



## فرآیند ذوب در محفظه ذخیره سازی سه لوله‌ای: چیدمان مواد تغییر فاز دهنده نیوتنی و غیرنیوتنی

سمیه داودآبادی فراهانی<sup>\*</sup>، امیر داودآبادی فراهانی، فاطمه طیب‌زاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

### کلمات کلیدی:

ذوب

ماده تغییر فاز دهند

سیال غیرنیوتنی

مدل توانی

آرایش لایه‌ها

**خلاصه:** در این مقاله به مطالعه عددی انتقال حرارت و فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در یک محفظه ذخیره سازی سه لوله‌ای فین دار به صورت دو بعدی پرداخته شده است. اثر چیدمان مواد تغییر فاز دهنده به صورت سیال‌های نیوتنی و غیرنیوتنی بر روند ذوب بررسی شده است. از مدل غیرنیوتنی توانی و روش آنتالپی-تخلخل بر پایه روش حجم محدود به ترتیب برای شبیه سازی سیال غیرنیوتنی و فرآیند ذوب استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند ذوب در محفظه میانی و بیرونی برای سیال نیوتنی نسبت به سیال غیرنیوتنی به مقدار ۳/۰۳ درصد بیشتر می‌باشد. برای بررسی اثر چیدمان سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در بخش داخلی و خارجی محفظه دو چیدمان مختلف در نظر گرفته شده است: سیال نیوتنی-غیرنیوتنی و سیال غیرنیوتنی-نیوتنی. نتایج بیانگر آن است که هنگامی که از آرایش سیال نیوتنی-غیرنیوتنی استفاده می‌شود فرآیند ذوب نسبت به آرایش سیال غیرنیوتنی-نیوتنی سریعتر است. به طور میانگین در هر زمان، مقدار میانگین کسر ذوب در حالت سیال نیوتنی-غیرنیوتنی در حدود ۱۰/۳۲ درصد بیشتر از حالت دیگر است. با افزایش پارامتر شاخص سازگاری و کاهش شاخص توانی سیال غیرنیوتنی مقدار کسر ذوب کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود تغییرات عدد ناسلت نیز مشابه تغییرات کسر ذوب است.

### ۱- مقدمه

افزایش سطح آلودگی توسط تولید گازهای گلخانه‌ای و افزایش چشم‌گیر قیمت سوخت، زمینه را برای استفاده بیشتر از منابع انرژی تجدیدپذیر بیشتر نموده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌های امروزه تکنولوژی، ذخیره کردن انرژی در شکل‌های مناسب است که قابل تبدیل به شکل‌های مورد نیاز باشد. ذخیره کردن انرژی نه تنها موجب ایجاد توازن بین عرضه و تقاضای انرژی می‌شود بلکه سبب بهبود کارایی سیستم‌های انرژی شده و نقش ویژه‌ای در صرفه‌جویی مصرف انرژی ایجاد می‌کنند [۱]. اکثر سیستم‌های حرارتی خورشیدی فعال، ذخیره سازی را برای ساعاتی از روز فراهم می‌کند. تعداد زیادی از وسایل ذخیره‌کننده انرژی گرمایی را در تابستان به صورت فصلی به منظور گرمایش محیط در زمستان ذخیره می‌کنند. بنابراین می‌توان با استفاده از ذخیره انرژی حرارتی باعث بهبود این سیستم‌های انرژی شد. یکی از روش‌های ذخیره سازی انرژی، ذخیره انرژی حرارتی نهان می‌باشد. این ذخیره سازی به کمک یک سری از مواد که قابلیت ذوب و انجماد

دارند شکل می‌گیرد به این مواد، مواد تغییر فاز دهنده گفته می‌شود که دارای گرمای ذوب بالا هستند و می‌توانند برای ذخیره یا آزاد نمودن انرژی بدون تغییر در دمای آنها مورد استفاده قرار بگیرند. از مهم‌ترین مشکلات مواد تغییر فاز دهنده پایین بودن ضریب هدایت حرارتی این مواد می‌باشد. راه‌های مختلفی برای غلبه بر این مشکل وجود دارد که می‌توان به استفاده از سازه‌های ثابت مانند فین و یا استفاده از چند لایه ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب متفاوت اشاره نمود. پژوهش‌های مختلفی درباره فرآیند تغییر فاز و بهبود انتقال حرارت با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به صورت نیوتنی و غیرنیوتنی در محفظه‌هایی با هندسه‌های مختلف همراه با فین‌هایی با شکل‌های مختلف انجام شده است.

یکی از پرکاربردترین تقویت کننده‌های انتقال حرارت استفاده از فین است. اثر استفاده از فین‌ها در پژوهش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. مهدی و همکاران [۲] به بررسی عددی فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در یک لوله سه‌گانه با فین‌های طولی با اندازه‌های مختلف در نیمه بالا و پایین برای ذخیره انرژی حرارتی نهان به روش حجم محدود پرداختند. آنها

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sdfarahani@arakut.ac.ir



دریافتند که استفاده از باله‌هایی با طول بلند در نیمه پایینی واحد ذخیره سازی باعث ذوب شدن سریع ماده تغییر فاز دهنده می‌شود. همچنین، استفاده از باله‌هایی با تعداد کمتر و نسبتاً کوتاه در نیمه بالایی واحد ذخیره سازی باعث بهبود عملکرد حرارتی می‌شود. نتایج آنها نشان می‌دهد که وجود تعداد نسبتاً کمی از پره‌هایی با طول متوسط در نیمه بالایی مخزن ذخیره سازی، انتقال گرما را به داخل ماده تغییر فاز دهنده به اندازه کافی افزایش می‌دهد و فرایند ذوب سریعتر رخ می‌دهد. هانگاتو و همکاران [۳] به مطالعه عددی فرایند ذوب مواد تغییر فاز دهنده در یک مبدل پوسته و لوله‌ای فین‌دار به روش حجم محدود پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان داده است که استفاده از فین‌ها به طور قابل توجهی باعث کاهش زمان ذوب شده است بطوری که زمان ذوب برای هندسه‌هایی با تعداد ۸۰۴ و ۱۲ فین نسبت به هندسه بدون فین به ترتیب به مقدار ۵۵/۳، ۶۶/۱۰ و ۷۱ درصد کاهش یافته است. لی و همکاران [۴] به بررسی عددی فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده همراه با نانوذرات در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای با فین‌های Y شکل به روش حجم محدود پرداخته‌اند. از پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده و از اکسید مس به عنوان نانوذرات استفاده نموده‌اند. آنها دریافتند که استفاده از فین‌هایی با طول بیشتر منجر به جذب گرمای بیشتر و عملکرد بالاتر می‌شود. درزی و همکاران [۵] به بررسی عددی فرایند ذوب و انجماد در چهار هندسه متفاوت: دایره‌ای، بیضوی افقی، بیضوی عمودی و استوانه‌ای فین‌دار به روش حجم محدود پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که همرفت طبیعی نقش مهمی در فرایند تغییر فاز دارد به طوری که همرفت طبیعی باعث شده است که در هر چهار هندسه بررسی شده میزان ذوب و انجماد در قسمت بالایی هندسه از قسمت پایین بیشتر باشد. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که استفاده از لوله بیضوی عمودی جهت‌دار به جای هندسه دایره‌ای، زمان ذوب را کاهش می‌دهد اما در روند فرایند انجماد موثر نبوده است. بهگات و همکاران [۶] به بررسی عددی عملکرد حرارتی یک واحد ذخیره سازی گرمای نهان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله همراه با فین‌هایی متصل روی سطح لوله‌ها به روش حجم محدود پرداخته‌اند. آنها دریافتند که با دو برابر نمودن ضخامت و تعداد فین‌ها مقدار کسر ذوب از ۲/۶۳٪ به ۱۶٪ تغییر یافته است.

