافین مذاب موجب کاهش شتاب حرکت مواد مذاب به سمت پایین می‌شود. در این زمان دو مکانیزم انتقال گرمای رسانشی و همرفت در نیمه بالایی مبادله‌کن حاکم هستند، اما هنوز در نیمه پایینی مبدل فقط مکانیزم انتقال گرمای رسانشی حاکم است. در کانتورهای مربوط به موقعیت ناحیه خمیری با سبز و ناحیه مذاب با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. از شکل‌های مربوط به موقعیت ناحیه خمیری می‌توان مشاهده کرد که به علت کوچک بودن این فضا عدد رایلی برای این مورد نسبتاً کم است و همرفت طبیعی در مقایسه با فرآیند انتقال گرمای رسانشی از قدرت کمتری برخوردار است. مطابق نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، شکل ناحیه خمیری در قسمت پایینی فضای حلقوی گسترش نمی‌یابد. بنابراین، این ناحیه همانند سدی از پیشرفت مواد مذاب در ناحیه پایینی فضای حلقوی جلوگیری می‌کند. بعد از سپری شدن زمان آستانه و با کاهش اختلاف دما بین ماده تغییر فازدهنده و دیواره استوانه داخلی، سرعت بیشینه مواد مذاب رو به کاهش است و روند نزولی پیدا می‌کند. این اتفاق موجب کاهش اثر همرفت طبیعی می‌شود. از کانتورهای موجود در شکل ۲-الف می‌توان نحوه حرکت ناحیه خمیری و مرز متحرک را با گذر زمان مشاهده کرد. از کانتورهای موجود در سمت راست شکل ۲-الف می‌توان توزیع دما را برای دمای دیواره استوانه‌ای در دمای ثابت $69/9^\circ C$ مشاهده کرد. در کانتورهای مربوط به دما تشخیص ناحیه خمیری و مقدار مذاب دشوار است، زیرا باید توجه دقیقی به دامنه‌های دمایی داشت. کانتورهای دما برای تشخیص پیشرفت فرآیند انتقال گرما توسط هدایت و ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به صورت محسوس بسیار مفید می‌باشند. از کانتورهای دمایی فشرده در قسمت پایین دیواره استوانه داخلی می‌توان مشاهده کرد که بیشینه آهنگ انتقال گرما در این قسمت ایجاد می‌شود.

- توسعه الگوریتم‌های عددی کارآمدتر برای حل معادلات حاکم بر فرآیند انجماد و ذوب. استفاده از تکنیک‌های تقریب پیشرفته برای کاهش زمان شبیه‌سازی. به کارگیری روش‌های موازی سازی برای شبیه‌سازی‌های روی خوشه‌های محاسباتی.

(ج) ادغام با سیستم‌های انرژی:

- توسعه مدل‌های جامع برای شبیه‌سازی عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی نهان در ترکیب با سایر اجزای سیستم‌های انرژی، مانند منابع تولید انرژی و شبکه‌های برق. بررسی و بهینه‌سازی استراتژی‌های کنترلی برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی نهان. ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی نهان با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی.

۲- روش پژوهش

با توجه به فیزیک مسئله و نیز با در نظر گرفتن نانو سیال بعنوان محیط پیوسته معادلات پیوستگی انرژی و نیز خواص نانو سیال بصورت زیر بیان می‌شود:

معادله پیوستگی:

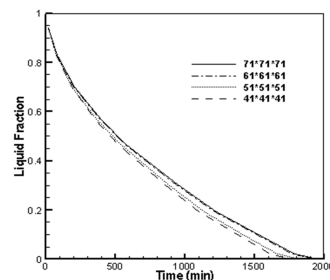
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

هنگامی که پیش زمینه‌های حل مورد توجه قرار گرفت قدم‌های زیر به عنوان مراحل روند حل مسئله باید برداشته شود: شروع حل گر با انتخاب مدل دو بعدی - وارد کردن شبکه - چک کردن شبکه - انتخاب فرمول مناسب حل - انتخاب معادله پایه حل: (مغشوش (غیر لزج))، ترکیب‌های شیمیایی مدل‌های گرمایی و... شناساندن مدل‌های اضافی مانند: فن‌ها، مدل‌های گرمایی و محیط‌های مختلط مورد نظر است - تعیین خواص مواد - تعیین شرایط مرزی - تنظیم پارامترهای کنترل روند حل - اعمال شرایط اولیه در میدان حل محاسبه حل - آزمایش نتایج - ذخیره‌سازی نتایج.

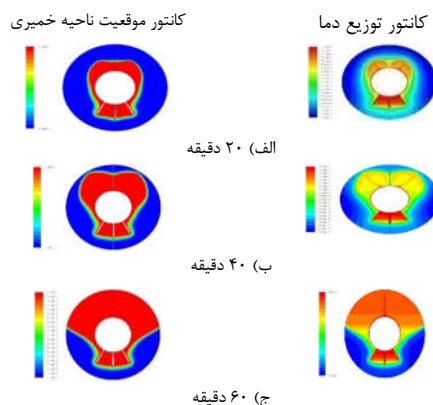
۳- ساختار جریان و شکل پارافین مذاب برای اعداد

رایلی مختلف در مبادله‌کن ساده

جهت اعتبارسنجی حل عددی همرفت آزاد انجام گرفته، نتایج بدست آمده را با نتایج حل عددی حاصل از کار لو و همکارانش [۲۲] مقایسه می‌شود.



شکل ۱- اثر همرفت آزاد در یک حفره مربعی دو بعدی (71*71,71) پژوهش حاضر بقیه موارد اعتبارسنجی)



شکل ۲- (راست) توزیع دما، (چپ) موقعیت ناحیه خمیری برای دیواره لوله داخلی در $T_{\text{wall}} = 69.6^{\circ}\text{C}$ و دمای اولیه $T_{\text{initial}} = 41.2^{\circ}\text{C}$ در زمان های (الف) ۲۰ دقیقه، (ب) ۴۰ دقیقه و (ج) ۶۰ دقیقه.

در ابتدای فرآیند شکل های دایره ای حاصل از کانتورهای دما ثابت در طی ذوب شدن نشان دهنده غالب بودن فرآیند انتقال گرمای رسانشی هستند. با گذر زمان حلقه های دما ثابت بر روی دیوار استوانه ای داخلی شروع به جدا شدن از سطح لوله و منحرف شدن به سمت قسمت بیرونی فضای حلقوی می کنند، این پدیده نشان دهنده تأثیر فرآیند همرفت طبیعی است.

