

شبیه سازی عددی مبدل حرارتی سه لوله ای با مواد تغییر فاز دهنده و اثر تغییر شکل لوله با کارایی آنها

در این پژوهش از آب به عنوان سیال جاری در لوله های داخلی و خارجی، و لوله میانی به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل سه لوله ای استفاده شده است. با استفاده از روش آنتالپی متخلخل مقایسه ای بین لوله مستقیم، دندانهای و سینوسی به عنوان لوله درونی انجام شده است. همچنین بررسی ضریب کارایی، بازده انرژژی و انرژژی و تاثیر تغییر دبی جرمی بر ذوب ماده تغییر فاز دهنده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین زمان ذوب را در مبدل سه لوله ای، لوله سینوسی و همچنین برای ضریب کارایی، بازده انرژژی و انرژژی مبدل های سینوسی و دندانهای بهتر از لوله مستقیم می باشد. با افزایش دبی برای جریان آرام و مغشوش زمان ذوب به ترتیب حداکثر تا ۲/۶ و ۱۳/۵ درصد کاهش می یابد.

محمدرضا عساری^۱

دانشیار

حسن بصیرت تبریزی^۲

استاد

محسن پرور^۳

کارشناسی ارشد

رضا زکی زاده^۴

دانشجوی کارشناسی ارشد

واژه های راهنما: مبدل حرارتی، ماده تغییر فاز دهنده، ضریب کارایی، تحلیل انرژژی، تحلیل انرژژی، لوله سینوسی، لوله دندانهای

۱- مقدمه

انرژی گرمایی یکی از مهم ترین موضوعاتی است که بسیار مورد توجه دانشمندان می باشد که در حال حاضر تحقیق و بررسی برای یافتن راه های کار آمد تری برای ذخیره کردن می باشند. یکی از موثرترین روش ها این است که از سیستم های ذخیره سازی که از گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده (PCMs)^۵ استفاده می کنند، بهره بردارند. توانایی ذخیره کردن انرژی گرمایی بالا به دلیل ظرفیت گرمایی نهان بالای آن، محدوده های دمای گوناگون، کاربردهای فراوانی در صنایع، کارخانجات، هوا-فضا، خنک کننده های خورشیدی، سیستم های گرمایشی، و حتی تجهیزات خانگی که می تواند به عنوان مزایای آن در نظر گرفته شود. ضمناً، یکی از مهم ترین کاربردهای PCM ها استفاده از این مواد در مبدل های حرارتی است. رحیمی و همکاران [۱] در یک مطالعه

^۱ نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول assari@jsu.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران hbasirat@aut.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، مرکز پژوهشی جندی شاپور، دزفول Mohsen_parvar@jsu.ac.ir

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول reza97zakizadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

آزمایشگاهی به مقایسه ماده تغییرفازدهنده در مبدل حرارتی با و بدون فین پرداختند. نتیجه بدست آمده این بود که افزایش دمای سیال ورودی برای حالت بدون فین، زمان ذوب را به مقدار بیشتری نسبت به حالت فین دار کاهش می دهد. در ادامه رحیمی و همکاران [۲] در یک کار آزمایشگاهی، به فرایند ذوب و انجماد ماده تغییرفازدهنده در یک مبدل حرارتی فین و لوله را مورد بررسی قرار دادند. آن ها تاثیرات دبی و دمای سیال ورودی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهنده این بود که صرف نظر از رژیم جریان، استفاده از فین موجب افزایش دمای میانگین ماده تغییرفازدهنده گردیده است. مت^۱ و همکاران [۳] در یک شبیه سازی عددی به مطالعه فرآیند ذوب ماده تغییرفازدهنده در مبدل حرارتی سه لوله ای با فین های داخلی و خارجی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که حالت های مختلف قرارگیری فین، تاثیر چندانی در ذوب PCM نداشته و مشابه می باشند. همچنین دریافتند که استفاده از فین باعث کاهش زمان ذوب تا ۳۴/۴ درصد نسبت به حالت بدون فین می شود. پتکول^۲ و همکاران [۴] به بررسی بهبود انتقال حرارت در یک مبدل دو لوله ای که لوله داخلی به حالت مارپیچ و موج دار بوده، پرداختند. در این تحقیق انتقال حرارت، عملکرد حرارتی و ضریب اصکاک لوله موج دار بصورت تجربی بررسی و مقایسه ای با لوله صاف نیز انجام گرفت. عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در این لوله ها به ترتیب ۳/۰۱ و ۲/۱۴ برای لوله صاف بدست آمده است. چن^۳ و همکاران [۵] به بررسی عددی و تجربی سیستم ذخیره سازی انرژی با لوله مارپیچ و استفاده از پارافین و گرافیت فشرده به عنوان PCM پرداختند. کاهش زمان ذخیره سازی انرژی با افزایش عدد رینولدز و اختلاف دما سیال با PCM رخ می دهد. اما باید دقت کرد که افزایش همزمان آن ها بیشتر از میزان موثر به تلفات حرارتی می انجامد و رینولدز نباید از مرز ۸۷۰۰ عبور کند. امینی و همکاران [۶] عملکرد گرمایی یک مبدل گرمایی پوسته و لوله به صورت عددی را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه عددی به دنبال تاثیر فین در بازده مبدل تحت تاثیر دو پارامتر مستقل قابل تنظیم یعنی گام پره و ارتفاع پره در حالی که زبری سطح ثابت است. در نهایت یک طرح جدیدی از فین ها، فین مارپیچی ارائه شد. نتایج مطرح شده به این صورت بود که فین به طور کلی بازده مبدل حرارتی را افزایش می دهد؛ و دیگر اینکه فین های مارپیچی کارایی مبدل حرارتی را تا ۱۷ درصد در مقایسه با لوله های ساده افزایش می دهند. آل عبیدی^۴ و همکاران [۷]، انتقال حرارت در مبدل سه لوله ای با استفاده از پره های داخلی و خارجی برای ذوب یک ماده PCM را با نرم افزار فلوئنت بررسی کردند. پارامترهایی همچون تعداد پره، طول پره، عدد استفان، مواد بکار رفته و اثر شکل بر اتمام ذوب در PCM را بحث نمودند. نتایج محاسبات آنها، نشان داد که اثر شکل پره در لوله زمان کوتاه تری برای تکمیل ذوب در PCM را نیاز دارد و زمان ذوب به ۳۴/۷ درصد حالت بدون پره می رسد. آل عبیدی و همکاران [۸] در مبدل سه لوله ای برای سیستم تهویه مطبوع بهره بردند. آنها به سه روش انتقال حرارت در مبدل حرارتی سه لوله ای پرداختند. روش اول از لوله داخلی، روش دوم از لوله خارجی و در روش سوم از هر دو لوله داخلی و خارجی به PCM حرارت انتقال یافت. روش اول ذوب کامل رخ نداد ولی در روش های دیگر به ذوب مورد نظر رسیدند و ذوب کامل حاصل شد. در این روش کوتاهترین زمان ذوب متعلق به روش سوم مشخص گردید، که در این روش می توان از پایین ترین دما بیشترین ذوب