یکی دیگر از راه‌های افزایش میزان هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده استفاده از نانوذرات با مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد. استفاده از نانوذرات موجب افزایش سرعت انتقال حرارت و بهبود فرایند ذوب-انجماد بواسطه‌ی افزودن نانوذرات به ماده تغییر فاز دهنده می‌شود. اثر استفاده از نانوذرات و

تأثیر آن بر روی فرایند ذوب و انجماد در پژوهش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. حسین‌زاده و همکاران [۷] به بررسی عددی فرایند انجماد یک ماده تغییر فاز دهنده همراه با نانو ذرات در یک سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی به شکل دانه برف به روش المان محدود پرداخته‌اند. تأثیر نوع شکل نانوذرات و همچنین کسر حجمی نانوذرات بر روند انجماد ماده تغییر فاز دهنده بررسی شده است. گزارش شده است که استفاده از نانوذرات با کسر حجمی ۰/۰۴ می‌تواند روند انجماد را به میزان ۲۴/۱ درصد نسبت به حالت بدون نانوذرات افزایش دهد. حاجی‌زاده و همکاران [۸] به بررسی مدل‌سازی عددی انجماد پارافین در یک کانال موج‌دار به روش حجم محدود پرداخته‌اند. یافته‌های آنها بیانگر آن است که استفاده از نانوذرات و سطح موج‌دار بر روند انجماد ماده تغییر فاز دهنده کمک می‌کند به طوری که سرعت فرایند انجماد را به مقدار ۳۸٪ افزایش داده است. حاجی‌زاده و همکاران [۹] به بررسی عددی فرایند انجماد در یک سیستم ذخیره سازی برای رسیدن به کمترین زمان فرایند انجماد همراه با نانوذرات و چیدمان فین‌های متفاوت به روش حجم محدود پرداخته‌اند. برای ارزیابی تأثیر نانو مواد از یک مدل همگن استفاده شده است و غلظت نانوذرات همراه با ماده تغییر فاز دهنده در تمام فضای ذخیره سازی یکسان است. نتایج آنها نشان داد هندسه فین‌دار همراه با نانوذره دارای عملکرد بهتری نسبت به حالت بدون فین دارد. بنداروا و همکاران [۱۰] تأثیر افزودن نانوذرات بر روند ذوب مواد تغییر فاز دهنده را به صورت عددی به روش المان محدود بررسی نمودند. آنها دریافتند که در اعداد رایلی پایین، افزودن نانوذرات به پارافین تأثیر قابل توجهی بر ساختار هیدروپویسمی مذاب ندارد و سرعت مذاب را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد اما در مقابل برای اعداد بزرگ رایلی، جریان‌های همرفت تأثیر قابل توجهی در انتقال گرما و جرم دارند. آنها مشاهده نمودند هنگامی افزایش کسر حجمی نانوذرات منجر به افزایش زمان ذوب می‌شود که انتقال حرارت همرفتی غالب باشد. شایینگ و همکاران [۱۱] به بررسی عددی فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده پارافین با افزودن نانوذرات مس در یک محفظه مستطیلی دو بعدی به روش حجم محدود پرداخته‌اند. نتایج آنها حاکی از آن است که با افزودن نانوذرات با ۱ درصد وزنی زمان ذوب شدن کامل ماده تغییر فاز دهنده را می‌توان به میزان ۱۳/۱ درصد نسبت به حالت بدون نانوذرات کاهش داد.

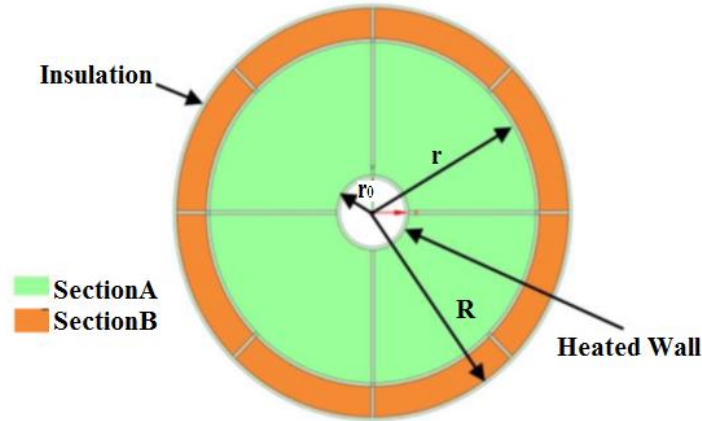
یکی دیگر از راه‌های بهبود فرایند ذوب و انجماد مواد تغییر فاز دهنده استفاده از چیدمان چندین ماده تغییر فاز دهنده با آرایش‌های مختلف است. ترتیب قرارگیری مواد تغییر فاز دهنده با نقاط ذوب مختلف بر روی بهبود

مستطیلی بر میزان انتقال حرارت ناشی از همرفت طبیعی که برای یک سیال غیرنیوتنی بینگهام شبیه‌سازی شده است پرداختند. آنها نشان دادند که عدد ناسلت میانگین به نسبت ارتفاع محفظه به پهنای محفظه بستگی دارد و با افزایش پارامتر نسبت ارتفاع محفظه به پهنای محفظه اثرات همرفت طبیعی افزایش و مقدار هدایت گرمایی کاهش می‌یابد. عدد ناسلت با افزایش عدد بینگهام کاهش می‌یابد و انتقال حرارت رسانشی مکانیزم غالب در محفظه خواهد شد. شجاعیان و همکاران [۱۸] به بررسی عددی انتقال حرارت ناشی از همرفت طبیعی برای یک جریان سیال غیرنیوتنی کاملاً توسعه یافته درون کانال دایره‌ای به صورت جریان مغشوش پرداخته‌اند. آنها دریافتند که با افزایش پارامتر شاخص پایداری سیال غیرنیوتنی و عدد برینکمن عدد ناسلت کاهش و میزان آنتروپی تولیدی در طول فرایند افزایش یافته است. لادمیلا و همکاران [۱۹] به بررسی شبیه‌سازی عددی فرایند انجماد یک سیال غیرنیوتنی در لوله به روش حجم محدود پرداخته‌اند. آنها دریافتند که تا زمانی که سرعت سیال ورودی به لوله به اندازه کافی بالا نباشد، تغییرات لزجت سیال اثر چندانی بر روند انجماد سیال نخواهد گذاشت. مایرز و لو [۲۰] به بررسی فرایند انجماد یک سیال غیرنیوتنی در یک میکروکانال با مقطع دایره‌ای پرداخته‌اند. از مدل غیرنیوتنی توانی برای شبیه‌سازی سیال غیرنیوتنی استفاده شده است. آنها معادلات مربوط به فرایند انجماد و تغییرات پارامترهای مربوط به سیال غیرنیوتنی را در نرم افزار متلب به طور همزمان حل نموده‌اند و از دو سیال غیرنیوتنی خون و اکسید پلی‌اتیلن در طول شبیه‌سازی استفاده نموده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از سیال غیرنیوتنی موجب تسریع در فرایند انجماد در مقایسه با سیال نیوتنی تحت همان افت فشار شده است.

با توجه به مطالعات پیشین، یکی از راه‌های افزایش مقدار انتقال حرارت و تسریع فرایند ذوب-انجماد، استفاده از چند لایه ماده تغییر فاز دهنده است. تقریباً در تمامی مطالعات ماده تغییر فاز دهنده نیوتنی در نظر گرفته شده است و تقریباً تاکنون اثر استفاده از چند لایه ماده تغییر فاز دهنده به صورت سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در فرایند تغییر فاز برای ذخیره سازی انرژی حرارتی نهان بررسی نشده است و کمبود دانش در این زمینه به شدت احساس می‌شود. بنابراین، در پژوهش حاضر به بررسی عددی فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده به صورت سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در یک محفظه سه لوله‌ای فین‌دار پرداخته شده است. اثر چیدمان ماده تغییر فاز دهنده به صورت سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در فضای لوله‌های داخلی و میانی بر روند ذوب و انتقال حرارت ماده تغییر فاز دهنده بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی بر پایه روش حجم

روند ذوب و انجماد تاثیر بسزایی دارد و در پژوهش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. جاسم و همکاران [۱۲] به بررسی عددی شبیه‌سازی ذخیره سازی انرژی حرارتی نهان برای یک مبدل پوسته و لوله‌ای همراه با مواد تغییر فاز دهنده به روش حجم محدود پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از حالت‌هایی با دو و سه ماده تغییر فاز دهنده سرعت فرایند انجماد را نسبت به حالت یک ماده تغییر فاز دهنده به ترتیب به مقدار  $۵/۲$  و  $۸/۲$  درصد افزایش داده است. فنگ و چن [۱۳] به بررسی یک مدل عددی برای ذخیره سازی انرژی گرمای نهان با استفاده از چندین لایه ماده تغییر فاز دهنده به صورت سری در یک سیستم مبدل پوسته و لوله‌ای به روش المان محدود پرداخته‌اند. آنها دریافتند که اختلاف دمای ذوب بین مواد تغییر فاز دهنده و نحوه ترتیب چیدمان آنها تاثیر مهمی بر روند کلی انتقال حرارت و ذخیره سازی انرژی گرمایی نهان با وجود ماده تغییر فاز دهنده دارد. آدینه و القرینا [۱۴] به بررسی عددی یک واحد ذخیره سازی گرمای نهان در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله با استفاده از ترکیب دو ماده تغییر فاز دهنده به صورت سری پرداخته‌اند. از دو ماده P۱۱۶ و اکتادکان به عنوان مواد تغییر فاز دهنده برای ترکیب سری استفاده شده است. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از دو لایه سری ماده تغییر فاز دهنده مختلف به میزان ۵۷ درصد نرخ انتقال حرارت بیشتری نسبت به حالت تک لایه ایجاد می‌کند. هو و همکاران [۱۵] به بررسی عددی انتقال حرارت بین ماده تغییر فاز دهنده و سیال انتقال دهنده گرما در یک سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی نهان به روش حجم محدود پرداخته‌اند. پنج واحد ذخیره سازی از حجم مساوی اما با ابعاد مختلف در طول شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد که ترتیب چیدمان ماده تغییر فاز دهنده بر روی فرایند انتقال حرارت مواد تغییر فاز دهنده بسیار اهمیت دارد و استفاده از چندین ماده تغییر فاز دهنده باعث شده است که زمان ذخیره سازی انرژی حرارتی در مقایسه با حالت تک لایه به مقدار  $۴۷/۵$  درصد کاهش یابد.

