



## شبیه‌سازی عددی ذخیره‌کننده‌های حرارتی با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده

بهادر براری<sup>۱\*</sup> و علی اکبر رنجبر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشگاه علوم و فنون مازندران، دانشکده مهندسی مکانیک، بابل، ایران

<sup>۲</sup> پرفسور، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک، بابل، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۷

### چکیده

اثر چینش لوله‌های داخلی در مبدل بر رفتار ذوب و انجماد سیستم ذخیره‌کننده، به ازای سه فاصله مختلف بین لوله‌ای، مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه برای بررسی اثر افزودن تعداد لوله‌ها (از یک تا پنج لوله)، مقایسه‌ای بین مبدل‌هایی که ذخیره انرژی در آنها در مدت زمان کوتاه‌تری صورت گرفته، انجام شده است. چینش و فاصله بین لوله‌ای، زمان ذوب برای تمام مبدل‌های بررسی شده نسبت به مبدل تک لوله‌ای کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد لوله‌ها به پنج لوله با فاصله بین لوله‌ای یکسان، نوع چینش دیگر تأثیری بر زمان ذوب ندارد گرچه تغییر فاصله همچنان تأثیرگذار است. با مقایسه مبدل‌هایی که در زمان کوتاه‌تری انرژی حرارتی را ذخیره می‌کنند، کاهش یا افزایش فاصله بین لوله‌ها، افزایش زمان ذوب را به دنبال دارد؛ همچنین افزایش تعداد لوله‌ها به بیشتر از ۴، دیگر روی زمان ذوب تأثیرگذار نیست. به استثنای مبدل دو لوله‌ای، کمترین زمان انجماد مربوط به همان مبدل‌هایی است که کوتاه‌ترین زمان ذوب را نیز داشتند. میزان تغییرات زمان با افزایش تعداد لوله از دو به سه در فرآیند شارژ و دشارژ، چشمگیرتر از سایر موارد است.

**کلمات کلیدی:** مواد تغییر فاز دهنده؛ انتقال حرارت؛ ذوب؛ انجماد.

## Numerical Simulation of Thermal Storage Using Phase-Change Material

B. Barari<sup>1</sup>, A.A. Ranjbar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.A., Department of Mechanical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran.

<sup>2</sup> Professor (PhD), Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Iran.

### Abstract

This dissertation investigates the analysis of thermal energy storage system using phase change materials to improve. In this study for three different distances between tubes in heat exchangers, the effect of inner tubes arrangement on melting and solidification behavior of energy storage system is investigated. Then, in order to investigate the effect of adding tubes, a comparison have been done between heat exchangers with the least melting time. The results show that regardless of the number of tubes, their arrangement and the distance between them, the melting time decreases with respect to one tube heat exchanger. By increasing the number of tubes to five, changing the arrangement with the constant distance between tubes, does not affect melting time, however the distance between tubes is still effective. Comparing the heat exchangers with the least melting time with each other, it can be shown that variation in this distance, increases the melting time. Also increasing the tube numbers to more than four, does not affect the melting time any more. Except two tubes heat exchangers, the least solidification time happens in cases with the least melting time. By increasing the number of tubes from two to three, the time increasing is more than other cases in charging and discharging process.

**Keywords:** PCM, Heat Transfer, Melting, Solidification.

## ۱- مقدمه

در میان انرژی‌های نو، عظیم‌ترین منبع انرژی در جهان که می‌تواند پاسخگوی نیازهای حرارتی و الکتریکی باشد، انرژی خورشیدی است که پاک، بی‌پایان و قابل دسترس در بیشتر نقاط جهان است. ارزان بودن این منبع در بعضی از ساعات روز، فناوری ساده آن و محدودیت دوام سوخت‌های فسیلی از دیگر دلایل لزوم استفاده از آن است. موارد پرکاربرد این منبع تجدیدپذیر، در ساختمان‌ها است؛ زیرا که ساختمان‌ها عمده‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در جهان هستند. ذخیره انرژی گرمایی که ذخیره‌سازی گرم و سرد نیز نامیده می‌شود، امکان ذخیره‌سازی گرما و سرما را به صورت موقتی به منظور مصرف در زمان‌های بعدی فراهم می‌کند. برای بکارگیری مجدد گرما یا سرمای ذخیره شده، احتیاج است که روش ذخیره‌سازی مورد استفاده برگشت‌پذیر باشد. TES در سیستم‌های تجدیدپذیر توسعه یافته توانسته است، مشکل عدم حضور مداوم خورشید را برطرف کند؛ زیرا ذخیره انرژی گرمایی خورشید موجب می‌شود در زمان‌هایی که خورشید حضور ندارد، بتوان از انرژی ذخیره شده استفاده کرد تا برق مورد نیاز در ساعات اوج مصرف تامین شود. مهمترین روش‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی عبارتند از: ذخیره انرژی ترموشیمیایی، ذخیره گرمای محسوس و ذخیره گرمای نهان. موادی که برای ذخیره انرژی در واحدهای ذخیره‌ساز انرژی نهان به کار می‌روند، مواد تغییر فاز دهنده<sup>۱</sup> یا اصطلاحاً PCM نامیده می‌شوند. این مواد با دریافت گرما از یک منبع گرمایی، به طور پیوسته گرم می‌شوند تا به دمای ذوب خود (دمای تغییر فاز) برسند. پس از رسیدن به مرحله تغییر فاز، علی‌رغم دریافت گرمای بیشتر، دمای آنها افزایش نمی‌یابد، بلکه گرمای اضافی را در خود ذخیره کرده، طی مرحله تغییر فاز موجب ثابت ماندن دمای خود و محیط اطراف خود می‌شوند؛ در این حالت می‌گویند PCM شارژ شده است. این مواد در سیکل بعدی، هنگامی که در کنار منبع سرد قرار بگیرند با تغییر فاز معکوس گرمای جذب کرده را پس می‌دهند، در این حالت می‌گویند PCM دشارژ می‌شود. PCM پس از تخلیه شدن منجمد می‌گردد. مواد تغییر فاز دهنده

<sup>۱</sup> Phase Change Material

به دلیل دارا بودن دانسیته ذخیره انرژی بالاتر با نوسان دمایی کمتر، دارای اهمیت ویژه‌ای هستند.

رفتار ذوب کپسول پارافین در یک محفظه استوانه‌ای که به وسیله آب داغ احاطه شده است، توسط رجین و همکاران [۱] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش، نشان‌دهنده سرعت بیشتر فرآیند ذوب در ناحیه بالای استوانه نسبت به بخش پایینی استوانه بوده است. همچنین با وارد کردن اثر جابجایی در حل عددی، توافق خوبی بین نتایج عددی و داده های آزمایشگاهی مشاهده شده است.

لامبرگ و همکاران [۲]، مطالعه عددی دیگری را بر فرآیند ذوب PCM در یک محفظه مستطیلی با حضور و بدون حضور جابجایی طبیعی انجام دادند. نتایج بدست آمده از مطالعه عددی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان داد که با نادیده گرفتن اثر جابجایی طبیعی، زمان مورد نیاز برای رسیدن به ماکزیمم دما، دو برابر زمان واقعی آن است.

استریته [۳]، محل صفحه واسط جامد-مایع در طول فرآیند ذوب PCM در یک محفظه مستطیلی در یک کار آزمایشگاهی را بررسی کرده است. نتایج آزمایش وی با داده‌های تحلیلی مبتنی بر مکانیزم هدایت، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داد، تنها در شروع فرآیند ذوب، داده‌های تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند؛ اما بعد از گذشت زمان ذوب، نتایج اختلاف چشمگیری به خود می‌گیرد.

ژانگ و همکاران [۴]، بطور تجربی فرآیند ذوب یک محفظه مستطیلی که از یک سمت بطور مستقیم با یک نرخ ثابت گرم شده است را مورد مطالعه قرار داده‌اند. با گذشت زمان در طول فرآیند ذوب، دمای ناحیه بالای مایع بالاتر از ناحیه پایین آن بود. این امر به خاطر بهبود جابجایی طبیعی با گذشت زمان در فاز مایع و به واسطه آن صعود سیال گرم و متعاقب آن نزول سیال سرد در محفظه بوده است. منابع حرارتی مجزا فقط در شروع مرحله ذوب، دارای دمای یکسان بودند که این بیانگر غالب بودن انتقال حرارت هدایت در مرحله اولیه ذوب بوده است؛ اما با گذشت زمان در فرآیند ذوب، دمای سطح بصورت افزایشی از بالا به پایین تغییر کرد که این امر حاکی از آنست که در مراحل جلوتر انتقال حرارت، مکانیزم جابجایی حائز اهمیت بوده است.

درجه در طول شب، انجماد پارافین ۴ ساعت طول می‌کشد. این سرمای ذخیره شده، ۱.۲ کیلو وات برودت را ساعت ۲.۵ بعدازظهر تیر ماه به صورت تهویه آزاد به اتاق تزریق می‌کند [۹].

بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده در مکانیسم بادگیرهای سنتی به منظور کاهش دما و بهینه‌سازی مصرف انرژی توسط اولی‌پور و همکاران، مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش با استفاده از تلفیق عملکرد بادگیر و مواد تغییر فاز دهنده، فناوری نوینی ارائه شده است که این فناوری به دلیل ساختار ویژه‌ای که دارد، اقدام به تولید سرمایش ایستا می‌کند. در این مطالعه سیستم پیشنهادی، به کمک نرم افزارفلوئنت مدل سازی شد که از مواد تغییر فاز دهنده با دمای پافشاری ۲۴ درجه سلسیوس استفاده گردید و نتیجه آن کاهش ۴.۵ درجه دما بدون استفاده از فناوری‌های مکانیکی-الکتریکی بوده است [۱۰].

سامی و همکاران، به بررسی بهبود عملکرد حرارتی مواد تغییر فاز دهنده به کمک میکروکپسوله‌سازی پرداخته‌اند و به این نتیجه دست یافتند که میکروکپسوله‌سازی، یکی از روش‌های موثر در بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی این مواد محسوب می‌شود. بازده کپسوله‌سازی میکرو ذرات به عوامل مختلفی مانند: قابلیت انحلال حلال آلی، سرعت جداسازی حلال، پایداری پوسته در حلال و غلظت ماده پوسته در آب بستگی دارد؛ همچنین خصوصیات میکروکپسوله‌ها از قبیل، ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی، اندازه ذره و مورفولوژی وابسته به درصد وزنی ماده تغییر فازدهنده و ماده فعال سطحی است [۱۱].

در مطالعات دیگر، اثر تغییر آرایش لوله‌ها در محیط متخلخل بر انتقال حرارت مبدل و ذوب ماده تغییر فازدهنده، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از حل عددی، نشان می‌دهد که محیط متخلخل با ضریب تخلخل کمتر، سبب کاهش لختی حرارتی در سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان می‌شود [۱۲-۱۶].

در این تحقیق، با توجه به اهمیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، به رفتار ذوب و انجماد یک سیستم ذخیره کننده انرژی در یک مبدل حرارتی به کمک ماده تغییر فاز دهنده در سیستم گرمایشی ساختمان به صورت عددی پرداخته شده است.

گراسیا و همکاران [۵]، مطالعه‌ای تحت عنوان مواد تغییر فاز دهنده و ذخیره سازی انرژی حرارتی برای ساختمان‌ها را انجام دادند. آنها به این نتیجه دست یافتند که گرمایش و سرمایش پایدار با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در ساختمان می‌تواند از طریق سیستم‌های غیر فعال در پاکت‌های ساختمان، مواد تغییر فازدهنده در سیستم‌های فعال، سیستم‌های جذب و ذخیره سازی فصلی به دست آید.

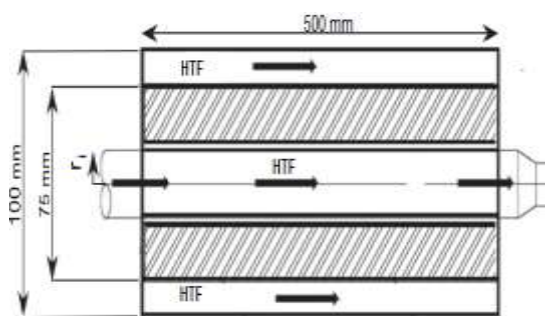
مورنو و همکاران [۶]، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده را در سیستم‌های پمپ گرما و تهویه خانگی برای ذخیره‌سازی کوتاه مدت را مورد بررسی قرار دادند. آنها بیان داشتند که سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نه تنها به عنوان ذخیره کننده انرژی در تغییر عملکرد سیستم بکار می‌رود، بلکه کاربردهای دیگری از قبیل، بازیابی حرارت و یا ذوب در سیستم‌های تهویه را نیز دارد. مواد تغییر فاز دهنده، دارای دمای ذوب مناسبی برای بکارگیری در پمپ‌های حرارتی استاندارد برای هر نوع کاربردی است.

در مطالعه‌ای تحت عنوان مروری بر مواد عایق برای حفاظت از انرژی در ساختمان بیان شد که با تحولات اخیر در عایق حرارتی ساخت و ساز می‌توان، جذب و از دست دادن گرما حتی تولید گازهای گلخانه‌ای بالقوه و هزینه‌ها را کاهش داد [۷].

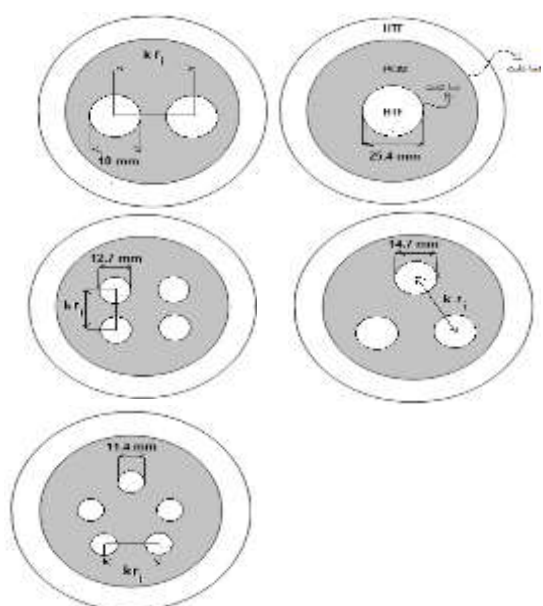
اکبر و همکاران، تاثیر مواد تغییر فاز دهنده در سیستم خنک‌کننده غیر فعال پایدار در پاکت‌های ساختمانی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به هزینه بالای میکروکپسول‌های حاوی این مواد، می‌توان مواد مذکور را به صورت پاکت‌های بزرگتر و یا پانل‌های حاوی این مواد، در فواصل بین جداره‌ها و یا بین شیشه‌های دو جداره به کار برد؛ همچنین در مورد موقعیت قرارگیری این مواد پس از آزمایشات مختلف این نتیجه حاصل شده است که بهترین موقعیت برای قرار دادن مواد تغییر فاز دهنده، در ناحیه میانی دیوار است؛ زیرا این امر در کاهش نوسانات و دامنه تغییرات دمای فضای داخل تاثیرگذار است [۸].