در اصل با حرکت پارافین مذاب به سمت بالا، پارافین ذوب شده جدید جایگزین آن در نزدیک دیواره لوله داخلی می شود و این فرآیند به صورت دائم در حال تکرار شدن است. اما اختلاف دما بین دیوار و ماده مذاب به تدریج شروع به کاهش یافتن در طی حرکت ماده مذاب به سمت بالا می کند و به دنبال آن آهنگ انتقال گرما کاهش می یابد. حرکت جریان واداشته موجب می شود که خطوط هم دما از دیواره استوانه داخلی به سمت بالا حرکت کنند و موجب تغییرات نظم خطوط هم دما در نیمه بالایی فضای حلقوی شدید می شود. در حالی که ماده تغییر فاز دهنده مذاب از بالا به سمت پایین فضای حلقوی حرکت می کند، خطوط دما ثابت به شکل قارچ تبدیل می شوند و سپس شروع به صاف شدن می کنند. در این زمان فرآیند انتقال گرمای همرفت توسط رسانش جایگزین شده است. در قسمت پایینی فضای حلقوی در سه زمان نمایش داده شده در شکل ۲-ب انتقال گرما به طور عمده به وسیله رسانش کنترل می شود.

شکل ۲ (ج) نشان می دهد که بعد از سپری شدن ۶۰ دقیقه از فرآیند ذوب شدن حرکت همرفت ماده مذاب در نیمه بالایی فضای حلقوی شدید می شود. این نکته را می توان از کانتورهای دمایی در نیمه بالایی فضای حلقوی نتیجه گرفت. یک نتیجه دیگر از این شکل آشکار می کند که با افزایش زمان ذوب شدن، تراکم خطوط هم دما در جهت تأثیر نیروی شناوری موجب بهبود آهنگ انتقال گرما در این ناحیه می شود. با افزایش زمان ذوب شدن ماده مذاب داغ شروع به حرکت به سمت پایین در طی مسیر ناحیه سرد خمیری می کند. این ناحیه مذاب پس از دست دادن انرژی سردتر شده و نهایتاً به ته ناحیه جامد می رسد. در نیمه پایینی مبادله کن مکانیزم انتقال گرمای رسانشی به علت ترکیب بندی هندسی افقی فضای حلقوی بسیار مهم است.

اما این مکانیزم انتقال گرما به علت پایین بودن رسانایی گرمایی پارافین اثر چندانی ندارد. می توان از شکل مشاهده کرد که با گذر زمان از ۲۰ دقیقه تا ۶۰ دقیقه موقعیت ناحیه خمیری عملاً در نیمه پایینی فضای حلقوی در زاویه هایی حدود $\theta = 180^{\circ}$ و $\theta = 260^{\circ}$ ثابت باقی می ماند (محور تقارن پایین $\theta = 0^{\circ}$ و محور تقارن بالا $\theta = 180^{\circ}$) مطابق نتایج بدست آمده آهنگ ذوب شدن در ناحیه پایینی مبادله کن $\theta = 80^{\circ}$ به طور مؤثری نسبت به سایر نواحی درون فضای حلقوی کندتر صورت می گیرد. مشابه چنین پدیده ای توسط سایر محققین برای مواد تغییر فاز دهنده خالص درون فضای حلقوی افقی که به طور تجربی کار کرده اند، گزارش شده است.

این شکل ها ثابت می کنند که حتی بعد از سپری شدن زمان بیشتری از فرآیند ذوب شدن، فرآیند تغییر فاز عملاً متوقف می شود. با ادامه یافتن فرآیند ذوب شدن با گذر زمان ذخیره سازی انرژی که هدف اصلی این مطالعه است، فقط به صورت محسوس صورت می گیرد. این مقدار در مقایسه با ذخیره سازی انرژی توسط گرمای نهان بسیار ناچیز است. در نتیجه ادامه یافتن فرآیند ذوب تحت این شرایط سودمند و مقرون به صرفه نیست.

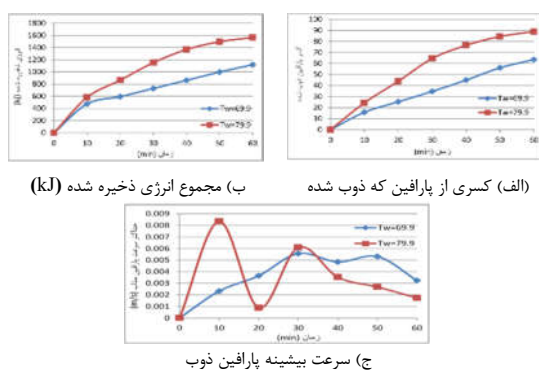
۴-۲- توزیع دما و مکان ناحیه خمیری برای $1/67 \times 10^6$ Ra = (دمای $79/9^{\circ}\text{C}$)

توزیع دما و موقعیت ناحیه خمیری برای دمای دیواره استوانه داخلی در دمای $79/9^{\circ}\text{C}$ و فضای حلقوی حاوی پارافین در دمای اولیه $41/2^{\circ}\text{C}$ در سه زمان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب در شکل های ۲ (الف-ج) نشان داده شده اند. در این مورد یک عدد رایلی نسبتاً بزرگ ارائه شده است. بنابراین؛ تأثیر نیروی شناوری در مقایسه با دو عدد رایلی قبلی بسیار آشکار می شود. در مقایسه با عدد رایلی اولی دمای دیواره ای استوانه داخلی 10°C افزایش یافته است و این موجب می شود تا فرآیند ذوب شدن در ناحیه بالایی فضای حلقوی شتاب گرفته و در مقایسه با دو مورد قبلی با اعداد رایلی کوچک تر، نرخ ذوب بیشتری ایجاد شود. باید توجه کرد که دمای بالاتر موجب ایجاد گرادیان دمایی قوی تر در ناحیه مذاب در زمان یکسان در مقایسه با دو مورد قبلی می شود درست است که عدد رایلی استفاده شده در این مورد از دو مورد قبلی بزرگ تر است؛ اما موقعیت ناحیه خمیری که توسط خطوط دما ثابت $51/2^{\circ}\text{C}$ و $59/9^{\circ}\text{C}$ محدود شده بعد از سپری شدن ۶۰ دقیقه عملاً در موقعیت های شعاعی و زاویه ای یکسان با اعداد رایلی قبلی در نیمه پایینی فضای حلقوی قرار دارد. این مطلب به دلیل غالب بودن مکانیزم انتقال گرمای رسانشی در این ناحیه است از مقایسه شکل های ۳ (الف-ب-ج) با شکل های ۲ (الف-ب-ج) می توان این نکته را مشاهده کرد.