اثر استفاده از سیال غیرنیوتنی بر انتقال حرارت ناشی از همرفت طبیعی و فرایند ذوب-انجماد مواد تغییر فاز دهنده در پژوهش‌های مختلفی بررسی شده است. کیم و همکاران [۱۶] به بررسی همرفت طبیعی در یک محفظه مربعی که از سیال غیرنیوتنی پر شده است، پرداخته‌اند. برای شبیه‌سازی سیال غیرنیوتنی از مدل توانی استفاده نمودند. گزارش شده است که برای عدد رایلی در محدوده  $۱۰^۵ - ۱۰^۷$  و عدد پراتل  $۱۰۰ - ۱۰۰۰$  با کاهش شاخص پایداری سیال غیرنیوتنی همرفت طبیعی شدیدتر می‌شود و انتقال گرما افزایش می‌یابد. اوسمان و همکاران [۱۷] به بررسی نسبت ابعاد یک محفظه



شکل ۱. شماتیکی از هندسه محفظه ذخیره سازی لوله سه تایی فین دار ۱.

Fig. 1. A schematic of the geometry of the finned triple tube storage chamber

از ۰ تا ۱ افزایش پیدا می کند. هنگامی که ناحیه ای به طور کامل منجمد گردد میزان تخلخل صفر بوده و سرعت جریان در این ناحیه به صفر کاهش پیدا می کند. همرفت طبیعی در داخل مناطق مایع ماده تغییر فاز دهنده اتفاق می افتد. تاثیر همرفت طبیعی در طی فرایند ذوب و انجماد با استفاده از تقریب بوزینسک برای چگالی ماده تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده است. در روش آنتالپی-تخلخل، آنتالپی کل حاصل جمع آنتالپی گرمای محسوس و گرمای نهان است که به صورت زیر محاسبه می شود [۲۱]:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \lambda L_h \quad (1)$$

که  $h_{ref}$  آنتالپی مرجع،  $T_{ref}$  دمای مرجع،  $T$  دمای ماده تغییر فاز دهنده،  $C_p$  ظرفیت حرارتی در فشار ثابت،  $\lambda$  کسر ذوب شده و  $L_h$  گرمای نهان می باشد.  $h$  از معادله زیر محاسبه می شود [۲۲]:

$$\lambda = \begin{cases} 1 & \text{if } T \geq T_{li} \\ 0 & \text{if } T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_{li} - T_s} & \text{if } T_s < T < T_{li} \end{cases} \quad (2)$$

محدود و با استفاده از نرم افزار تجاری انسیس فلونت انجام شده است. برای مدل سازی فرایند ذوب و انجماد از روش آنتالپی-تخلخل و برای شبیه سازی سیال غیرنیوتنی از مدل توانی استفاده شده است. از نتایج مطالعه حاضر می توان در بهبود تجهیزات خورشیدی مانند کلکتورهای خورشیدی، گرمکن هوای خورشیدی، آب شیرین کن خورشیدی و ... استفاده نمود.

## ۲- مدل فیزیکی و معادلات حاکم

شماتیکی از محفظه ذخیره سازی انرژی حرارتی، با هندسه لوله سه تایی فین دار به صورت دو بعدی در شکل ۱ نشان داده شده است. ضخامت محفظه و فین ها مورد استفاده ثابت و برابر ۱ میلی متر می باشد. جنس فین ها از آلومینیوم و ماده تغییر فاز دهنده اسید لوریک در نظر گرفته شده است.  $r$ ،  $R$  و  $H$  به ترتیب بیانگر شعاع استوانه میانی، داخلی، خارجی و طول فین در استوانه خارجی و مقدار آنها به ترتیب  $R-r$ ،  $10$ ،  $60$  و  $50$  میلی متر در نظر گرفته شده است. شرط مرزی دمای ثابت،  $333$  کلوین برای دیواره درونی محفظه و شرط آدیباتیک برای دیواره بیرونی محفظه اعمال شده است. دمای اولیه ماده تغییر فاز دهنده، فین ها و محفظه  $300$  کلوین در نظر گرفته شده است.

برای شبیه سازی عددی فرایند ذخیره سازی انرژی حرارتی نهان همراه با مواد تغییر فاز دهنده از روش آنتالپی-تخلخل بر پایه روش حجم محدود استفاده شده است. در این روش کسر مایع ذوب در هر تکرار محاسبه می شود. ناحیه خمیری ناحیه ای است که در آن تخلخل با ذوب ماده تغییر فاز دهنده

شده است. لزجت ظاهری در این حالت از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۳]:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (۶)$$

$$\tau = \Gamma \dot{\gamma}^n \quad (۷)$$

$$\dot{\gamma} = [2(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + 2(\frac{\partial v}{\partial y})^2 + (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})^2]^{0.5} \quad (۸)$$

به طوری که  $\mu_a$ ،  $\tau$ ،  $\dot{\gamma}$ ،  $\Gamma$ ،  $u$ ،  $n$  و  $V$  به ترتیب بیانگر لزجت ظاهری سیال، تنش برشی، نرخ کرنش، شاخص سازگاری سیال، شاخص توانی سیال غیرنیوتنی و سرعت در جهت  $X$  و  $Y$  می باشد. هنگامی که از سیال غیرنیوتنی استفاده می شود در معادلات (۱) تا (۵) به جای  $\mu_f$  از  $\mu_a$  استفاده می شود. عدد بدون بعد ناسلت برای توصیف میزان انتقال حرارت استفاده می شود. عدد ناسلت محلی عبارت است از:

$$Nu_i = \frac{h(2\pi r_o)}{k} \quad (۹)$$

که  $h$  بیانگر ضریب انتقال حرارت جابه جایی می باشد. خواص ترموفیزیکی مواد انتخاب شده در جدول ۱ آورده شده است. مطابق جدول ۲، ده حالت مختلف برای نحوه قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده به صورت نیوتنی و غیرنیوتنی درون قسمت های داخلی و قسمت خارجی محفظه در طول شبیه سازی در نظر گرفته شده است. برای ناحیه ای که ماده تغییر فاز دهنده به صورت سیال نیوتنی قرار می گیرد، مقدار لزجت سیال ثابت و برای ناحیه ای که ماده تغییر فاز دهنده به صورت سیال غیرنیوتنی قرار دارد، مقدار لزجت بر حسب تغییرات دو پارامتر شاخص سازگاری سیال غیرنیوتنی ( $\Gamma$ ) و شاخص توانی سیال غیرنیوتنی ( $n$ ) تغییر پیدا می کند. تغییرات شاخص سازگاری و شاخص توانی سیال غیرنیوتنی مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است.

که  $T_s$  و  $T_{ii}$  به ترتیب بیانگر دمای مایع و دمای جامد است. با توجه به تمام فرضیات در نظر گرفته شده، معادله پیوستگی و ممنتوم برای شبیه سازی به ترتیب در ادامه آورده شده است [۲۲]:

$$\nabla V = 0 \quad (۳)$$

$$\rho(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V) = -\nabla P + \mu_f \nabla^2 V + A_u \frac{(1-\lambda)^2}{(\lambda^3 + 0.001)} V + \rho \beta g (T - T_{re}) \quad (۴)$$

که  $V$ ،  $\mu$ ،  $P$ ،  $t$ ،  $g$ ،  $\beta$  و  $\rho$  به ترتیب سرعت، لزجت، فشار، زمان، شتاب گرانش، ضریب انبساط حرارتی و چگالی است.  $A_u$  ثابت ناحیه خمیری است و این ثابت ناحیه خمیری از  $10^4$  تا  $10^7$  تغییر می کند. ثابت ناحیه خمیری دامنه میرایی را مشخص می کند به طوری که مقادیر بزرگ تر این ثابت بیانگر شیب سریع تر میرایی سرعت بوده و مقادیر خیلی بزرگ آن می تواند باعث ایجاد نوسان در حل گردد. همچنین، با افزایش ثابت ناحیه خمیری مقدار نرخ انتقال حرارت و کسر ذوب کاهش می یابد بخاطر آنکه همرفت طبیعی در ناحیه خمیری کاهش می یابد. بنابراین در مطالعه حاضر با در نظر گرفتن این موضوع و با توجه به اعتبارسنجی مقدار ثابت ناحیه خمیری انتخاب شده است. در پژوهش حاضر مقدار این پارامتر برابر با  $10^4$  در نظر گرفته شده است. معادله انرژی با صرف نظر از اتلافات گرمایی ناشی از لزجت به صورت زیر بیان شده است [۲۳]:

$$\rho(C_p + L_h \frac{d\lambda}{dT}) \frac{dT}{dt} + \rho C_p V \cdot \nabla T = k \nabla^2 T \quad (۵)$$