¹ Mat

² Pethkool

³ Chen

⁴ Al-Abidi

PCM را بدست آورد. در ادامه آل عبیدی و همکاران [۹] پژوهشی تجربی را پیرامون فرایند ذوب و انجماد PCM در یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای با پره را بررسی کردند. در این تحقیق به روند شارژ PCM تحت شرایط پایدار و ناپایدار دمایی سیال انتقال حرارت (HTF) و اثر نرخ جریان را بر فرایند ذوب بررسی گردید. همچنین به آنالیز گرادیان‌های دمایی PCM در جهت شعاعی و زاویه‌ای پرداخته شد. نتیجه حاصله نمایانگر غالب بودن اثر دمایی HTF نسبت به نرخ جریان بر روی روند ذوب می‌باشد. زمان شارژ برای نرخ جریان تا ۵۸ درصد و برای دمایی سیال HTF تا ۸۶ درصد از خود کاهش نشان داد. سورامانیان^۲ و همکاران [۱۰] پژوهشی تجربی را بر تاثیر فین‌های داخلی و خارجی در ذوب PCM در مبدل حرارتی سه لوله‌ای انجام دادند. برای دستیابی به بالاترین عملکرد حرارتی و درجه حرارت PCM در طول‌های متفاوتی آزمایش‌هایی انجام گردید. نتایج حاصله بیانگر آن بود که انتقال حرارت با افزایش طول فین افزایش و زمان رسیدن به حداکثر دما با کاهش طول فین کاهش می‌یابد. اتلاف حرارتی با طول فین نسبت مستقیم دارد و چنانچه طول فین از میزان موثر عبور کند انتقال حرارت کاهش یافته و بازدهی کم می‌شود. ساری و همکاران [۱۱] بصورت آزمایشگاهی در یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی بصورت پوسته و لوله به بررسی ذوب و انجماد پرداختند. نتایج نشان دهنده این بود که در طی فرایند ذوب نرخ انتقال حرارت به علت اثر جابه‌جایی طبیعی نسبت به فرایند انجماد بیشتر است. عیسی پور و همکاران [۱۲] به بررسی تغییر فاز در مبدل حرارتی چند لوله‌ای پرداختند. سیال درون لوله‌های داخلی و خارجی آب، از RT۳۵ به عنوان PCM استفاده شده است. خواص ذوب RT۳۵ در مبدل گرما با تعداد لوله‌های متفاوت بررسی شده و مقایسه‌ای بین دو لوله و چند لوله‌ای صورت گرفته است. براساس نتایج حاصله زمان ذوب تا ۲۹ درصد برای چهار لوله کاهش یافته‌است. ضریب کاهش زمان ذوب در دماهای کاری پایین افزایش و با افزایش دما افزایش می‌یابد. در مقایسه بین دو لوله‌ای و چند لوله‌ای اثر نرخ سیال و دمایی سیال ورودی در چند لوله‌ای بیشتر از حالت دو لوله‌ای بوده است. اسلام نژاد و رحیمی [۱۳] به بهبود فرایند انتقال حرارت در مبدل سه لوله‌ای همراه با PCM و فین پرداختند. یک مبدل دو بعدی به وسیله نرم افزار فلوئنت ایجاد شده و انتقال حرارت رسانش و جابه‌جایی طبیعی بررسی شده‌اند. در این پژوهش هدف کاهش زمان ذوب PCM بوده و بهترین چیدمان فین برای بهبود جابه‌جایی طبیعی تعیین گردید. عصارى و همکاران [۱۴] مطالعه با آزمایش‌هایی، اثر لوله‌های تمام دامنه و نیم دامنه سینوسی به عنوان لوله داخلی در مبدل حرارتی سه لوله‌ای با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده را مورد بررسی قرار دادند. طول و قطر لوله‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که مساحت هر دو لوله یکسان باشد و فرآیندهای شارژ و دشارژ کردن به وسیله لوله داخلی، لوله بیرونی و هر دو لوله‌ای درونی و بیرونی انجام شده است. نتایج آنها نشان داده که ذوب و انجماد PCM برای لوله داخلی سینوسی تمام دامنه، در فرآیندهای شارژ و دشارژ در زمان کوتاه‌تری صورت می‌پذیرد. از طرفی در خصوص تحلیل انرژی و انرژی، آل عبیدی و همکاران [۱۵] عملکرد فین در مبدل سه لوله‌ای که در آن لوله میانی PCM و سیال آب گرم از لوله داخلی و خارجی عبور داده شده بود را بررسی نمودند. نتایج نشان دهنده آن بود که بازده انرژی مبدل حرارتی سه لوله‌ای همراه با فین ۷۱/۸ درصد می‌باشد. اکیف ایزن^۳ و همکاران [۱۶] یک دوره شارژ یک سیستم ذخیره انرژی حرارتی سیم پیچ را بر روی یخ به روش تجربی انجام دادند. نتایج براین اساس بود که با

¹ heat transfer fluid

² Subramaniyan

³ Akif Ezan

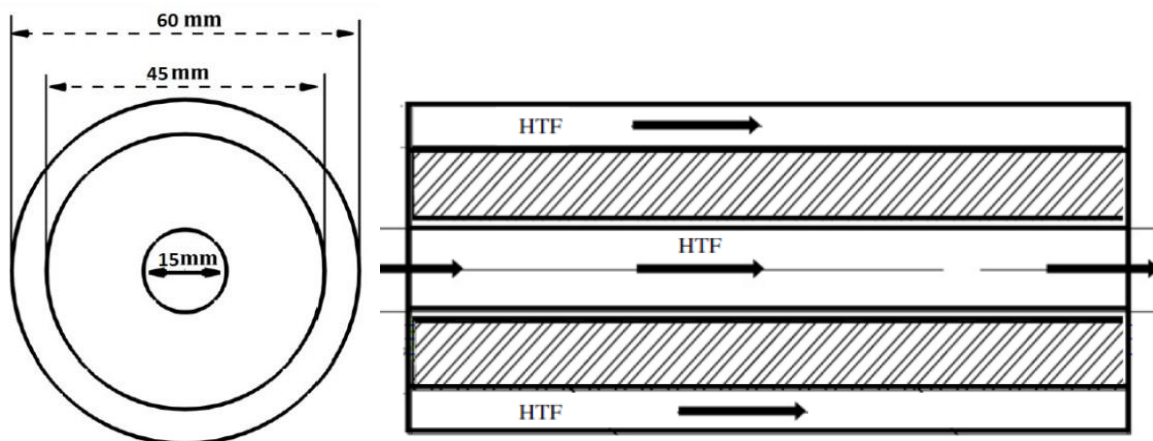
افزایش دبی جرمی، نرخ انتقال حرارت و بازده انرژی افزایش و همچنین با افزایش دمای ورودی سیال انتقال حرارت بازده انرژی افزایش می یابد. کان یانگ و همکاران [۱۷] به بررسی عملکرد یک ماده تغییرفازدهنده در یک مبدل سه لوله ای به صورت عددی پرداختند. نتایج نشان دهنده این بود که افزایش دمای ورودی با رژیم جریان مغشوش در HTF می تواند عملکرد حرارتی را بهبود بخشد، هرچند با افزایش دبی جرمی بازده انرژی کاهش می یابد.