در مطالعه‌ای در ایران شبیه‌سازی محاسباتی تهویه آزاد یک ساختمان با بهره‌گیری از مواد تغییر فاز دهنده، مورد بررسی قرار گرفت و اظهار داشتند که شبیه‌سازی فرایند ذخیره سرما نشان داد که با عبور دمای متوسط محیط ۱۹

با توجه به کوچکترین گام زمانی مسأله (۰/۰۰۵ ثانیه) و همچنین زمان فیزیکی فرآیند ذوب برای آن (۱۲۰ دقیقه)، شبیه‌سازی با این تعداد شبکه‌بندی بسیار طولانی می‌شود؛ بنابراین برای شبیه‌سازی، نصف مبدل مورد نظر و PCM اطراف آن به عنوان ناحیه محاسباتی در نظر گرفته شد. در کار حاضر، از RT82 به عنوان PCM به علت اینکه در کاربردهای خورشیدی مناسب است فرض شد و آب به علت ارزان بودن و ظرفیت گرمایی بالا، به عنوان سیال انتقال گرما در نظر گرفته شد. لوله‌های بکار رفته از جنس مس است که علت این انتخاب، رسانایی گرمایی بالای این ماده است. خواص کلیه مواد بکار رفته در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱- شماتیک مساله برای مبدل سه لوله‌ای (با یک لوله داخلی)



شکل ۲- مقطع هندسه برخی از نمونه‌های بررسی شده

بر اساس این مقاله، اگر چنین سیستم گرمایشی در ساختمان بکار رود، موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش فاکتورهایی از قبیل، فشردگی در سیستم‌ها، تراکم انرژی در مواد و سیستم‌ها، رسانایی حرارتی مواد می‌گردد. البته استفاده از مواد جدید، مخصوصاً مایعاتی که بطور همزمان به‌عنوان سیالات انتقال حرارت و مواد ذخیره‌سازی عمل می‌کند، توسعه می‌یابد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تعریف مسئله

هندسه مورد بررسی عبارت است از: یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای (TTHX) که سیستم ذخیره‌کننده، بین لوله داخلی و لوله میانی است و سیال انتقال دهنده گرما (HTF)، از لوله داخلی و لوله بیرونی می‌گذرد (شکل ۱). شعاع و ضخامت لوله میانی به ترتیب برابر با ۷۵ و ۳ میلی‌متر و شعاع و ضخامت لوله درونی ۲۵/۴ و ۱/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

کار حاضر، به تحلیل و طراحی سیستم گرمایشی ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به منظور دست یافتن به زمان ذوب و انجماد پایین برای PCM می‌پردازد. بر همین اساس، مقطعی از مبدل شبیه‌سازی شده، اثر پارامترهای هندسی همچون، افزودن لوله‌های داخلی به مبدل (تا پنج ردیف لوله)، چیدمان لوله‌ها و همچنین فاصله مرکز به مرکز آن‌ها از هم بر رفتار سیستم ذخیره کننده در فرآیند شارژ و دشارژ، مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور درک بهتر مساله، شماتیکی از هندسه تعدادی از مقطع نمونه‌های بررسی شده در این پژوهش در شکل ۲ نمایش داده شده است. فاصله مرکز به مرکز لوله‌های داخلی از هم  $k r_1$  در نظر گرفته شده است که  $r_1$  شعاع لوله داخلی و  $k$  دارای مقادیری برابر با ۳، ۴ و ۵ است. مقدار ماده تغییر فاز دهنده برای همه حالت‌ها، یکسان در نظر گرفته می‌شود. شبیه‌سازی کل هندسه بدلیل زیاد شدن سلول‌های محاسباتی بسیار زمان‌بر است. به عنوان مثال، شبکه‌بندی‌های اولیه برای فرآیند ذوب نشان داد که شبیه‌سازی یک دوم مقطع مبدل برای حالات مختلف، مستلزم داشتن ۲۵۲۰۰ سلول محاسباتی است.

جدول ۱- خواص مواد بکار رفته در پژوهش حاضر

	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	رسانایی گرمایی (w/m.K)	ویسکوزیته (Pa.s)	دمای ذوب (K)	ضریب انبساط حجمی (1/k)	گرمای نهان (J/kg)
PCM	۹۵۰	۲۰۰۰	۰/۲	۰/۰۰۳۴۹۹	۳۵۰-۳۵۵	۰/۰۰۱	۱۷۶۰۰
مس	۸۹۵۴	۳۸۳	۴۰۰	-	-	-	-

### ۲-۱-۳- معادلات حاکم

نرم افزار فلوئنت یک کد تجاری دینامیک سیالات است که برای شبیه سازی گستره وسیعی از مسائل مختلف ذوب و انجماد در مهندسی و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. برای شبیه سازی فرآیند ذوب و انجماد، از روش آنتالپی متخلخل استفاده گردید.

برآیند معادلات حاکم به ترتیب پیوستگی، مومنتوم و انرژی حرارتی بر سیستم به صورت رابطه (۱-۳) بیان می شود:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + S_i \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \gamma \Delta T) \quad (3)$$

در کار حاضر به علت تغییرات کوچک در چگالی از تقریب بوزینسک استفاده گردید که از روش های پر کاربرد در شبیه سازی فرآیند شارژ و دشارژ است. این مدل، چگالی را در تمام معادلات حل شده بجز عبارت شناوری در معادله مومنتوم ثابت می گیرد.

تقریب بوزینسک از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$\rho = \rho_0 (1 - \gamma \Delta T) \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $\rho$  چگالی سیال،  $\rho_0$  چگالی اولیه و  $\Delta T$  تغییرات دما است. با استفاده از رابطه بالا ترم شناوری معادله مومنتوم، بصورت رابطه (۵) در می آید:

$$(\rho - \rho_0) g \cong -\rho_0 \gamma (T - T_0) g \quad (5)$$

### ۲-۲- تنظیمات مدل و صحنه گذاری

برای شبیه سازی هرچه دقیق تر مسئله، به تخمین منطقی مقادیر شرایط اولیه، شرایط مرزی، رعایت ابعاد هندسی و همچنین شبکه بندی مناسب محیط مسئله، نیاز است. انتخاب شبکه بندی مناسب، اجازه استفاده از گام زمانی بیشتر و در

### ۲-۱-۱- فرضیات مسئله

در شبیه سازی های مطالعه حاضر، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.

- مسئله در شرایط دو بعدی، آرام و ناپایا در نظر گرفته شد.
- جریان سیال تراکم ناپذیر بوده، خواص آن ثابت فرض شده است.
- اثر جابه جایی طبیعی در طول فرآیند ذوب و انجماد در نظر گرفته شده است.
- مقدار ماده تغییر فاز دهنده دبی جرمی سیال انتقال گرما در همه نمونه ها یکسان فرض شده است.
- انتقال حرارت تشعشع در لوله و ماده تغییر فاز دهنده قابل صرف نظر کردن است و اتلاف ناچیز در نظر گرفته شد.

### ۲-۱-۲- شرایط اولیه و مرزی

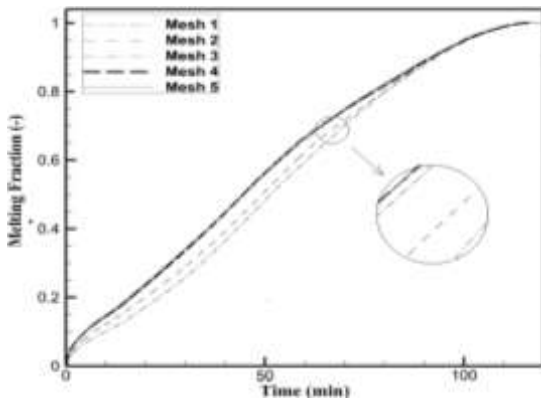
#### ۲-۱-۲-۱- فرآیند شارژ

دمای اولیه سیستم در فرآیند شارژ در دمای ۲۷°C، پایین تر از دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده قرار گرفته است. جهت کاهش هزینه های محاسباتی، سیال انتقال دهنده گرما شبیه سازی نشده، به عنوان شرایط مرزی دما با مقدار ۹۰°C به لوله درونی و لوله میانی داده شده است و دلیل آن این است که در کار عددی حل با شرط مرزی دما ثابت نسبت به شرط مرزی شارژ ثابت راحت تر است.

#### ۲-۱-۲-۲- فرآیند دشارژ

در فرآیند دشارژ دمای اولیه سیستم در دمای ۹۰°C، بالاتر از دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده قرار گرفته، سیال انتقال دهنده به عنوان شرط مرزی دما با مقدار ۶۵ درجه سانتی گراد به لوله درونی و لوله میانی داده شده است.

در نهایت شبکه‌بندی ۳ برای بررسی پارامترها انتخاب شد. این شبکه‌بندی‌ها با سیستم Core i7-3610 2.5 GHz با هشت هسته موازی فعال بررسی شد که زمان اختصاص یافته برای حل بطور تقریبی مطابق جدول ۳ است.



شکل ۳- بررسی حساسیت به شبکه برای مبدل حرارتی با یک لوله داخلی در فرآیند شارژ (نمودار کسر جرمی ذوب بر حسب زمان)

جدول ۲- تعداد شبکه‌بندی برای مبدل با یک لوله داخلی در فرآیند شارژ

تعداد سلول‌ها	شبکه بندی
۱۲۰۵۰	شبکه بندی ۱
۱۸۴۸۰	شبکه بندی ۲
⊗ ۲۵۲۰۰	شبکه بندی ۳
۲۸۵۴۶	شبکه بندی ۴
۳۲۹۰۵	شبکه بندی ۵

جدول ۳- زمان مورد نیاز برای حل در فرآیند شارژ

زمان حل	شبکه بندی
۱۳۵	شبکه بندی ۱
۱۸۰	شبکه بندی ۲
⊗ ۲۳۰	شبکه بندی ۳
۲۷۸	شبکه بندی ۴
۲۹۰	شبکه بندی ۵

نتیجه کوتاه شدن زمان انجام پژوهش را می‌دهد. به همین دلیل پس از انجام دادن استقلال از شبکه‌بندی و بازه زمانی برای فرآیند شارژ و دشارژ، به صحنه‌گذاری مسئله پرداخته می‌شود. در این تحقیق برای تایید اعتبار مدل مورد استفاده برای مبدل سه لوله‌ای دارای یک لوله داخلی در فرآیند شارژ (ذوب)، از مرجع [۱۷] و برای فرآیند دشارژ (انجماد)، از مرجع [۱۸] استفاده شده است که مقایسه‌ها تطابق قابل قبولی را به همراه دارند. مهم‌ترین سنجش جهت تایید اعتبار، تغییرات کسر جرمی ذوب ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان است که در مطالعات و بررسی‌های مختلفی از سیستم‌های ذخیره‌کننده، همیشه مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از این پارامتر می‌توان به نرخ شدت ذوب و انجماد و زمان پایان شارژ و دشارژ ماده تغییر فاز دهنده پی برد.

## ۲-۲-۱- آزمون حساسیت به شبکه‌بندی

### ۲-۲-۱-۱- فرآیند شارژ (ذوب)

به دلایل گفته شده یکی از تحلیل‌هایی که در مسائل عددی انجام می‌شود، انتخاب شبکه مناسب برای حل و بررسی استقلال جواب‌ها از شبکه مذکور است.

در ابتدا مسأله با شبکه نسبتاً درشت حل می‌شود و در مرحله بعد شبکه ریزتر شده، جواب‌ها با حالت قبل مقایسه می‌گردند اگر جواب‌ها با هم اختلاف اندک داشته باشند، شبکه درشت‌تر به عنوان شبکه حل انتخاب می‌شود. در غیر اینصورت باید ریز کردن شبکه حل تا آنجا ادامه یابد که بین دو حالت نهایی جواب‌ها، تفاوت کمی مشاهده گردد. پس از وارد کردن پارامترهای هندسی و تنظیمات شبکه‌بندی، پنج اندازه سلول مختلف از بزرگ به کوچک قرار داده شد (طبق جدول ۲). پس از آماده‌سازی مش‌ها، در یک شرایط ثابت و بدون تغییر پارامترهای عددی، با استفاده از روش CFD، به تحلیل آن‌ها پرداخته و نتایج حاصل جهت انتخاب شبکه مناسب با یکدیگر مقایسه شد.

نمودار تغییرات کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان در شکل ۳، نشان از تغییرات بسیار اندک بین سه منحنی بدست آمده از شبکه‌بندی ۳، ۴ و ۵ است؛ بطوری که شبکه‌بندی ۳ با ۴ حدود ۱٪ و ۴ با ۵ کمتر از ۱٪ اختلاف داشتند. این در حالی است که اختلاف چشمگیر آن‌ها با نتیجه حاصل از شبکه‌بندی ۱ و ۲ بطور واضح مشخص است.

۲-۱-۲-۲- فرآیند دشارژ (انجماد)

برای فرآیند دشارژ، چهار اندازه سلول مختلف از بزرگ به کوچک اعمال شد و بدون تغییر پارامترهای عددی به تحلیل آن پرداخته شد (جدول ۴). جهت انتخاب شبکه مورد نظر، نتایج بدست آمده از آن مورد مقایسه قرار گرفته است. نمودار تغییرات کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان در شکل ۴، نشان از تغییرات بسیار ناچیز بین سه منحنی بدست آمده از سه شبکه بندی آخر (با خطای ۰/۱) است، در حالی که اختلاف آن‌ها با نتیجه حاصل از شبکه بندی ۱ بطور واضح مشخص است. برای سرعت بخشیدن به حل، از شبکه بندی درشت تر ( شبکه بندی ۲) برای بررسی پارامترها استفاده شد. این شبکه بندی‌ها با سیستم Core i7-3610 2.5 GHz با هشت هسته موازی فعال بررسی شد که زمان اختصاص یافته برای حل مطابق جدول ۵ است.

۲-۳-۳- آزمون حساسیت به گام زمانی

۲-۳-۱- فرآیند شارژ

یکی دیگر از آزمون‌هایی که در مسائل عددی انجام می‌گیرد، اطمینان از عدم وابستگی نتایج، به گام زمانی و انتخاب بزرگترین گام زمانی ممکن برای کاهش زمان حل است. در این بخش با ثابت نگه داشتن پارامترهای متغیر، شبکه انتخاب شده برای چهار گام زمانی مختلف حل گردید تا بهینه ترین بازه زمانی انتخاب گردد.

مسئله برای فرآیند شارژ با گام‌های زمانی نشان داده شده در جدول ۶ حل شده است. در چهار گام زمانی بررسی شده، نمودارهای سه گام زمانی اول با اختلاف کمتر از ۱٪، بسیار به هم نزدیک هستند و نتیجه مقاله مرجع را بهتر دنبال می‌کنند.

جدول ۴- تعداد شبکه بندی برای مبدل با یک لوله

داخلی در فرآیند دشارژ

تعداد سلول‌ها	شبکه بندی
۹۴۹۳	شبکه بندی ۱
۱۳۳۷۶	شبکه بندی ۲
۱۷۷۷۱	شبکه بندی ۳
۲۳۲۲۳	شبکه بندی ۴

جدول ۵- زمان مورد نیاز برای حل در فرآیند دشارژ

زمان حل (ساعت)	شبکه بندی
۳۶	شبکه بندی ۱
۶۰	شبکه بندی ۲
۸۰	شبکه بندی ۳
۱۰۵	شبکه بندی ۴

جدول ۶- مقدار گام زمانی برای مبدل با یک لوله

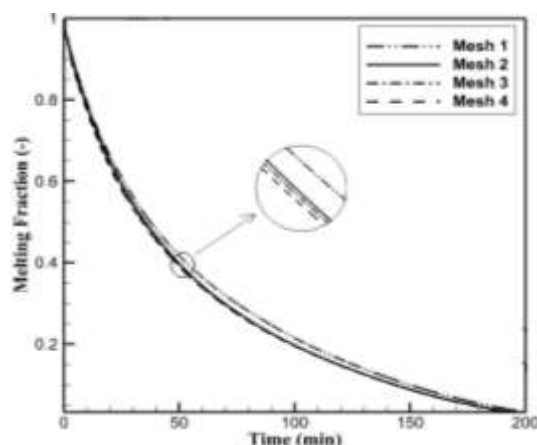
داخلی (مرجع) در فرآیند شارژ

گام زمانی	گام زمانی
۰/۰۰۵	گام زمانی ۱
۰/۰۵	گام زمانی ۲
۰/۱	گام زمانی ۳
۰/۵	گام زمانی ۴
واگرا شد	

از این رو ۰/۱ به عنوان گام زمانی مناسب انتخاب گردید. دلیل نمایش ندادن شبکه بندی ۰/۵ در شکل ۵، واگرا شدن حل است.