که  $k$  ضریب رسانایی حرارتی ماده تغییر فاز دهنده است. در هنگام مدل سازی سیال غیرنیوتنی از قانون توانی برای شبیه سازی استفاده شده است. در این قانون اثر تغییرات لزجت با شدت تغییر شکل اعمال شده بر روی سیال با دو پارامتر شاخص سازگاری سیال و شاخص سیال غیرنیوتنی بررسی

جدول ۱. خصوصیات مواد انتخاب شده [۱۸]

Table 1. Characteristics of designated materials [18]

خاصیت	آلومینیوم	(جامد/مایع) اسید لوریک
دمای ذوب [K]	-	۳۳۱/۲-۳۱۶/۵
ظرفیت گرمایی ویژه [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	۰/۸۷	۲۱۸۰-۲۳۹۰
گرمای نهان [J.kg <sup>-1</sup> ]	-	۱۸۷۲۰۰
چگالی [kg.m <sup>-۳</sup> ]	۲۷۱۹	۹۴۰-۱۸۸۵
ضریب هدایت حرارتی [W.m <sup>-۱</sup> .K <sup>-۱</sup> ]	۲۰۲/۴	۰/۱۴-۰/۱۶
[K <sup>-۱</sup> ] ضریب انبساط گرمایی	-	۰/۰۰۰۸
لزجت دینامیکی [Pa.s]	-	۰/۴۱

جدول ۲. نحوه چیدمان مواد تغییر فاز دهنده درون محفظه ذخیره سازی

Table 2. Arrangement of phase change materials in the storage chamber

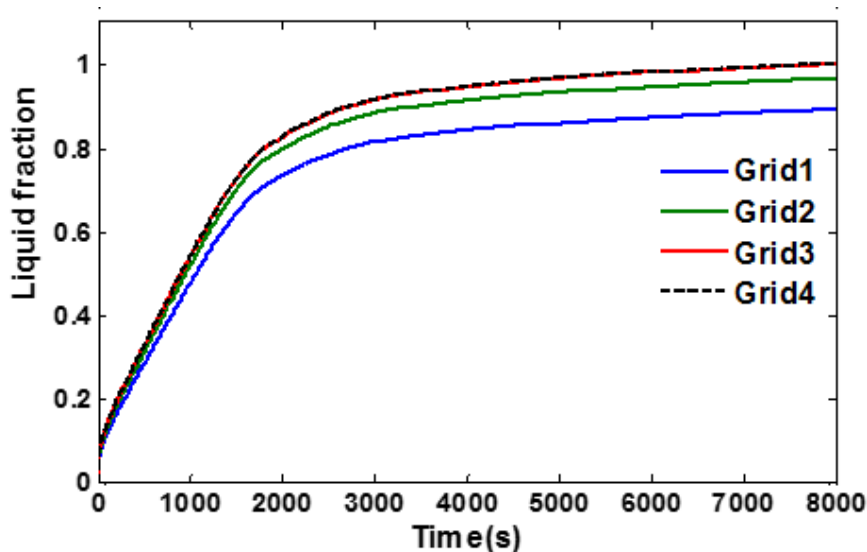
بخش میانی		بخش بیرونی		شماره حالت
$\Gamma$	$n$	$\Gamma$	$n$	
۱	۱	۱	۱	۱
۳/۵۳۶	۱	۳/۵۳۶	۱	۲
۱	۱	۳/۵۳۶	۱	۳
۳/۵۳۶	۱	۱	۱	۴
۱	۱	۳/۹۸۷	۱	۵
۳/۹۸۷	۱	۱	۱	۶
۱	۱	۷/۹۱۰	۰/۸۷۹	۷
۷/۹۱۰	۰/۸۷۹	۱	۱	۸
۱	۱	۱۱/۰۲۱	۰/۸۲۲	۹
۱۱/۰۲۱	۰/۸۲۲	۱	۱	۱۰

جدول ۳. خصوصیات سیال غیرنیوتنی [۲۳]

Table 3. Properties of non-Newtonian fluid [23]

حالت ۴	حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	خاصیت
۰/۸۲۲	۰/۸۷۹	۱	۱	$n$
۱۱/۰۲۱	۷/۹۱۰	۳/۹۸۷	۳/۵۳۶	$\Gamma$ [MPa.S <sup>n</sup> ]





شکل ۲. اثر اندازه شبکه بر کسر ذوب

Fig. 2. Effect of lattice size on melting fraction

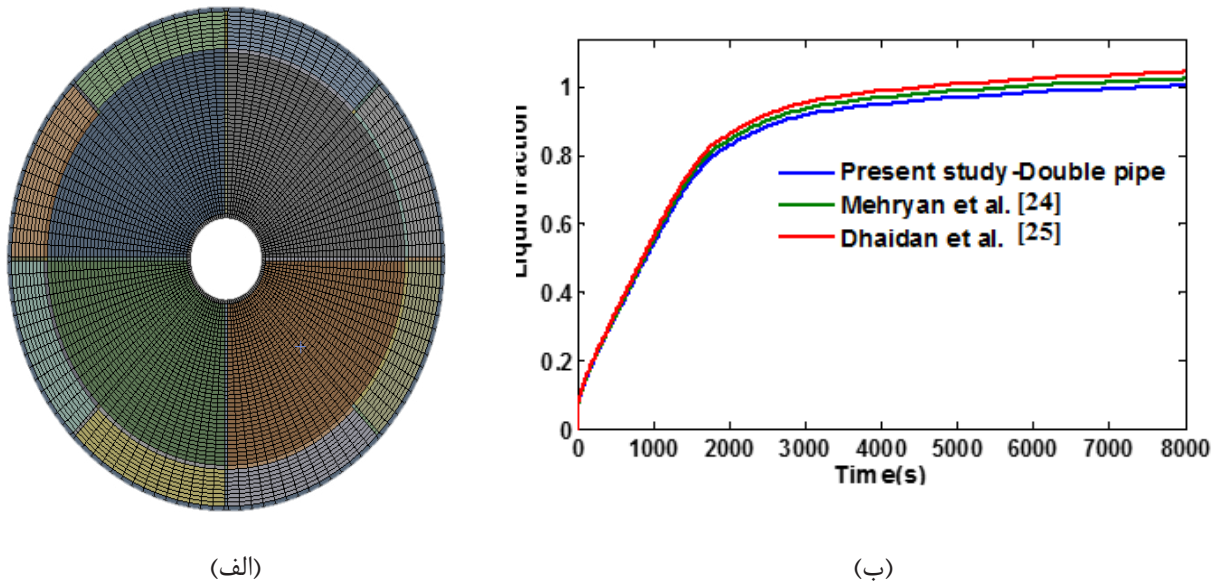
گرفتند. شکل ۲ تغییرات کسر مایع با زمان را برای سه شبکه محاسباتی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده میانگین اختلاف نسبی کسر مایع بین شبکه با تعداد گره ۵۹۰۰ با شبکه با تعداد گره ۶۸۰۰ برابر با ۰/۰۶٪ و با شبکه با تعداد گره ۴۰۰۰ در حدود ۳/۸٪ است. بنابراین به منظور حفظ دقت و کاهش زمان محاسباتی شبکه با تعداد گره ۵۹۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. شبکه‌بندی انتخابی برای هندسه محفظه ذخیره سازی مطابق شکل ۳ الف نشان داده شده است. شبیه‌سازی به صورت گذرا در نظر گرفته شده است و مطالعه‌ای مشابه جهت تعیین گام زمانی مناسب بین گام‌های زمانی ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۳ و ۰/۰۲ ثانیه انجام شده است و در نهایت گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه برای انجام محاسبات انتخاب گردید.