مطالعات گوناگونی بر استفاده از PCM ها در مبدل حرارتی، انجام شده است و ضریب رسانش گرمایی پایین PCM ها برای تبدیل انرژی یک چالش ایجاد کرده است. با این حال تاکنون مقایسه ای بین لوله سینوسی، دندانهای و مستقیم در قالب بهینه بودن و بهترین شکل لوله در مبدل برای بالاترین کارایی آن ها مورد بررسی قرار نگرفته است. و همچنین تاکنون مقایسه ای بین مبدل حرارتی سه لوله ای برای ضریب کارایی در هنگامی که ماده تغییرفازدهنده کامل ذوب می شود انجام نگرفته است. در این پژوهش یک مبدل حرارتی سه لوله با مواد تغییر فازدهنده شبیه سازی شده و به مقایسه لوله هایی به شکل سینوسی، دندانهای و مستقیم پرداخته می شود. این بررسی به دنبال پیدا کردن بهترین طراحی شکل لوله در مبدل حرارتی جهت یافتن بالاترین بازده برای انرژی و انرژی و ذوب ماده تغییر فازدهنده در مبدل می باشد.

۲- مدل فیزیکی

۲-۱- مدل فیزیکی مبدل سه لوله ای

مدل مورد بررسی مطابق شکل (۱) از یک مبدل حرارتی سه لوله ای (حالت پایه) با مشخصات هندسی با طول ۱۵۲ میلی متر، قطرهای داخلی ۱۵ میلی متر، میانی ۴۵ میلی متر و بیرونی ۶۰ میلی متر می باشد. سیال انتقال دهنده حرارت آب و در تمامی حالات جرم ماده تغییر فازدهنده ثابت در نظر گرفته شده است. از RT_{35} ، به عنوان ماده تغییر فازدهنده در لوله میانی بین لوله های سیال گرم استفاده شده و همزمان لوله های درونی و لوله بیرونی عمل شارژ و دشارژ را انجام می دهند. خواص ترموفیزیکی این ماده در جدول (۱) آورده شده است. ضخامت لوله ها ۰/۲ میلی متر، جریان در لوله ها همسو و دمای اولیه کل مجموعه، ۲۹۸ درجه کلوین است.



شکل ۱- شکل هندسی حالت پایه

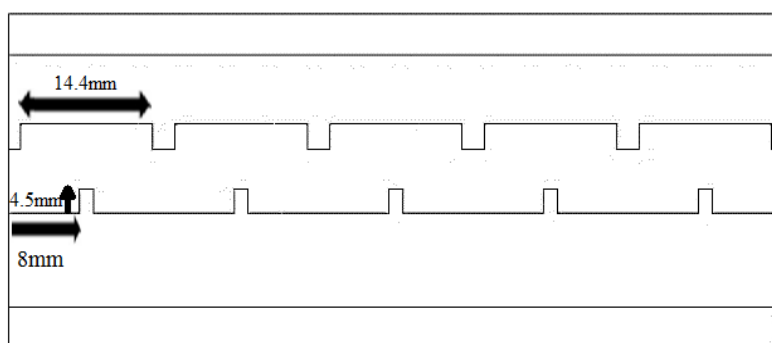
جدول ۱- خواص ترموفیزیکی RT35 [۱۹]

مقدار	خاصیت
۳۰۲	دمای ابتدایی محدوده ذوب (K)
۳۰۹	دمای انتهایی محدوده ذوب (K)
۸۱۵	چگالی (kgm^{-3})
۰/۰۲۳	ویسکوزیته (kg/m s)
۲۰۰۰	گرمای ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
۰/۲	ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
۱۷۰۰۰۰	گرمای نهان (Jkg^{-1})
۰/۰۰۰۶	ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})

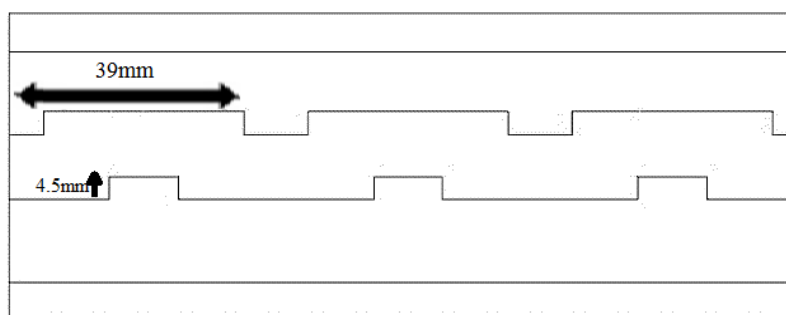
حالت‌های مختلف مبدل حرارتی سه لوله‌ای که شامل لوله سینوسی و دندان‌های با سه گام و پنج گام مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۲) اشکال مختلف و در جدول (۲)، قطر لوله‌های داخلی سیال گرم و رینولدز برای حالت‌های مختلف مبدل حرارتی سه لوله‌ای نشان داده شده است. دبی ورودی ثابت ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه و دمای ورودی ۳۴۳ کلوین می‌باشد. عدد رینولدز در حالت پایه ۱۲۵۷/۵۲ می‌باشد و همچنین دبی جرمی ۰/۰۲۴ و ۰/۰۰۶ کیلوگرم بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است.

فرضیات مسئله در نظر گرفته شده عبارتند از:

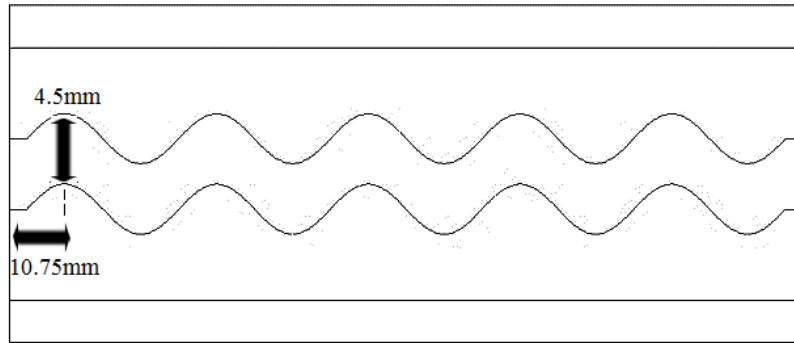
- جریان غیردائم، غیرقابل تراکم، و سه بعدی، بررسی‌ها در دو حالت جریان آرام و آشفتگی انجام شده است.
- دمای ابتدایی ماده تغییرناپذیر در ابتدای فرآیند ذوب یکنواخت و برابر با دمای محیط قرار داده شده است.
- سطح بیرونی مبدل عایق در نظر گرفته شده است.



