



## اثر افزایش تعداد و چیدمان لوله‌های سیال گرم بر رفتار ذوب ماده تغییر فاز دهنده در مبدل حرارتی سه لوله‌ای

مهدی عیسی پور درزی<sup>۱</sup>، سید محمد جواد حسینی کهساری<sup>۲\*</sup>، علی اکبر رنجبر<sup>۳</sup> و یونس پهم لی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و فنون بابل، بابل

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گلستان، گرگان

<sup>۳</sup> استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

<sup>۴</sup> دانشجوی کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۹/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۶

### چکیده

در این مقاله به بررسی عددی رفتار ذوب ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای به صورت سه بعدی پرداخته شده است. آب به عنوان سیال گرم در لوله‌های داخلی و خارجی جریان داشته، فضای میانی لوله‌ها با RT35 به عنوان ماده تغییر فاز دهنده پر شده است. هدف اصلی در این مطالعه، بررسی اثر افزایش تعداد لوله‌های داخلی سیال گرم و چیدمان آن‌ها روی فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده است. همچنین مقایسه‌ای بین مبدل حرارتی سه لوله‌ای و دو لوله‌ای، صورت پذیرفته است. به منظور مدل‌سازی فرآیند تغییر فاز، از روش آنتالپی متخلخل استفاده شده است. نتایج حاکی از غالب بودن مکانیزم هدایت در ابتدای فرآیند ذوب بوده، با گذشت زمان جابه‌جایی طبیعی مکانیزم اصلی انتقال حرارت می‌گردد. با افزایش تعداد لوله‌های داخلی سیال گرم به علت افزایش سطح انتقال حرارت داخلی، شدت مکانیزم جابه‌جایی طبیعی درون پوسته بیشتر شده که باعث کاهش قابل توجهی در زمان ذوب می‌شود. افزایش تعداد لوله داخلی در مبدل سه لوله‌ای از یک به چهار عدد، باعث کاهش ۲۹ درصدی زمان ذوب می‌شود. چیدمان لوله‌های داخلی در حالت پخش، نرخ ذوب را افزایش می‌دهد. در مبدل حرارتی سه لوله‌ای در مقایسه با دو لوله‌ای در شرایط مرزی یکسان، زمان ذوب ۸۰ درصد کمتر است.

**کلمات کلیدی:** مبدل حرارتی سه لوله‌ای؛ ماده تغییر فاز دهنده؛ ذوب؛ چیدمان؛ جابه‌جایی طبیعی.

### Effect of Increasing Number and Arrangement of Hot Fluid Tube on Melting Behavior of Phase Change Material in a Triplex Tube Heat Exchanger

M. Esapour Darzi<sup>1</sup>, S. M. J. Hosseini Kahsari<sup>2\*</sup>, A. Ranjbar<sup>3</sup>, Y. Pahamli<sup>4</sup>

<sup>1</sup>M.s. Student, Mech. Eng., Babol Science and technology University, Babol, Iran.

<sup>2</sup>Assis. Prof., Mech. Eng., Golestan Univ., Gorgan, Iran.

<sup>3</sup>Prof., Mech. Eng., Babol University of Technology, Babol, Iran.

<sup>4</sup>M.s. Student, Mech. Eng., Babol University of Technology, Babol, Iran.

### Abstract

In this paper three dimensional numerical study of melting of phase change material (PCM) in a triplex tube heat exchanger is studied. Water is used as heat transfer fluid (HTF) which flows through the inner and outer tubes while the shell side is filled with RT35 as the PCM. The main purpose of this study is to investigate the effect of increasing number of inner hot fluid tube and its arrangement on melting behavior of PCM. Also a comparison between triplex and double tube heat exchanger is done. Enthalpy porosity method is used for modeling the phase change process. The result shows that at the initial steps of the melting process, the major mechanism of heat transfer is conduction while afterward natural convection will be main heat transfer mechanism. Increasing number of inner tubes increases heat transfer surface thus the natural convection intensifies in shell side which considerably diminishes the melting time. Increasing number of inner tube in a triplex tube heat exchanger from 1 to 4 leads to 29 percent decrease in melting time. Arrangement of inner tubes in distributed case intensifies the melting. In a triplex tube heat exchanger in comparison with double pipe melting time is 80 percent less.

**Keywords:** Triplex Tube Heat Exchanger; Phase Change Material; Melting; Arrangement; Natural Convection.

## ۱- مقدمه

با افزایش روز افزون نیاز به انرژی و نیز محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و آلاینده‌گی آن‌ها، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و نیز بکارگیری تکنیک‌هایی به منظور ذخیره-سازی انرژی اهمیت فراوانی پیدا کرده است. روش‌های مختلفی به منظور ذخیره‌سازی انرژی موجود است که از جمله آن‌ها می‌توان به ذخیره‌سازی انرژی به صورت‌های مکانیکی، الکتریکی و گرمایی اشاره کرد. انرژی گرمایی را می‌توان به دو صورت گرمای محسوس و گرمای نهان ذخیره کرد. استفاده از گرمای نهان در فرآیند تغییر فاز، یکی از مهم‌ترین تکنیک‌ها در ذخیره‌سازی انرژی و یا کنترل فرآیندهای حرارتی است. ماده به کار رفته در این تکنیک، ماده تغییر فاز دهنده نام دارد. نحوه عملکرد این مواد به گونه‌ای است که با افزایش دما، دچار تغییر فاز شده، انرژی حرارتی را در خود ذخیره می‌کنند و با کاهش دما، این انرژی را آزاد می‌سازند. عمده ویژگی مواد تغییر فاز دهنده چگالی، ذخیره بالای انرژی و انجام فرآیند تغییر فاز در دمای ثابت است. محققان زیادی مطالعاتی را در خصوص مواد تغییر فاز دهنده ارائه داده‌اند. مدرانو و همکاران [۱]، در یک کار آزمایشگاهی به بررسی خصوصیات انتقال حرارتی پنج مبدل حرارتی به عنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی در طول فرآیندهای ذوب و انجماد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ماده تغییر فاز دهنده جاسازی شده در ماتریس گرافیتی در مبدل حرارتی دو لوله‌ای، بالاترین مقدار عملکرد را دارد. آدین و قارنیا [۲]، به مطالعه اثر مواد تغییر فاز دهنده چندگانه با دماهای ذوب متفاوت در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دبی سیال ورودی برای مواد تغییر فاز دهنده چندگانه در دماهای پایین‌تر مؤثر است. ربیع‌نجاج و همکاران [۳]، در یک کار عددی دو بعدی به بررسی فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در یک فضای حلقوی با خروج از مرکزیت لوله داخلی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این مطلب است که در حالت لوله هم مرکز به علت اثرات زیاد هدایت حرارتی، نرخ ذوب نسبت به افزایش خروج از مرکزیت کمتر است. ساری و همکاران [۴]، در یک کار آزمایشگاهی به بررسی رفتار ذوب و انجماد در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که ضریب انتقال حرارت متوسط و نرخ انتقال حرارت در حین ذوب به