۲-۳-۲- فرآیند دشارژ

برای فرآیند دشارژ نیز با انتخاب یک شبکه مشخص و ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها، مساله برای چهار گام زمانی



شکل ۴- بررسی حساسیت به شبکه برای مبدل حرارتی با یک لوله داخلی در فرآیند دشارژ (نمودار کسر جرمی ذوب بر حسب زمان)

## ۲-۴- استقلال از شبکه‌بندی و گام زمانی برای مبدل‌های دیگر

چون مبدل‌های مورد بررسی در این پژوهش دارای پارامترهای هندسی متغیر است، لذا به ازای هر تغییر در تعداد لوله‌های داخلی از یک تا پنج لوله، آزمون استقلال از شبکه‌بندی و گام زمانی مجزا انجام شد. شبکه‌بندی منتخب برای همه حالت‌ها به روشی است که تعداد سلول‌ها با افزایش تعداد لوله‌ها تغییر نمی‌کند. گام زمان منتخب و مورد نیاز برای حل در فرآیند شارژ و دشارژ، برای تعداد لوله‌های متفاوت به ترتیب در جدول ۸ و ۹ ذکر شده است.

## جدول ۸- مقدار گام زمانی برای مبدل با تعداد لوله‌های مختلف در فرآیند شارژ

گام زمانی بهینه در شارژ	گام زمانی بهینه در فرآیند شارژ	تک لوله‌ای
۰/۵	۰/۱	تک لوله‌ای
۰/۱	۰/۰۰۴	دو لوله‌ای
۰/۱	۰/۰۵	سه لوله‌ای
۰/۱	۰/۰۱	چهار لوله‌ای
۰/۱	۰/۰۱	پنج لوله‌ای

## جدول ۹- زمان مورد نیاز برای حل در فرآیند شارژ و دشارژ

تعداد نمونه های بررسی شده	زمان حل (روز) برای هر نمونه در فرآیند شارژ	زمان حل (روز) برای هر نمونه در فرآیند دشارژ	تک لوله‌ای
۱	۹	۲	تک لوله‌ای
۶	۶۶	۴	دو لوله‌ای
۵	۲۸	۴	سه لوله‌ای
۷	۲۳	۴	چهار لوله‌ای
۸	۵۵	۴	پنج لوله‌ای

## ۲-۵- صحت‌سنجی

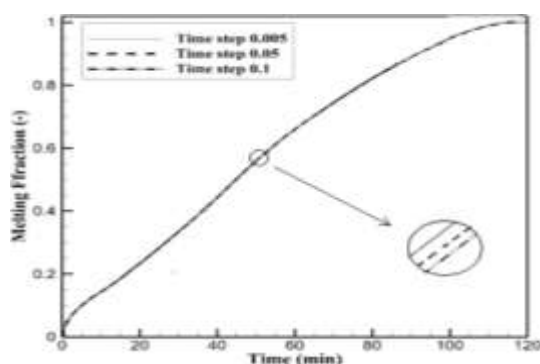
### ۲-۵-۱- فرآیند شارژ

از آنجایی که هدف از انجام مطالعه حاضر، بررسی تعداد و چیدمان لوله‌ها بوده است، مقطع مبدل حرارتی باید

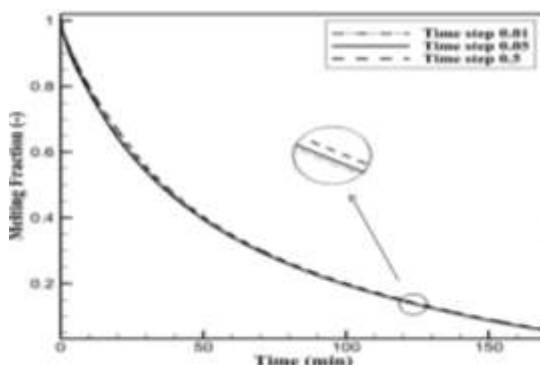
مختلف طبق جدول ۷ حل گردید تا بهینه‌ترین بازه زمانی انتخاب گردد. در شکل ۶، نمودارهای سه گام زمانی اول با اختلاف ۲٪، همدیگر را دنبال می‌کنند. از این رو ۰/۵ به عنوان گام زمانی مناسب انتخاب گردید. دلیل نمایش ندادن گام زمانی ۴، واگرا شدن حل است.

## جدول ۷- مقدار گام زمانی برای مبدل با یک لوله داخلی (مرجع) در فرآیند دشارژ

گام زمانی	گام زمانی
۰/۰۱	گام زمانی ۱
۰/۰۵	گام زمانی ۲
۰/۵	گام زمانی ۳
۱ واگرا	گام زمانی ۴



شکل ۵- بررسی حساسیت به گام زمانی برای مبدل با یک لوله داخلی در فرآیند شارژ (نمودار کسر جرمی ذوب بر حسب زمان)



شکل ۶- بررسی حساسیت به گام زمانی برای مبدل با یک لوله داخلی در فرآیند دشارژ (نمودار کسر جرمی ذوب بر حسب زمان)



### ۳- نتایج

بعد از صحنه‌گذاری برای مبدل با یک لوله داخلی (مبدل تک لوله‌ای) که حالت مرجع نامیده می‌شود، به نتایج بدست آمده در دو بخش می‌پردازیم. بخش نخست، فرآیند شارژ (ذوب) ماده تغییر فاز دهنده را بررسی می‌کند و در بخش دوم، به بررسی فرآیند دشارژ (انجماد) ماده پرداخته می‌شود. در بخش اول، تدریجاً به لوله‌های داخلی لوله اضافه می‌شود. در هر مرحله، چینش لوله‌ها در فرم‌ها و فاصله‌های مختلف بررسی و زمان شارژ که معیاری برای مقایسه است، گزارش می‌شود و در پایان هر گام، زمان شارژ کامل بدست آمده برای ماده تغییر فاز دهنده با زمان شارژ ماده تغییر فاز دهنده در حالت مرجع، مقایسه و با در نظر گرفتن مقدار زمان ۱۰۰ برای حالت مرجع، زمان ذوب PCM در حالت‌های دیگر از ۱۰۰ گزارش می‌شود. بعد از این مرحله در نهایت نمونه‌هایی که کمترین زمان ذوب در هر قسمت را دارند (یعنی مبدل منتخب)، با یکدیگر مقایسه می‌شوند. بخش دوم به تحلیل و بررسی فرآیند دشارژ تمام نمونه‌هایی که زمان ذوب آن‌ها در فرآیند شارژ گزارش شده، پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱- فرآیند شارژ (ذوب) ماده تغییر فاز دهنده

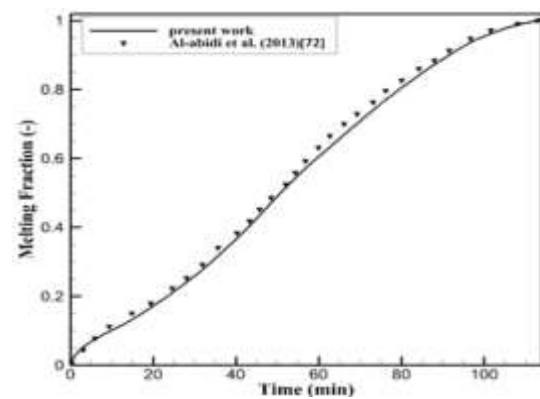
در شکل ۹ کانتورهای دما، در نیمه راست پوسته به تصویر کشیده شده، در حالی که خطوط جریان در جهت مخالف آمده است. فرآیند انجام شده در حین ذوب شدن مطابق شکل ۹، اینگونه است که در مراحل اولیه فرآیند ذوب، حرارت از لوله درونی و پوسته به ماده تغییر فاز دهنده جامد منتقل می‌شود.

در نتیجه بر اثر مکانیزم انتقال حرارت هدایت یک لایه‌ی نازک مذاب در تماس با لوله‌ها بوجود می‌آید. با پیشروی فرآیند ذوب، ناحیه مذاب گسترش یافته و به دنبال آن اثرات شناوری (بایانسی) نیز افزایش می‌یابد و ماده تغییر فاز دهنده مذاب با چگالی کمتر، به نیمه‌ی بالایی مخزن صعود می‌کند که به نوبه خود جریان‌های گردابه‌ای کوچکی را ایجاد می‌کند. هنگامی که این گردابه‌ها با هم جمع می‌شوند، گردابه‌های بزرگ‌تر، جابجایی طبیعی و نرخ فرآیند ذوب را بهبود می‌بخشند.

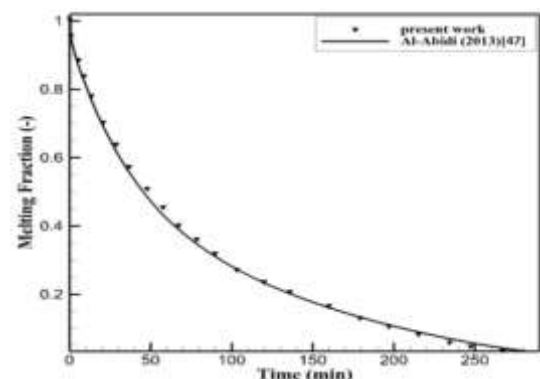
شبیه‌سازی می‌شود. با استفاده از شبکه‌بندی و گام زمانی مناسب، شبیه‌سازی برای مبدل سه لوله‌ای (با یک لوله داخلی) در مقطعی انجام شد که داده آزمایشگاهی آن موجود بوده است. شکل ۷، مطابقت نتایج این پژوهش با مطالعه العبیدی و دیگران [۱۷] در کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده نسبت به زمان، با اختلاف ۴٪ را نشان می‌دهد.

#### ۲-۵-۲- فرآیند دشارژ

در مطالعه‌ای دیگر العبیدی و همکاران [۱۸]، به بررسی فرآیند دشارژ در مبدل سه لوله‌ای (با یک لوله داخلی) پرداختند که برای اعتبارسنجی مسئله مورد نظر در فرآیند دشارژ، از این مرجع استفاده گردید. شکل ۸، همخوانی نزدیک این تحقیق را (با اختلاف ۲٪) با مطالعه العبیدی نشان می‌دهد.

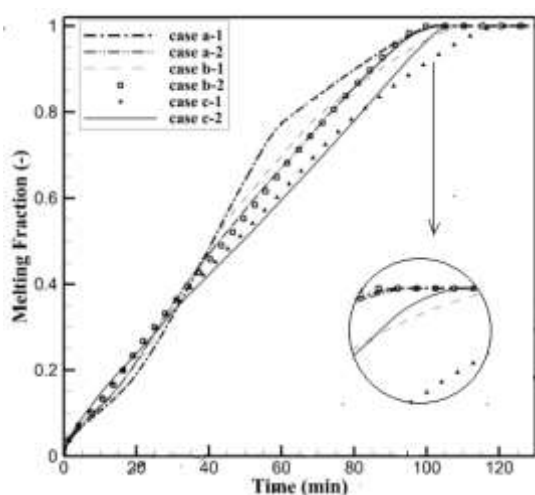


شکل ۷- مقایسه نمودار کسر ذوب کار حاضر با کار العبیدی [۱۷] در فرآیند شارژ

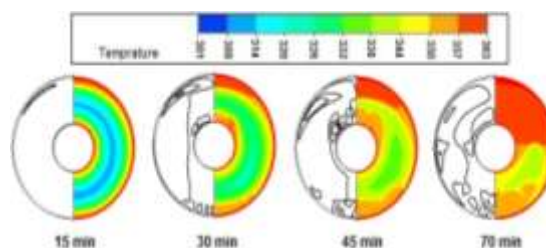


شکل ۸- مقایسه نمودار کسر جرمی کار حاضر با کار العبیدی [۱۸] در فرآیند دشارژ

و سپس بصورت عمودی در لوله میانی (پوسته) قرار داده شد. در چپش اول وقتی که لوله‌ها بصورت افقی قرار دارند، در ابتدا فاصله بین آن‌ها ۳٪ مشخص گردید، سپس این فاصله به ۴٪ و ۵٪ تغییر یافت؛ اما در این چپش با تغییر فاصله، ارتفاع لوله‌ها تغییر نمی‌کند؛ بنابراین، تنها عامل توزیع انتقال حرارت فاصله بین لوله‌ها است. وقتی فاصله بین لوله‌ها از هم زیاد می‌شود، نقاط بیشتری از کناره‌های پوسته تحت تاثیر حرارت لوله‌های داخلی قرار می‌گیرند و در پی آن نقاط میانی بین دو لوله، کمتر این حرارت را احساس می‌کنند. در چپش ۱ و فاصله ۳٪ (حالت a-1)، طبق نمودار کسر جرمی ماده برحسب زمان که در شکل ۱۰ آمده است، از لحظه شروع تا حدود ۵۸ دقیقه، نرخ ذوب شدن با گذشت زمان زیاد می‌شود و تا این زمان حجم بالایی از ماده تغییر فاز دهنده، یعنی همه PCM موجود در نیمه بالایی پوسته ذوب می‌شود، ولی پس از این زمان، دچار کاهش شدید می‌شود. البته انتظار می‌رود در اثر انتقال حرارت، جابجایی مقدار PCM باقی‌مانده در نیمه پایینی پوسته هم ذوب گردد، اما اطراف PCM ذوب نشده، دما حدوداً ۳۴۸ درجه کلین است و بر خلاف نیمه بالایی که دمای PCM ذوب شده ۳۵۸ درجه سانتی‌گراد است، شرایط خوبی برای انتقال حرارت جابجایی فراهم نمی‌شود؛ بنابراین، نرخ ذوب شدن در این حالت کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰- نمودار کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده برحسب زمان برای نمونه‌های بررسی شده در مبدل دو لوله‌ای در فرآیند شارژ



شکل ۹- کانتور دما و خطوط جریان برای مبدل تک لوله‌ای (حالت مرجع) در زمان‌های مختلف

بر اساس شکل، تا زمانی که لوله درونی انتقال دهنده سیال گرم در میانه پوسته قرار دارد، دو سطح گرمایی آن قدر از هم دور هستند که مقادیر زیادی از PCM، بعد از گذشت ۷۰ دقیقه هنوز در قسمت پایین لوله درونی جامد باقی می‌ماند. این امر نشان دهنده تاثیرات ضعیف جابجایی طبیعی و PCM نیمه پایینی پوسته به زمان بیشتری برای ذوب شدن است. زمان مورد نیاز برای ذوب شدن کامل PCM در مبدل تک لوله‌ای ۱۱۴ دقیقه است.