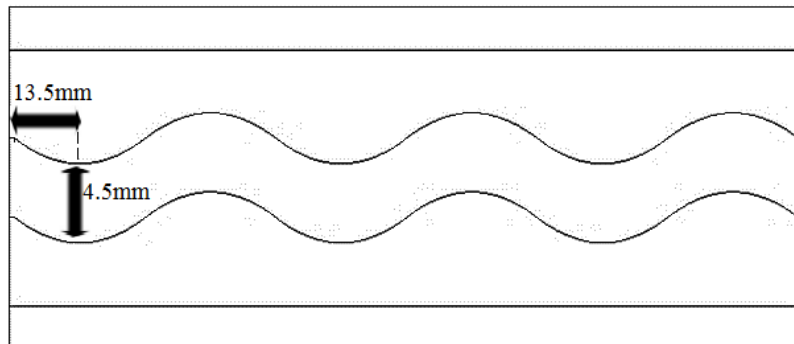
لوله دندان‌های با پنج گام



لوله دندان‌های با سه گام



لوله سینوسی با پنج گام



لوله سینوسی با سه گام

شکل ۲- اشکال مختلف برای مبدل سه لوله ای

جدول ۲- حالت های شبیه سازی مبدل حرارتی سه لوله ای با ضخامت ۰/۲ میلی متر دمای ۳۴۳ درجه کلوین

دبی جرمی (kg/s)	رینولدز		طول لوله (mm)	قطر (mm)	نوع لوله
	لوله خارجی	لوله داخلی			
جریان آرام					
۰/۰۰۶	۶۲۸/۷۶	۶۲۸/۷۶	۱۵۲	۱۵	مستقیم
		۸۱۴/۸۷	۱۹۶/۹۹۳	۱۱/۵۷۴	دندانه ای با پنج گام
		۷۵۲/۱۰۵	۱۸۱/۸۱۸	۱۲/۵۴	سینوسی با پنج گام
۰/۰۱۲	۱۲۵۷/۵۲	۱۲۵۷/۵۲	۱۵۲	۱۵	مستقیم
		۱۶۲۹/۷۵	۱۹۶/۹۹۳	۱۱/۵۷۴	دندانه ای با پنج گام
		۱۵۰۴/۲۱	۱۸۱/۸۱۸	۱۲/۵۴	سینوسی با پنج گام
		۱۴۸۹/۱۲	۱۷۹/۹۹۵	۱۲/۶۶۷	دندانه ای با سه گام
		۱۳۵۶/۵۴	۱۶۳/۹۶۹	۱۳/۹۰۵	سینوسی با سه گام
جریان مغشوش					
۰/۰۲۴	۲۵۱۵/۴	۲۵۱۵/۴	۱۵۲	۱۵	مستقیم
		۳۲۵۹/۵۱	۱۹۶/۹۹۳	۱۱/۵۷۴	دندانه ای با پنج گام
		۳۰۰۸/۴۲	۱۸۱/۸۱۸	۱۲/۵۴	سینوسی با پنج گام

۲-۲- مدلسازی و معادلات آن

مدلسازی فرآیند تغییر فاز از روش آنتالپی متخلخل استفاده شده است. در این روش، کسر مایع ذوب در هر سلول بر پایه موازنه آنتالپی در هر تکرار محاسبه می‌گردد. ناحیه خمیری ناحیه‌ای است که در آن تخلخل با ذوب ماده تغییر فزاینده از ۰ تا ۱ افزایش پیدا می‌کند. هنگامی که ناحیه‌ای به طور کامل منجمد گردد، تخلخل صفر گشته و سرعت جریان در این ناحیه تا صفر کاهش پیدا می‌کند. جریان آب درون لوله‌ها اعداد رینولدز کمتر از ۲۳۰۰ به عنوان جریان آرام و اعداد رینولدز بالای ۲۳۰۰ به عنوان جریان مغشوش محسوب گردید. در تحقیق حاضر برای جریان مغشوش مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است و معادلات حاکم برای جریان آرام و مغشوش را بصورت ذیل استفاده شد [۱۸].

پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

مومنوم برای جریان آرام:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S \quad (2)$$

مومنوم برای جریان مغشوش:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_i) = -\frac{\partial P'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S \quad (3)$$

انرژی برای جریان آرام:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_{\text{tot}}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h_{\text{tot}}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\tau_{ij})] \quad (4)$$

انرژی برای جریان مغشوش:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_{\text{tot}}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h_{\text{tot}}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\tau_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j)] \quad (5)$$

انرژی جنبشی k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + Y_M + S_k \quad (6)$$

پراکنش آشفته‌گی: ε :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - \rho c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (8)$$

فشار اصلاح شده:

$$P' = P + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (9)$$

انرژی برای محفظه PCM:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho U H) = \nabla \cdot (-K \nabla T) \quad (10)$$

در روابط ۶ و ۷، G_k تولید انرژی جنبشی به دلیل وجود نیروی لزجی، G_b تولید انرژی جنبشی به دلیل نیروی بویانسی و Y_M در رابطه ۶ سهم انبساط نوسانی اغتشاشات تراکم پذیر در نرخ تلفات کلی می‌باشد [۱۸-۱۹]. به علاوه ترم‌های S ، ρ ، U ، T ، P ، μ_{eff} ، ε ، k ، به ترتیب نیروی حجمی، چگالی، سرعت، دما، فشار، ویسکوزیته موثر، پراکنش آشفته‌گی و نیروی جنبشی آشفته‌گی موثر هستند. در مدل آشفته‌گی، $c_{1\varepsilon}$ ، $c_{2\varepsilon}$ ، σ_k ، σ_ε و c_μ مقادیر ثابت هستند که در آن $c_{1\varepsilon}=1/44$ ، $c_{2\varepsilon}=1/92$ ، $\sigma_k=1$ ، $\sigma_\varepsilon=1/3$ و $c_\mu=0.09$. μ_t ویسکوزیته آشفته‌گی است که به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

آنتالپی ماده به صورت مجموع آنتالپی محسوس و آنتالپی نهان است: [۱۲]

$$H = h + \Delta H \quad (12)$$

که

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^t c_p dT \quad (13)$$

مقدار گرمای نهان می‌تواند به صورت گرمای نهان ماده محاسبه گردد:

$$\Delta H = \lambda L \quad (14)$$

که $\frac{\Delta H}{L}$ می‌تواند از صفر (جامد) تا یک (مایع) تغییر کند. به همین منظور، کسر حجمی ذوب به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{\Delta H}{L} = 0 & \text{if } T < T_s \\ \frac{\Delta H}{L} = 1 & \text{if } T > T_L \\ \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_s}{T_L - T_s} & \text{if } T_s < T < T_L \end{cases} \quad (15)$$

در رابطه ۲، ترم S تعدیل قانون داری است که به علت اثرات تغییر فاز در انتقال حرارت جابه‌جایی به رابطه مومنتوم اضافه می‌شود.

$$S = \frac{(1 - \lambda)^2}{\lambda^3} A_{\text{mush}} U \quad (16)$$

که A_{mush} ثابت خمیری می‌باشد. ثابت خمیری از 10^4 تا 10^7 تغییر می‌کند. [۱۲]
محاسبه انتقال حرارت بین سیال و ماده تغییر فاز دهنده:

گرمای کل ذخیره شده Q می‌باشد که مجموع سهم های PCM و سیال است. انتقال حرارت بین سیال و PCM با فرض همدمای بودن در آغاز و پایان با شرط زیر برقرار است. [۱۸]

$$Q = V^{\text{HTF}} \cdot \rho^{\text{HTF}} \cdot c_p^{\text{HTF}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{in}}) + V^{\text{PCM}} \cdot \rho^{\text{PCM}} \cdot (h_{\text{PCM}}(T_{\text{max}}) - h_{\text{PCM}}(T_{\text{in}})) \quad (17)$$

که به عنوان اختلاف دما، ماکزیمم دمایی که ذخیره سازی حرارت داده می‌شود را T_{max} و حداقل دمایی که می‌توان آن را خنک کرد، T_{in} استفاده می‌شود. بعلاوه ترم‌های V^{HTF} ، ρ^{HTF} ، c_p^{HTF} ، V^{PCM} ، ρ^{PCM} و h_{PCM} که به ترتیب حجم سیال، چگالی سیال، ظرفیت گرمایی سیال، حجم ماده تغییر فاز دهنده، چگالی ماده تغییر فاز دهنده و آنتالپی تغییر فاز هستند.