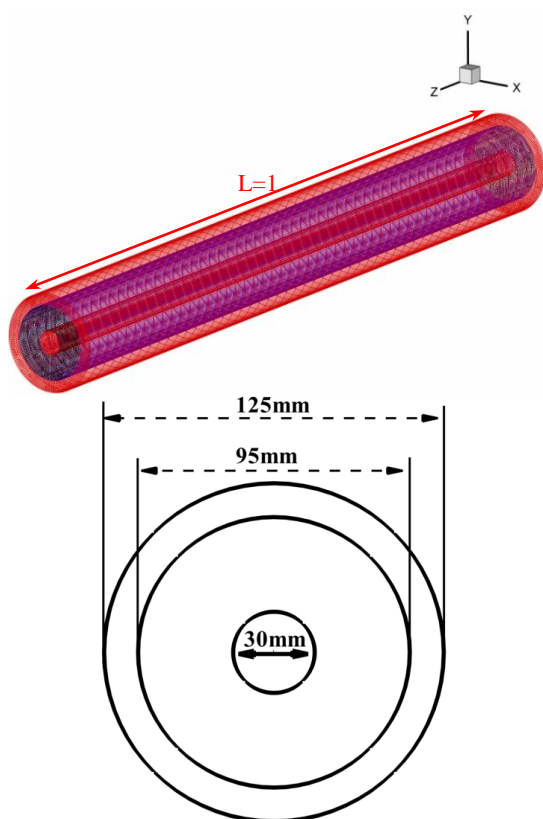
علت اثر جابه‌جایی طبیعی، بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته است. در یک کار تجربی مانیش و همکاران [۵]، ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده را در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای با استفاده از سه فین طولی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این است، استفاده از فین در مقایسه با حالت بدون فین، باعث کاهش زمان ذوب می‌شود. هم-چنین با قرار دادن سه فین به صورت طولی، زمان انجماد ۴۳/۶ درصد کاهش می‌یابد. آگنیم و همکاران [۶]، در یک کار آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله‌ای و چند لوله‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حالت چهار لوله‌ای، انتقال حرارت بهتری نسبت به حالات دیگر در فرآیند ذوب صورت می‌پذیرد. رحیمی و همکاران [۷]، در یک کار آزمایشگاهی به مقایسه ذوب ماده تغییر فاز دهنده در مبدل حرارتی در حالت فین و لوله و بدون فین پرداختند. آن‌ها دریافتند که افزایش دمای سیال ورودی برای حالت بدون فین، زمان ذوب را به مقدار بیشتری نسبت به حالت فین‌دار کاهش می‌دهد. مت و همکاران [۸]، در یک شبیه‌سازی عددی به مطالعه فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در مبدل حرارتی سه لوله‌ای با فین‌های داخلی و خارجی پرداختند. آن‌ها در این کار به بررسی مبدل‌های (بدون پره، با پره داخلی، با پره خارجی و با پره داخلی و خارجی) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که حالت‌های مختلف قرارگیری فین، تأثیر چندانی در زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده ندارد و مشابه می‌باشند. هم‌چنین آن‌ها دریافتند که استفاده از فین، باعث کاهش زمان ذوب تا ۳۴/۴ درصد نسبت به حالت بدون فین می‌شود. عبدالجلیل و همکاران [۹ و ۱۰]، به بررسی ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده در مبدل حرارتی سه لوله‌ای به کمک تغییر پارامترهای هندسی (فین‌های داخلی و خارجی) و جریانی (دما و دبی سیال ورودی) پرداختند. حسینی و همکاران [۱۱]، در یک کار آزمایشگاهی و عددی به بررسی تأثیر فین‌های طولی در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای در طول فرآیند ذوب پرداختند که در آن تأثیر پارامترهای دمای سیال ورودی و ارتفاع فین‌ها روی عملکرد مبدل حرارتی نیز، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این است که وجود فین، باعث کاهش زمان ذوب و نفوذ حرارتی بیشتر می‌شود. هم‌چنین آن‌ها مشاهده کردند که قدرت ذخیره

آب است. آن‌ها به بررسی تغییرات پارامترهای ذوب با تغییر دبی و دمای سیال ورودی پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که افزایش درجه حرارت، تأثیر بیشتری نسبت به افزایش دبی در کاهش زمان ذوب دارد. در مطالعه‌ای دیگری حسینی و همکاران [۱۶]، به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر دمای سیال ورودی روی زمان ذوب مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که جبهه ذوب در اطراف لوله حامل سیال تشکیل شده، با نرخ رشد متفاوت به سمت بیرون و به طرف پوسته گسترش می‌یابد. هم‌چنین افزایش دمای سیال ورودی از ۷۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد، باعث کاهش ۳۷ درصدی زمان ذوب می‌شود. اسماعیل و همکاران [۱۷]، در یک کار عددی به بررسی فرآیند انجماد ماده تغییر فاز دهنده در یک سیلندر افقی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش دمای سیال ورودی، ماده تغییر فاز دهنده بیشتری منجمد شده و زمان مورد نیاز برای انجماد کامل، کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. هم‌چنین آن‌ها نشان دادند، هر چند افزایش دبی سیال ورودی باعث کاهش در زمان انجماد می‌گردد، اما تأثیر آن به اندازه دمای سیال ورودی نمی‌باشد. حسینی و همکاران [۱۸]، به بررسی عددی فرآیند ذوب پارافین (RT50) در حضور نانو ذرات مس در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش غلظت نانو ذرات مس تا ۵ درصد، باعث کاهش ۱۴/۵ درصدی زمان ذوب و افزایش ۱۴۶ درصدی نفوذ طولی جبهه ذوب گردیده است. پهم‌لی و همکاران [۱۹]، در یک کار عددی به بررسی پارامترهای هندسی و جریانی در فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش خروج از مرکزیت به عنوان یک پارامتر هندسی ناحیه غالب مربوط به ذوب و انجماد در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای پرداختند. عیسی‌پور و همکاران [۲۰]، به بررسی عددی مبدل‌های حرارتی چند لوله‌ای پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که در مبدل با چهار لوله داخلی نسبت به تک لوله، زمان ذوب کمتر است. رنجبر و همکاران [۲۱] در یک کار عددی اثرات اعوجاج سطح و درصد حجمی نانو ذره مس را روی فرآیند انجماد نانوسیال آب و مس در یک حفره مستطیلی قائم، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافته‌اند که افزایش غلظت نانوذرات، منجر به کاهش زمان انجماد می‌شود. مطالعه آن‌ها

حرارتی مبدل، تابعی از ارتفاع فین در زمان‌های اولیه ذوب است؛ هم‌چنین حسینی و همکاران [۱۲] در یک کار عددی و آزمایشگاهی دیگر، به بررسی ذوب ماده تغییر فاز دهنده با تغییر ارتفاع فین و عدد استفان در مبدل حرارتی دو لوله‌ای پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش طول فین و افزایش عدد استفان، زمان ذوب را کاهش می‌دهد. آن‌ها با بررسی نتایج دریافته‌اند که اثر افزایش طول فین، تأثیر بیشتری در کاهش زمان انجماد نسبت به کاهش زمان ذوب دارد؛ هم‌چنین در یک کار آزمایشگاهی و عددی دیگر حسینی و همکاران [۱۳]، به بررسی خصوصیات گرمایی و حرارتی پارافین (RT50<sup>۱</sup>) در طول فرآیندهای ذوب و انجماد در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای پرداختند. نتایج عددی آن‌ها نشان داد که جبهه ذوب در زمان‌ها و مکان‌های مختلف، نزدیک به لوله سیال گرم ایجاد شده، به سمت بیرون گسترش پیدا می‌کند. هم‌چنین نتایج آزمایشگاهی آن‌ها حاکی از آن است که افزایش دمای سیال ورودی از ۷۰ به ۷۵ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد، بازده تئوری را در فرآیندهای شارژ و دشارژ به ترتیب از ۸۱/۴ به ۸۸/۴ درصد و از ۷۹/۷ به ۸۱/۴ درصد افزایش می‌دهد. در کار آزمایشگاهی رحیمی و همکاران [۱۴]، فرآیند ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی فین و لوله را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیرات پارامترهای جریان همانند، دبی و دمای سیال ورودی و هم‌چنین پارامترهای هندسی همانند، گام فین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که صرف‌نظر از نوع رژیم جریان، استفاده از فین موجب افزایش دمای میانگین ماده تغییر فاز دهنده گردیده، این در حالی است که کاهش گام فین، تأثیر چندانی بر این پارامتر برای هر دو رژیم جریان (آرام و مغشوش) نداشته است. آن‌ها هم‌چنین مشاهده کردند که افزایش دمای سیال ورودی از ۵۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با افزایش آن از ۶۰ به ۷۰ درجه سانتی‌گراد، باعث کاهش بیشتری در زمان ذوب گردیده است. عبدالجلیل و همکاران [۱۵]، به صورت آزمایشگاهی ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده را یک در مبدل حرارتی سه لوله‌ای با پره مورد مطالعه قرار دادند. ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده، پارافین (RT82) و سیال انتقال دهنده، حرارت

<sup>۱</sup> Rubiterm 50

مبدل حرارتی سه لوله‌ای است. فاصله بین لوله‌ها به گونه‌ای است که در هر آرایش به اندازه شعاع لوله داخلی مورد نظر از لوله میانی فاصله گرفته و فاصله باقیمانده نصف گردیده و این مقدار، فاصله شعاعی از مرکز مبدل را مشخص می‌کند. دبی و دمای سیال گرم ورودی برای حالت‌های مختلف به ترتیب برابر،  $0.24$  کیلوگرم بر ثانیه و  $50$  درجه سانتی‌گراد بوده، عدد رینولدز مربوطه نیز برابر  $951/34$  است.