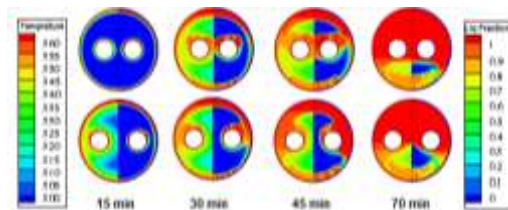
### ۳-۱-۱- تاثیر چیدمان و حالت‌های مختلف لوله‌های داخلی

با افزودن لوله‌های باریک درونی و توزیع آن‌ها در میان PCM، با شرط ثابت ماندن مقدار ماده تغییر فاز دهنده در همه حالات، تاثیر توزیع حرارت روی فرایند ذوب مشاهده خواهد شد؛ چون با افزودن لوله‌های داخلی بیشتر علاوه بر توزیع حرارت، سطح انتقال حرارت ماده تغییر فاز دهنده‌ی جامد در تماس با لوله انتقال دهنده سیال نیز افزایش خواهد یافت؛ بنابراین، ابتدا بطور مجزا به تحلیل مبدل‌هایی با تعداد لوله‌های یکسان با چپش‌های متفاوت و سه فاصله مختلف ۳٪، ۴٪، ۵٪ پرداخته می‌شود و سپس مقایسه‌ای روشن‌گرانه بین نمونه‌های منتخب با شرط داشتن زمان ذوب کم انجام می‌گیرد. نامگذاری نمونه‌های بررسی شده اینگونه است که حروف لاتین، بیانگر فاصله بین لوله‌ها است و اعداد، نوع چپش آن‌ها را مشخص می‌کند.

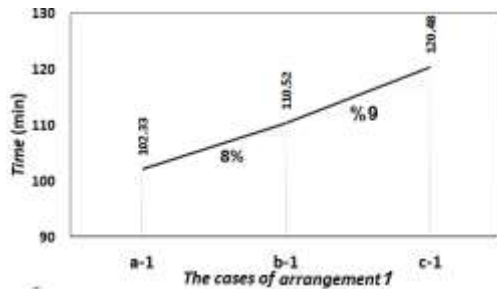
### ۳-۱-۱-۱- مبدل دو لوله‌ای

برای مبدل حرارتی با دو لوله داخلی (مبدل دو لوله‌ای)، دو چپش منظور گردیده است. لوله‌های درونی ابتدا بطور افقی

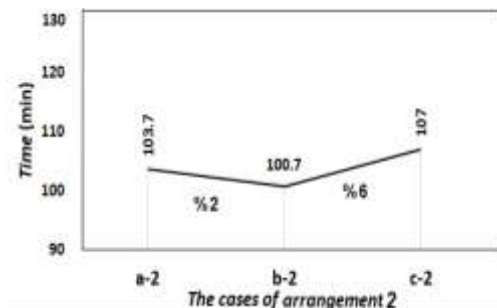
پایانی ذوب است. با افزایش این فاصله به  $5r_i$ ، لوله‌ها به دیواره‌های بالایی و پایینی پوسته بسیار نزدیک می‌شوند. از یک طرف، این موضوع موجب می‌گردد که نواحی بین لوله درونی و دیواره‌ها با سرعت بیشتری ذوب شوند و همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، نمودار کسر جرمی حالت c-2 با شیب تندی ذوب می‌شود، ولی از طرف دیگر با گذشت زمان، نواحی میانی لوله‌ها به دلیل فاصله بسیار زیادی که لوله‌ها از هم دارند و توزیع حرارت در آنجا کم است، زمان بیشتری برای ذوب نیاز دارند. شکل ۱۳، تغییرات زمان ذوب کامل حالت‌های بررسی شده را در چپینش ۲ نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- کانتور کسر جرمی و دمای ماده تغییر فاز دهنده در چپینش ۱ برای دو فاصله  $3r_i$  و  $4r_i$



شکل ۱۲- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای حالت‌های بررسی شده در چپینش ۱ برای مبدل دو لوله‌ای



شکل ۱۳- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای حالت‌های بررسی شده در چپینش ۲ برای مبدل دو لوله‌ای

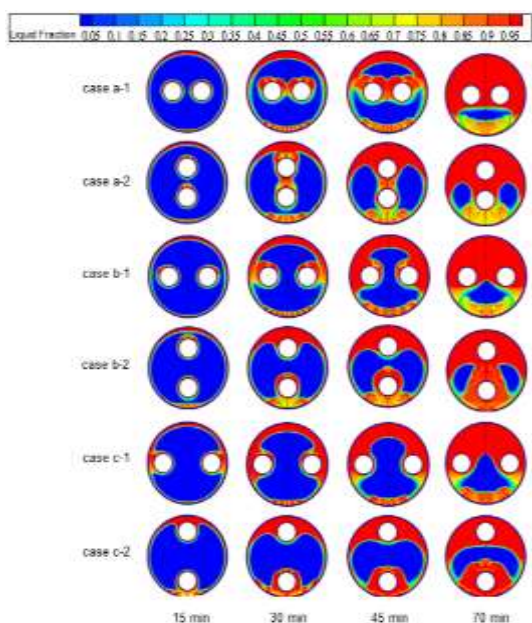
با افزایش فاصله بین لوله‌ها به  $4r_i$  (حالت b-1)، کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده مایع با شیب کمتری نسبت به حالت  $3r_i$ ، افزایش پیدا می‌کند؛ در حالی که روند نرخ ذوب آن همانند حالت قبل است؛ یعنی در ابتدا، نرخ ذوب شدن با گذشت زمان زیاد می‌شود تا این‌که از لحظه‌ای به بعد یعنی ۷۲ دقیقه افت می‌کند. کم شدن شیب نمودار نسبت به حالت a-1، به خاطر این است که با افزودن فاصله بین لوله‌ها، نقاط میانی آن‌ها کمتر تحت تاثیر حرارت جابجایی می‌باشند و دیر ذوب می‌گردند؛ در صورتی که ماده تغییر فاز دهنده‌ی جامد بین دیواره پوسته و لوله داخلی علاوه بر حرارت پوسته، حرارت موثر لوله داخلی را نیز دریافت می‌کند و با این‌که ذوب می‌شود، اما باز هم تحت تاثیر مقدار زیادی از حرارت قرار می‌گیرد و در حقیقت هدر می‌رود. شکل ۱۱ این واقعیت را بیان می‌کند.

در حالتی که فاصله بین لوله‌ها به  $5r_i$  تغییر می‌کند (حالت c-1)، روند افزایش کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده مایع، مشابه دو حالت قبلی است؛ اما به دلایل مذکور این فرایند کندتر پیش می‌رود. زمان ذوب در این حالت نسبت به حالت‌های بررسی شده در چپینش ۱، دارای بیشترین مقدار خود است. در شکل ۱۲ تغییرات زمان اتمام ذوب را برای حالت‌های بررسی شده در چپینش ۱ آمده است که نشان می‌دهد با افزایش فاصله بین لوله‌ها در مبدل دو لوله‌ای در چپینش ۱، زمان ذوب افزایش خواهد یافت.

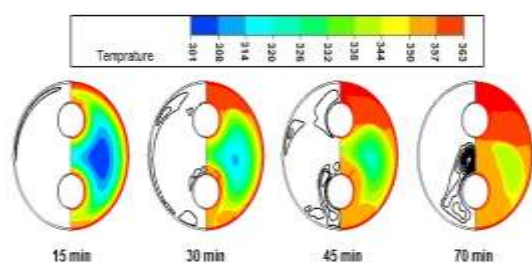
در چپینش ۲ همانند چپینش قبل، برای مبدل حرارتی دو لوله‌ای، هنگامی که لوله‌ها بصورت عمودی در پوسته جایگذاری می‌شوند، ابتدا حالتی که فاصله بین لوله‌ها  $3r_i$  است (حالت a-2) و سپس فاصله‌های  $4r_i$  و  $5r_i$  (به ترتیب حالت b-2 و c-2) بررسی می‌شود. در این چپینش علاوه بر فاصله بین لوله‌ها در حالت‌های بررسی شده، ارتفاع دو لوله نیز با هم متفاوت است و این امر برای ماده تغییر فاز دهنده در نواحی پایینی پوسته موثر است. بطوری که در این چپینش، انتظار افت شدید در شیب نمودار کسر جرمی را نداریم که در چپینش ۱ رخ داده است در حالی که فاصله بین لوله‌ها از  $3r_i$  به  $4r_i$  تغییر می‌یابد، نرخ شدت ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده، کمی افزایش پیدا می‌کند و این به آن دلیل است که ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده در نواحی پایین پوسته با سرعت بیشتری نسبت به حالت a-2 در دقایق

جدول ۱۰- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده در نمونه های بررسی شده برای مبدل دو لوله‌ای

نام مبدل	a-1	a-2	b-1	b-2	c-1	c-2
فاصله بین لوله‌ها	$3r_i$	$3r_i$	$4r_i$	$4r_i$	$5r_i$	$5r_i$
زمان اتمام ذوب (دقیقه)	۷۰/۲۳۳	۷۱/۳۰۳	۷۱/۵۲۱	۷۱/۵۲۱	۷۱/۷۱۱	۷۱/۷۱۱
درصد (نسبت به حالت مرجع)	٪۹۰	٪۹۱	٪۹۷	٪۸۸	٪۱۰۶	٪۹۴



شکل ۱۴- کانتور کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده در نمونه‌های بررسی شده برای مبدل دو لوله‌ای



شکل ۱۵- کانتور دما و خطوط جریان برای مبدل منتخب دو لوله‌ای در زمان‌های مختلف

چینش ۲ حالت‌های d-2 و e-2) بررسی شد. همان‌طور که از شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، با افزودن یک پله فاصله در چینش ۱ (حالت d-1) زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده نسبت به حالت e-1، ۱۱٪ کاهش می‌یابد؛ در حالی که در

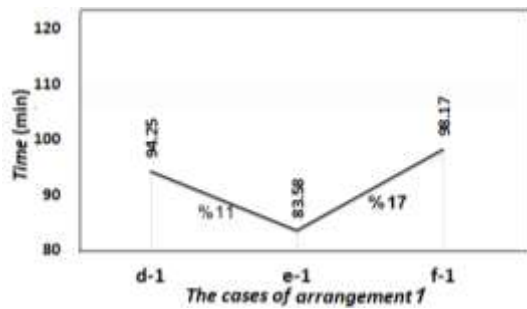
برای همه نمونه‌های بررسی شده مقایسه‌ای هم در دو چینش افقی و عمودی با فاصله یکسان بین لوله‌ها انجام گرفت. شکل ۱۴، کانتور کسر جرمی همه نمونه‌های بررسی شده را در چهار زمان متفاوت نشان می‌دهد. در مقایسه دو حالت a-1 و a-2 (دو چینش مختلف با فاصله یکسان بین لوله‌ها) می‌توان گفت، نرخ ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده در حالت a-1 که بخاطر وجود دو لوله هم ارتفاع در مرکز پوسته، ناحیه غالب مربوط به جایجایی بیشتر است، با اختلاف زیادی از حالت a-2 سبقت می‌گیرد، اما به دلیل افت شدیدی که علت بیان گردید، شیب نمودار کم و در نهایت زمان ذوب شدن در هر دو حالت، با اختلافی بسیار ناچیز و در حد مرتبه خطا، با هم برابر می‌شود.

این موضوع در مورد حالت‌های دیگر نیز صادق است. در پایان، حالت b-2 زودتر از حالت b-1 و حالت c-2 در زمان کمتری نسبت به حالت c-1 ذوب می‌شود.

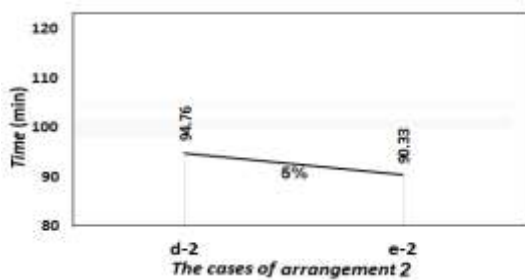
زمان ذوب کامل چینش‌های مختلف برای دو لوله‌ای در جدول ۱۰ نشان داده شده است. اگر زمان ذوب مبدل تک لوله‌ای را ۱۰۰ در نظر بگیریم، زمان ذوب نمونه‌های بررسی شده در مبدل دو لوله‌ای نیز، از ۱۰۰ بیان شده است. نکته حائز اهمیت این است که نرخ ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده در مبدل c-1 یعنی چینش ۱ با فاصله بین لوله‌ای  $5r_i$ ، از نرخ ذوب شدن ماده در مبدل تک‌لوله‌ای (مرجع) ۶ درصد بیشتر است؛ بنابراین توزیع لوله همیشه هم باعث کاهش زمان ذوب نخواهد شد و محل قرارگیری لوله‌ها در پوسته نیز از عامل تاثیرگذار روی زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده است. با توجه به جدول فوق در این بخش، مبدل منتخب حالت c-2 (چینش ۲ با فاصله  $4r_i$ ) است؛ چرا که زمان ذوب کمتری دارد. در شکل ۱۵ کانتورهای دما، در نیمه راست پوسته به نمایش گذاشته شد، در حالی که خطوط جریان در جهت مخالف نشان داده شده است. با توجه به شکل با پیشرفت فرایند ذوب، در اثر افزایش ناحیه مذاب، اثرات شناوری افزایش یافته و نرخ فرایند ذوب نیز بهبود یافته است.

### ۳-۱-۲- مبدل سه لوله‌ای

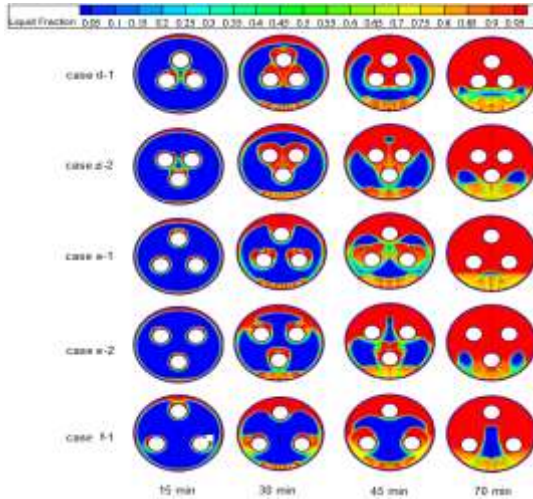
برای مبدل با سه لوله داخلی (سه لوله‌ای) نیز همانند مبدل دو لوله‌ای، دو چینش استفاده شد. در هر دو چینش، فواصل  $3r_i$  و  $4r_i$  (برای چینش ۱ حالت‌های d-1 و e-1 و برای



شکل ۱۶- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای حالت‌های بررسی شده در چینش ۱ برای مبدل سه لوله‌ای



شکل ۱۷- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای حالت‌های بررسی شده در چینش ۲ برای مبدل سه لوله‌ای



شکل ۱۸- کانتور کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده در نمونه‌های بررسی شده برای مبدل سه لوله‌ای

از نمودار کسر جرمی PCM در شکل ۱۹ مشخص است، زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای دو حالت d-1 و d-2 یعنی، وقتی که چینش متفاوت و فاصله بین لوله‌ها با هم برابر (فاصله ۳٪) است، با اختلافی بسیار ناچیز و در حد

چینش ۲ (شکل ۱۷)، افزودن یک پله فاصله تنها ۵٪ کاهش زمان ذوب را به همراه دارد. تفاوت در افزایش درصد کاهش زمان ذوب به این دلیل است که با افزودن فاصله در چیدمان ۱، دو لوله در قسمت پایین‌تر پوسته قرار می‌گیرند؛ بنابراین مناطق مربوط به انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که در چیدمان ۲، تنها یک لوله در این ناحیه قرار می‌گیرد و در نتیجه‌ی آن، اثر انتقال حرارت جابجایی کمتر خواهد بود.