برای بدست آوردن بازده انرژی از رابطه زیر استفاده شده: [۱۶]

$$\eta_{\text{ch}} = \frac{Q_{\text{PCM, ch}}}{Q_{\text{HTF, ch}}} \quad (18)$$

که در آن $Q_{\text{PCM, ch}}$ گرمای انتقال حرارت PCM و $Q_{\text{HTF, ch}}$ گرمای انتقال حرارت سیال در حالت شارژ می‌باشد. همچنین برای بدست آوردن بازده تحلیل انرژی از رابطه زیر استفاده می‌شود: [۱۶]

$$\Psi_{\text{ch}} = \frac{Ex_{\text{stored}}}{Ex_{\text{HTF, ch}}} \quad (19)$$

که در آن EX_{stored} اگزرژی ذخیره شده و $EX_{HTF,ch}$ اگزرژی سیال در حالت شارژ می باشد. به منظور بدست آوردن ضریب کارایی در فرآیند تغییر فاز از روش روش ϵ -NTU استفاده شده است. که ضریب کارایی با توجه به تعریف در گستره بین ۰ تا ۱ و بی بعد می باشد و تعداد واحد های انتقال یک پارامتر بی بعد است که برای تحلیل مبدل گرمایی استفاده می شود. [۱۹]

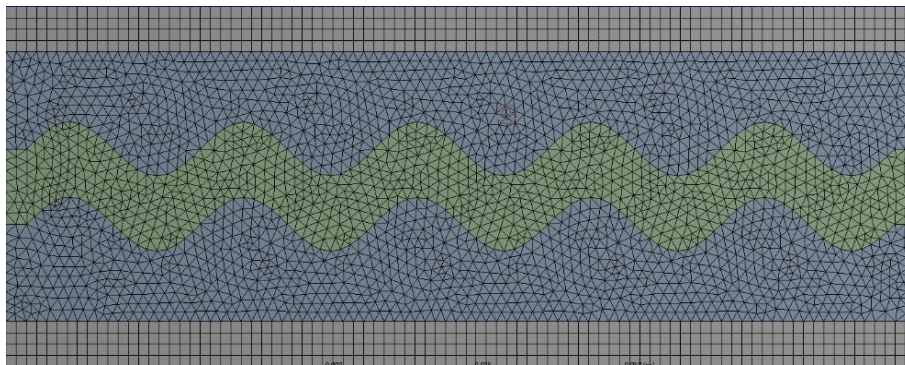
۳-۲- نوع حلگر و شرایط مرزی

شبه سازی انجام شده سه بعدی و به علت تقارن جریان از شرط مرزی تقارن^۱ استفاده شده است، در حل مسئله نیمی از هندسه جهت مدل سازی در نظر گرفته شده است. مدل آرام و مغشوش برای ویسکوزیته و الگوریتم سیمپل^۲ برای حل معادلات انتخاب شده است. همچنین از طرح تفکیک کوئیک^۳ برای حل معادلات مومنتوم و انرژی استفاده شده است. [۱۲] همچنین معادلات تصحیح فشار با استفاده از طرح پرس تو^۴ حل شده است. ضرایب تخفیف^۵ برای فاکتورهای فشار، سرعت، انرژی و کسر حجمی مایع به ترتیب ۰/۳، ۰/۶، ۱ و ۰/۹ می باشد. تنظیمات ورودی اولیه برای لوله داخلی و خارجی بر روی دبی جرمی ورودی^۶ و برای خروجی برای لوله داخلی و خارجی بر روی فشار^۷ تنظیم شده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود، شبکه بندی^۸ مربوطه از ساختار سه وجهی^۹ و چهار وجهی^۱ می باشد. شرایط مرزی مسئله شامل شرایط مرزی جریان درون لوله ها و شرط مرزی دیواره ها می باشد. شرط مرزی برای ورودی لوله ها عبارتند از:

$$u = v = 0 \text{ و } w = w_{in} \text{ و } T = T_{in}$$

شرط مرزی برای دیواره های مشترک عبارتند از:

$$q_f'' = q_{pcm}''$$

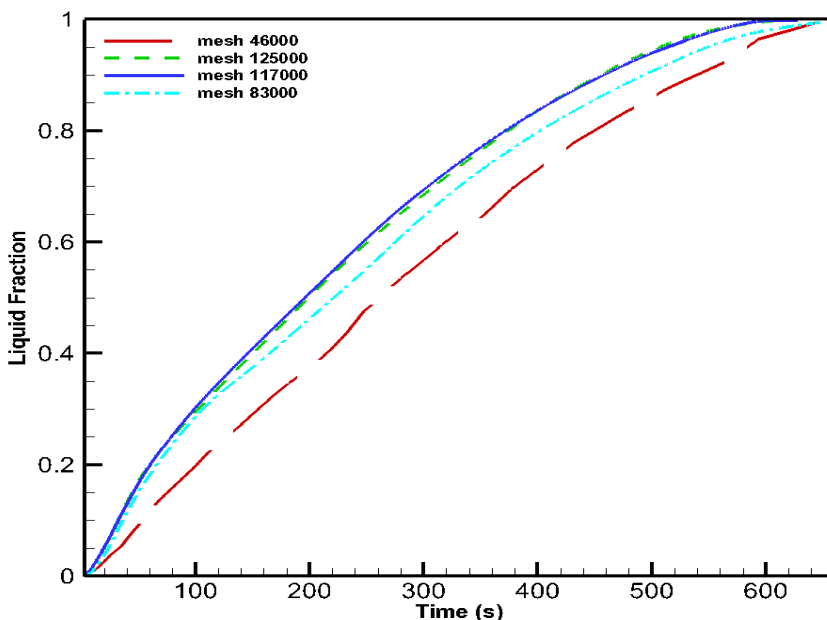


شکل ۳- شبکه محاسباتی برای مدل سینوسی

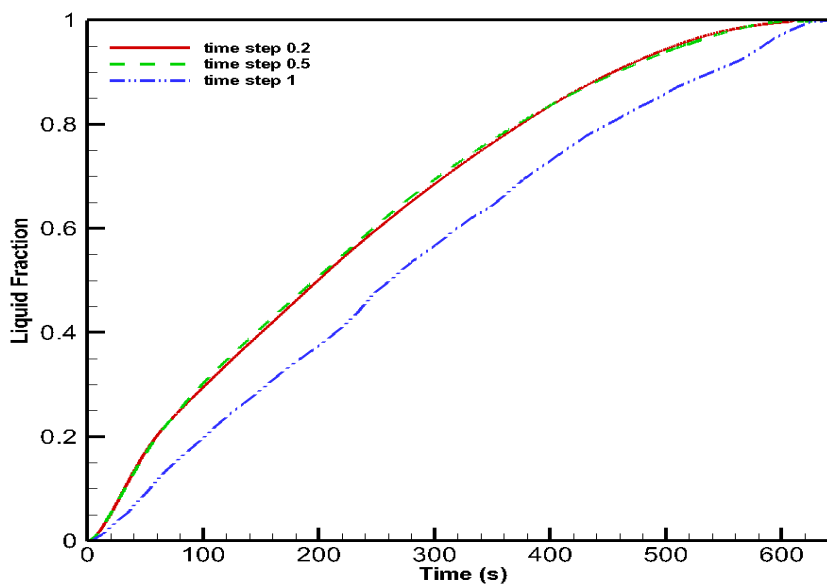
- 1 symmetry
- 2 simple
- 3 QUICK
- 4 PRESTO
- 5 Under-relaxation
- 6 Mass Flow Inlet
- 7 Pressure outlet
- 8 mesh
- 9 trihedral
- 1 tetrahedral