شکل ۱- شماتیک مدل هندسی

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی RT35 [۱۴]

مقدار	خاصیت
۳۰۲	دمای ابتدایی محدوده ذوب (K)
۳۰۹	دمای انتهایی محدوده ذوب (K)
۸۱۵	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
۲۰۰۰	گرمای ویژه ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
۰/۲	ضریب هدایت حرارتی ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
۱۷۰۰۰۰	گرمای نهان ( $\text{Jkg}^{-1}$ )
۰/۰۰۰۶	ضریب انبساط حرارتی ( $\text{K}^{-1}$ )

هم‌چنین نشان داد که موج صفحه یک فاکتور کنترل‌کننده برای زمان انجماد بوده و در تمام اعداد گراشف، افزایش اعوجاج صفحه سبب افزایش زمان انجماد خواهد شد. با توجه به مطالعات پیشین صورت گرفته در زمینه مبدل‌های حرارتی با بکارگیری ماده تغییر فاز دهنده، بررسی هم‌زمان به کارگیری مبدل حرارتی سه لوله‌ای و چند لوله‌ای به طور هم‌زمان صورت نپذیرفته است؛ بنابراین با تلفیق این دو سیستم، به مبدل حرارتی جدیدی به منظور ارتقاء کارایی سیستم دست یافته شده است. به منظور بررسی اثر افزایش سطح انتقال حرارت، تعداد لوله‌های سیال گرم در مبدل حرارتی سه لوله‌ای از یک به دو، سه و چهار عدد با ثابت بودن مقدار ماده تغییر فاز دهنده و دبی سیال گرم، افزایش داده شده است؛ هم‌چنین اثر چیدمان لوله‌های داخلی و مقایسه با مبدل حرارتی دو لوله‌ای با جرم ماده تغییر فاز دهنده یکسان نیز، بررسی گردیده است. در انتهای کار نیز، تأثیر دما و دبی سیال ورودی روی زمان ذوب، مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدل فیزیکی

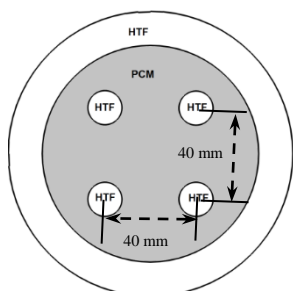
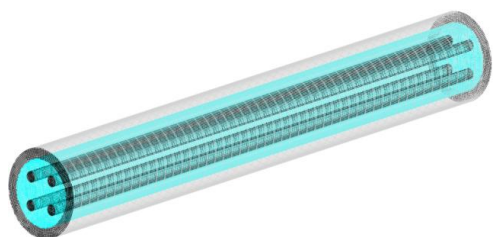
### ۲-۱- مدل فیزیکی

هندسه مورد بررسی در این مقاله، مبدل حرارتی سه لوله‌ای (حالت پایه) به طول یک متر و به قطرهای داخلی  $30$  میلی‌متر، میلی‌متر، میانی  $95$  میلی‌متر و بیرونی  $125$  میلی‌متر است که در شکل ۱ نشان داده شده است. سیال انتقال دهنده حرارت، آب بوده و در تمامی حالات جرم ماده تغییر فاز دهنده، ثابت در نظر گرفته شده است. RT35، به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در فضای میانی بین لوله‌های سیال گرم واقع شده، خواص ترموفیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده است. ضخامت لوله‌ها  $2$  میلی‌متر است. دمای اولیه کل مجموعه،  $25$  درجه سانتی‌گراد بوده که پایین‌تر از نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده قرار گرفته است.

به منظور بررسی اثر افزایش تعداد لوله‌های داخلی سیال گرم، حالت‌های مختلف مبدل حرارتی سه لوله‌ای با تعداد لوله‌های داخلی سیال گرم  $2$  (حالت B)،  $3$  (حالت C) و  $4$  (حالت D) بررسی گردیده که در شکل ۲، حالت‌های مختلف نشان داده شده است. جدول ۲، نشان‌دهنده قطر لوله‌های داخلی سیال گرم و فاصله بین لوله‌ها برای حالت‌های مختلف

جدول ۲- قطر لوله داخلی برای حالت‌های مختلف  
مبدل حرارتی سه لوله‌ای

حالت	قطر (mm)
حالت پایه	۳۰
حالت B	۲۱/۲
حالت C	۱۷/۴
حالت D	۱۵



حالت D

شکل ۲- حالت‌های مختلف مبدل حرارتی سه لوله‌ای

### ۲-۲- معادلات حاکم

به منظور ساده‌سازی معادلات فیزیکی و ریاضی فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- تلفات ویسکوزیته در سیال انتقال دهنده حرارت ناچیز در نظر گرفته شده است؛ همچنین جریان سیال به صورت سه بعدی، آرام و غیرقابل تراکم است.

- تلفات حرارتی در پوسته بیرونی ناچیز است (پوسته بیرونی عایق است).

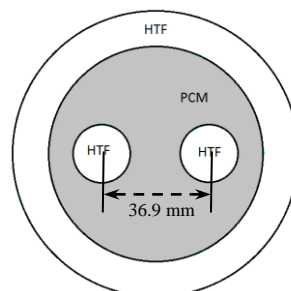
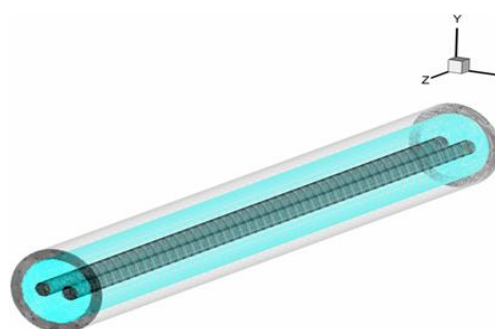
- از مقاومت حرارتی پوسته داخلی و تغییرات حجمی ناشی از تغییر فاز صرف‌نظر می‌شود.

- انتقال حرارت در ماده تغییر فاز دهنده به کمک مکانیزم‌های هدایت و جابه‌جایی است.

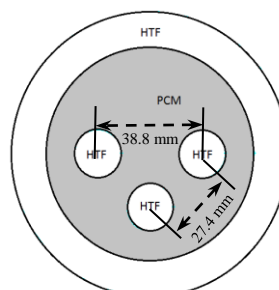
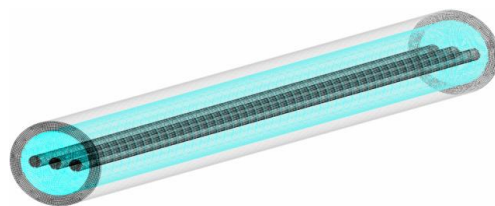
- خواص ترموفیزیکی سیال انتقال دهنده حرارت و ماده تغییر فاز دهنده، ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور مدل‌سازی فرآیند تغییر فاز از روش آنتالپی متخلخل استفاده شده است. در این روش، کسر مایع در هر سلول بر پایه موازنه آنتالپی در هر تکرار محاسبه می‌شود. ناحیه خمیری، ناحیه‌ای است که در آن متخلخل با ذوب ماده تغییر فاز دهنده از ۰ تا ۱ افزایش پیدا می‌کند هنگامی که ناحیه‌ای به طور کامل منجمد گردد، متخلخل صفر گشته و سرعت جریان در این ناحیه تا صفر کاهش پیدا می‌کند.