با مشاهده اثر مثبت بیشتر تغییر فاصله در چینش ۱، یک پله دیگر به فاصله بین لوله‌ها، اضافه شد و فاصله بین لوله‌ها از ۴٪ به ۵٪ تغییر یافت. در این حالت (حالت f-1) که تنها برای چینش ۱ بررسی شد، به دلیل نزدیک بودن لوله‌های داخلی به دیواره‌های درونی پوسته، نواحی میان دیواره‌های پوسته و لوله‌ها تحت تاثیر سطح انتقال حرارت موثر اضافی قرار می‌گیرند و روند ذوب شدن در ابتدای فرآیند شدت می‌گیرد، (شیب نمودار در آغاز فرآیند، از همه نمونه‌های بررسی شده در مبدل سه لوله‌ای بیشتر است (شکل ۱۹) اما بعد از گذشت زمان به دلیل دور بودن ماده تغییر فاز دهنده نواحی میانی پوسته از دیواره‌های حرارتی، شیب نمودار کسر جرمی کاهش می‌یابد، در ادامه زمان ذوب افزایش می‌یابد. زمان ذوب در مبدل f-1، افزایش ۱۷ درصدی در پی خواهد داشت؛ بنابراین در بین همه نمونه‌های بررسی شده در مبدل سه لوله‌ای، کمترین زمان ذوب PCM برای چینش ۱ یعنی حالت e-1 و برای چینش ۲ حالت e-2 است.

همان‌طور که از کانتورهای کسر جرمی در شکل ۱۸ نشان داده شده، در حالت d-1 که لوله‌ها خیلی بهم نزدیک هستند، توزیع حرارت در کناره‌ها و قسمت پایین پوسته مناسب نیست و ماده تغییر فاز دهنده جامد در این نواحی غالب است. در حالت f-1 نیز که لوله‌ها از هم فاصله دارند، در میانه لوله‌ها توزیع حرارت مناسب نیست (کانتور مربوط به زمان ۴۵ دقیقه حالت d-1 و f-1 این موضوع را به خوبی نشان می‌دهند)، این در حالی است که در حالت e-1 لوله‌ها به گونه‌ای در پوسته قرار داده شده‌اند که در همه قسمت‌های پوسته توزیع حرارت مناسب است و انتقال حرارت جابجایی طبیعی اثر خوبی دارد. با گذشت زمان منطقه ذوب افزایش و زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد.

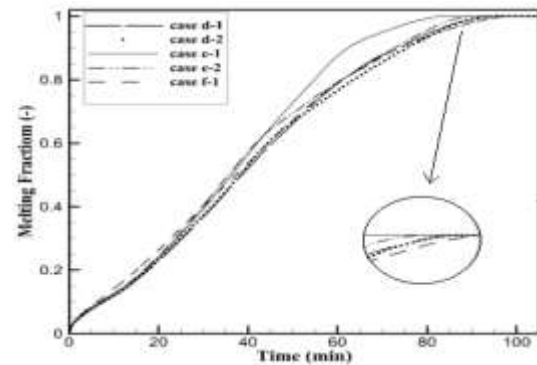
جدول ۱۱- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده در نمونه‌های بررسی شده برای مبدل سه لوله‌ای

نام مبدل	d-1	d-2	e-1	e-2	f-1
فاصله بین لوله‌ها	۳۲ <sub>f</sub>			۴۲ <sub>f</sub>	۵۲ <sub>f</sub>
زمان اتمام ذوب (دقیقه)	۹۴/۲۵	۹۴/۷۶	۸۳/۵۸	۹۰/۳۳	۹۸/۱۷
درصد (نسبت به حالت مرجع)	٪۸۲	٪۸۳	٪۷۳	٪۷۹	٪۸۶

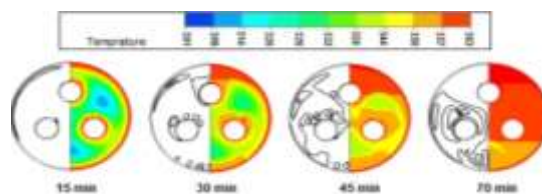
دلیل آن متمرکز بودن لوله‌های داخلی در مرکز، با فاصله‌های کم از هم است. در مقایسه چینش ۲ و ۳ (حالت g-2 و g-3)، در حالت g-2 به علت وجود دو لوله در نیمه پایینی پوسته، شرایط بهتری برای انتقال حرارت جابجایی فراهم می‌شود؛ در نتیجه کاهش زمان ذوب ماده نسبت به مرجع، بیشتر از حالت g-3 و چیدمان‌های دیگر با همین فاصله خواهند بود و طبیعتاً به دلیل انتقال حرارت جابجایی ضعیف‌تر در حالت g-3، بیشترین زمان ذوب برای این مبدل خواهد بود که چینش آن دقیقاً بر خلاف حالت g-2 است. از آنجاکه زمان ذوب ماده برای دو چینش g-1 و g-2 نسبت به چینش‌های دیگر کمتر و خیلی به هم نزدیک است، فاصله بین لوله‌ها تنها برای این دو حالت، از ۳۲<sub>f</sub> به ۴۲<sub>f</sub> تغییر داده شد تا اثر افزودن فاصله روی زمان ذوب نیز، مورد بررسی قرار گیرد.

در چینش ۱ با افزایش فاصله (حالت h-1)، لوله‌های درونی در چهار ربع مخزن، نواحی زیادی از کناره‌های پوسته و نواحی میانی لوله‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند و با گذشت زمان با توجه به توزیع حرارت مناسب، فرایند ذوب پیشرفت ناحیه‌ی مذاب گسترش می‌یابد، گردابه‌های ذوب قوی‌تر شده و باعث انتقال حرارت غالب جابجایی نسبتاً خوبی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲۱ نشان داده شده، در این حالت زمان ذوب نسبت به مبدل g-1، ۱۳٪ کاهش می‌یابد؛ در صورتی که در چینش ۲ با تغییر فاصله به ۴۲<sub>f</sub> زمان، کمتر کاهش پیدا کرد شکل ۲۲ به دلیل کاهش ۱۳ درصدی در چینش ۱، زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در فاصل ۵۲<sub>f</sub> (حالت i-1) نیز برای آن بررسی شد که با افزایش زمان ذوب برای PCM همراه می‌شود. کانتور کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده در تمام نمونه‌های بررسی شده در چهار بازه زمانی در مبدل چهار لوله‌ای در شکل ۲۳ قرار دارد. همان‌طور که شکل ۲۴ نشان می‌دهد، کمترین زمان ذوب برای حالت h-1 است

مرتبه خطا، یکسان است. علت، آن است که لوله‌های داخلی بهم نزدیک است در مرکز پوسته متمرکز شده‌اند، بطوری که روند ذوب شدن برای این دو چینش با این فاصله مثل هم پیش می‌رود. با افزایش یک پله فاصله (فاصله ۴۲<sub>f</sub>) زمان ذوب برای حالت e-1، ۸٪ کمتر از e-2 است که علت آن در فوق اشاره شده است. زمان ذوب کامل برای چینش‌های مختلف برای مبدل سه لوله‌ای در جدول (۱۱) آمده است. همان‌طور که مشخص است، ماده تغییر فاز دهنده e-1 (مبدل منتخب) برای ذوب کامل، تنها به ۷۳٪ زمان ذوب PCM در مبدل مرجع نیاز دارد. شکل ۲۰ کانتورهای دما و خطوط جریان پیشرفت فرایند ذوب را برای حالت e-1 (مبدل منتخب) نشان می‌دهد که کمترین زمان ذوب را نسبت به دیگر مبدل‌ها دارد.



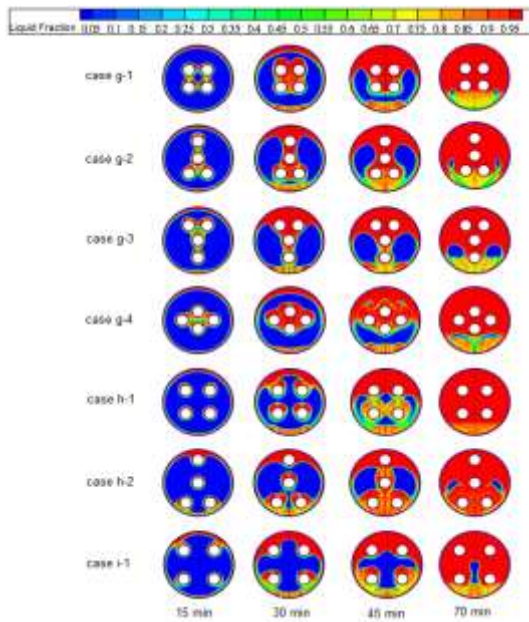
شکل ۱۹- نمودار کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده برحسب زمان برای نمونه‌های بررسی شده در مبدل سه لوله‌ای برای فرآیند شارژ



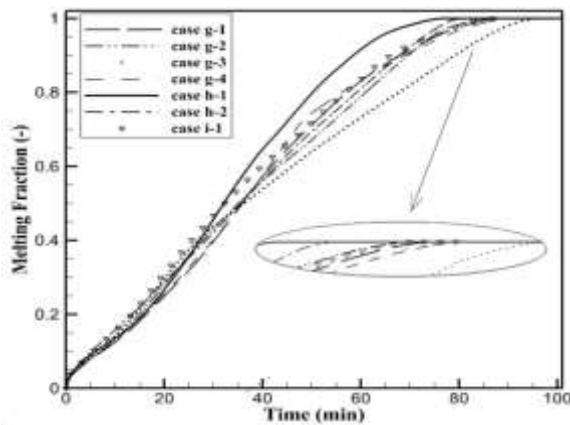
شکل ۲۰- کانتور دما و خطوط جریان برای مبدل منتخب سه لوله‌ای در زمان‌های مختلف

### ۳-۱-۱-۳- مبدل چهار لوله‌ای

برای مبدل با چهار لوله داخلی (چهار لوله‌ای)، چهار چیدمان بکار برده می‌شود. برای دو چینش ۱ و ۴ با فاصله‌های یکسان ۳۲<sub>f</sub> یعنی حالت‌های g-1 و g-4، زمان ذوب شدن تقریباً یکسان است.



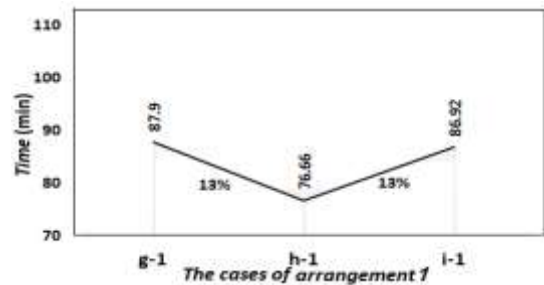
شکل ۲۳- کانتور کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده در نمونه های بررسی شده برای مبدل چهار لوله ای



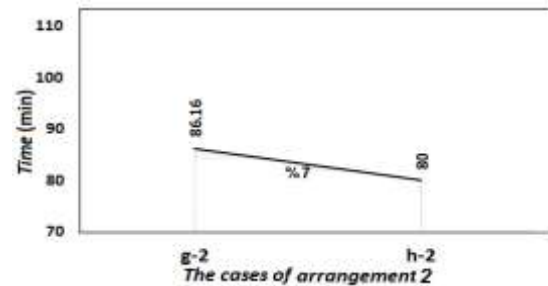
شکل ۲۴- نمودار کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان برای نمونه های بررسی شده در مبدل چهار لوله ای

در نمودار کسر جرمی ملاحظه می شود. در ابتدای فرآیند ذوب، شیب کسر جرمی حالت i-1 در میان نمونه های بررسی شده بیشتر است که با گذشت زمان کاهش می یابد. به این دلیل نزدیکی خیلی زیاد لوله های حرارتی به دیواره های پوسته و به دنبال آن اثر حرارت اضافی موثر در کناره های پوسته کسر جرمی شدت می گیرد، ولی با گذشت زمان و پس از ذوب این نواحی، به دلیل فاصله زیاد لوله ها از هم، جامد در نواحی میانی غالب است.

زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده در چینش های مختلف برای مبدل سه لوله ای در جدول ۱۲ آورده شده است.



شکل ۲۱- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای حالت های بررسی شده در چینش ۱ برای مبدل چهار لوله ای



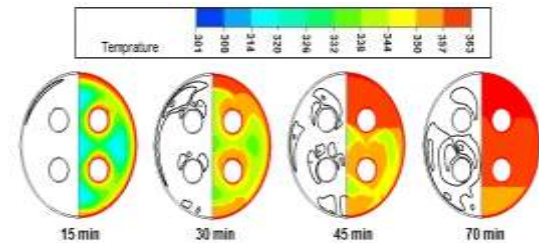
شکل ۲۲- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای حالت های بررسی شده در چینش ۲ برای مبدل چهار لوله ای

جدول ۱۲- زمان ذوب کامل برای چینش های مختلف برای چهار لوله ای

i-1	h-2	h-1	g-4	g-3	g-2	g-1	نام مبدل
$5 r_i$	$4 r_i$			$3 r_i$			فاصله بین لوله ها
۸۶/۹۲	۸۰	۷۶/۶۶	۹۰	۹۶/۶۶	۸۶/۱۶	۸۷/۹	زمان اتمام ذوب (دقیقه)
٪۷۶	٪۷۰	٪۶۸	٪۷۹	٪۸۴	٪۷۶	٪۷۷	درصد (نسبت به حالت مرجع)

همان‌طور که مشخص است، ماده تغییر فاز دهنده در مبدل h-1 (مبدل منتخب) برای ذوب کامل ماده، تنها به ۶۷٪ زمان ذوب PCM در مبدل مرجع نیاز دارد. شکل ۲۵، کانتورهای دما و خطوط جریان و پیشرفت فرایند ذوب را برای حالت h-1 نشان می‌دهد.

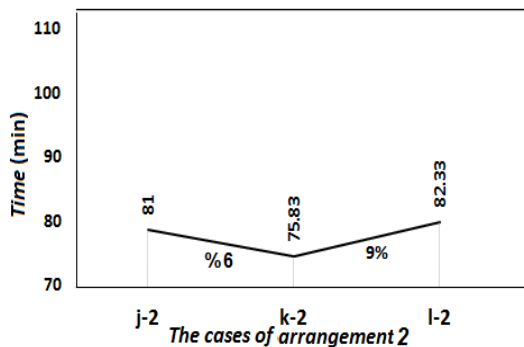
حسب تغییر فاصله، در شکل ۲۶ برای چیدمان ۲ و در شکل ۲۷ برای چیدمان ۴ آمده است. وقتی فاصله بین لوله‌ها به ۴٪ تغییر داده می‌شود، زمان ذوب PCM، به دلیل توزیع حرارت مناسب و همچنین اثرگذاری بیشتر انتقال حرارت جابجایی ناشی از پایین آمدن لوله‌های درونی، کاهش می‌یابد. مقدار کاهش زمان ذوب برای حالت k-۲، طبیعتاً به دلایل گفته شده بیشتر است. کانتورهای رنگی در شکل ۲۸، این موضوع را به خوبی نشان می‌دهند. نمودار کسر جرمی نمونه‌های بررسی شده برای مبدل پنج لوله‌ای در شکل ۲۹ و جدول ۱۳ نشان از این است که ذوب در مبدل‌های با چینش مختلف در فاصله‌های یکسان، در بازه زمانی نزدیک به هم اتفاق می‌افتد؛ در صورتی که فاصله‌های متغیر با چینش‌های یکسان هنوز روی زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده تأثیرگذار است. شکل ۳۰، کانتورهای دما و خطوط جریان و پیشرفت فرایند ذوب را برای حالت k-۲ (مبدل منتخب) نشان می‌دهد.