جهت اعتبار سنجی، نتایج مطالعه حاضر با پژوهش‌های پیشین مقایسه شده است. برای این منظور مقدار کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده با گذشت زمان برای هندسه مورد بررسی در حالت  $(R=T)$  زمانی که از ماده تغییر فاز دهنده به صورت سیال نیوتنی استفاده شده است با نتایج عددی مهربان و همکاران [۲۴] و نتایج تجربی داهیان و همکاران [۲۵] مقایسه شده است. در هر دو این پژوهش‌ها از پارافین اکتادکان به عنوان ماده تغییر فاز دهنده نیوتنی استفاده شده است. در تحقیق عددی [۲۴] به بررسی فرایند ذوب در یک محفظه ذخیره سازی که دیواره لوله داخلی تحت یک دمای یکنواخت قرار دارد بررسی شده است.

### ۳- بحث و نتایج

در این مقاله اثر چیدمان مواد تغییر فاز دهنده به صورت نیوتنی و غیرنیوتنی در بخش‌های درونی و خارجی محفظه ذخیره سازی بر روند ذوب و انتقال حرارت بررسی شده است. در مطالعه عددی حاضر، حل معادلات حاکم به کمک نرم افزار انسیس فلونت بر پایه روش حجم محدود انجام شده است. از مدل جریان آرام برای لزجت و الگوریتم سیمپل برای کوپل کردن میدان سرعت و فشار استفاده می‌شود. به منظور گسسته‌سازی عبارت‌های پخش و جابجایی به ترتیب روش‌های تفاضل مرکزی و کوئیک استفاده شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب برابر با  $10^{-3}$ ،  $10^{-5}$  و  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. ضرایب برای اصلاح سرعت، فشار، انرژی حرارتی و کسر مایع به ترتیب برابر ۰/۴، ۰/۳، ۱۰ و ۰/۹ انتخاب شده است.

ایجاد شبکه‌بندی مناسب در رسیدن به پاسخ دقیق از اهمیت بالایی برخوردار است. برای اطمینان از آن که نتایج حل وابسته به اندازه شبکه نمی‌باشد، مقدار کسر ذوب برای حالتی که در هر دو بخش درونی و بیرونی محفظه از ماده تغییر فاز دهنده به صورت سیال نیوتنی استفاده شده است، بررسی شده است و اثر تغییرات شبکه‌بندی مختلف بر تاریخچه زمانی کسر ذوب مطالعه و در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت بررسی استقلال نتایج از شبکه، چهار شبکه با ابعاد ۴۰۰۰، ۲۵۰۰، ۵۹۰۰ و ۶۸۰۰ مورد مطالعه قرار



شکل ۳. الف) نمونه شبکه انتخابی و ب) مقایسه کسر ذوب با ادبیات پیشین مراجع [۲۴ و ۲۵]

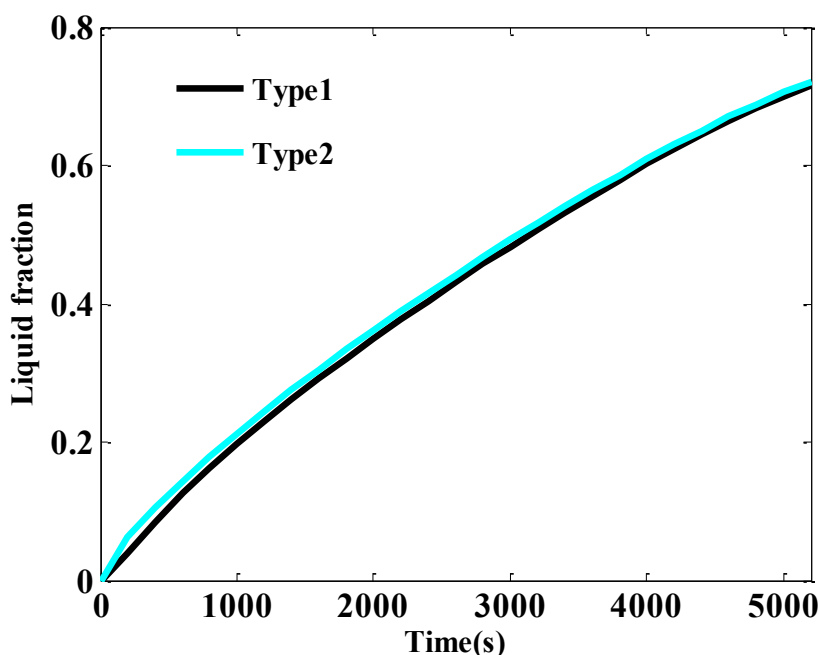
Fig. 3. a) chosen mesh for the computational domain and b) Comparison of melting fraction with previous literature [24, 25]

بخش از سیال نیوتنی احاطه شده است (حالت ۱) بیشتر می‌باشد. علت این رفتار حرارتی آن است که سیال غیرنیوتنی چگالی و ظرفیت گرمایی بالاتری در مقایسه با سیال نیوتنی دارد. همچنین اثر انتقال حرارت ناشی از همرفت طبیعی در سیال غیرنیوتنی از سیال نیوتنی بیشتر می‌باشد، به طوری که مقدار میانگین کسر ذوب برای حالت ۲ به مقدار  $3/03$  درصد نسبت به حالت ۱ تا زمان  $5000$  ثانیه افزایش یافته است. هنگامی که دمای ماده تغییر فاز دهنده جامد به وسیله گرمای انتقال یافته از سطوح گرم افزایش می‌یابد، ماده تغییر فاز دهنده شروع به ذوب شدن می‌کند. در مرحله اولیه یک لایه نازک از ماده تغییر فاز دهنده مایع به موازات سطح داخلی تحت گرما به وجود می‌آید و به تبع آن انتقال حرارت بین ماده تغییر فاز دهنده و سطوح گرمایی ظاهر می‌شود و با گذشت زمان ماده تغییر فاز دهنده نزدیک سطح گرمایی به طور کامل ذوب می‌شود. بنابراین شکل منحنی کسر ذوب فرایند همرفت طبیعی و روند انتقال گرما را در طول شبیه‌سازی نشان می‌دهد. در ابتدای فرایند سهم انتقال حرارت هدایتی که از طریق دیواره تحت حرارت توسط باله‌ها به ماده تغییر فاز دهنده می‌رسد، زیاد است، اما با گذشت زمان سهم انتقال حرارت ناشی از همرفت طبیعی بر انتقال حرارت هدایتی غالب می‌شود به همین دلیل شیب تغییرات ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده در زمان‌های ابتدایی و نهایی مطابق شکل ۴ متفاوت می‌باشد.

همچنین در مطالعه تجربی مرجع [۲۵] نیز به بررسی فرایند ذوب یک ماده تغییر فاز دهنده در یک محفظه ذخیره‌سازی دو لوله‌ای بر حسب زمان بررسی شده است. آنها اثر غیر هم مرکز بودن لوله داخلی را بررسی نمودند. آنها دریافتند که هنگامی که لوله داخلی با لوله خارجی هم مرکز نیست مقدار کسر ذوب بیشتر از حالت هم مرکز است. در این تحقیق از پارافین اکتادکان به صورت نیوتنی با خواص ترموفیزیکی ارائه شده در پژوهش [۲۵] برای ارزیابی صحت مدل سازی عددی ارائه شده استفاده شده است. در شکل ۳ ب مقدار کسر ذوب حاصل از شبیه‌سازی فعلی در حالت  $(R=1)$  با مراجع [۲۴ و ۲۵] مقایسه شده است. روند تغییرات کسر ذوب برای هر سه مورد تقریباً یکسان می‌باشد و همخوانی خوبی بین نتایج مطالعه حاضر و مطالعات پیشین وجود دارد. حداکثر اختلاف نسبی برای مقدار کسر ذوب در مطالعه حاضر با نتایج [۲۴ و ۲۵] به ترتیب در حدود  $3/91$  و  $7/65$  درصد می‌باشد، بنابراین از صحت مدل سازی ارائه شده اطمینان حاصل شده است.