از نمودار ۱ می توان دید؛ ناحیه خمیری در زمان ۲۰ دقیقه به سطح لوله خارجی مبادله کن رسیده است و بعد از این زمان ناحیه مذاب شروع به حرکت به سمت پایین می کند و بعد از ۴۰ دقیقه ناحیه خمیری در نیمه پایینی به شکل افقی تبدیل می شود و با گذر زمان حرکتی ندارد. حرکت نکردن ناحیه خمیری به دلیل عدم تأثیر فرآیند همرفت طبیعی و حاکم بودن فرآیند انتقال گرمای رسانشی است با ادامه فرآیند ذوب شدن اثر همرفت طبیعی کم می شود و حداکثر سرعت پارافین مذاب هم کاهش می یابد.

۶۹/۹ در زمان ۶۰ دقیقه (زمان آستانه) برابر با $1155/52 \text{ KJ}$ است، این مقدار در مقایسه با انرژی ذخیره شده در زمان قبلی (۵۰ دقیقه) تنها ۱۰٪ انرژی بیشتری ذخیره کرده است همچنین از نمودار ۱ (ب) مربوط به سرعت بیشینه پارافین ذوب شده میتوان مشاهده کرد که سرعت بیشینه برای پارافین مذاب در زمان ۶۰ دقیقه حدود m/s $0.408/10$ است که در مقایسه با زمان قبلی آن (۵۰ دقیقه) به اندازه ۳۴ درصد کمتر است یعنی سرعت بیشینه بعد از زمان ۶۰ دقیقه به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. پس به عبارت دیگر طبق مطالب بیان شده نیروی شناوری به علت کم شدن اختلاف دمای بین منبع (لوله داخلی) و مواد مذاب کوچک شده است.

می توان از نمودارهای ۱، مشاهده کرد که در دمای $69/9^{\circ}\text{C}$ ذخیره سازی انرژی با شدت مناسبی انجام می شود اما بعد از این زمان شیب نمودارهای مربوط به ذخیره سازی انرژی گرمایی و کسر پارافین ذوب شده کم می شود. پس زمان ۶۰ دقیقه برای عدد رایلی $10^6 \times 1/09$ زمانی خاص است در این مطالعه به این زمان خاص زمان آستانه گفته می شود در صورتی که برای اعداد رایلی $10^6 \times 1/67$ زمان آستانه ۵۰ دقیقه می باشد. به روشنی می توان دریافت که برای $10^6 \times 1/67 \leq Ra \leq 10^6 \times 1/09$ تأثیر عدد رایلی بر روی مقدار انرژی ذخیره شده بعد از زمان آستانه ناچیز است؛ زیرا فرآیند انتقال گرمای رسانشی مکانیزم غالب بوده و در این زمان ذخیره سازی انرژی به صورت محسوس در ماده مذاب صورت می گیرد یک مقایسه کمی بین مجموع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین مذاب و کسری از پارافین که ذوب شده در نمودار ۱ ارائه شده است. این نتایج نشان دهنده تأثیر عدد رایلی (دمای دیوار) برای پارافین در دمای اولیه $^{\circ}\text{C}$ $41/2$ برای سپری شدن ۶۰ دقیقه از فرآیند ذوب شده ارائه شده است. تمام کمیت های پیش بینی شده با مورد اولی در دمای $Ra=1.09 \times 10^6$ ، $T_{wall}=69/9^{\circ}\text{C}$ با هم مقایسه شده اند.

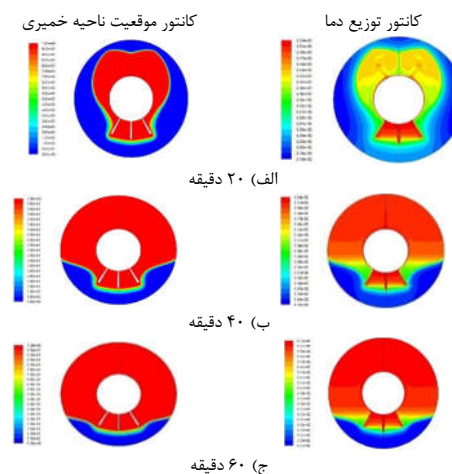


نمودار ۱- عملکرد مبادله کن دو لوله ای ساده در دماهای $T_{wall}=69.9^{\circ}\text{C}$ و $T_{wall}=79.9^{\circ}\text{C}$ و دمای اولیه $^{\circ}\text{C}$ $41/2$

۴-۴- ساختار جریان و شکل پارافین مذاب برای اعداد رایلی مختلف با در نظر گرفتن سه پره (مبادله کن نوع a)

توزیع دما در هر لحظه در فاز جامد، مایع و ناحیه خمیری و مکان مرز متحرک در فاز مایع در طی فرآیند ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده در یک فضای حلقوی پره دار در شکل های زیر به ترتیب برای

البته بعد از افقی شدن ناحیه خمیری تقریباً فرآیند انتقال گرمای رسانشی هم در نیمه پایینی (پارافین جامد) و هم در نیمه بالایی فضای حلقوی (پارافین مایع) حاکم می شود.



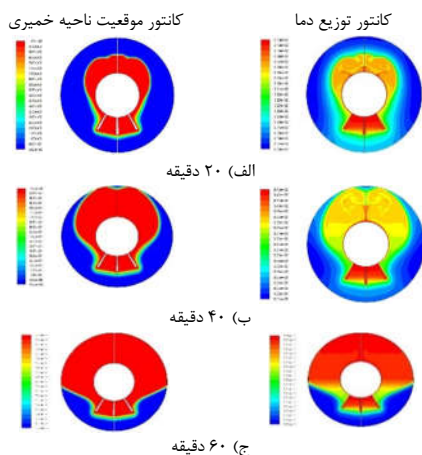
شکل ۳- (راست) توزیع دما، (چپ) موقعیت ناحیه خمیری برای دیواره لوله داخلی در $T_{wall}=79.9$ و دمای اولیه $T_{initial}=41.2$ در زمان های (الف) ۲۰، (ب) ۴۰ و (ج) ۶۰.

۴-۳- مجموع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین مایع و کسری از پارافین که ذوب شده برای اعداد رایلی مختلف

به منظور پی بردن به نقش فرآیند انتقال گرمای همرفت بر روی فرآیند ذوب شدن مجموع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین و کسری از پارافین که ذوب شده است، برای دو عدد رایلی مختلف در نمودار ۱ نشان داده شده اند. نمودارهای گرافیکی ارائه شده در نمودار ۱ به صورت تابعی از زمان برای سه دمای دیواره استوانه داخلی ارائه شده اند و با هم مقایسه می شوند.