معادلات بی‌بعد به صورت روابط (۱-۳) می‌باشند:

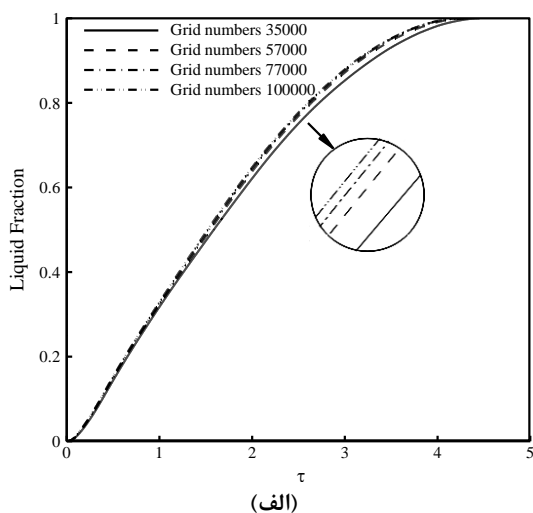


حالت B

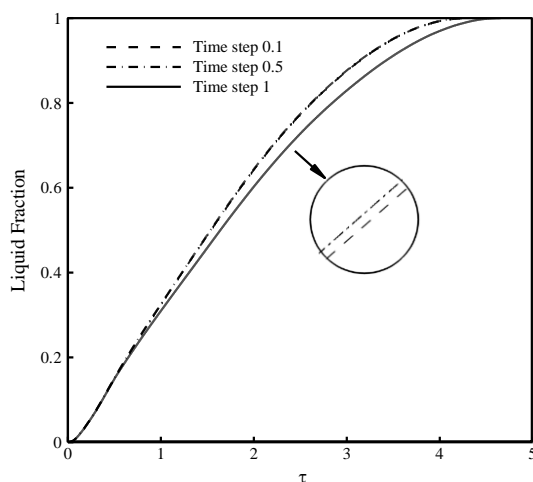


حالت C

برای کسر حجمی ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای مقایسه شده است. ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده در کار مت و همکاران، RT82 با گرمای نهان ۱۷۶۰۰۰ ژول بر کیلوگرم بوده و دبی و دمای سیال ورودی برابر ۸/۳ لیتر بر دقیقه و ۹۰ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۶، نشان‌دهنده مقایسه کسر مایع ماده تغییر فاز دهنده بر حسب زمان بین دو کار است. هم‌چنین شکل ۷، نشان‌دهنده مقایسه خطوط دما ثابت و خطوط جریان بین دو کار حاضر است. اگرچه کانتورهای دما و خطوط جریان در نگاه کلی بسیار نزدیک هستند، اما اختلافاتی جزئی نیز مشاهده می‌شود. به



(الف)



(ب)

شکل ۳- الف) استقلال از شبکه و ب) استقلال از گام زمانی

$$\nabla \cdot \vec{V}^* = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}^*}{\partial \tau} + \vec{V}^* \cdot \nabla \vec{V}^* = -\nabla P^* + Pr \nabla^2 \vec{V}^* - Pr Ra \beta T^* + \vec{S}^* \quad (2)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial \tau} + \vec{V}^* \cdot \nabla T^* = \nabla^2 T^* - \frac{1}{Ste} \frac{\partial \lambda}{\partial \tau} \quad (3)$$

$\vec{S}^*$  ترم چشمه است که به علت اثرات تغییر فاز در انتقال حرارت جابه‌جایی به رابطه مومنوم اضافه می‌شود که در رابطه (۴) آورده شده است.

$$\vec{S}^* = \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} A_{mush} \vec{V}^* \quad (4)$$

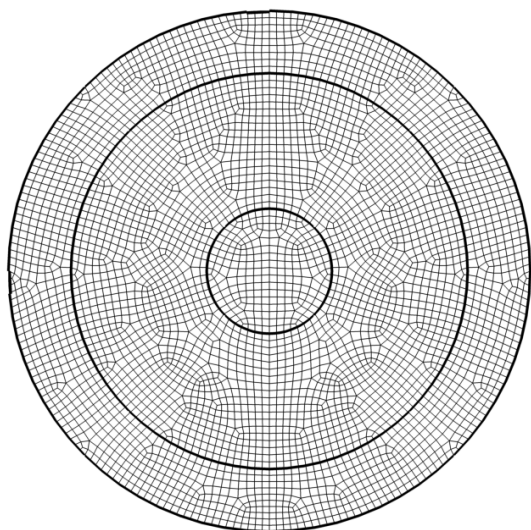
$A_{mush}$  ثابت ناحیه خمیری است. ثابت ناحیه خمیری از  $10^4$  تا  $10^7$  تغییر می‌کند. ثابت ناحیه خمیری، دامنه میرایی را مشخص می‌کند؛ مقادیر بزرگتر این ثابت، بیانگر شیب سریع‌تر میرایی سرعت بوده، مقادیر خیلی بزرگ آن می‌تواند باعث ایجاد نوسان در حل شود.  $A_{mush}$  انتخاب شده در این کار برابر  $10^6$  است.

### ۳-۲- روش محاسباتی

شبیه‌سازی عددی به کمک نرم افزار فلونت انجام شده است. مدل آرام برای ویسکوزیته و الگوریتم پیزو برای حل معادلات حاکم انتخاب شده است. جهت بررسی تأثیر تعداد مش و گام زمانی بر حل عددی، سه شبکه مختلف با ۳۵۰۰۰ و ۵۷۰۰۰ و ۷۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ سلول، مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت تعداد مش ۷۷۰۰۰ به عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. هم‌چنین گام زمانی برای شبیه‌سازی، ۰/۵ ثانیه انتخاب شده است. نتایج مربوط به استقلال از شبکه و گام زمانی در شکل ۳ ارائه گردیده است. شکل ۴ نیز، نشان‌دهنده عدم وابستگی حل به شبکه عددی مربوط به خطوط جریان و کانتور کسر مایع در مقطع میانی مبدل در  $\tau=1.6314$  است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنوم،  $10^{-5}$  و معادله انرژی،  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. هم‌چنین شکل ۵ نشان‌دهنده نمایی از سطح مقطع مبدل حرارتی به همراه شبکه‌بندی مربوطه است.

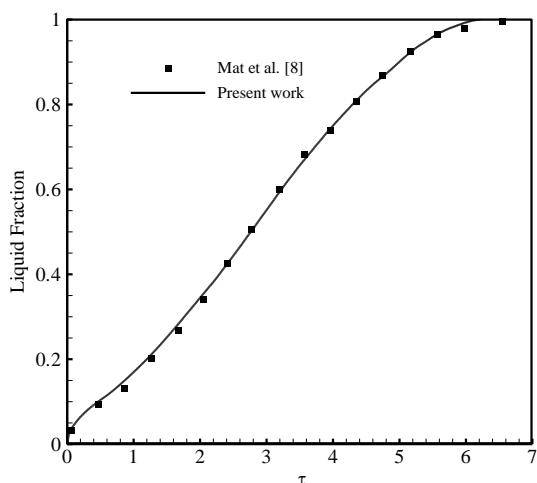
### ۴-۲- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی مطالعه حاضر، بررسی‌های ابتدایی با داده‌های عددی مت و همکاران [۸]

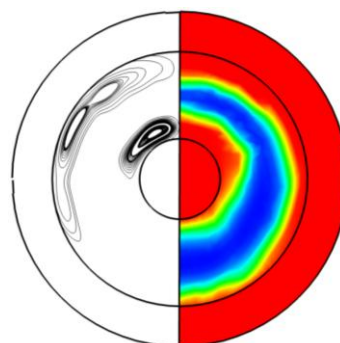


شکل ۵- نمونه ای از شبکه‌بندی بکاررفته

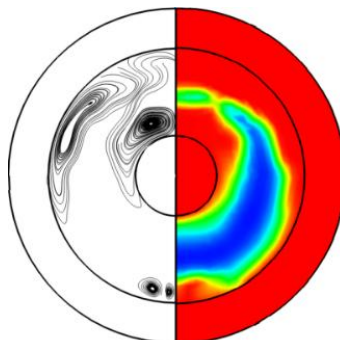
منظور همگرایی بهتر کار حاضر با توجه با طولانی بودن زمان شبیه‌سازی‌ها، الگوریتم تصحیح فشار و هم‌چنین ضرایب تصحیح متغیرهای اصلی با مقادیر مربوطه در مقاله مت و همکاران [۸] متفاوت است. بنابراین علت این اختلافات، تفاوت در انتخاب الگوریتم تصحیح فشار و ضرایب تصحیح کننده است. این موضوع نشان می‌دهد که علی‌رغم اختلافات اندک کانتورهای دما و خطوط جریان، کلیت حل صحیح است.