در شکل ۴ تغییرات مقدار کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده برای حالتی که در هر دو بخش داخلی و خارجی محفظه ذخیره‌سازی از ماده تغییر فاز دهنده به صورت نیوتنی و غیرنیوتنی تنها استفاده شده است، مطابق جدول ۳ برای دو حالت ۱ و ۲ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که مقدار کسر ذوب برای زمانی که در هر دو بخش داخلی و خارجی محفظه از سیال غیرنیوتنی احاطه شده است (حالت ۲) نسبت به زمانی که هر دو





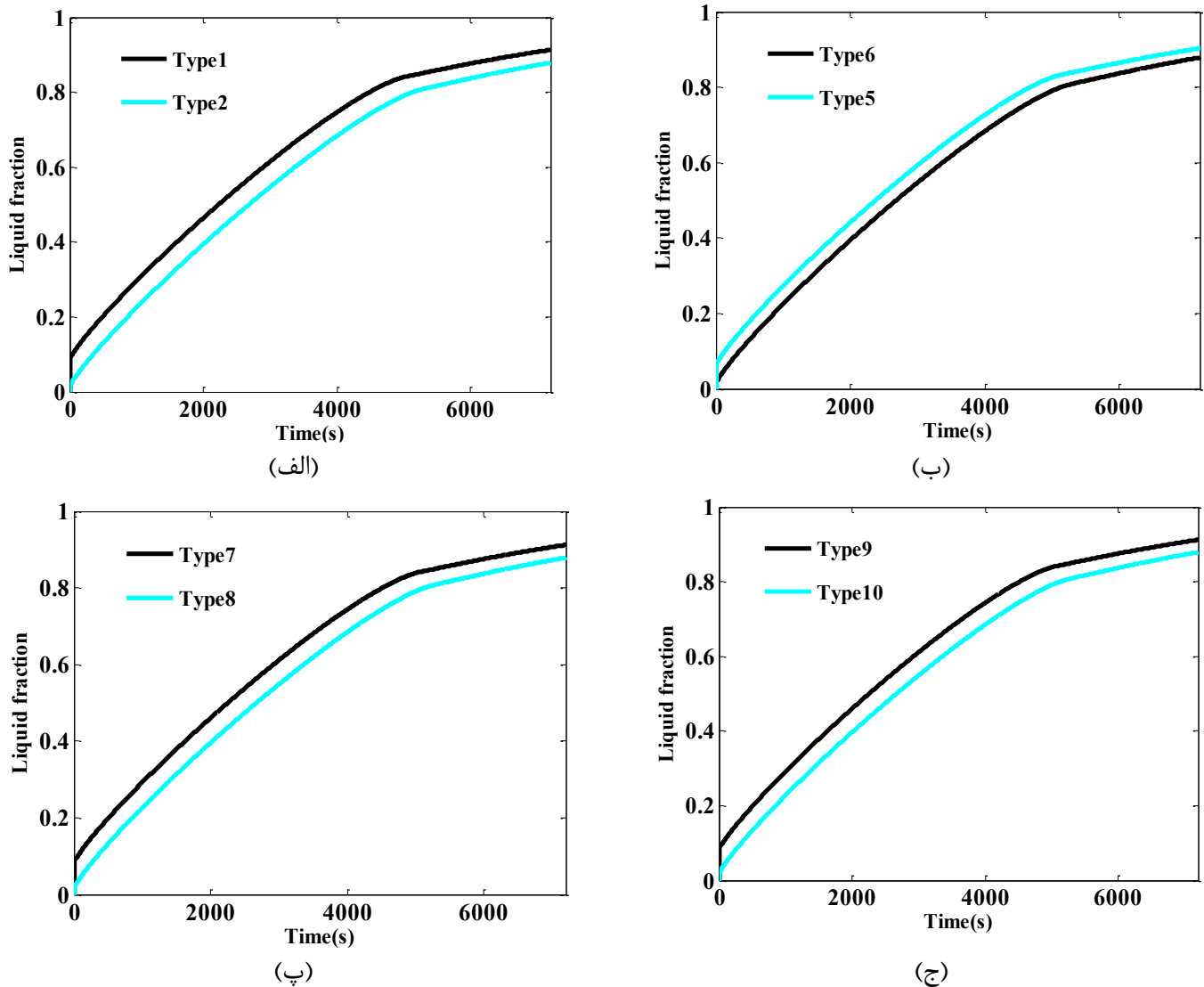
شکل ۴. تغییرات کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده برای چیدمان مختلف

Fig. 4. Melting fraction changes of phase change material for different arrangement

کاهش شاخص توانی سیال غیرنیوتنی مقدار ذوب کاهش پیدا کرده است زیرا طبق قانون توانی با افزایش پارامتر شاخص سازگاری و با کاهش پارامتر شاخص توانی سیال غیرنیوتنی مقدار لزجت ظاهری سیال افزایش می‌یابد که باعث کاهش اثرات ناشی از همرفت طبیعی در طول فرایند و کاهش روند ذوب می‌شود. در مقابل زمانی که از سیالی با مقدار شاخص سازگاری کمتر استفاده می‌شود، مقدار لزجت ظاهری کاهش می‌یابد و به تبع آن اثرات انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی بیشتر و باعث بهبود در روند ذوب سیال غیرنیوتنی می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش مقدار شاخص سازگاری سیال غیرنیوتنی باعث کاهش در میدان سرعت و به تبع آن کاهش گرادیان دما در منطقه ذوب سیال غیرنیوتنی می‌شود. کاهش گرادیان دما موجب کاهش ترم مربوط به انتقال حرارت همرفتی در معادله انرژی و کاهش میزان کسر ذوب می‌شود.

در شکل ۶ تاریخچه زمانی تغییرات کانتور کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده مطابق جدول ۲ برای چهار حالت مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با گذشت زمان مقدار گرمای به دام افتاده بین دیواره تحت حرارت لوله داخلی، لوله خارجی و فین‌ها افزایش می‌یابد که باعث افزایش نرخ ذوب می‌شود. همچنین از نتایج مشخص است که در زمان ابتدای فرایند در فضای بین دیوار داخلی تحت حرارت و لوله‌ی داخلی جریان‌های گردابه‌ای به وجود

در شکل ۵ تغییرات مقدار کسر ذوب برای حالت‌هایی که چیدمان مواد تغییر فاز دهنده به صورت نیوتنی و غیرنیوتنی در قسمت‌های داخلی و خارجی محفظه متفاوت است (جدول ۲) نشان داده شده است. مقدار لزجت برای حالت نیوتنی ثابت است اما برای حالت سیال غیرنیوتنی مقدار لزجت بر اساس قانون توانی به دو پارامتر شاخص سازگاری و شاخص توانی سیال غیرنیوتنی بستگی دارد. همچنین برای حالت‌های مختلف ماده تغییر فاز دهنده غیرنیوتنی مقدار شاخص سازگاری سیال غیرنیوتنی (جدول ۳) به پارامتر شاخص سیال غیرنیوتنی بستگی دارد. همانطور که از شکل ۵ مشخص است، مقدار کسر ذوب برای حالت‌هایی که سیال نیوتنی در بخش داخلی و سیال غیرنیوتنی در بخش بیرونی محفظه قرار گرفته است نسبت به حالتی که سیال غیرنیوتنی در بخش داخل و سیال غیرنیوتنی در بخش خارجی محفظه قرار گرفته است بیشتر می‌باشد. به طوری که مشاهده می‌شود مقدار میانگین کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده برای حالتی که ماده تغییر فاز دهنده نیوتنی در بخش داخلی محفظه و ماده تغییر فاز دهنده به صورت سیال غیرنیوتنی در بخش بیرونی محفظه قرار گرفته‌اند به مقدار  $10/32$  درصد نسبت به حالتی که ماده تغییر فاز دهنده غیرنیوتنی با پارامتر در بخش داخلی و ماده تغییر فاز دهنده نیوتنی در بخش بیرونی قرار گرفته است افزایش یافته است. در حالت غیرنیوتنی مشاهده می‌شود با افزایش پارامتر شاخص سازگاری و



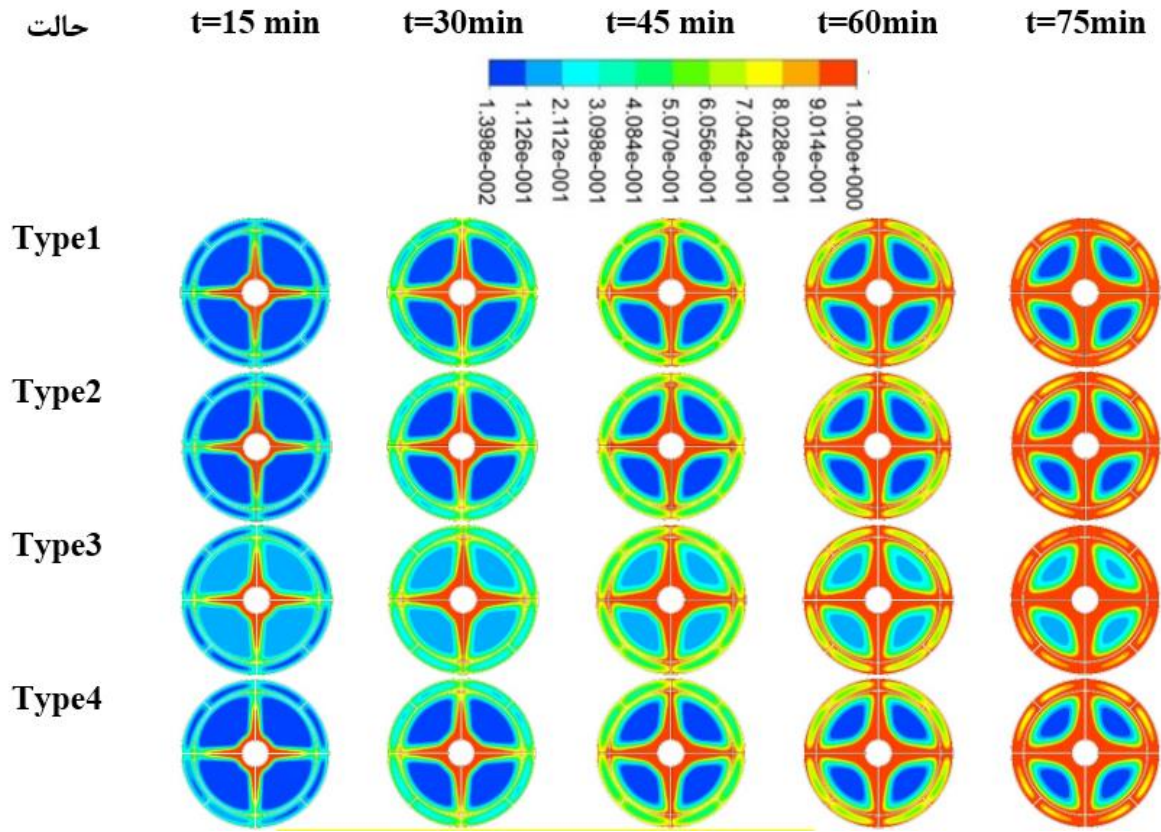
شکل ۵. تغییرات کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده در چیدمان‌های مختلف نیوتنی-غیرنیوتنی