از شکل های ارائه شده آشکار می شود که در مراحل اولیه فرآیند ذوب شدن آهنگ ذوب شدن تقریباً خطی است و مجموع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین مذاب و درصد ذوب شدن پارافین با گذر زمان افزایش می یابد. می توان نتیجه گرفت که روند ذوب شدن در یک فضای حلقوی هم مرکز برای یک ماده تغییر فاز دهنده مشخص تا یک زمان مشخص به طور موثری افزایش می یابد بعد از سپری شدن این زمان مجموع انرژی ذخیره شده و آهنگ ذوب شدن به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. زیرا از همرفت طبیعی جلوگیری می شود. این مطلب را می توان از نمودارهای مربوط به سرعت بیشینه پارافین مذاب مشاهده کرد. این زمان خاص معروف به زمان آستانه است و مطابق نمودارهای ارائه شده در این مطالعه برای رایلی $10^6 \times 1/09$ (دمای $69/9^{\circ}\text{C}$) زمانی حدود ۶۰ دقیقه و برای رایلی $10^6 \times 1/67$ (دمای $79/9^{\circ}\text{C}$) زمانی حدود ۵۰ دقیقه دارد.

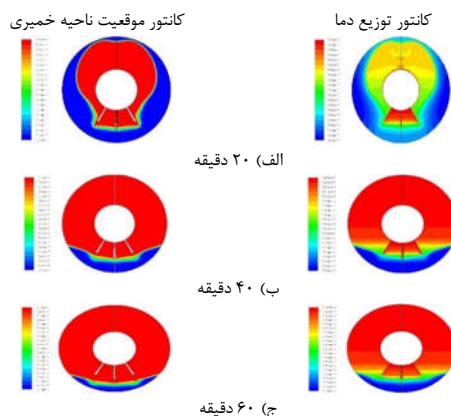
برای مشاهده بهتر تأثیر زمان آستانه بر عملکرد حرارتی مبادله کن دو لوله ای مقدار انرژی ذخیره شده و سرعت بیشینه پارافین مذاب برای زمان های قبل و بعد از زمان آستانه به صورت پیش رو ارائه شده اند: مقدار انرژی ذخیره شده برای مبادله کنی با دمای دیواره $^{\circ}\text{C}$ 50



شکل ۴- (راست) توزیع دما، (چپ) موقعیت ناحیه خمیری برای دیواره لوله داخلی در $T_{wall} = 6.9^\circ C$ و دمای اولیه $2^\circ C$ در زمان های الف) ۲۰ دقیقه، ب) ۴۰ دقیقه، ج) ۶۰ دقیقه

۴-۶- توزیع دما و مکان ناحیه خمیری برای $10^6 \times 1/67$ $Ra = (79/9^\circ C)$ دمای

توزیع دمایی و مکان مرز متحرک برای دمای دیواره استوانه داخلی در دمای $79/9^\circ C$ برای سه زمان مختلف در شکل های زیر نشان داده شده است. برای حالتی که دمای دیواره استوانه داخلی $79/9^\circ C$ است $10^\circ C$ نسبت به دمای ذوب پارافین بیشتر است، پارافین جامد در ابتدا توسط فرآیند انتقال گرمای رسانش شروع به ذوب شدن می کند. در دقایق ابتدایی فرآیند ذوب شدن، کانتورهای دمایی به صورت دایره هایی متقارن فرآیند ذخیره سازی انرژی گرمایی را به صورت محسوس نشان می دهند. بعد از ذوب شدن پارافین در ابتدا ناحیه مذاب به صورت متقارن اطراف لوله داخلی شروع به پیشرفت می کند. تا این زمان به طور کامل فرآیند ذوب شدن توسط انتقال گرمای رسانشی به پیش می رود، اما با گذر زمان و افزایش ناحیه مذاب به تدریج انتقال گرما توسط فرآیند همرفت طبیعی شروع می شود، این موضوع را می توان از تغییرات تقارن ناحیه خمیری مشاهده کرد.



شکل ۵- (راست) توزیع دما، (چپ) موقعیت ناحیه خمیری برای دیواره لوله داخلی در $79/9^\circ C$ و دمای اولیه $41/2^\circ C$

دماهای $69/9^\circ C$ ، $79/9^\circ C$ نمایش داده شده اند. در سمت راست هر شکل سه کانتور مربوط به توزیع دمای پارافین و در سمت چپ هر شکل سه کانتور مربوط به شکل ناحیه خمیری و موقعیت آن در زمان های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه نشان داده شده اند. تمام شبیه سازی ها برای پارافین با دمای اولیه $Ste_i = 0.113, 41.2$ انجام شده اند. در این تحلیل جهت اعتبار سنجی از ماده تغییر فازدهنده به کار برده در حل عددی استفاده شده است.

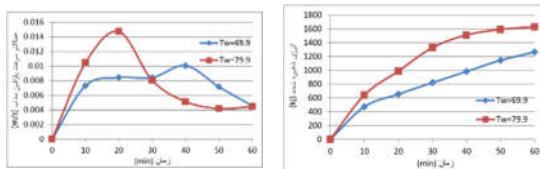
جدول ۱- خواص فیزیکی و ضخامت پره های آلومینیومی

خواص	علامت	واحد	مقادیر
رسانایی گرمایی (جامد)	K	$\left(\frac{kw}{mK}\right)$	۰/۱۷۹۹
چگالی (جامد)	p	$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	۲۷۱۲/۶
گرمای ویژه (جامد)	C _p	$\left(\frac{kJ}{kg.K}\right)$	۰/۶۹
عرض شعاعی پره			
ابعاد	نسبت	واحد	مقادیر
ضخامت در پایه	-	mm	۱/۰۵
ضخامت در رأس پره مبادله کن نوع a	-	mm	۱/۸۸۵
طول پره در مبادله کن نوع a	$\frac{G}{2}$	mm	۱۶
ضخامت در رأس پره مبادله کن نوع b	-	Mm	۱/۸۸۵
طول پره در مبادله کن نوع b	$\frac{G}{2}$	Mm	۸/۲

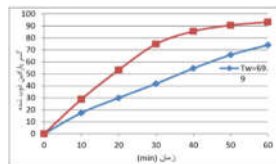
۴-۵- توزیع دما و مکان ناحیه خمیری برای $10^6 \times 1/0.9$ $Ra = (69/9^\circ C)$ دمای

توزیع دمایی و مکان مرز متحرک برای دمای دیواره استوانه داخلی در دمای $69/9^\circ C$ برای سه زمان مختلف در شکل های زیر نشان داده شده است. برای حالتی که دمای دیواره استوانه داخلی $69/9^\circ C$ است $10^\circ C$ نسبت به دمای ذوب پارافین بیشتر است، پارافین جامد در ابتدا توسط فرآیند انتقال گرمای رسانش شروع به ذوب شدن می کند. در دقایق ابتدایی فرآیند ذوب شدن، کانتورهای دمایی به صورت دایره هایی متقارن فرآیند ذخیره سازی انرژی گرمایی را به صورت محسوس نشان می دهند. بعد از ذوب شدن پارافین در ابتدا ناحیه مذاب به صورت متقارن اطراف لوله داخلی شروع به پیشرفت می کند. تا این زمان به طور کامل فرآیند ذوب شدن توسط انتقال گرمای رسانش به پیش می رود، اما با گذر زمان و افزایش ناحیه مذاب به تدریج انتقال گرما توسط فرآیند همرفت طبیعی شروع می شود.