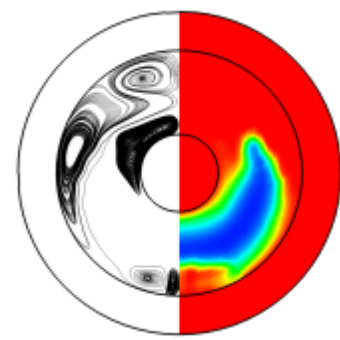
شکل ۶- مقایسه کسر مایع ماده تغییر فاز دهنده بین مطالعه حاضر و مت و همکاران [۸]



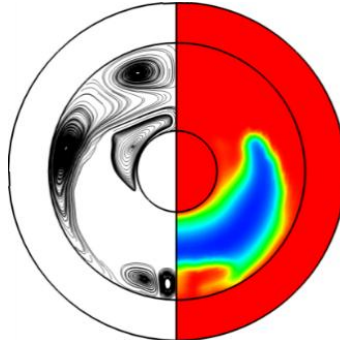
N-cell=35000



N-cell=57000



N-cell=77000



N-cell=100000

شکل ۴- خطوط جریان و کانتور کسر مایع مربوط به عدم وابستگی حل به شبکه عددی در مقطع میانی مبدل

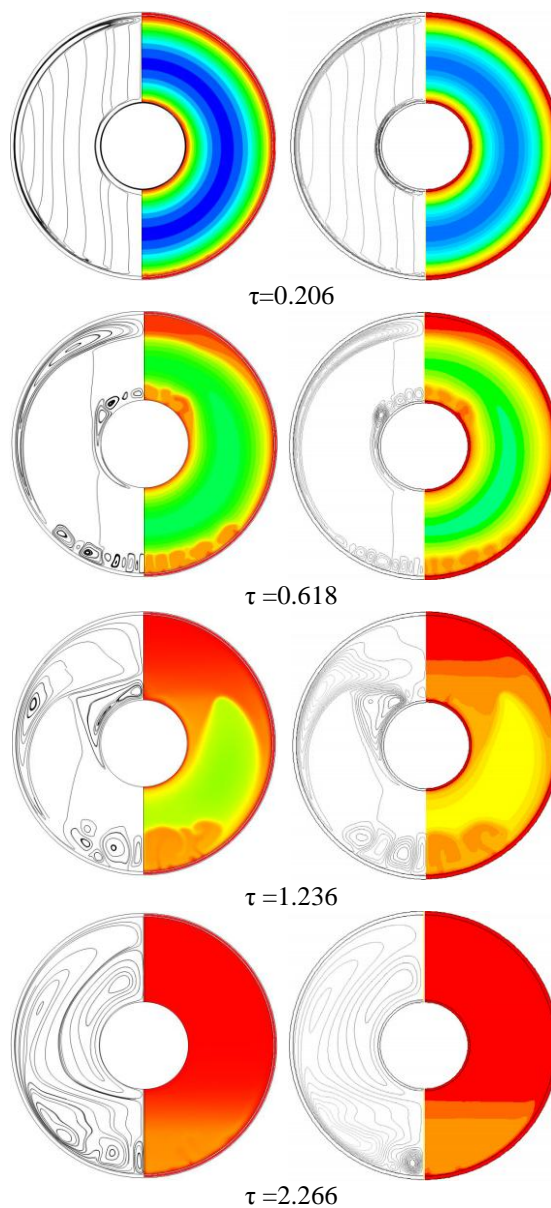
حرارتی دو لوله‌ای مشابه صورت پذیرفته است. در ادامه تأثیر افزایش دما و دبی سیال ورودی روی زمان ذوب، مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۱- مبدل حرارتی سه لوله‌ای

کانتورهای لحظه‌ای کسر مایع و خطوط جریان در زمان‌های مختلف برای مبدل حرارتی سه لوله‌ای، در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در ابتدای فرآیند، گردابه‌ها منطقه کوچکی از ذوب را در اطراف لوله‌های سیال گرم تشکیل می‌دهند، بنابراین مکانیزم غالب انتقال حرارت در این زمان از فرآیند، هدایت است. با گذشت زمان، به علت اثر بویانسی، ناحیه مذاب به سمت نیمه بالایی محفظه حرکت کرده و گردابه‌های کوچک متعدد با یکدیگر ادغام و ناحیه گردابه‌ای بزرگی را تشکیل می‌دهند، بنابراین جابجایی طبیعی مکانیزم غالب انتقال حرارت می‌شود. در نتیجه به هنگام فرآیند ذوب دو ناحیه وجود خواهد داشت: (۱) ناحیه جامد (۲) ناحیه مذاب. در ناحیه جامد، انتقال حرارت توسط هدایت صورت گرفته و مرزهای جامد، حرارت را از ناحیه ذوب شده توسط جابجایی طبیعی دریافت می‌کنند. با ذوب ماده تغییر فاز دهنده جامد، به علت نیروهای بویانسی ناشی از اختلاف چگالی که در اثر تفاوت دما در ماده تغییر فاز دهنده ایجاد می‌شود، مکانیزم جابجایی وظیفه گردش‌های داخلی در ناحیه مذاب را بر عهده خواهد گرفت. این گردش‌های داخلی، باعث بهبود انتقال حرارت در ناحیه مذاب می‌شود که این امر به علت بیشتر بودن دمای نواحی بالایی پوسته نسبت به نواحی پایینی آن است.

### ۳-۲- اثر افزایش تعداد لوله سیال گرم داخلی بر روی فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده

نحوه تغییر جبهه ذوب برای حالت‌های مختلف مبدل حرارتی سه لوله‌ای در  $\tau = 1.6314$  در شکل ۹ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در حالت پایه به علت قرار گرفتن سطح انتقال حرارت در مرکز پوسته و فاصله زیاد بوجود آمده بین ماده تغییر فاز دهنده و لوله سیال گرم، انتقال حرارت بین لوله‌های سیال گرم و ماده تغییر فاز دهنده اطراف پوسته به خوبی صورت نمی‌پذیرد؛ در نتیجه نواحی پایینی پوسته نیاز به زمان بیشتری برای ذوب کامل دارد. با



شکل ۷- مقایسه خطوط دما ثابت و خطوط جریان بین مطالعه حاضر و مت و همکاران [۸] (ستون سمت راست: کار مت و همکاران [۸] ستون سمت چپ: مطالعه حاضر)

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در مبدل حرارتی سه لوله‌ای و همچنین اثر افزودن تعداد لوله‌های داخلی سیال گرم و چیدمان آن‌ها روی فرآیند ذوب ارائه شده است. همچنین مقایسه‌ای بین مبدل حرارتی سه لوله‌ای حاضر و مبدل





شکل ۸- کانتور کسر مایع و خطوط جریان در مقطع میانی مبدل حرارتی سه لوله‌ای

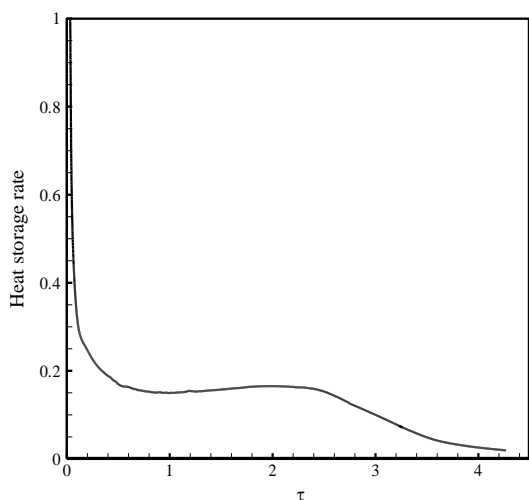
افزایش تعداد لوله‌های سیال گرم و قرارگیری در نواحی مختلف پوسته، سطح انتقال حرارت با ماده تغییر فاز دهنده افزایش یافته و نواحی پایین‌تر نیز تحت تأثیر انتقال حرارت قرار می‌گیرند. با توجه به شکل در  $\tau = 1.6314$  می‌توان مشاهده کرد با افزایش تعداد لوله‌ها، سرعت نفوذ جبهه ذوب افزایش یافته و ناحیه بیشتری ذوب می‌شود. در نهایت عوامل اصلی افزایش نرخ ذوب با افزایش تعداد لوله‌ها به دلایل زیر است:

با توجه به افزایش تعداد لوله‌های حامل سیال گرم داخلی و در نتیجه افزایش سطح انتقال حرارت، نرخ انتقال حرارت هدایتی در زمان‌های اولیه افزایش می‌یابد، بنابراین نرخ ذوب افزایش یافته در نتیجه مکانیزم جابه‌جایی سریع‌تر غالب گشته که این امر سبب کاهش زمان ذوب می‌شود.