Fig. 5. Melting fraction changes of phase change material in different arrangements of newtonian-nonnewtonian fluid

خارجی و داخلی محفظه استفاده شده نسبت به حالت‌هایی که در هر دو بخش داخلی و خارجی محفظه از ماده تغییر فاز دهنده به صورت فقط نیوتنی و غیرنیوتنی استفاده شده است، بیشتر می باشد.

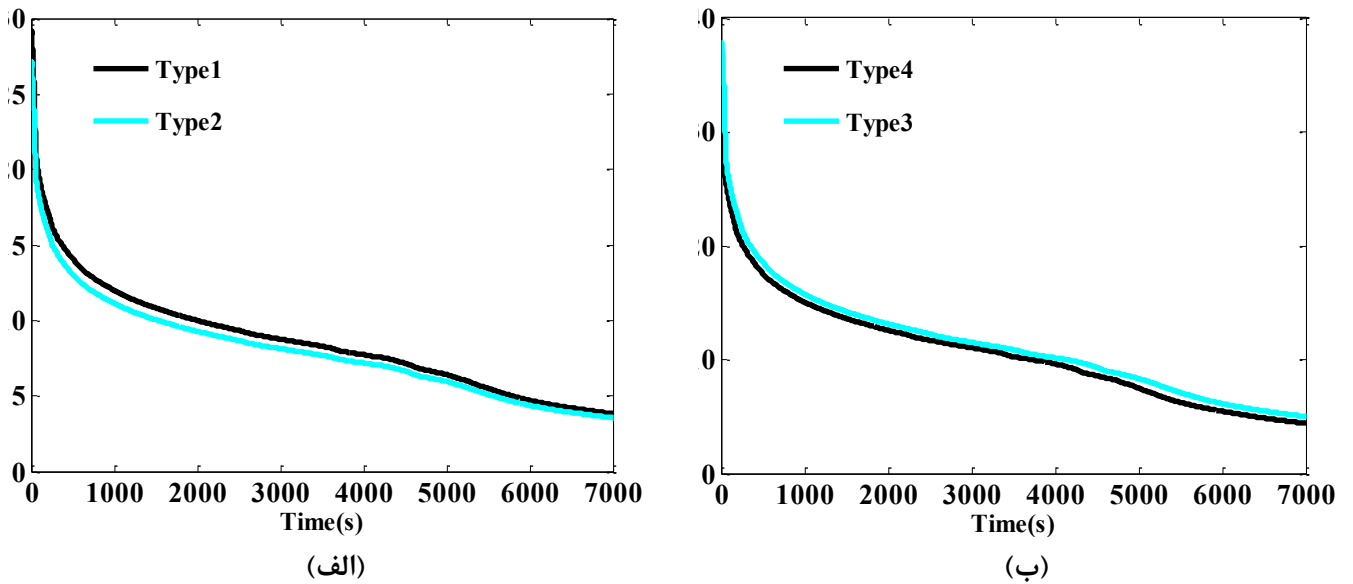
در شکل ۷ تغییرات عدد ناسلت میانگین بر روی دیواره داخلی تحت حرارت با گذشت زمان برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است. عدد ناسلت متوسط برای توصیف شدت انتقال حرارت همرفتی در دیواره لوله داخلی بیان می‌شود. با ذوب ماده تغییر فاز دهنده با گذشت زمان مقاومت حرارتی بین سطح تحت حرارت و ناحیه خمیری (جامد-مایع) افزایش می‌یابد

می‌آید. این گردابه‌ها از دیوار داخلی تحت دمای یکنواخت گرما دریافت می‌کنند و همچنین با ناحیه خمیری جامد-مایع برخورد می‌کنند که منجر به تولید گردابه در فضای بین دیوار تحت حرارت و لوله داخلی می‌شود. همچنین در فضای بالا و پایین فین‌ها، قسمت‌های ماده تغییر فاز دهنده مایع ناشی از گردابه‌های کوچک ایجاد می‌شود که باعث ذوب شدن ضخامت قسمت‌های جامد اطراف فین‌ها می‌گردد. همچنین کانتورهای کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده نشان می‌دهد مقدار کسر ذوب میانگین برای حالت‌هایی که از چیدمان‌های مختلف ماده تغییر فاز دهنده نیوتنی و غیرنیوتنی در قسمت‌های



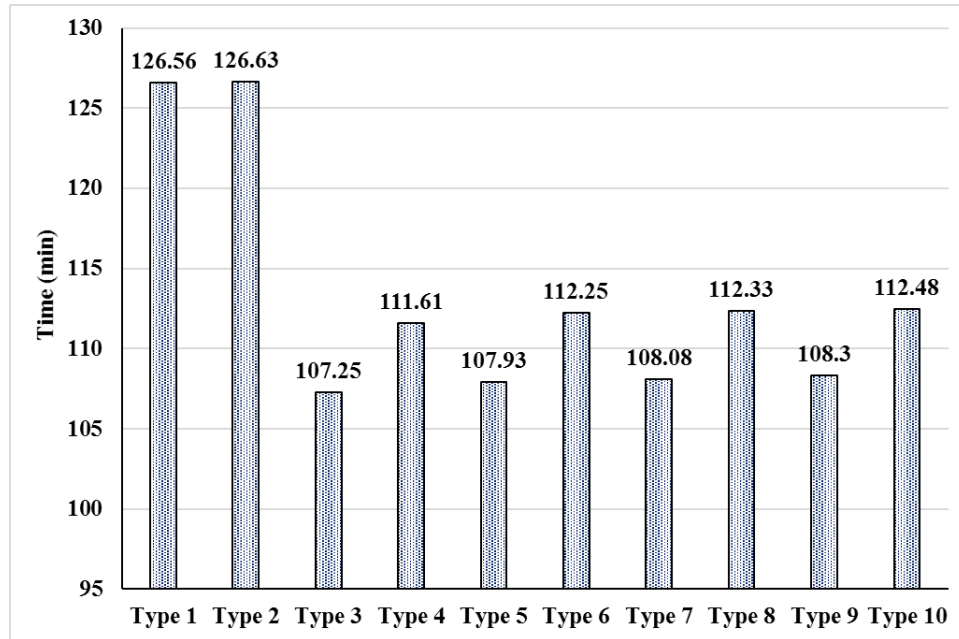
شکل ۶. کانتور تغییرات کسر ذوب ماده تغییر فاز دهنده در زمان‌های مختلف

Fig. 6. Contour of changes in melting fraction of phase change material at different times



شکل ۷. تغییرات عدد ناسلت میانگین برای حالت‌های مختلف

Fig. 7. Mean Nusselt number variations for different modes



شکل ۸. مقایسه زمان ذوب کامل حالت‌های مختلف

Fig. 8. Comparison of complete melting times of different states

زمان ذوب کامل حالت‌های بررسی شده در این پژوهش در شکل ۸ نشان شده است. نتایج نشان دهنده آن است که حالت ترکیبی نیوتنی- غیرنیوتنی (حالت ۳) کمترین زمان ذوب را دارد و بیشترین زمان ذوب متعلق به حالتی است که رفتار سیال در کل محفظه به صورت غیرنیوتنی (حالت ۲) است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی انتقال حرارت و فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در یک محفظه ذخیره سازی به صورت هندسه لوله سه‌تایی همراه با فین‌های خارجی متصل به لوله میانی به صورت دو بعدی پرداخته شده است. اثر چیدمان مواد تغییر فاز دهنده به صورت سیال‌های نیوتنی و غیرنیوتنی در بخش‌های داخلی و خارجی محفظه ذخیره سازی بر روی روند ذوب و انتقال حرارت در طول شبیه سازی بررسی شده است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