ارائه شده است. این نتایج نشان دهنده تأثیر عدد رایلی (دمای دیوار) برای پارافین در دمای اولیه $41/2^{\circ}\text{C}$ برای سپری شدن ۶۰ دقیقه از فرآیند ذوب شده ارائه شده است. تمام کمیت های پیش بینی شده با مورد اولی در دمای $T_{\text{wall}}=9.69 \text{ Ra}=1/0.9 \times 10^6$ با هم مقایسه شده اند.



الف) (مجموع انرژی ذخیره شده (kJ) ب) سرعت بیشینه پارافین ذوب شده



ج) کسری از پارافین که ذوب شده

نمودار ۲- عملکرد مبدله کن دو لوله ای در دماهای $69/9^{\circ}\text{C}$ و $41/2^{\circ}\text{C}$ در دمای اولیه

۴-۸- ساختار جریان و شکل پارافین مذاب برای مبدله کن خارج از مرکز برای $\text{Ra} = 1/0.9 \times 10^6$ (دمای $69/9^{\circ}\text{C}$) و با در نظر گرفتن سه پره

عبدالمکی مسئله خارج از مرکزی را برای مبدله کن ساده بررسی کرده و میزان بهینه خارج از مرکزی بدست می آید، خارج از مرکزی در نظر گرفته شده ۳۰٪ از شعاع لوله بزرگ تر است. توزیع دمایی و مکان مرز متحرک برای دمای دیواره استوانه داخلی در دمای $69/9^{\circ}\text{C}$ برای سه زمان مختلف در شکل های زیر نشان داده شده است. برای حالتی که دمای دیواره استوانه داخلی $69/9^{\circ}\text{C}$ است ۱۰ نسبت به دمای ذوب پارافین بیشتر است، پارافین جامد در ابتدا توسط فرآیند انتقال گرمای رسانی شروع به ذوب شدن می کند. در دقایق ابتدایی فرآیند ذوب شدن، کانتورهای دمایی به صورت دایره هایی متقارن فرآیند ذخیره سازی انرژی گرمایی را به صورت محسوس نشان می دهند. بعد از ذوب شدن پارافین در ابتدا ناحیه مذاب به صورت متقارن اطراف لوله داخلی شروع به پیشرفت می کند. تا این زمان به طور کامل فرآیند ذوب شدن توسط انتقال گرمای رسانی به پیش می رود، اما با گذر زمان و افزایش ناحیه مذاب به تدریج انتقال گرما توسط فرآیند همرفت طبیعی شروع می شود، این موضوع را می توان از تغییرات تقارن ناحیه خمیری مشاهده کرد.

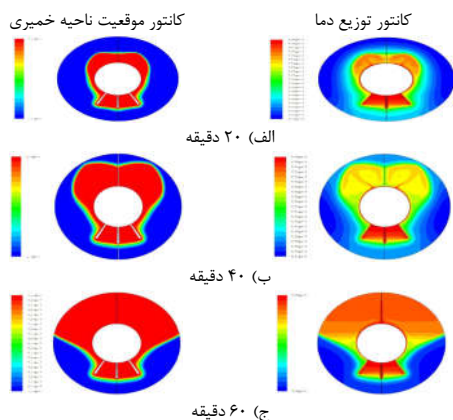
۴-۷- مجموع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین مایع و کسری از پارافین که ذوب شده برای اعداد رایلی مختلف در (مبدله کن نوع a)

به منظور پی بردن به نقش فرآیند انتقال گرما همرفت بر روی فرآیند ذوب شدن مجموع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین و کسری از پارافین که ذوب شده است، برای سه عدد رایلی مختلف در شکل ۴ نشان داده شده اند. نمودارهای گرافیکی ارائه شده در شکل ۴ به صورت تابعی از زمان برای سه دمای دیواره استوانه داخلی ارائه شده اند و با هم مقایسه می شوند.

روند ذوب شدن در یک فضای حلقوی هم مرکز برای یک ماده تغییر فاز دهنده مشخص تا یک زمان مشخص به طور موثری افزایش می یابد بعد از سپری شدن این زمان مجموع انرژی ذخیره شده و آهنگ ذوب شدن به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. زیرا از همرفت طبیعی به طور محسوس جلوگیری می شود. این مطلب را می توان از نمودارهای مربوط به سرعت بیشینه پارافین مذاب مشاهده کرد که بعد از این زمان روند پیدا می کنند. این زمان خاص معروف به زمان آستانه است و مطابق نمودارهای ارائه شده در این مطالعه برای رایلی $1/0.9 \times 10^6$ (دمای $69/9^{\circ}\text{C}$) زمانی حدود ۶۰ دقیقه و برای رایلی $1/67 \times 10^6$ (دمای $79/9^{\circ}\text{C}$) زمانی حدود ۵۰ دقیقه دارد.

برای مشاهده بهتر تأثیر زمان آستانه بر عملکرد گرمایی مبدله کن دو لوله ای مقدار انرژی ذخیره شده و سرعت بیشینه پارافین مذاب برای زمان های قبل و بعد از زمان آستانه به صورت پیش رو ارائه شده اند: مقدار انرژی ذخیره شده برای مبدله کنی با دمای دیواره $69/9^{\circ}\text{C}$ در زمان ۶۰ دقیقه (زمان آستانه) برابر با $1265/92 \text{ KJ}$ است، این مقدار در مقایسه با انرژی ذخیره شده در زمان قبلی (۵۰ دقیقه) تنها ۱۰٪ انرژی بیشتری ذخیره کرده است همچنین از نمودار ۲ (ب) مربوط به سرعت بیشینه پارافین ذوب شده می توان مشاهده کرد که سرعت بیشینه برای پارافین مذاب در زمان ۶۰ دقیقه حدود $0/046 \text{ m/s}$ است که در مقایسه با زمان بعدی آن (۵۰ دقیقه) به اندازه ۳۶ درصد کمتر است یعنی سرعت بیشینه بعد از زمان ۶۰ دقیقه به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. پس به عبارت دیگر طبق مطالب بیان شده نیروی شناوری به علت کم شدن اختلاف دمای بین منبع (لوله داخلی) و مواد مذاب کوچک شده است.