شکل ۲۵- کانتور دما و خطوط جریان برای مبدل منتخب چهار لوله‌ای در زمان‌های مختلف

### ۳-۱-۱-۴- مبدل پنج لوله‌ای

برای مبدل با پنج لوله داخلی (پنج لوله‌ای)، چهار چیدمان انتخاب شد. در چینش ۱ و ۳، لوله‌ها در پوسته خلاف هم قرار گرفته‌اند. در این دو چیدمان لوله‌ها با فاصله ۳٪، نزدیک به هم و در مرکز پوسته متمرکز شده‌اند و طبق انتظار زمان ذوب کامل PCM در این دو مبدل یکسان است. در چینش ۲ و ۴، فاصله لوله‌ها از لوله مرکزی به اندازه ۳٪ فرض شده است. زمان ذوب شدن برای این دو چینش نیز، به دلایل ذکر شده یکسان است. در میان این چهار چینش، کمترین زمان ذوب البته با اختلاف بسیار کم، برای چینش ۲ و ۴ خواهد بود؛ بنابراین، در این دو چینش فاصله بین لوله‌ها به ۴٪ و ۵٪ تغییر داده شده و بررسی می‌شود. درصد تغییرات زمانی بر

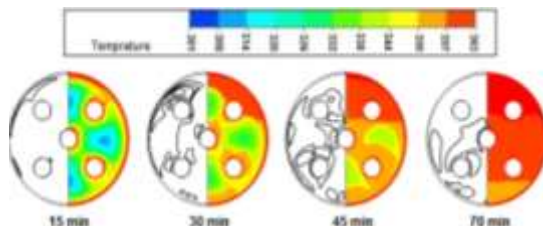


شکل ۲۶- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای حالت‌های بررسی شده در چینش ۲ برای مبدل پنج لوله‌ای

جدول ۱۳- زمان ذوب کامل برای چینش‌های مختلف برای پنج لوله‌ای

نام مبدل	j-1	j-2	j-3	j-4	k-2	k-4	i-2	i-4
فاصله بین لوله‌ها	$3 r_i$	$3 r_i$	$3 r_i$	$3 r_i$	$4 r_i$	$4 r_i$	$4 r_i$	$5 r_i$
زمان اتمام ذوب (دقیقه)	۸۴/۱۷	۸۱	۸۳/۸۳	۸۱	۷۵/۸۳	۷۷/۳۳	۸۲/۳۳	۸۸/۱۷
درصد (نسبت به حالت مرجع)	٪۷۴	٪۷۱	٪۷۳	٪۷۱	٪۶۷	٪۶۸	٪۷۳	٪۷۷

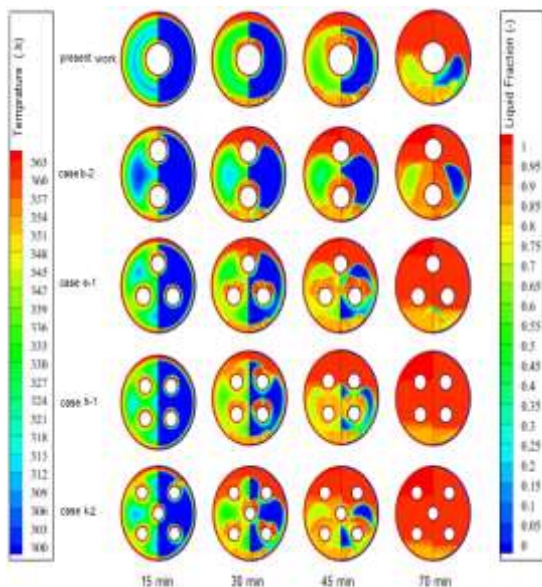




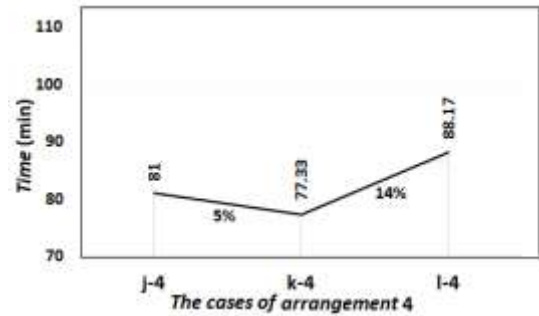
شکل ۳۰- کانتور دما و خطوط جریان برای مبدل پنج لوله‌ای در زمان‌های مختلف

۳-۱-۲- مبدل‌های با زمان ذوب کم (مبدل‌های منتخب)

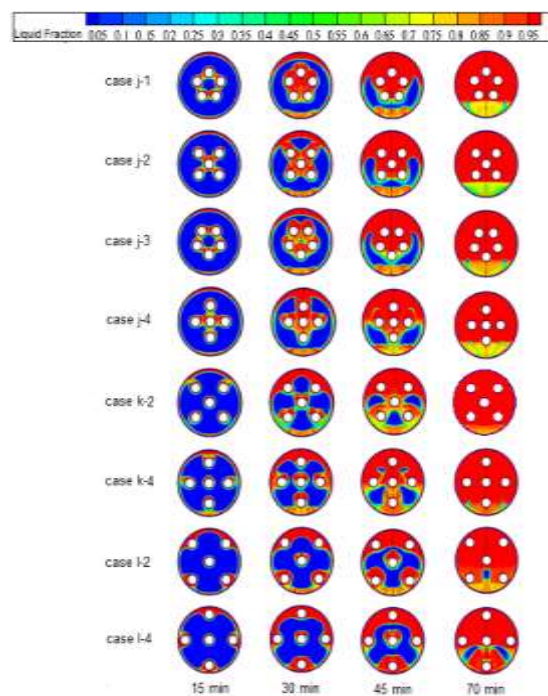
در بخش‌های قبیل برای هر تعداد لوله یکسان، چیدمان و فاصله بین لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفت و مبدلی که سیستم ذخیره‌کننده در آن زمان ذوب کمتری داشت و انرژی حرارتی در زمان کوتاهی ذخیره می‌شد، انتخاب گردیده است. در این بخش، مقایسه‌ای بین این پنج مبدل و مبدل مرجع صورت خواهد گرفت تا علاوه بر چینش، اثر افزایش تعداد لوله روی زمان ذوب نیز مشاهده شود. شکل ۳۱، کانتورهای کسر ذوب و کانتور دمای این پنج مبدل حرارتی با تعداد لوله‌های متفاوت را نشان می‌دهد. برای مبدل مرجع و دو لوله‌ای مقدار قابل توجهی ماده تغییر فاز دهنده جامد، تا دقیقه هفتاد باقی مانده است. نمودار کسر جرمی برای این پنج مبدل،



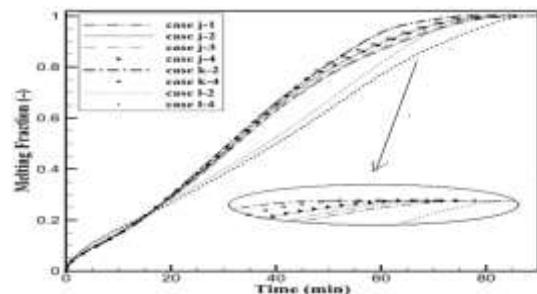
شکل ۳۱- کانتور کسر جرمی و دمای ماده تغییر فاز دهنده برای مبدل‌های با زمان ذوب پایین



شکل ۲۷- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای حالت‌های بررسی شده در چینش ۴ برای مبدل پنج لوله‌ای

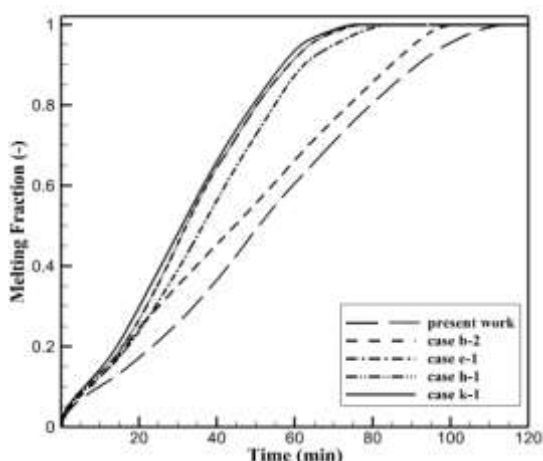


شکل ۲۸- کانتور کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده در نمونه‌های بررسی شده برای مبدل پنج لوله‌ای

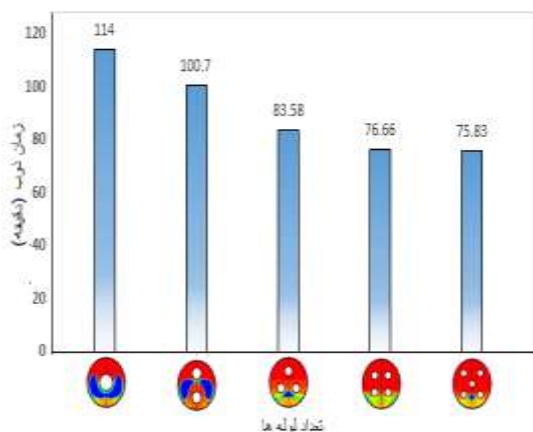


شکل ۲۹- نمودار کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان برای نمونه‌های بررسی شده در مبدل پنج لوله‌ای

هستند که بعد از گذشت ۱۹۲ دقیقه، هنوز مقادیر زیادی از ماده تغییر فاز دهنده مذاب باقی مانده است و نیاز به زمان بیشتری برای انجماد دارد.



شکل ۳۲- نمودار کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده برای مبدل‌های با زمان ذوب پایین



شکل ۳۳- نمودار میله‌ای اثرات کاهش زمان بر اثر افزایش تعداد لوله در فرآیند شارژ

در شکل ۳۲ آورده شده است. طبق جدول ۱۴، با افزایش تعداد لوله‌ها از یک تا دو لوله و از دو تا سه لوله، زمان ذوب به مقدار قابل توجهی، به ترتیب ۱۲٪ و ۱۷٪ کاهش می‌یابد؛ اما با افزایش تعداد لوله از سه به چهار لوله، زمان ذوب کمتر تاثیر گذار است. افزودن تعداد لوله‌های داخلی بیشتر از چهار عدد، دیگر تاثیری روی زمان ذوب نخواهد گذاشت. لازم به ذکر است که فاصله مرکز تا مرکز لوله‌های داخلی در همه مبدل‌ها ۴۲ است که نشان می‌دهد، برای ذخیره انرژی در زمان کوتاه‌تر، یک مقدار استاندارد برای فاصله بین لوله‌ها از هم وجود دارد و اگر این فاصله از این حد بیشتر یا کمتر شود، حرارت بصورت مناسب توزیع نمی‌شود. نمودار میله‌ای در شکل ۳۳، تغییرات کاهش زمان بر اثر افزایش تعداد لوله را به خوبی نمایش می‌دهد.

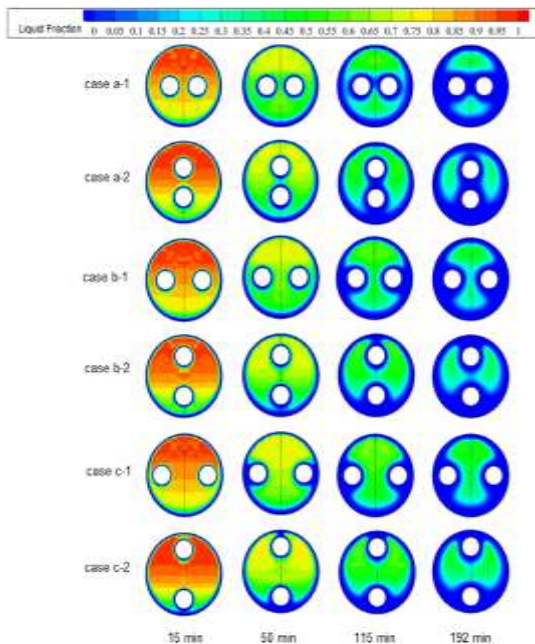
### ۳-۲- فرآیند دشارژ ماده تغییر فاز دهنده

طی فرآیند دشارژ برخلاف فرآیند شارژ، انتقال حرارت جابجایی طبیعی تنها در شروع فرآیند تاثیرگذار است. در شکل ۳۴ مشخص است، طی مراحل اولیه فرآیند، حرارت از ماده تغییر فاز دهنده مذاب به لوله درونی و پوسته منتقل می‌شود؛ در نتیجه بر اثر مکانیزم انتقال حرارت جابجایی طبیعی یک لایه نازک جامد در تماس با لوله‌ها و پوسته به وجود می‌آید. با گذشت زمان و افزایش نرخ انتقال حرارت این ناحیه جامد گسترش می‌یابد، اثر جابجایی طبیعی به سمت صفر میل می‌کند و مکانیزم هدایت غالب می‌شود.

در دشارژ، نیمه پایینی پوسته به میزان بیشتری نسبت به بالای آن، از لوله‌های دما پایین تاثیر می‌پذیرند، چون ماده تغییر فاز دهنده جامد به علت سنگین‌تر بودن به سمت پایین حرکت می‌کند. وقتی که لوله درونی حاوی سیال سرد، در میانه پوسته قرار دارد، دو سطح سرد آن قدر از هم دور

### جدول ۱۴- زمان ذوب کامل برای مبدل‌های منتخب

تعداد لوله	تک لوله‌ای	دو لوله‌ای	سه لوله‌ای	چهار لوله‌ای	پنج لوله‌ای
نام مبدل	مرجع	b-2	e-1	h-1	k-2
فاصله بین لوله‌ها	-	۴۲			
زمان اتمام ذوب (دقیقه)	۱۱۴	۱۰۰/۷	۸۳/۵۸	۷۶/۶۶	۷۵/۸۳
درصد کاهش زمان هر حالت نسبت به حالت قبل	٪۰	٪۱۲	٪۱۷	٪۸	٪۱



شکل ۳۵- کانتور کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده نمونه های بررسی شده برای مبدل دو لوله ای در فرآیند دشارژ

نکته قابل توجه این است که نحوه چیدمان لوله های داخلی در فاصله های یکسان برای این مبدل ها تاثیر چندانی روی زمان انجماد نخواهد داشت (حدود ۲٪)، در صورتی که با افزایش فاصله بین لوله ای به  $4r_i$ ، تغییرات چشمگیری در زمان انجماد مشاهده می شود. بطور مثال، تغییرات زمان فرآیند انجماد سیستم ذخیره کننده در مبدل های b-1 و b-2 (با فاصله  $4r_i$ ) در مقایسه با هم، کمتر از ۲٪ است؛ در صورتی که برای b-1 نسبت به c-1 (با فاصله  $5r_i$ )، ۳۱٪ زمان را افزایش می دهد. همان طور که در جدول ۱۵ نشان داده شده است. از نمودار کسر جرمی ماده در شکل ۳۶ مشخص است، هنگامی که لوله های داخلی در فاصله  $4r_i$  بصورت افقی قرار می گیرند (حالت b-1)، شیب نمودار کسر جرمی بعد از ۱۲۰ دقیقه افت می کند و نرخ انجماد کاهش می یابد. این افت شیب برای مبدل c-1 نیز (چینش یکسانی با b-1 دارد) از دقیقه ۸۰ به بعد اتفاق می افتد. علت آن است که از این زمان به بعد، نواحی که منجر به انجماد می گردند، دیواره ها نیستند، بلکه PCM منجمد شده در زمان های قبلی است و همچنین علت آن اختلاف دمای کم بین لایه های ماده تغییر فاز دهنده است.

زمان مورد نیاز برای انجماد کامل ماده تغییر فاز دهنده، در مبدل تک لوله ای ۲۸۲ دقیقه است.