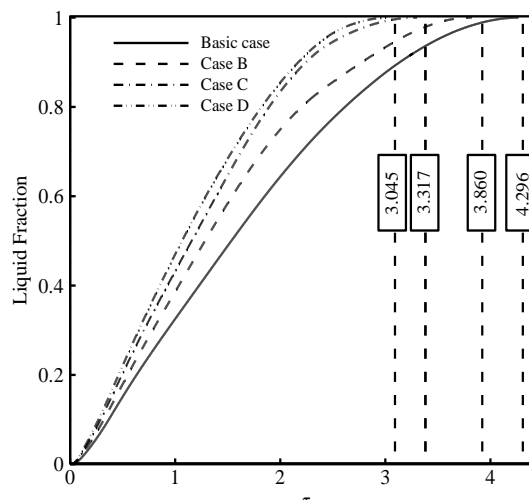
شکل ۱۰، نشان‌دهنده زمان ذوب برای حالت‌های مختلف مبدل حرارتی سه لوله‌ای است. همانطور که از شکل می‌توان استنباط نمود، افزایش تعداد لوله‌ها تا سه لوله باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در زمان ذوب شده است. کاهش زمان ذوب برای افزایش تعداد لوله‌ها از یک به دو و سه به ترتیب ۱۰/۱۲ و ۲۲/۷۸ درصد است؛ در حالی که افزایش تعداد لوله‌ها تا چهار لوله اثر قابل توجهی روی زمان ذوب نداشته و کمتر از ۷ درصد کاهش در زمان ذوب نسبت به حالت سه لوله‌ای را

شکل ۹- موقعیت جبهه ذوب مبدل حرارتی سه لوله‌ای برای

حالت‌های مختلف در  $\tau = 1.6314$



شکل ۱۱- نرخ ذخیره حرارت در مبدل حرارتی سه لوله‌ای



شکل ۱۰- زمان ذوب برای حالت‌های مختلف مبدل حرارتی سه لوله‌ای

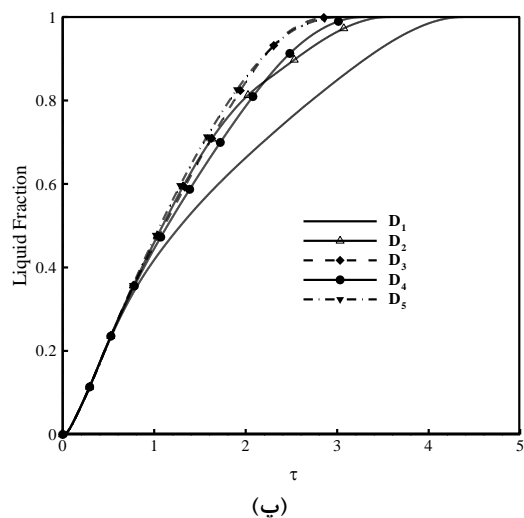
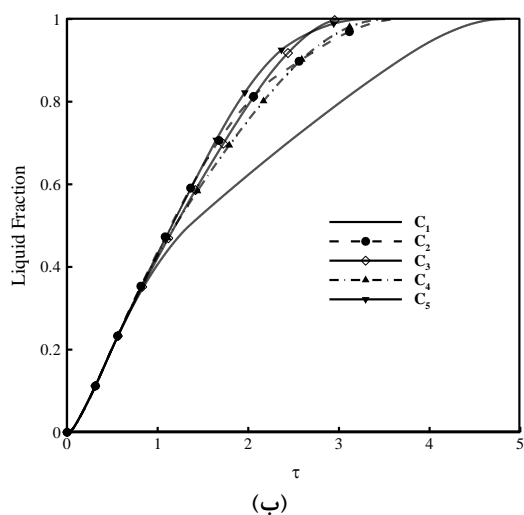
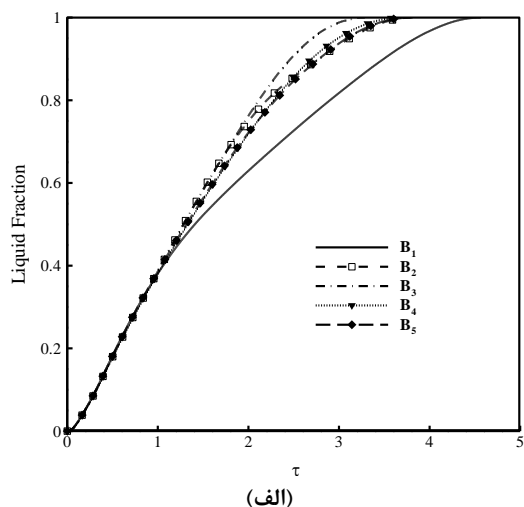
شکل ۱۳، نشان‌دهنده نمودار تغییرات زمانی کسر حجمی سیال برای چیدمان‌های مختلف لوله سیال گرم داخلی است. همانطور که از اشکال می‌توان مشاهده کرد، در حالتی که لوله‌ی سیال گرم داخلی درون پوسته توزیع شده باشد، ذوب سریع‌تری رخ می‌دهد.

### ۳-۳- اثر چیدمان

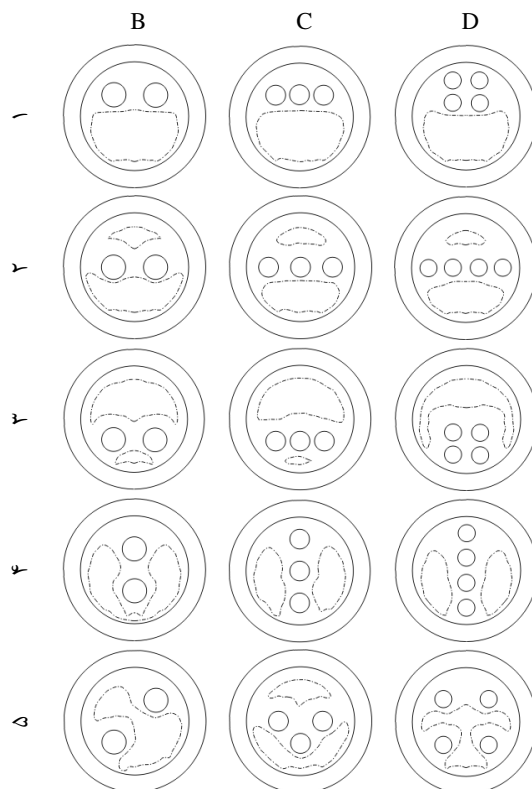
اثر چیدمان لوله سیال گرم داخلی در زمان  $\tau = 1.6314$  در مبدل حرارتی سه لوله‌ای در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانگونه که بحث گردید، به علت اثرات کم جابه‌جایی طبیعی در نواحی زیرین پوسته ذوب در این نواحی به کندی صورت می‌پذیرد. حال با حرکت لوله‌های داخلی در راستای قائم و به سمت نواحی زیرین پوسته (حالت‌های ۱، ۲ و ۳)، انتقال حرارت بیشتری در این نواحی رخ داده و ذوب بیشتری اتفاق می‌افتد؛ این در حالی است که قرار دادن لوله‌های سیال گرم به صورت عمودی (حالت ۴)، تأثیر خاصی بر نرخ ذوب ندارد؛ هم‌چنین با تغییر آرایش لوله‌ها و پخش کردن آن در نواحی مختلف پوسته (حالت ۵)، مناطق بیشتری تحت تأثیر انتقال حرارت قرار گرفته و ذوب روند تسریعی به خود می‌گیرد؛ بنابراین با مقایسه حالت‌های مختلف در نحوه آرایش لوله‌های داخلی مشاهده می‌شود که قرارگیری لوله‌ها در حالت پخش تأثیر بیشتری بر نفوذ جبهه ذوب خواهد داشت.