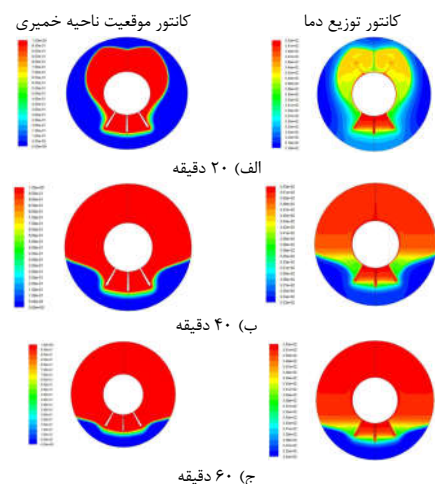
می توان از نمودارهای ۲، مشاهده کرد که در دمای $69/9^{\circ}\text{C}$ ذخیره سازی انرژی با شدت مناسبی انجام می شود اما بعد از این زمان شیب نمودارهای مربوط به ذخیره سازی انرژی گرمایی و کسر پارافین ذوب شده کم می شود. پس زمان ۶۰ دقیقه برای عدد رایلی $1/0.9 \times 10^6$ زمانی خاص است در این مطالعه به این زمان خاص زمان آستانه گفته می شود در صورتی که برای اعداد رایلی $1/67 \times 10^6$ زمان آستانه ۵۰ دقیقه می باشد و این مطلب از نمودارهای ۲ دیده می شود. به روشنی می توان دریافت که برای $1/67 \times 10^6 \leq \text{Ra} \leq 1/0.9 \times 10^6$ تأثیر عدد رایلی بر روی مقدار انرژی ذخیره شده بعد از زمان آستانه ناچیز است؛ زیرا فرآیند انتقال گرمای رسانی مکانیزم غالب بوده و در این زمان ذخیره سازی انرژی به صورت محسوس در ماده مذاب صورت می گیرد یک مقایسه کمی بین مجموع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین مذاب و کسری از پارافین که ذوب شده در جدول ۲



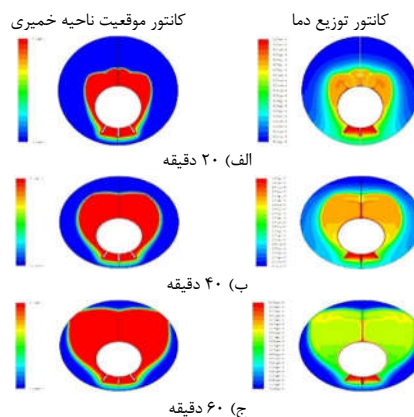
شکل ۷- (راست) توزیع دما، (چپ) موقعیت ناحیه خمیری برای مبادله‌کن نوع a در دمای دیواره لوله داخلی در دمای ۶۹/۹ و دمای اولیه ۴۱/۲ در زمان های (الف) ۲۰ دقیقه، (ب) ۴۰ دقیقه، (ج) ۶۰ دقیقه

۴-۹-۱-۲- توزیع دما و مکان ناحیه خمیری برای $Ra = 1/67 \times 10^6$ (دمای ۷۹/۹°C)

توزیع دمایی و مکان مرز متحرک برای دمای دیواره استوانه داخلی در دمای ۷۹/۹°C برای سه زمان مختلف در شکل های زیر نشان داده شده است. برای حالتی که دمای دیواره استوانه داخلی ۷۹/۹°C است ۱۰٪ نسبت به دمای ذوب پارافین بیشتر است، پارافین جامد در ابتدا توسط فرآیند انتقال گرمای رسانشی شروع به ذوب شدن می کند. در دقایق ابتدایی فرآیند ذوب شدن، کانتورهای دمایی به صورت دایره هایی متقارن فرآیند ذخیره سازی انرژی گرمایی را به صورت محسوس نشان می دهند. بعد از ذوب شدن پارافین در ابتدا ناحیه مذاب به صورت متقارن اطراف لوله داخلی شروع به پیشرفت می کند. تا این زمان به طور کامل فرآیند ذوب شدن توسط انتقال گرمای رسانشی به پیش می رود، اما با گذر زمان و افزایش ناحیه مذاب به تدریج انتقال گرما توسط فرآیند همرفت طبیعی شروع می شود، این موضوع را می توان از تغییرات تقارن ناحیه خمیری مشاهده کرد.



شکل ۸- (راست) توزیع دما، (چپ) موقعیت ناحیه خمیری برای مبادله‌کن نوع a در دمای دیواره لوله داخلی در ۷۹/۹°C و دمای اولیه ۴۱/۲°C در زمان های (الف) ۲۰ دقیقه، (ب) ۴۰ دقیقه، (ج) ۶۰ دقیقه



شکل ۹- (راست) توزیع دما، (چپ) موقعیت ناحیه خمیری برای دیواره لوله داخلی در ۶۹/۹°C و دمای اولیه ۴۱/۲°C در زمان های (الف) ۲۰ دقیقه، (ب) ۴۰ دقیقه، (ج) ۶۰ دقیقه

۴-۹-۲- فرآیند ذوب شدن پارافین در یک مبادله‌کن دولوله ای با در نظر گرفتن تعداد پره های متفاوت

مبادله‌کن دو لوله ای را با سه پره حل کرده و با حداقل تعداد پره گذاری برای زمانه آستانه پایین تر، بهترین عملکرد مبادله‌کن بدست می آید. در این تحلیل جهت اعتبار سنجی از ماده تغییر فازدهنده در حل عددی $v = 4/10 \times 10^{-3} \frac{kg}{ms}$ استفاده شده است.

۴-۹-۱- ساختار جریان و شکل پارافین مذاب برای اعداد رایلی مختلف در مبادله‌کن (نوع a) با سه پره

۴-۹-۱-۱- توزیع دما و مکان ناحیه خمیری برای $Ra = 1/09 \times 10^6$ (دمای ۶۹/۹°C)

توزیع دمایی و مکان مرز متحرک برای دمای دیواره داخلی در دمای ۶۹/۹°C برای سه زمان مختلف در شکل های زیر نشان داده شده است. برای حالتی که دمای دیواره استوانه داخلی ۶۹/۹°C است ۱۰٪ نسبت به دمای ذوب پارافین بیشتر است، پارافین جامد در ابتدا توسط فرآیند انتقال گرمای رسانشی شروع به ذوب شدن می کند. در دقایق ابتدایی فرآیند ذوب شدن، کانتورهای دمایی به صورت دایره هایی متقارن فرآیند ذخیره سازی انرژی گرمایی را به صورت محسوس نشان می دهند. بعد از ذوب شدن پارافین در ابتدا ناحیه مذاب به صورت متقارن اطراف لوله داخلی شروع به پیشرفت می کند. تا این زمان به طور کامل فرآیند ذوب شدن توسط انتقال گرمای رسانشی به پیش می رود، اما با گذر زمان و افزایش ناحیه مذاب به تدریج انتقال گرما توسط فرآیند همرفت طبیعی شروع می شود، این موضوع را می توان از تغییرات تقارن ناحیه خمیری مشاهده کرد.