۲-۴- استقلال شبکه

برای شبکه بندی مناسب دو مطلب باید مورد توجه قرارگیرد. نخست اینکه تراکم بندی شبکه و دیگر تعداد حجم مناسب برای رسیدن به یک حل قابل قبول می باشد. دراین شبیه سازی، معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و ممنتوم 10^{-5} ، و معادله انرژی 10^{-6} در نظر گرفته شده است. [۱۲] بررسی تاثیر تعداد مش و گام زمانی بر حل عددی لوله مستقیم، چهار شبکه مختلف با ۴۶۰۰۰ و ۸۳۰۰۰ و ۱۱۷۰۰۰ و ۱۲۵۰۰۰ سلول، مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت تعداد مش ۱۱۷۰۰۰ به عنوان شبکه مناسب انتخاب گردید. همچنین گام زمانی برای شبیه سازی، ۰/۵ ثانیه انتخاب شد. نتایج مربوطه به استقلال از شبکه و گام زمانی در شکل (۴) الف) و (۴) ب) و در جدول (۳) و (۴) آورده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) استقلال اندازه مش، ب) استقلال از گام زمان

جدول ۳- تعداد شبکه های انتخابی برای حالت های مختلف

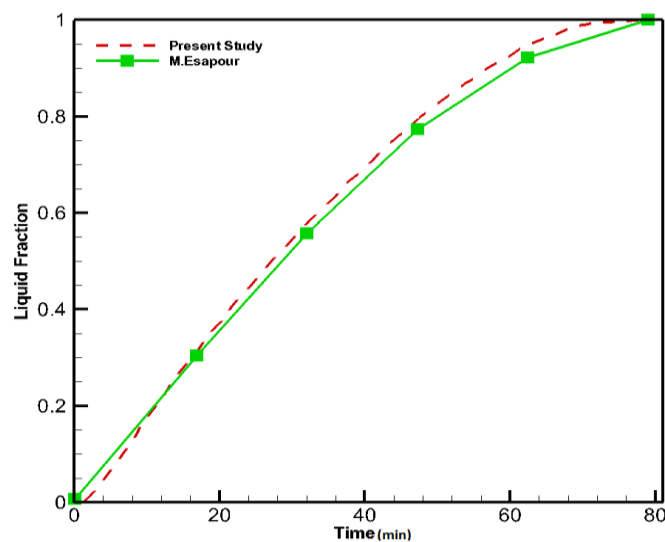
درصد تغییر	تعداد شبکه				نوع لوله
۰/۴۱	۴۶۰۰۰	۸۳۰۰۰	۱۱۷۰۰۰	۱۲۵۰۰۰	مستقیم
۰/۸۷	۸۶۰۰۰	۹۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	دندانه ای با پنج گام
۰/۷۲	۹۰۰۰۰	۱۱۵۰۰۰	۱۸۴۰۰۰	۲۳۰۰۰۰	سینوسی با پنج گام
۱/۲۱	۷۷۰۰۰	۹۵۰۰۰	۱۱۱۰۰۰	۱۴۶۰۰۰	دندانه ای با سه گام
۱/۵۳	۸۲۰۰۰	۱۰۵۰۰۰	۱۳۵۰۰۰	۱۶۰۰۰۰	سینوسی با سه گام

جدول ۴- گام زمانی انتخابی برای حالت های مختلف

درصد تغییر	گام زمانی			نوع لوله
۱/۰۵	۱	۰/۵	۰/۲	مستقیم
۱/۷۶	۰/۷	۰/۵	۰/۲	دندانه ای با پنج گام
۱/۳۱	۱	۰/۵	۰/۲	سینوسی با پنج گام
۱/۹۷	۱	۰/۵	۰/۲	دندانه ای با سه گام
۲/۳۲	۱	۰/۵	۰/۲	سینوسی با سه گام

۵-۲- اعتبار سنجی

برای اعتبار سنجی مدل و دقت شبیه سازی، مطالعه حاضر با داده های عددی عیسی پور و همکاران در شکل (۵) برای کسر حجمی ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل سه لوله ای مقایسه و نشان داده شده است. ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده در کار عیسی پور و همکاران [۱۲] RT۳۵ است. و طول مبدل ۱ متر، قطر لوله داخلی، لوله میانی و لوله بیرونی بترتیب ۳۰، ۹۵ و ۱۲۵ میلی متری باشد. دبی ۰/۰۲۴ کیلوگرم بر ثانیه و دما ۳۲۳ درجه کلین است. مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی این مطالعه و شبیه سازی عددی عیسی پور و همکاران نشان از ۷/۴۱ درصد خطا دارد که نشان می دهد همخوانی خوبی با یکدیگر دارند.

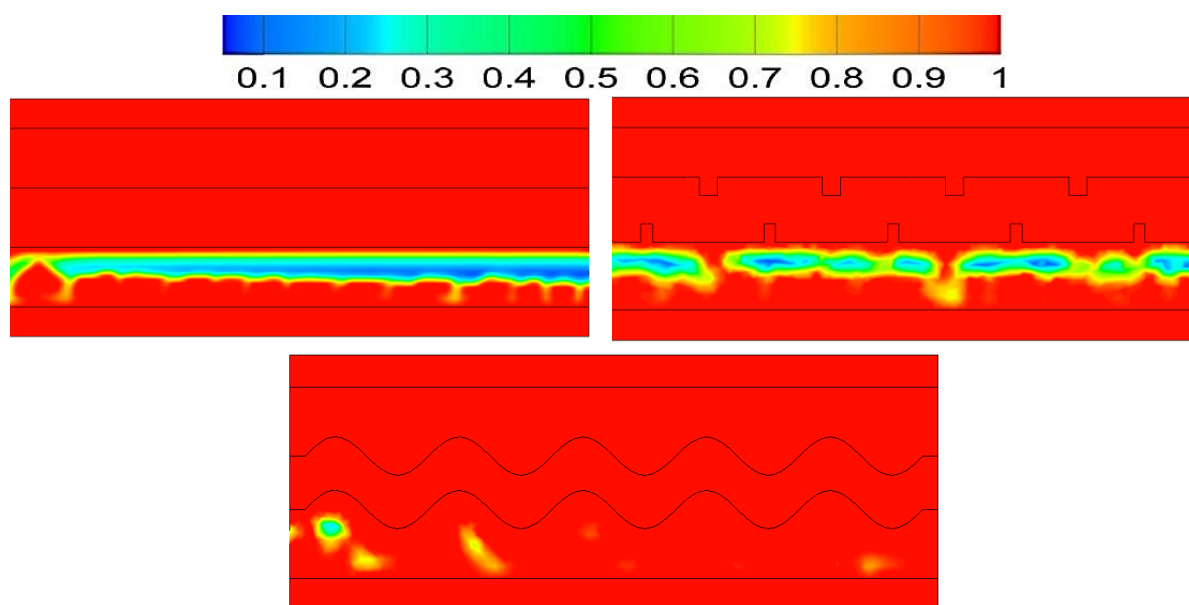


شکل ۵- مقایسه کسر مایع ماده تغییر فاز دهنده بین مطالعه حاضر و عیسی پور و همکاران [۱۲]