بدنبال خواهد داشت. درصد افزایش سطح انتقال حرارت با افزایش تعداد لوله سیال گرم از یک به دو و از دو به سه عدد، ۹/۶۷ و ۷/۸۹ درصد است؛ این در حالی است که با افزایش تعداد لوله سیال گرم از سه به چهار عدد، ۷ درصد افزایش سطح انتقال حرارت خواهیم داشت که این در مقایسه با دو حالت دیگر به نسبت کمتر است؛ بنابراین با افزایش بیشتر تعداد لوله‌های داخلی می‌توان مشاهده نمود که به علت نسبت کم افزایش سطح انتقال حرارتی زمان ذوب نیز به نسبت کمتر کاهش خواهد یافت.

شکل ۱۱، نشان‌دهنده نمودار نرخ ذخیره حرارت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و دبی جرمی ۰/۰۲۴ کیلوگرم بر ثانیه است. در زمان‌های اولیه با توجه به پایین‌تر بودن دمای ماده تغییر فاز دهنده نسبت به سیال گرم ورودی، میزان نرخ انتقال حرارت بسیار زیاد است. اختلاف درجه حرارت زیاد بین ماده تغییر فاز دهنده و سیال گرم ورودی به تدریج با گذشت زمان کاهش می‌یابد؛ در نتیجه افزایش دمای ماده تغییر فاز دهنده، باعث افت شدید انتقال حرارت می‌شود. با رسیدن دمای ماده تغییر فاز دهنده به بازه‌ی ذوب در زمان‌های میانی، نرخ ذخیره حرارت تقریباً روند ثابتی را طی می‌نماید. در زمان‌های انتهایی نیز به علت ذوب اکثر ماده تغییر فاز دهنده و افزایش دمای آن، نرخ ذخیره حرارتی سریعاً کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳- نمودار تغییرات زمانی کسر حجمی سیال (الف) حالت B، (ب) حالت C و (پ) حالت D.



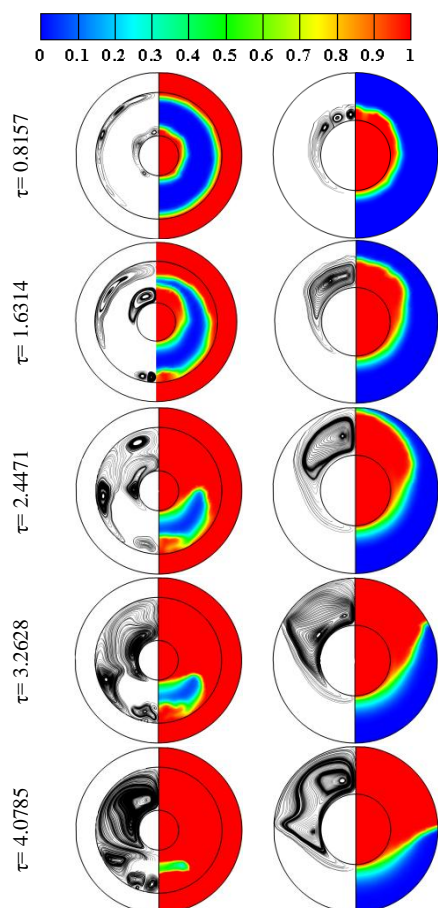
شکل ۱۲- تأثیر چیدمان بر نفوذ جبهه ذوب در مبدل حرارتی سه لوله‌ای

### ۳-۴- مقایسه مبدل حرارتی سه لوله‌ای و دو لوله‌ای

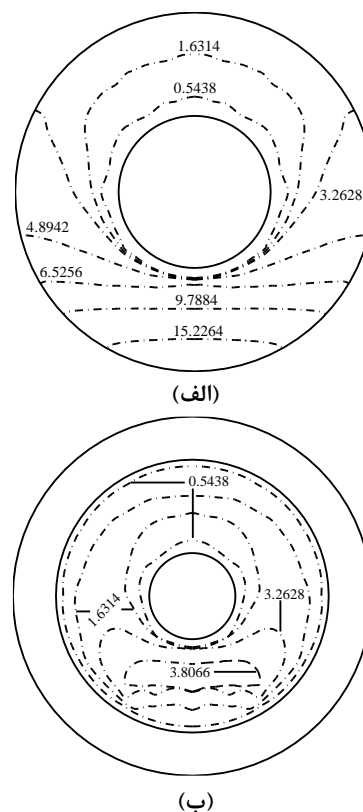
شکل ۱۴، نشان‌دهنده نحوه تغییر جبهه ذوب در طول فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در صفحه میانی مبدل حرارتی دو لوله‌ای (الف) و مبدل حرارتی سه لوله‌ای (ب) است. دبی و دمای سیال گرم به کار گرفته شده در دو هندسه به ترتیب برابر،  $0.024$  کیلوگرم بر ثانیه و  $50$  درجه سانتیگراد بوده و ماده تغییر فاز دهنده در دمای اولیه  $25$  درجه سانتیگراد قرار دارد. مطابق شکل با شروع فرآیند ذوب، جبهه ذوب از اطراف لوله‌های حامل سیال گرم به سمت بالا حرکت می‌کند. در حین فرآیند ذوب، با انتقال حرارت از سیال گرم، ماده تغییر فاز دهنده موجود در اطراف لوله داخلی، گرم‌تر شده و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد که این امر منجر به یک جریان بالاسو برای سیال واقع در این ناحیه شده، در نتیجه باعث به وجود آمدن جابه‌جایی طبیعی می‌شود. جریان

در شکل ۱۵، خطوط میدان جریان و کانتور لحظه‌ای کسر مایع در مقطع میانی مبدل حرارتی سه لوله‌ای و مبدل حرارتی دو لوله‌ای، مورد مقایسه قرار داده شده است. به دلیل حضور پوسته بیرونی در مبدل حرارتی سه لوله‌ای خطوط جریان در کنار لوله بیرونی و درونی تشکیل می‌گردد و در نتیجه آن با پیشرفت زمان گردابه‌ها سریع‌تر با یکدیگر ادغام شده و خطوط جریان بزرگتری را تشکیل می‌دهند؛ در حالی که در مبدل حرارتی دو لوله‌ای به دلیل داشتن یک سطح انتقال حرارت رشد ناحیه ذوب و ادغام شدن گردابه‌ها به کندی صورت می‌پذیرد. با توجه به شکل در  $\tau = 4.0785$ ، می‌توان مشاهده کرد در مبدل حرارتی سه لوله‌ای، گردابه‌های تشکیل شده کل ناحیه پوسته را در بر گرفته که نشان از ذوب مقدار بیشتری از ماده تغییر فاز دهنده نسبت به مبدل حرارتی دو لوله‌ای در این زمان دارد. این در حالی

طبیعی به وجود آمده به شدت روی میدان حرارتی حاکم بر مسأله تأثیر گذاشته و موجب تغییر وضعیت انتقال حرارت در میدان حل و در نتیجه تغییر شکل جبهه تغییر فاز با گذشت زمان می‌شود. البته باید توجه داشت که در شروع فرآیند ذوب، هدایت حرارتی مکانیزم غالب در میزان انتقال حرارت بوده و تأثیر جابجایی طبیعی به علت میدان حرکتی محدود، بسیار ناچیز است. با گذشت زمان و پیشرفت جبهه ذوب، ناحیه مذاب گسترش یافته و در نتیجه مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی قادر است، نقش بزرگتری در انتقال حرارت در چنین فرآیندهایی را ایفا کند. همانگونه که از شکل ۱۴ قابل مشاهده است، در زمان‌های مشابه نفوذ جبهه ذوب در مبدل حرارتی سه لوله‌ای سریع‌تر صورت می‌پذیرد. علت این امر آن است که با افزایش سطح انتقال حرارت، شدت مکانیزم جابه‌جایی طبیعی افزایش یافته که این امر منجر به سرعت نفوذ بیشتر جبهه ذوب در مبدل می‌شود.