۴-۹-۱-۳- مجموع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین مایع و کسری از پارافین که ذوب شده برای اعداد رایلی مختلف در مبادله‌کن نوع a

به منظور پی بردن به نقش فرآیند انتقال گرمای همرفت بر روی فرآیند ذوب شدن مجمع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین و کسری از پارافین که ذوب شده‌است، برای سه عدد رایلی مختلف در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. نمودارهای گرافیکی ارائه شده در شکل ۷ به صورت تابعی از زمان برای سه دمای دیواره استوانه داخلی ارائه شده‌اند و با هم مقایسه می‌شوند.

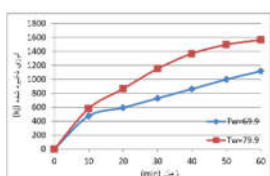
از شکل‌های ارائه شده آشکار می‌شود که در مراحل اولیه فرآیند ذوب شدن آهنگ ذوب شدن تقریباً خطی است و مجموع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین مذاب و درصد ذوب شدن پارافین با گذر زمان افزایش می‌یابد. این اتفاق به دلیل رخ دادن مکانیزم های انتقال گرمای رسانی و همرفت باهم در فرآیند ذوب شدن صورت می‌گیرد با گذر زمان و گرما گرفتن پارافین مذاب، اختلاف دما بین دیواره استوانه داخلی و ماده مذاب کاهش می‌یابد و با توجه به این که مهم ترین نیرو محرکه انتقال گرما اختلاف دما است، مطابق نتایج بدست آمده آهنگ انتقال گرما از استوانه داخلی به ماده مذاب کاهش می‌یابد. با پیشرفت فرآیند ذوب زمان آهنگ ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده به شدت کاهش می‌یابد که این اتفاق را می‌توان از صاف شدن منحنی‌های مربوط به انرژی ذخیره شدن و کسر پارافین ذوب شده مشاهده کرد. می‌توان نتیجه گرفت که روند ذوب شدن در یک فضای حلقوی هم مرکز برای یک ماده تغییر فاز دهنده مشخص تا یک زمان مشخص به طور موثری افزایش می‌یابد بعد از سپری شدن این زمان مجموع انرژی ذخیره شده و آهنگ ذوب شدن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. زیرا از همرفت طبیعی به طور جلوگیری می‌شود. این مطلب را می‌توان از نمودارهای مربوط به سرعت بیشینه پارافین مذاب مشاهده کرد که بعد از این زمان روند پیدا می‌کنند. این زمان خاص معروف به زمان آستانه است و مطابق نمودارهای ارائه شده در این مطالعه برای رایلی $10^6 \times 1/09$ (دمای $69/90^\circ\text{C}$) زمانی حدود ۶۰ دقیقه و برای رایلی $10^6 \times 1/67$ (دمای $79/90^\circ\text{C}$) زمانی حدود ۵۰ دقیقه دارد. برای مشاهده بهتر تأثیر زمان آستانه بر عملکرد حرارتی مبادله‌کن دو لوله‌ای مقدار انرژی ذخیره شده و سرعت بیشینه پارافین مذاب برای زمان های قبل و بعد از زمان آستانه به صورت پیش رو ارائه شده‌اند: مقدار انرژی ذخیره شده ۱ برای مبادله‌کنی با دمای دیواره $69/90^\circ\text{C}$ در زمان ۶۰ دقیقه (زمان آستانه) برابر با $1118/26 \text{ kJ}$ است، این مقدار در مقایسه با انرژی ذخیره شده در زمان قبلی (۵۰ دقیقه) تنها ۱۰٪ انرژی بیشتری ذخیره کرده است طبق مطالب بیان شده نیروی شناوری به علت کم شدن اختلاف دمای بین منبع (لوله داخلی) و مواد مذاب کوچک شده‌است.

می‌توان از نمودارهای ۳، مشاهده کرد که در دمای $69/90^\circ\text{C}$ ذخیره سازی انرژی با شدت مناسبی انجام می‌شود اما بعد از این زمان شیب نمودارهای مربوط به ذخیره سازی انرژی گرمایی و کسر پارافین ذوب شده کم می‌شود. پس زمان ۶۰ دقیقه برای عدد رایلی $10^6 \times 1/09$ زمانی خاص است در این مطالعه به این زمان خاص زمان

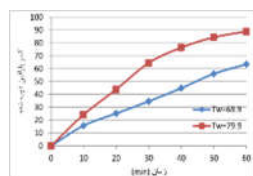
آستانه گفته می‌شود در صورتی که برای اعداد رایلی $10^6 \times 1/67$ زمان آستانه ۵۰ دقیقه می‌باشد و این مطلب از نمودارهای ۳ دیده می‌شود. به روشنی می‌توان دریافت که برای $10^6 \times 1/67 \leq Ra \leq 10^6 \times 1/09$ تأثیر عدد رایلی بر روی مقدار انرژی ذخیره شده بعد از زمان آستانه ناچیز است؛ زیرا فرآیند انتقال گرمای رسانی مکانیزم غالب بوده و در این زمان ذخیره سازی انرژی به صورت محسوس در ماده مذاب صورت می‌گیرد یک مقایسه کمی بین مجموع انرژی ذخیره شده سرعت بیشینه پارافین مذاب و کسری از پارافین که ذوب شده در جدول ۳ ارائه شده‌است. این نتایج نشان دهنده تأثیر عدد رایلی (دمای دیواره) برای پارافین در دمای اولیه $41/2^\circ\text{C}$ برای سپری شدن ۴۰ دقیقه از فرآیند ذوب شده ارائه شده است.

جدول ۳- تأثیر عدد رایلی (دمای دیواره) بر روی مجموع انرژی ذخیره شده، سرعت بیشینه پارافین مذاب و درصد پارافین ذوب شده در مقایسه با مورد اول برای مدت ۴۰ دقیقه

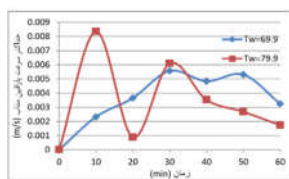
کمیت	$Ra=1.09 \times 10^6$	$Ra=1.67 \times 10^6$
مجموع انرژی ذخیره شده (kJ)	۸۶۱/۷۸	۱۳۶۸/۴۱
درصد بهبود (%)	-	۳۷%
بیشترین سرعت پارافین مذاب (m/s)	۰/۰۰۴۸۴	۰/۰۰۳۵۳
درصد بهبود (%)	-	۲۷%
کسر حجمی پارافین مذاب (%)	۴۴/۹۳	۷۶/۴۶
درصد بهبود (%)	-	۴۱%



(ب) مجموع انرژی ذخیره شده (kJ)



(الف) کسری از پارافین که ذوب شده



(ج) سرعت بیشینه پارافین ذوب شده

نمودار ۳- عملکرد مبادله‌کن نوع a در دماهای $69/90^\circ\text{C}$ و $79/90^\circ\text{C}$ در دمای اولیه $41/2^\circ\text{C}$

۴- نتیجه‌گیری

مقایسه عملکرد مبادله‌کن دو لوله‌ای ساده با مبادله‌کن‌های

نوع a و b:

(الف) تفاوت اساسی بین مبادله‌کن نوع a و b در مقدار ماده تغییر فاز دهنده ای است که هر مبادله‌کن به دلیل شکل هندسه اش در دسترس نیروی شناوری قرار می‌دهد همین طور که دیده شد به دلیل شکل هندسه خاص مبادله‌کن b مقدار ماده تغییر فاز دهنده بیشتری را در اختیار نیروی شناوری قرار می‌دهد.