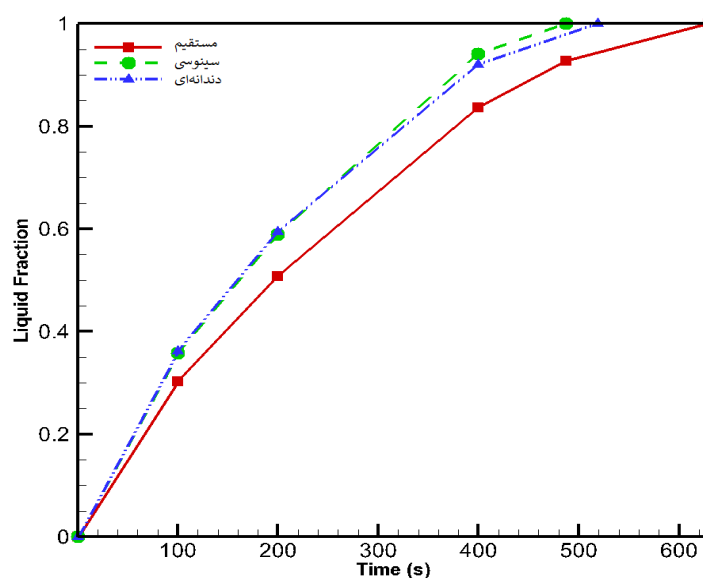
۳- بررسی نتایج شبیه سازی ها

۳-۱- کانتور کسر حجمی مایع مبدل‌های سه لوله‌ای

کسر حجمی مایع برای حالت‌های مختلف مبدل حرارتی سه لوله‌ای به ازای دمای ۳۴۳ درجه کلوین و دبی جرمی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه برای زمان ۴۵۰ ثانیه در شکل (۶) و (۷) نشان داده شده است. در اوایل فرآیند، لایه ذوب در اطراف لوله داخلی به دلیل انتقال حرارت هدایت بوده و نیروی بویانسی موجب رشد لایه ذوب شده و در طول انتقال حرارت جابجایی طبیعی است. کانتور کسر مایع که در شکل (۶) قابل مشاهده است نشان داده، که لوله سینوسی ذوب بهتری نسبت به لوله مستقیم و لوله دندان‌های دارد.



شکل ۶- کسر حجمی مایع برای حالت‌های مختلف مبدل حرارتی سه لوله‌ای به ازای دمای ۳۴۳ درجه کلوین و دبی جرمی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه (۴۵۰ ثانیه)



شکل ۷- نمودار کسر حجمی مایع مبدل حرارتی سه لوله‌ای به ازای دمای ۳۴۳ درجه کلوین و دبی جرمی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه

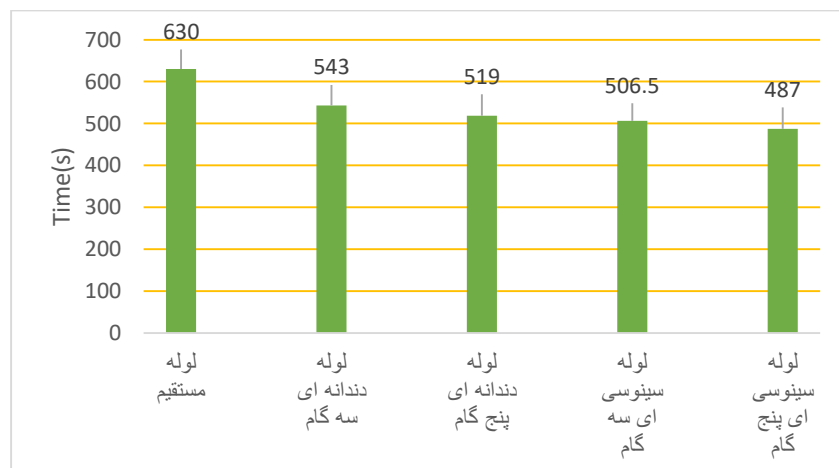
باتوجه به اطلاعات بدست آمده در شبیه سازی، نشان می دهد که در حالت تک لوله ای به علت سطح انتقال حرارت جابجایی کمتر، نسبت به حالت سینوسی و دندانهای میزان ذوب کمتری دارد. در نتیجه می توان بیان کرد با افزایش سطح انتقال حرارت میزان ذوب ماده تغییر فاز دهنده بیشتر خواهد شد.

۲-۳- اثر گام بر لوله های سینوسی و دندانهای ای در مبدل های سه لوله ای

کسر حجمی مایع مبدل حرارتی لوله سینوسی و دندانهای ای به ازای دمای ورودی ۳۴۳ درجه کلونین و دبی جرمی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه در جدول (۵) نشان داده شده است. اثر ذوب ماده تغییر فاز دهنده در لوله سینوسی پنج گام و دندانهای ای با پنج گام بیشتر از لوله سینوسی سه گام و دندانهای ای با سه گام می باشد. به دلیل تعداد گام بیشتر درگیری لوله ها با PCM بیشتر شده و در نتیجه زمان ذوب در لوله سینوسی و دندانهای ای با پنج گام زودتر از لوله با سه گام می باشد. بنابراین هرچه تعداد گام بیشتر باشد در لوله های سینوسی و دندانهای ای اثر ذوب بهتری را دارد. در ادامه کار از بهترین گام که پنج گام می باشد برای لوله سینوسی و دندانهای ای استفاده شده است. در شکل (۸) زمان ذوب را برای حالت های مختلف مبدل حرارتی سه لوله ای نشان داده شده است. همانطور که از شکل می توان استنباط نمود لوله سینوسی با پنج گام زمان ذوب بهتری نشان داده است. در لوله سینوسی با پنج گام ۲۹/۳۶ درصد کاهش در زمان ذوب نسبت به حالت پایه دارد و برای حالت دندانهای ای با پنج گام، دندانهای ای با سه گام و سینوسی با سه گام به ترتیب ۲۱/۳۸، ۱۶/۰۲ و ۲۴/۳۸ درصد می باشد.