1. مقدار کسر ذوب برای زمانی که در هر دو بخش داخلی و خارجی محفظه از سیال غیرنیوتنی احاطه شده است نسبت به زمانی که هر دو بخش از سیال نیوتنی پر شده است بیشتر می‌باشد.
2. مقدار کسر ذوب برای حالت‌هایی که سیال نیوتنی در بخش

و به تبع آن عدد ناسلت نیز کاهش می‌یابد. در مرحله اول رژیم هدایت گرما، انتقال حرارت هدایتی مکانیزم غالب انتقال حرارت است. مقدار عدد ناسلت برای همه هندسه فین‌ها در شروع فرایند بیشترین مقدار خود را دارند زیرا مقاومت حرارتی کوچکی به وسیله لایه مذاب نازک در زمان شروع فرایند ایجاد شده است. با گذشت زمان لایه مذاب ایجاد شده ضخیم‌تر شده و به تبع آن مقاومت حرارتی ایجاد شده در برابر انتقال گرما افزایش می‌یابد و عدد ناسلت نسبت به مراحل اولیه افت پیدا می‌کند. در مرحله دوم مذاب بیشتری ایجاد می‌شود که منجر به تبدیل مکانیزم انتقال حرارت از هدایت به همرفت طبیعی می‌شود. در این مرحله عدد ناسلت در مقایسه با مراحل اولیه با سرعت کمتری کاهش می‌یابد. در مرحله سوم مقدار کسر مایع همچنان افزایش می‌یابد و جریان مایع ماده تغییر فاز دهنده افزایش می‌یابد. در این مرحله عدد ناسلت سریع‌تر از مرحله دوم و تقریباً برابر مرحله اول کاهش می‌یابد. هنگامی که سیال غیرنیوتنی است مقدار لزجت کمتر از حالت نیوتنی است و سرعت حرکت مذاب و نواحی چرخش جریان ناشی از همرفت طبیعی بیشتر است. چرا که نیروی لزجت کاهش یافته و نیروی شناوری می‌تواند باعث همرفت طبیعی بیشتری در محفظه شود. بنابراین نرخ انتقال حرارت و به دنبال آن نرخ کسر ذوب در حالت غیرنیوتنی بیشتر است.

containing (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GO) HNEPCM, Journal of Molecular Liquids, 289 (2019) 111140.

- [8] M.R. Hajizadeh, F. Selimefendgil, T. Muhammad, M. Ramzan, H. Babazadeh, Z. Li, Solidification of PCM with nano powders inside a heat exchanger, Journal of Molecular Liquids, 306 (2020) 112892.
- [9] M.R. Hajizadeh, A.N. Keshteli, Q.-V. Bach, Solidification of PCM within a tank with longitudinal-Y shape fins and CuO nanoparticle, Journal of Molecular Liquids, 317 (2020) 114188.
- [10] N.S. Bondareva, B. Buonomo, O. Manca, M.A. Sheremet, Heat transfer performance of the finned nano-enhanced phase change material system under the inclination influence, International Journal of Heat and Mass Transfer, 135 (2019) 1063-1072.
- [11] S. Wu, H. Wang, S. Xiao, D. Zhu, Numerical simulation on thermal energy storage behavior of Cu/paraffin nanofluids PCMs, Procedia Engineering, 31 (2012) 240-244.
- [12] J.M. Mahdi, H.I. Mohammed, E.T. Hashim, P. Talebizadehsardari, E.C. Nsofor, Solidification enhancement with multiple PCMs, cascaded metal foam and nanoparticles in the shell-and-tube energy storage system, Applied Energy, 257 (2020) 113993.
- [13] M. Fang, G. Chen, Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system, Applied Thermal Engineering, 27(5-6) (2007) 994-1000.
- [14] H.A. Adine, H. El Qarnia, Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials, Applied mathematical modelling, 33(4) (2009) 2132-2144.
- [15] Z. Hu, A. Li, R. Gao, H. Yin, Enhanced heat transfer for PCM melting in the frustum-shaped unit with multiple PCMs, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 120(2) (2015) 1407-1416.
- [16] G.B. Kim, J.M. Hyun, H.S. Kwak, Transient buoyant convection of a power-law non-Newtonian fluid in an enclosure, International journal of heat and mass transfer, 46(19) (2003) 3605-3617.

داخلی و سیال غیرنیوتنی در بخش بیرونی محفظه قرار گرفته است نسبت به حالتی که سیال غیرنیوتنی در بخش داخل و سیال غیرنیوتنی در بخش خارجی محفظه قرار گرفته است بیش تر می باشد.

3. برای حالتی که از ماده تغییر فاز دهنده غیرنیوتنی استفاده شده است با افزایش پارامتر شاخص سازگاری سیال غیرنیوتنی و کاهش شاخص سیال غیرنیوتنی مقدار ذوب کاهش یافته است.

## منابع

- [1] C. Liang, X. Lingling, S. Hongbo, Z. Zhibin, Microencapsulation of butyl stearate as a phase change material by interfacial polycondensation in a polyurea system, Energy Conversion and Management, 50(3) (2009) 723-729.
- [2] J.M. Mahdi, S. Lohrasbi, D.D. Ganji, E.C. Nsofor, Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger, International Journal of Heat and Mass Transfer, 124 (2018) 663-676.
- [3] H. Xu, N. Wang, C. Zhang, Z. Qu, M. Cao, Optimization on the melting performance of triplex-layer PCMs in a horizontal finned shell and tube thermal energy storage unit, Applied Thermal Engineering, 176 (2020) 115409.
- [4] F. Li, M. Sheikholeslami, R.N. Dara, M. Jafaryar, A. Shafee, T. Nguyen-Thoi, Z. Li, Numerical study for nanofluid behavior inside a storage finned enclosure involving melting process, Journal of Molecular Liquids, 297 (2020) 111939.
- [5] A.A.R. Darzi, M. Jourabian, M. Farhadi, Melting and solidification of PCM enhanced by radial conductive fins and nanoparticles in cylindrical annulus, Energy conversion and management, 118 (2016) 253-263.
- [6] K. Bhagat, M. Prabhakar, S.K. Saha, Estimation of thermal performance and design optimization of finned multitube latent heat thermal energy storage, Journal of Energy Storage, 19 (2018) 135-144.
- [7] K. Hosseinzadeh, M. Alizadeh, M. Alipour, B. Jafari, D. Ganji, Effect of nanoparticle shape factor and snowflake crystal structure on discharging acceleration LHTESS

- change material in finned latent heat thermal storage units, *Applied Thermal Engineering*, 146 (2019) 45-60.
- [22] S. Motahar, N. Nikkam, A.A. Alemrajabi, R. Khodabandeh, M.S. Toprak, M. Muhammed, A novel phase change material containing mesoporous silica nanoparticles for thermal storage: a study on thermal conductivity and viscosity, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 56 (2014) 114-120.
- [23] H. Shokouhmand, B. Kamkari, Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 50 (2013) 201-212.
- [24] S. Mehryan, M. Vaezi, M. Sheremet, M. Ghalambaz, Melting heat transfer of power-law non-Newtonian phase change nano-enhanced n-octadecane-mesoporous silica (MPSiO<sub>2</sub>), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 151 (2020) 119385.
- [17] O. Turan, J. Lai, R.J. Poole, N. Chakraborty, Laminar natural convection of power-law fluids in a square enclosure submitted from below to a uniform heat flux density, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 199 (2013) 80-95.
- [18] M. Shojaeian, M. Yildiz, A. Koşar, Convective heat transfer and second law analysis of non-Newtonian fluid flows with variable thermophysical properties in circular channels, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 60 (2015) 21-31.
- [19] L. Vesjolaja, J.M. Bujalski, K. Vaagsaether, CFD Simulation of Solidification of non-Newtonian Fluid Flowing in a Complex Geometry Pipeline in Turbulent Flow Regime, (2018).
- [20] T. Myers, J. Low, Modelling the solidification of a power-law fluid flowing through a narrow pipe, *International journal of thermal sciences*, 70 (2013) 127-131.
- [21] R. Karami, B. Kamkari, Investigation of the effect of inclination angle on the melting enhancement of phase

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Davoodabadi Farahani , A. Davoodabadi Farahani, F. Tayebzadeh , *Melting Process of Phase Change Materials in a Triplex-Tube: Arrangement, Newtonian and Non-Newtonian*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(5) (2022) 1167-1180.

DOI: 10.22060/mej.2022.20390.7224