- [14] Yu W, France D M, Routbort J L, Choi S U S. Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements Heat Transfer Engineering 29, 2008: 432-460.
- [15] Yu C J, Richter, A G, Datta A, Durbin M K, Dutta P. Observation of Molecular Layering in Thin Liquid Films Using X-Ray Reflectivity, Physical Review Letters 82,1999: 2326-2329.
- [16] He J, Yang X & Zhang G. A phase change material with enhanced thermal conductivity and secondary heat dissipation capability by introducing a binary thermal conductive skeleton for battery thermal management. Applied Thermal Engineering, 148, 2019: 984-991.
- [17] Fan R, Zheng N & Sun Z. Evaluation of fin intensified phase change material systems for thermal management of Li-ion battery modules. International Journal of Heat and Mass Transfer, 166, 2021:120753.
- [18] Yan X, Zhao H., Feng, Y, Qiu L, Lin L, Zhang X & Ohara T. Excellent heat transfer and phase transformation performance of erythritol/graphene composite phase change materials. Composites Part B: Engineering, 228, 2022:109435.
- [19] Agrawal R, Singh K D P & Sharma R K. Experimental investigations on the phase change and thermal properties of nano enhanced binary eutectic phase change material of palmitic acid-stearic acid/CuO nanoparticles for thermal energy storage. International Journal of Energy Research, 46(5), 2022:6562-6576.
- [20] Lo DC, Young DL, Tsai CC. High resolution of 2D natural convection in a cavity by the DQ method 203 2007: 219 – 236.
- [21] Panisilvam J, Wang P C & Tay N H S. Numerical validation and assessment of vertical and horizontal latent heat energy storage system during a melting process. Journal of Energy Storage, 72,2023: 108267.
- [22] Amidu M A, Ali M, Alkaabi A K & Addad Y. A critical assessment of nanoparticles enhanced phase change materials (NePCMs) for latent heat energy storage applications. Scientific Reports, 13,2023: 7829.
- [23] Hassaballa A A, Basem A, AL-bonsrulah H A, Dahshan, N M, Almarashi A, Abd Elmotaleb A M A & Qahiti R. Transient modeling of storage of cold energy in existence of nano-sized additives. Journal of Energy Storage, 92,2024: 112216.
- [24] Khuda M A, Yan L, Sarunac N & Romero C. Design, analysis and testing of a prototype-scale latent heat thermal energy storage (LTES) system. Journal of Energy Storage, 89,2024: 111796.

ب) تفاوت بعدی در سه نوع مبادله‌کن استفاده از پره‌ها در آن‌ها می‌باشد همچنین تفاوت اساسی مبادله‌کن a و b در میزان فضای حلقوی پایین مبادله‌کن می‌باشد با توجه به کوچک تر شدن فضای حلقوی در مبادله‌کن b و همچنین کوچک تر شدن فضای استفاده شده برای پره‌ها چنین به نظر می‌رسد که کوچک تر شدن پره‌ها نتیجه معکوس در مرزهای انتقال گرما به ماده تغییر فاز دهنده دارد بنابراین سبب کاهش میزان ذوب و همچنین انرژی ذخیره شده می‌شود. نمودارها، جداول و شکل‌های ارائه شده در این بخش نشان می‌دهد که تغییر شکل هندسی ایجاد شده در مبادله‌کن دو لوله ای ساده تأثیر مثبت نداشته و موجب شده تا درصد کمتری از پارافین از انتهای فرآیند ذوب شود و نمی‌تواند مشکل ذوب نشدن پارافین های جامد باقی مانده در نیمه پایینی فضای حلقوی، پس از اتمام فرآیند ذوب را حل کند. همین طور که دیده شد سایر هندسه های خارج از مرکز که رابطه مستقیم با کوچک تر شده سطح پایینی فضای حلقوی و همچنین کوچک تر شدن طول پره‌ها دارد.

۵- مراجع

- [1] Maxwell JC. A Treatise on Electricity and Magnetism second ed. Oxford University Press, Cambridge, 1 1904: 435-441.
- [2] Hamilton RL and Crosser OK. Thermal Conductivity of Heterogeneous two Component Systems Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. 1962: 187-191.
- [3] Wasp EJ, Kenny JP and Gandhi RL. Solid – Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation Series on Bulk Materials Handling Trans Tech Publications. 1:4, Clausthal Germany, 1977.
- [4] Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles Netsu Bussei. 7 1993: 227-233.
- [5] Choi US. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles in Developments and application of non-newtonian flows. ASME, 1995 :99-105.
- [6] Das SK, Putra P and Roetzel w. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids, Transactions of ASME, Journal of Heat Transfer, 121 2003: 567-574.
- [7] Prakash M, Giannelis E P. Mechanism of Heat Transport in Nanofluids Journal of Computer-Aided Material Design 14,2007: 109-117.
- [8] Karthikeyan N R, Philip J, Raj B. Effect of Clustering on the Thermal Conductivity of Nanofluids Materials Chemistry and Physics 109 2008: 50-55.
- [9] Wang X, Xu X, Choi S U S. Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture. Journal of Thermophysics and Heat Transfer 13 1999: 474-480.
- [10] Jang S P, Choi S U S. Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity. ASME Journal of Heat Transfer 129 , 2007: 617-623.
- [11] Jang S P, Choi S U S. Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal conductivity of Nanofluids Applied Physics Letters. 84 ,2004: 4316-4318.
- [12] Chon C H, Kihm K D, Lee S P, Choi S U S. Empirical Correlation Finding the role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al₂O₃) Thermal Conductivity Enhancement, Applied Physics Letters 87, 2005: 153107.
- [13] Prasher R, Bhattacharya P, Phelan P E. Brownian-Motion-Based Convective-Conductive Model or the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids, ASME Journal of Heat Transfer 128, 2006: 588-595.