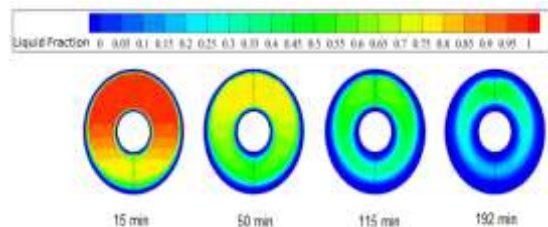
در این بخش تاثیر توزیع لوله های سرد و افزایش سطح انتقال حرارت روی رفتار انجماد سیستم ذخیره کننده در مبدل هایی بررسی می شود که فرآیند شارژ در آن ها تحلیل شود. در آغاز بطور جداگانه به تحلیل مبدل هایی با تعداد لوله های یکسان در چینش های متمایز با سه فاصله مختلف  $3r_i$ ،  $4r_i$ ،  $5r_i$  پرداخته می شود و سپس مقایسه ای بین نمونه های منتخب با شرط داشتن زمان انجماد کم صورت می گیرد.

### ۳-۲-۱- تاثیر چیدمان و حالت های مختلف لوله های

#### داخلی

#### ۳-۲-۱-۱- مبدل دو لوله ای

مبدل هایی که بررسی می شوند، در دو چینش افقی و عمودی با سه فاصله متغیر هستند. شکل ۳۵، کانتورهای رنگی از نحوه فرآیند انجماد برای مبدل دو لوله ای را نشان می دهد. طبق جدول ۱۵ در فاصله های  $4r_i$  و  $5r_i$  زمان اتمام فرآیند دشارژ نسبت به مبدل مرجع افزایش چشمگیری (به ترتیب ۱۰٪ و ۴۰٪) داشته است. با افزایش فاصله بین لوله ای از  $3r_i$  به  $4r_i$  و سپس از  $4r_i$  به  $5r_i$ ، به ترتیب افزایش ۱۲ و ۱۴ درصدی زمان مشاهده می شود. علت، آن است که با افزایش فاصله، مواد تغییر فاز دهنده ای که در مرکز پوسته قرار دارد، کمتر از حرارت دیواره لوله های داخلی تاثیر می پذیرند، بطوری که به زمان بیشتری برای انجماد نیاز پیدا می کنند. زمان انجماد نمونه های بررسی شده در مبدل دو لوله ای نسبت به مبدل تک لوله ای (مبدل مرجع)، در جدول آورده شده است.

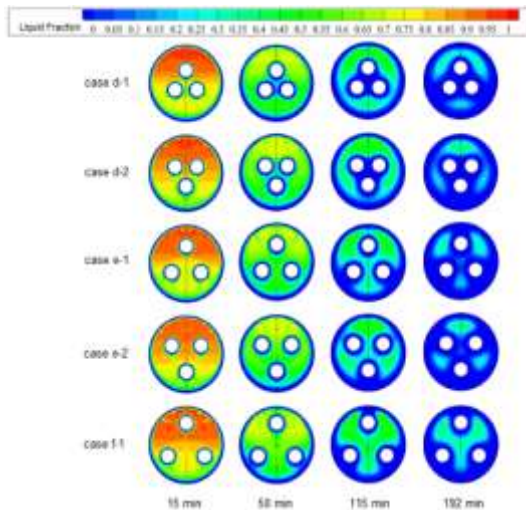


شکل ۳۶- کانتور کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده در مبدل تک لوله ای

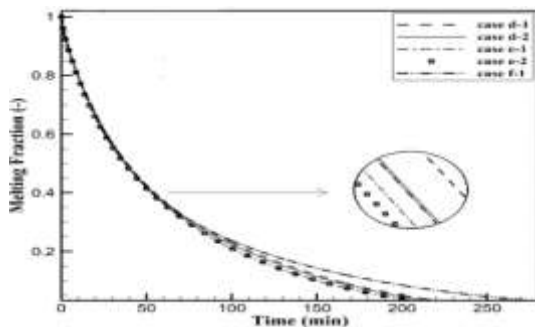
جدول ۱۵- زمان انجماد کامل برای چینش‌های مختلف برای مبدل دو لوله‌ای

نام مبدل	a-1	a-2	b-1	b-2	c-1	c-2
فاصله بین لوله‌ها	$3r_f$	$3r_f$	$4r_f$	$4r_f$	$5r_f$	$5r_f$
زمان اتمام انجماد (دقیقه)	۲۷۶	۲۶۷	۳۱۰	۳۰۴	۴۰۳	۳۹۵
درصد (نسبت به حالت مرجع)	٪۹۸	٪۹۵	٪۱۱۰	٪۱۰۸	٪۱۴۲	٪۱۴۰

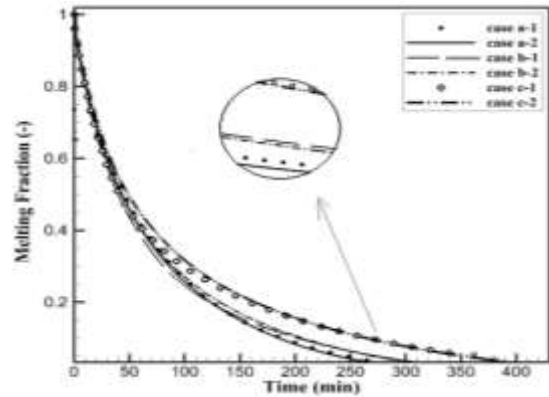
قابل توجه است، زمان انجماد در این حالت تقریباً برابر زمان انجماد در مبدل مرجع است. نمودار کسر جرمی ماده در شکل ۳۸ نشان می‌دهد که در مبدل سه لوله‌ای نیز مانند مبدل دو لوله‌ای، تغییر فاصله نسبت به چینش تاثیر گذارتر است.



شکل ۳۷- کانتور کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده نمونه‌های بررسی شده برای مبدل سه لوله‌ای در فرآیند دشارژ



شکل ۳۸- نمودار کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده برحسب زمان برای نمونه‌های بررسی شده در مبدل سه لوله‌ای در فرآیند دشارژ



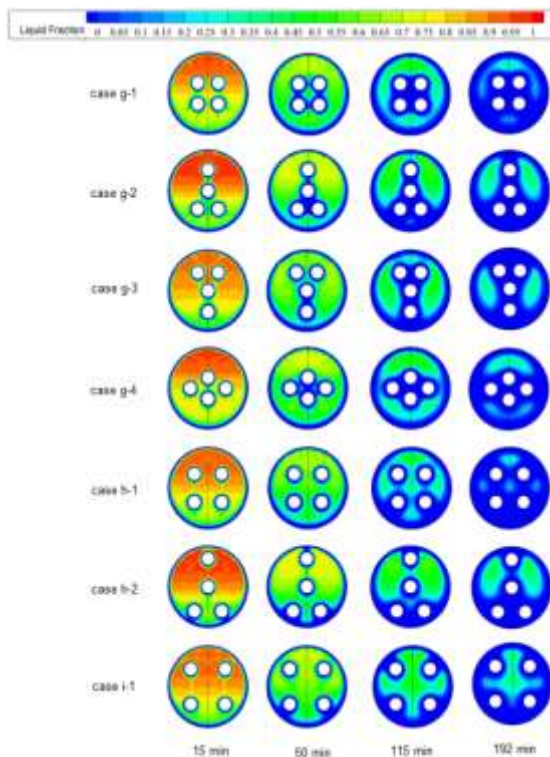
شکل ۳۶- نمودار کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده برحسب زمان برای نمونه‌های بررسی شده در مبدل دو لوله‌ای در فرآیند دشارژ

### ۳-۲-۱-۲-۳- مبدل سه لوله‌ای

در مبدل سه لوله‌ای رفتار انجماد سیستم ذخیره‌کننده برای دو چینش ۱ و ۲ در فاصله‌های مختلف در شکل ۳۷ نشان داده شده است. چینش ۲ در فاصله  $3r_f$  (حالت ۲-d)، به دلیل داشتن دو لوله در ناحیه بالای پوسته، به میزانی بسیار کم دارای زمان انجماد پایین‌تری نسبت به چینش ۱ (حالت ۱-d) است. علت آن است که سرما به خودی خود چگال است و تمایل دارد به سمت پایین حرکت کند، بنابراین با قرار دادن تعداد لوله‌های بیشتر در نواحی بالای پوسته، انجماد ماده تغییر فاز دهنده در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. طبق جدول ۱۶ با افزایش فاصله بین لوله‌ها به  $4r_f$ ، به دلیل توزیع بهتر دما، زمان انجماد در حدود ۵٪ کمتر می‌شود. با افزایش بیشتر فاصله‌ها برای چینش ۱ (حالت ۱-f)، به دلیل اینکه تمرکز لوله‌ها به سمت دیواره‌های پوسته است، مواد تغییر فاز دهنده جامد در مرکز، کمتر از حرارت آن‌ها تاثیر می‌پذیرند، بنابراین زمان انجماد در این حالت ۳۲٪ نسبت به حالت e-1 افزایش پیدا می‌کند.

جدول ۱۶- زمان انجماد کامل برای چینش‌های مختلف برای مبدل سه لوله‌ای

نام مبدل	d-۱	d-۲	e-۱	e-۲	f-۱
فاصله بین لوله‌ها	$۳r_i$	$۲r_i$	$۴r_i$	$۴r_i$	$۵r_i$
زمان اتمام انجماد (دقیقه)	۲۲۱	۲۱۵	۲۰۷	۲۰۹	۲۷۴
درصد (نسبت به حالت مرجع)	٪۷۸	٪۷۶	٪۷۳	٪۷۴	٪۹۷



شکل ۳۹- کانطور کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده نمونه های بررسی شده برای مبدل چهار لوله‌ای در فرآیند دشارژ

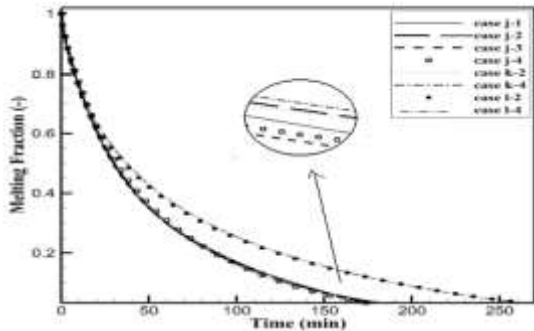
در این حالت نسبت به g-2 با وجود دو لوله در قسمت بالای پوسته و همراه داشتن ناحیه غالب برای پایین آمدن، PCM منجمد در وضعیت خیلی بهتری قرار گرفته است و زمان انجماد به اندازه ۱۲٪ کاهش پیدا می‌کند. در حالت g-1، لوله‌ها در مرکز متمرکز شده‌اند که باعث شده است نسبت به حالت h-1، توزیع حرارت همگون نباشد و در نتیجه زمان انجماد آن ۱۳ درصد بیشتر از حالت h-1 (چینش ۱ با فاصله  $۴r_i$ ) است. نمودار کسر جرمی برای نمونه‌های بررسی شده در شکل ۴۰ آمده است. جدول ۱۷، کاهش زمان انجماد را

### ۳-۱-۲-۳- مبدل چهار لوله‌ای

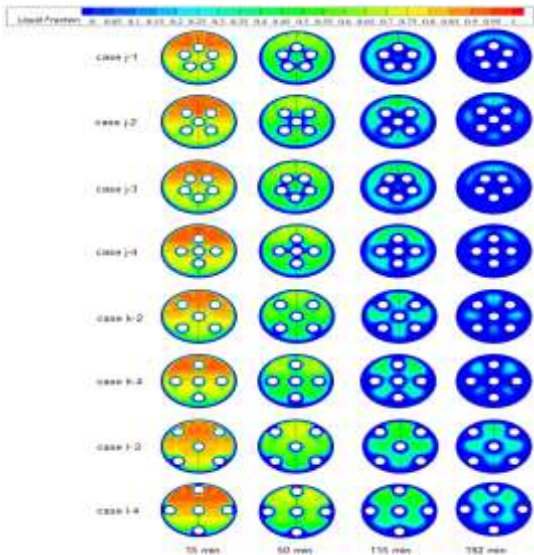
شکل ۳۹ چهار چینش بسیار متفاوت از هم را برای مبدل های چهار لوله‌ای نمایش می‌دهد. ساده‌ترین چینش برای مبدل چهار لوله‌ای، چینش ۱ است که لوله‌ها در چهار ربع دایره تعبیه شده‌اند. چینش ۲، شکل دوران‌یافته چینش ۳ به اندازه ۱۸۰ درجه است. چینش ۳ به دلیل نحوه قرارگیری لوله‌ها، وقتی فاصله بین لوله‌های نزدیک به هم در آغاز  $۳r_i$  در نظر گرفته می‌شود، فاصله دورترین لوله‌ها حدوداً  $۶r_i$  است و به دیواره‌های کناری پوسته نزدیک می‌شوند.

در چینش ۴، نزدیک‌ترین فاصله لوله‌ها  $۳r_i$  و دورترین فاصله آنها  $۵r_i$  است. تفاوت در چیدمان در مبدل چهار لوله‌ای که تفاوت فاصله بین لوله‌ها را به همراه دارد، اختلاف زیادی در زمان انجماد بین حالت‌ها به وجود آورده است. طبق کانتورهای رنگی وقتی فاصله بین آنها  $۳r_i$  است، رفتار انجماد در حالت g-1 و g-4 عملکرد مشابهی دارد (انجماد از نواحی مرکزی پوسته آغاز می‌شود)؛ در صورتی که عملکرد فرآیند انجماد در چینش ۲ و ۳ با همین فاصله، متفاوت است. برای چینش ۱ (حالت g-1)، به دلیل توزیع یکنواخت‌تر لوله‌ها و به دنبال آن سرما، نسبت به چیدمان‌های دیگر، انجماد به صورت همگون‌تری اتفاق می‌افتد.

در حالت g-4 مواد کناره‌های پوسته فاصله زیاد بین لوله های افقی سبب شده، کناره‌های پوسته تحت تاثیر حرارت بیشتری نسبت به چینش‌های دیگر قرار گیرند و تا قبل از دقیقه ۱۳۰ کاملاً منجمد شوند؛ در صورتی که با وجود گذشت زمان مقدار زیادی از ماده تغییر فاز دهنده در بالا و پایین پوسته به دلیل وجود یک لوله در این قسمت‌ها، هنوز منجمد نشده است. در مبدل g-3 نیز، مواد تغییر فاز دهنده در بالا و پایین پوسته، به دلیل فاصله زیاد لوله‌های دور از هم و نزدیک به دیواره پوسته به خوبی تحت تاثیر دیواره‌های حرارتی لوله‌ها قرار می‌گیرند.



شکل ۴۱- نمودار کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده برحسب زمان برای نمونه‌های بررسی شده در مبدل پنج لوله‌ای در فرآیند دشارژ

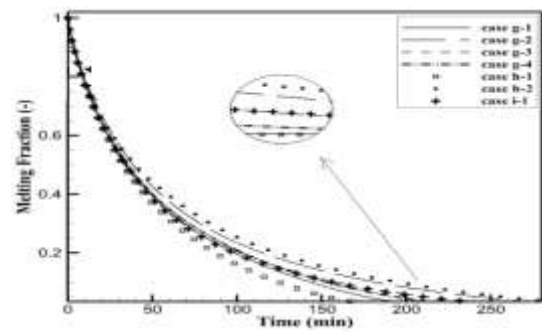


شکل ۴۲- کانطور کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده نمونه‌های بررسی شده برای مبدل پنج لوله‌ای در فرآیند دشارژ

برای مبدل‌های چهار لوله‌ای نسبت به مرجع نشان می‌دهد. تعداد لوله‌ها، هنگامی که از ۳ تا بیشتر می‌شود، به دلیل اینکه نواحی که سبب انجماد می‌گردند، دیواره‌ها هستند (برخلاف مبدل دو لوله‌ای و سه لوله‌ای که PCM منجمد شده در زمان‌های قبلی، دلیل منجمد شدن در برخی نواحی شامل ماده تغییر فاز دهنده مذاب است) تغییر چینش تاثیر زیادی روی زمان می‌گذارد.