شکل ۱۵- مقایسه کسر مایع و خطوط جریان در مقطع میانی مبدل حرارتی دو لوله‌ای و مبدل حرارتی سه لوله‌ای



شکل ۱۴- موقعیت جبهه ذوب در طی زمان فرآیند شارژ در صفحه میانی (الف) مبدل حرارتی دو لوله‌ای و (ب) مبدل حرارتی سه لوله‌ای

است که در مبدل حرارتی دو لوله‌ای و در  $\tau = 4.0785$  گردابه‌ها به نواحی پایین نفوذ نکرده و مقداری ماده تغییر فاز دهنده جامد در این ناحیه وجود داشته که نیاز به زمان بیشتری برای ذوب خواهد داشت.

#### ۴- نتیجه گیری

در مقاله حاضر فرآیند ذوب پارافین RT35 در مبدل حرارتی سه لوله‌ای بررسی شده است. بر اساس بررسی‌های عددی نتایج زیر حاصل شده است:

- در طول فرآیند ذوب، نیمه بالایی پوسته به علت اثرات نیروی شناوری دمای بیشتری را تجربه کرده، ذوب در این ناحیه به نسبت نیمه پایینی پوسته سریعتر اتفاق می‌افتد.
- با افزایش تعداد لوله‌های سیال گرم داخلی در مبدل حرارتی سه لوله‌ای، از یک به دو ۱۰/۱۲ درصد، از دو به سه ۱۱/۲۶ درصد و از سه به چهار ۱۱/۱۱ درصد زمان ذوب کاهش می‌یابد؛ هم‌چنین با افزایش تعداد لوله‌های داخلی از یک به چهار زمان ذوب ۲۹/۱۱ درصد کاهش خواهد یافت.
- در حالتی که لوله‌های داخلی سیال گرم به طور هم‌زمان نواحی بالایی و پایینی پوسته را در برگیرند (حالت پخش)، نفوذ جبهه ذوب و در نتیجه نرخ ذوب بیشتر خواهد بود.
- با افزودن یک لوله سیال گرم به قسمت بیرونی مبدل حرارتی دو لوله‌ای و در نتیجه افزایش سطح انتقال حرارت روند ذوب تسریع می‌یابد.

#### ۵- فهرست علائم

ثابت ناحیه خمیری	$A_{mush}$
ثابت گرانش	$g$
عدد رایلی $(g\beta(T_H - T_m)R^3/k\nu)$	$Ra$
فشار هیدرواستاتیکی	$P$
عدد پراگندگی $(\nu/\alpha)$	$Pr$
شعاع مبدل حاوی ماده تغییر فازدهنده	$R$
ترم چشمه	$S$
عدد استفان $(C_p(T_{in} - T_{ref})/L)$	$Ste$
دمای	$T$

سرعت	$V$
علائم یونانی	
ضریب انبساط گرمایی	$\beta$
زمان بی‌بعد $(\alpha t/R^2)$	$Fo$
کسر مایع	$\lambda$
ویسکوزیته سینماتیکی	$\nu$

#### زیرنویس و بالا نویس

پارامتر بی‌بعد	*
سیال گرم ورودی	$H$
متوسط دمای تغییر فاز	$m$

#### ۶- مراجع

- [1] Medrano M, Yilmaz MO, Nogués M, Martorell I, Roca J, Cabeza LF (2009) Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems. *Appl Energy* 86: 2047-2055.
- [2] Adine HA, Qarnia HE (2009) Numerical analysis of the thermal behavior of a shell and tube heat storage unit using phase change materials. *Appl Math Model* 33(4): 2132-2144.
- [3] Rabienataj Darzi AA, Farhadi M, Sedighi K (2012) Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus. *Appl Math Model* 36: 4080-4086.
- [4] Sari A, Kaygusuz K (2002) Thermal and heat transfer characteristics in a latent heat storage system using lauric acid. *Energy Convers Manage* 43(18): 2493-2507.
- [5] Rathod MK, Banerjee J (2015) Thermal performance enhancement of shell and tube latent heat storage unit using longitudinal fins. *Appl Therm Eng* 85: 1084-1092.
- [6] Agyenim F, Eames P, Smyth M (2010) Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array. *Renew Energ* 35: 198-207.
- [7] Rahimi M, Ranjbar AA, Ganji DD, Sedighi K, Hosseini MJ (2014) Experimental Investigation of Phase Change inside a Finned-Tube Heat Exchanger. *J Eng* 2014:1-11.
- [8] Mat S, Al-Abidi AA, Sopian K, Sulaiman MY, Mohammad A Th (2013) Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins. *Energy Convers Manage* 74: 223-236.
- [9] Al-Abidi AA, Mat S, Sopian K, Sulaiman MY, Mohammad A Th (2013) Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers. *Appl Therm Eng* 53: 147-156.
- [10] Al-Abidi AA, Mat S, Sopian K, Sulaiman MY, Mohammad A Th (2013) Numerical study of PCM

- [17] Ismail KAR, Lino FAM, Silva RCR da, Jesus AB de, Paixão LC (2014) Experimentally validated two-dimensional numerical model for the solidification of PCM along a horizontal long tube. *Int J Therm Sci* 75: 184-193.
- [18] Hosseini MJ, Ranjbar AA, Sedighi K, Rahimi M (2013) Melting of nanoparticle-enhanced phase change material inside shell and tube heat exchanger. *J Eng* 2013(17): 1-8.
- [19] Pahamli Y, Hosseini Khsari SMJ, Ranjbar AA (2015) Investigating geometrical and flow parameters in behavior of melting Phase Change Material in a double pipe heat exchanger. *Modares Mech Eng* 15 (10): 183-191. (In Persian)
- [20] Esapour M, Hosseini MJ, Ranjbar AA, Pahamli Y, Bahrapoury R (2016) Phase change in multi-tube heat exchangers. *Renew Energ* 85: 1017-1025.
- [21] Ranjbar AA, Kashani S, Hosseinizadeh SF, Ghanbarpour M (2011) Numerical heat transfer studies of a latent heat storage system containing nano-enhanced phase change material. *Therm Sci* 15 (1): 169-181.
- [22] Brent AD, Voller VR, Reid KJ (1988) Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change, application to the melting of a pure metal. *Numer Heat Transfer* 13(3): 297-318.
- [23] Voller VR, Prakash C (1987) A fixed grid numerical modeling methodology for convection-diffusion mushy region phase change problems. *Int J Heat Mass Tran* 30(8): 1709-1719.
- solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins. *Int J Heat Mass Tran* 61(1): 684-695.
- [11] Hosseini MJ, Ranjbar AA, Rahimi M, Bahrapoury R (2015) Experimental and numerical evaluation of longitudinally finned latent heat thermal storage systems. *Energ Buildings* 99: 263-272.
- [12] Hosseini MJ, Rahimi M, Bahrapoury R (2015) Thermal analysis of PCM containing heat exchanger enhanced with normal annular fines. *Mech Sci* 6: 221-234.
- [13] Hosseini MJ, Rahimi M, Bahrapoury R (2014) Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system. *Int Comm Heat Mass Tran* 50: 128-136.
- [14] Rahimi M, Ranjbar AA, Ganji DD, Sedighi K, Hosseini MJ, Bahrapoury R (2014) Analysis of geometrical and operational parameters of PCM in a fin and tube heat exchanger. *Int Comm Heat Mass Tran* 53: 109-115.
- [15] Al-Abidi AA, Mat S, Sopian K, Sulaiman MY, Mohammad A Th (2014) Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins. *Energ Buildings* 68: 33-41.
- [16] Hosseini MJ, Ranjbar AA, Sedighi K, Rahimi M (2012) A combined experimental and computational study on the melting behavior of a medium temperature phase change storage material inside shell and tube heat exchanger. *Int Comm Heat Mass Tran* 9(39): 1416-1424.