### ۳-۲-۱-۴- مبدل پنج لوله‌ای

نمودار کسر جرمی برای نمونه‌های بررسی شده در مبدل حرارتی پنج لوله‌ای در شکل ۴۱ آمده است و جدول ۱۸، کاهش زمان انجماد را برای مبدل‌های پنج لوله‌ای نسبت به مرجع نشان می‌دهد. فرآیند انجماد برای نمونه‌های بررسی شده در مبدل حرارتی پنج لوله‌ای در شکل ۴۲، قابل ملاحظه است.



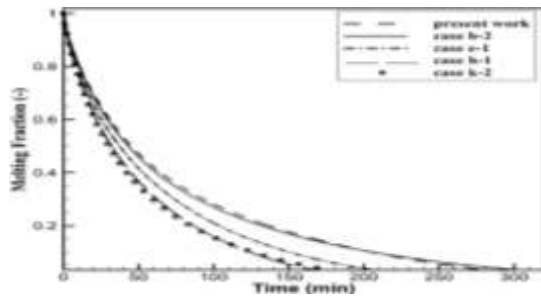
شکل ۴۰- نمودار کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده برحسب زمان برای نمونه‌های بررسی شده در مبدل چهار لوله‌ای در فرآیند دشارژ

جدول ۱۷- زمان انجماد کامل برای چینش‌های مختلف برای مبدل چهار لوله‌ای

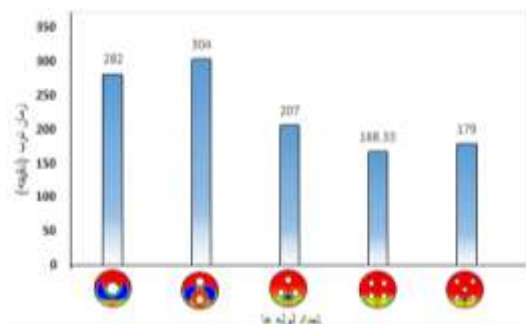
نام مبدل	g-1	g-2	g-3	g-4	h-1	h-2	i-1
فاصله بین لوله‌ها		$3r_i$			$4r_i$		$5r_i$
زمان اتمام انجماد (دقیقه)	۱۹۲/۵	۲۷۵	۲۴۰/۸۳	۲۱۲/۵	۱۶۸/۳۳	۲۹۰	۲۴۲
درصد (نسبت به حالت مرجع)	٪۶۸	٪۹۸	٪۸۵	٪۷۵	٪۶۰	٪۱۰۳	٪۸۶

جدول ۱۸- زمان انجماد کامل برای چینش‌های مختلف برای مبدل پنج لوله‌ای

نام مبدل	j-1	j-2	j-3	j-4	k-2	k-4	l-2	l-4
فاصله بین لوله‌ها		$3r_i$			$4r_i$		$5r_i$	
زمان اتمام انجماد (دقیقه)	۱۷۷/۵	۱۸۰	۱۷۴	۱۷۵	۱۷۹	۱۸۰/۶۶	۲۶۶/۶۶	۲۶۴
درصد (نسبت به حالت مرجع)	٪۶۳	٪۶۴	٪۶۲	٪۶۲	٪۶۳	٪۶۴	٪۹۵	٪۹۴



شکل ۴۴- نمودار کسر جرمی ماده تغییر فاز دهنده برای مبدل‌های منتخب



شکل ۴۵- نمودار میله‌ای اثر افزایش تعداد لوله بر مقدار زمان انجماد

#### ۴- نتیجه‌گیری

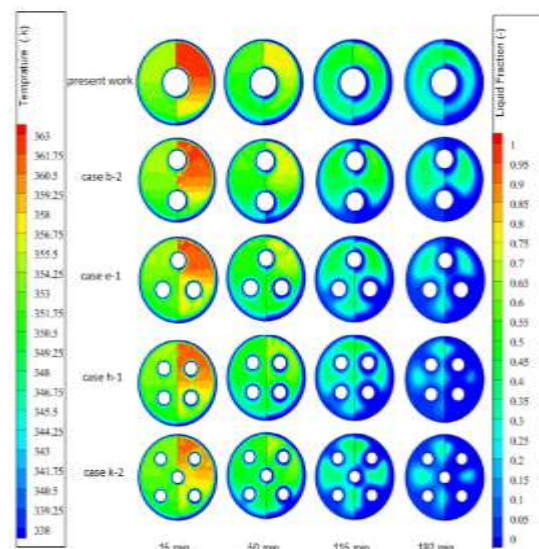
##### ۴-۱- فرآیند شارژ

در ابتدا فرآیند شارژ مکانیزم هدایت، غالب است، اما پس از گذشت زمان، با افزایش لایه‌های مذاب مکانیزم تاثیرگذار، انتقال حرارت جابجایی طبیعی خواهد بود.

در همه حالت‌های بررسی شده برای مبدل دو لوله‌ای، زمان ذوب در چینش‌های عمودی، نسبت به چینش‌های افقی کمتر بود. برای مبدل حرارتی سه لوله‌ای دو چینش در نظر گرفته شد. زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده در همه حالت‌های بررسی شده (مستقل از نوع چینش و تغییر فاصله)، نسبت به مبدل مرجع کاهش می‌یابد. برای مبدل حرارتی چهار لوله‌ای با چهار چینش، زمان ذوب در همه حالت‌ها، نسبت به مبدل مرجع نیز کاهش یافت. برای مبدل حرارتی پنج لوله‌ای زمان ذوب در همه حالت‌ها نسبت به مبدل مرجع، دارای مقادیر کمتری بود؛ یعنی بطور کلی، زمان ذوب برای تمام مبدل‌هایی که بررسی شد (به استثنای مبدل c-1)، فارغ از تعداد لوله‌ها، چینش و فاصله بین لوله‌ای، نسبت به مبدل مرجع کاهش می‌یابد.

##### ۴-۲-۲- مقایسه زمان انجماد مبدل‌های منتخب

در بخش‌های ذکر شده برای هر تعداد لوله یکسان، چیدمان و فاصله بین لوله‌ها در فرآیند شارژ و دشارژ، مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش زمان دشارژ مبدل‌هایی که انرژی حرارتی در آن‌ها در زمان کوتاه‌تری ذخیره می‌شود، با هم مقایسه شده تا علاوه بر چینش، اثر افزایش تعداد لوله نیز، روی زمان انجماد بررسی شود. کانتور کسر ذوب و دمای این مبدل‌ها (با تعداد لوله‌های مختلف) در شکل ۴۳ نشان می‌دهد که با گذشت ۱۹۰ دقیقه، هنوز مقدار قابل توجهی ماده تغییر فاز دهنده منجمد نشده در مبدل مرجع و دو لوله‌ای باقی مانده است. همان‌طور که قبلاً مشاهده شد، زمان ذوب در مبدل دو لوله‌ای منتخب، نسبت به مبدل مرجع ۱۲٪ کاهش یافت، اما شکل ۴۴ نشان می‌دهد، زمان انجماد برای همین مبدل ۸٪ نسبت به مبدل مرجع بیشتر شده است. به استثنای این مورد مطابق جدول ۱۹ با اضافه کردن تعداد لوله بیشتر، زمان دشارژ نسبت به حالت قبل، کاهش می‌یابد که بیشترین میزان این تغییرات حدود ۳۲٪ و ۱۹٪ به ترتیب با افزایش دو به سه لوله و سه به چهار لوله است. با توجه به استثنای مورد گزارش شده، کمترین زمان انجماد مربوط به همان مبدل‌هایی است که کوتاهترین زمان ذوب را نیز داشتند. نمودار میله‌ای نشان داده شده در شکل ۴۵، تغییر زمان را با افزایش تعداد لوله به خوبی نمایش می‌دهد.



شکل ۴۳- کانتور کسر جرمی و دمای ماده تغییر فاز دهنده برای مبدل‌های منتخب در فرآیند دشارژ

جدول ۱۹- زمان انجماد کامل تغییر فاز دهنده برای مبدل‌های منتخب

نام مبدل	g-۱	g-۲	g-۳	g-۴	h-۱	h-۲	i-۱
فاصله بین لوله‌ها	$۳r_i$				$۴r_i$		$۵r_i$
زمان اتمام انجماد (دقیقه)	۱۹۲/۵	۲۷۵	۲۴۰/۸۳	۲۱۲/۵	۱۶۸/۳۳	۲۹۰	۲۴۲
درصد (نسبت به حالت مرجع)	٪۶۸	٪۹۸	٪۸۵	٪۷۵	٪۶۰	٪۱۰۳	٪۸۶

به استثنای مبدل دو لوله‌ای منتخب، کمترین زمان انجماد مربوط به همان مبدل‌هایی است که کوتاهترین زمان ذوب را نیز داشتند و فاصله بین لوله‌ای در آن‌ها مقدار استاندارد  $۴r_i$  بود. بیشترین میزان تغییرات زمان هم در فرآید شارژ و هم دشارژ، با افزایش تعداد لوله از دو به سه لوله اتفاق افتاد.

#### ۵- مراجع

- [1] Regin AF, Solanki S, Saini J (2006) Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations. *Renewable Energy* 31(13): 2025-2041.
- [2] Lamberg P, Lehtiniemi R, Henell AM (2004) Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *Int J Thermal Sci* 43(3): 277-287.
- [3] Stritih U (2004) An experimental study of enhanced heat transfer in rectangular PCM thermal storage. *Int J Heat Mass Trans* 47(3):2841-2847.
- [4] Zhang Y, Chen Z, Wang Q, Wu Q (1993) Melting in an enclosure with discrete heating at a constant rate. *Exp Therm Fluid Sci* 6(93): 196-201.
- [5] Gracia A, Cabeza L.F (2015) Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy Build* 103: 414-419.
- [6] Moreno P, Solé C, Castell A, Cabeza L.F (2014) The use of phase change materials in domestic heat pump and air-conditioning systems for short term storage. *Renewable Sustainable Energy Rev* 39: 1-13.
- [7] Aditya L, Mahlia T.M.I, Rismanchi B, Hasan M.H, Metselaar H.S.C, Muraza O, Aditya H.B (2017) A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 73: 1352-1365.
- [8] Akeiber H, Nejat P, Majid M.Z.A, Wahid M.A, Jomehzadeh F, Famileh I.Z, Calautit J.K, Hughes B.R, Zaki S.A, (2016) A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable Sustainable Energy Rev* 60: 1470-1497.

وقتی افزایش لوله‌ها به پنج لوله می‌رسد، دیگر نوع چینش با فاصله یکسان، تاثیری روی زمان ذوب ندارد، گرچه فاصله بین لوله‌ای هنوز تاثیر گذار است. با مقایسه مبدل‌هایی که در زمان کوتاه‌تری ذوب می‌شوند (با هر تعداد لوله)، مشاهده می‌شود که فاصله بین لوله‌ای در تمامی حالت یک مقدار استاندارد را برابر با  $۴r_i$  است و کاهش یا افزایش این فاصله، افزایش زمان ذوب را نسبت به فاصله استاندارد، همراه داشت. همچنین افزایش تعداد لوله بالاتر از ۴ لوله، دیگر روی زمان ذوب تاثیر گذار نبود.

#### ۴-۲- فرآیند دشارژ

در فرآیند دشارژ در ابتدا تنها انتقال حرارت جابجایی طبیعی در شروع فرآیند تاثیر گذار است و با گذشت زمان و افزایش ماده تغییر فاز دهنده جامد، مکانیزم غالب هدایت خواهد بود. بیشترین کاهش زمان انجماد در مبدل دو لوله‌ای نسبت به مبدل مرجع در فاصله  $۳r_i$ ، در حالی که در فواصل  $۴r_i$  و  $۵r_i$  زمان انجماد بصورت قابل توجهی نسبت به مبدل مرجع (به ترتیب ٪۱۰ و ٪۴۰) افزایش یافت. در مبدل سه لوله‌ای در فواصل  $۳r_i$  و  $۴r_i$ ، چینش‌ها و تغییر فاصله‌ها اثر یکسانی بر زمان انجماد دارند. زمان انجماد بطور چشمگیر نسبت به مبدلی با همان چینش با فاصله  $۴r_i$  افزایش پیدا می‌کند و به زمان انجماد در حالت مرجع نزدیک می‌شود. تفاوت چینش در مبدل چهار لوله‌ای که تفاوت فاصله بین لوله‌ها را نیز همراه خود دارد، تفاوت زیادی در زمان انجماد بین چینش‌ها به وجود آورده است. برای مبدل پنج لوله‌ای در فواصل  $۳r_i$  و  $۴r_i$ ، چینش و تغییر فاصله، تاثیری بر زمان انجماد ندارد و کاهش زمان برای آن‌ها نسبت به مبدل مرجع حدود ٪۳۰ است. با افزایش فاصله به  $۵r_i$ ، زمان انجماد نسبت به حالت‌های قبل، بطور قابل توجهی (٪۲۵) افزایش یافته و مقدار آن برابر با زمان انجماد در مبدل مرجع است.



- [14] Piradl M., Piradl S (2013) Numerical Investigation of the Thermal Performance of Floor Heating System with PCM. *Iranian Journal of Energy*. 16(4): 105-112 (In Persian).
- [15] Piradl M., Piradl S (2014) Numerical Modeling of the Thermal Convection of the Viscoud Fluid Flow in the Square Cavity. *IJMPERD* 4(3): 13-18.
- [16] Najafi Khaboshan H, Nazif H.R (2016) Numerical analysis on convective turbulent air in an alternating elliptical tube. *Modares Mechanical Eng* 16(13): 5-8 (In Persian).
- [17] Al-Abidi AA, Mat S, Sopian K, Sulaiman M, Mohammad AT (2013) Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers. *Appl Therm Engin* 53(1): 147-156.
- [18] Al-Abidi AA, Mat S, Sopian K, Sulaiman M, Mohammad AT (2013) Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins. *Int J Heat Mass Trans* 61(1): 684-695.
- [9] Kouhestani M, Ahmadi R (2016) Computational Simulation of Free Cooling in a Building Using Phase Change Material. *Modares Mechanic Engin* 16(13): 135-140 (In Persian).
- [10] Olapour S, Rostampour K, Hamzehi M (2016) The use of phase-change material in the traditional wind towers mechanism for temperature reduction and energy efficiency, 3<sup>rd</sup> Int Conf. on Sci and Engin. Istanbul-Turkey (In Persian).
- [11] Sami S, Etesami N, (2016) Preparation of Microencapsulated Paraffin Wax by in situ Polymerization, 2<sup>nd</sup> Int. Conf. New research achivements in chemistry and Chemical Eng. Tehran-Iran (In Persian).
- [12] Bahari S, shokouhmand H, Nikan M (2017) Numerical Investigation of Pipe Array in a Shell and Tube Heat Exchanger Filled with PCM as a Porous Media. *Appl Mechanics Research* 8(1): 19-26 (In Persian).
- [13] Hosseini M.J, Rahimi M, Bahrampour R (2015) Thermal analysis of PCM containing heat exchanger enhanced with normal annular fines. *Mechanical Scinces* 6(2): 221-234.