جدول ۵- کسر حجمی مایع برای لوله های سینوسی و دندانهای ای در دمای ورودی ۳۴۳ درجه کلونین و دبی جرمی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه

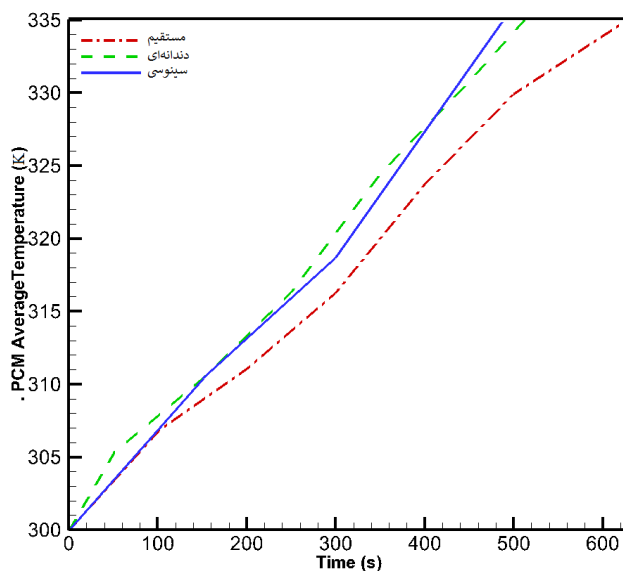
درصد تغییرات نسبت به زمان ۴۵۰ ثانیه	زمان (ثانیه)			نوع لوله
	۴۵۰	۳۰۰	۱۵۰	
۲/۰۳ %	۰/۹۹۰۵	۰/۸۰۰۲	۰/۴۷۴۵	سینوسی با پنج گام
	۰/۹۷۰۸	۰/۷۷۳۴	۰/۴۷۱۱	سینوسی با سه گام
۱/۱۵ %	۰/۹۶۷۳	۰/۷۸۹۷	۰/۴۷۵۶	دندانهای ای با پنج گام
	۰/۹۵۶۳	۰/۷۷۷۶	۰/۴۶۷۲	دندانهای ای با سه گام



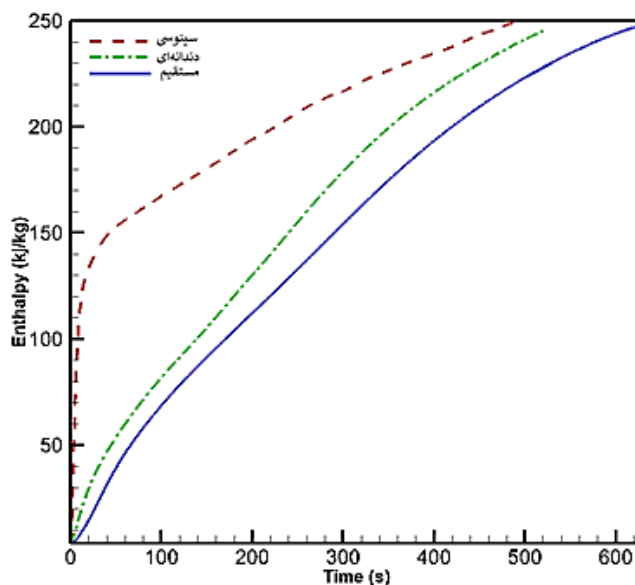
شکل ۸- زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای حالت های مختلف مبدل حرارتی سه لوله ای به ازای دمای ۳۴۳ درجه کلونین و دبی جرمی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه

۳-۳- دمای متوسط ماده تغییر فازدهنده در مبدل‌های سه لوله‌ای

شکل (۹ الف)، مقایسه نمودار دمای متوسط PCM برای مبدل حرارتی سه لوله‌ای با لوله مستقیم، سینوسی و دندان‌های به ازای دمای ورودی ۳۴۳ درجه کلوین و دبی جرمی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه را نشان می‌دهد. مبدل حرارتی سه لوله‌ای با لوله سینوسی دارای کمترین زمان ذوب بوده اما دمای متوسط نهایی مشابه با مبدل حرارتی لوله مستقیم و دندان‌های دارد. در اثبات این موضوع در شکل (۹ ب) می‌توان به مقدار انتالپی دریافتی ماده تغییر فازدهنده در این سه هندسه اشاره نمود و می‌توان گفت که مقدار انتالپی دریافتی ماده تغییر فازدهنده در لوله مستقیم، سینوسی و دندان‌های با مقدار دمای متوسط نهایی در آن هندسه لوله‌ها رابطه مستقیم دارد.



(الف)



(ب)

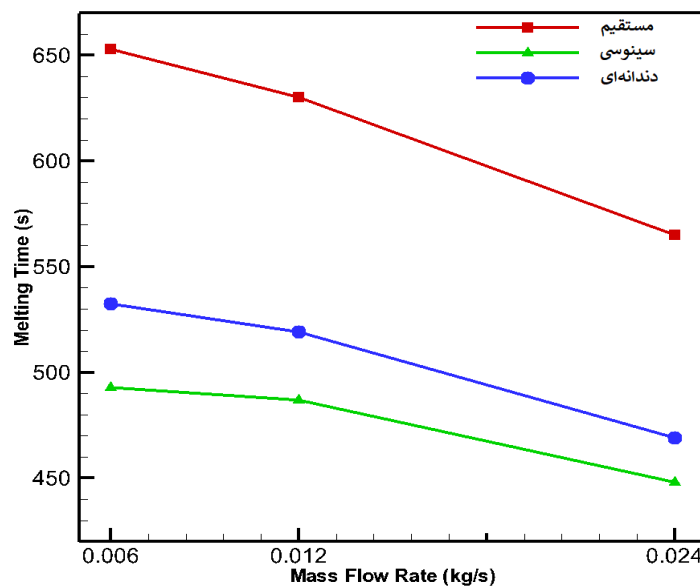
شکل ۹- الف) تغییرات دمای متوسط ماده تغییر فازدهنده در حالت‌های مختلف مبدل حرارتی سه لوله‌ای به ازای دمای ورودی ۳۴۳ درجه کلوین و دبی جرمی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه ب) انتالپی کل

۳-۴- تاثیر تغییر دبی جرمی بر ذوب ماده تغییرفازدهنده در جریان آرام و مغشوش

شکل (۱۰) نشان دهنده نمودار تاثیر دبی بر کسر حجمی ذوب در مبدل حرارتی سه لوله ای است. باتوجه به این شکل می توان گفت که با افزایش دبی برای جریان آرام از ۰/۰۰۶ کیلوگرم بر ثانیه تا ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه زمان ذوب حداکثر تا ۲/۶ درصد کاهش می یابد. اما زمان ذوب برای جریان مغشوش با دبی ۰/۰۲۴ کیلوگرم بر ثانیه حداکثر تا ۱۳/۵ درصد کاهش می یابد. بنابراین در حالت جریان آرام کاهش زمان ذوب با افزایش دبی جرمی در مبدل حرارتی سه لوله ای کمتر از حالت جریان مغشوش بین لوله مستقیم، لوله سینوسی و لوله دندانهای می باشد.

همانطوری که در جدول (۶) مشاهده می شود، ضریب کارایی با روش ϵ -NTU در مبدل سه لوله ای بین لوله مستقیم، لوله سینوسی و لوله دندانهای، به ازای دبی جرمی ۰/۰۰۶، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۲۴ کیلوگرم بر ثانیه و مساحت ۷۱۶۲/۸۳۱ میلیمتر مربع در زمانی که ماده تغییر فازدهنده ذوب شده می باشد و در مبدل سه لوله ای ضریب کارایی لوله سینوسی و دندانهای بیشتر از لوله مستقیم می باشد. ضریب کارایی لوله سینوسی و دندانهای در بازده ۳ تا ۷ درصد بهتر از لوله مستقیم بوده و همچنین با افزایش نرخ دبی جرمی از ۰/۰۰۶ کیلوگرم بر ثانیه تا ۰/۰۲۴ کیلوگرم بر ثانیه ضریب کلی انتقال حرارت تا ۱۴۷ درصد افزایش، NTU تا ۶۷/۱۱ درصد و ضریب کارایی مبدل تا ۲۲/۲۹ درصد افزایش پیدا می کند.

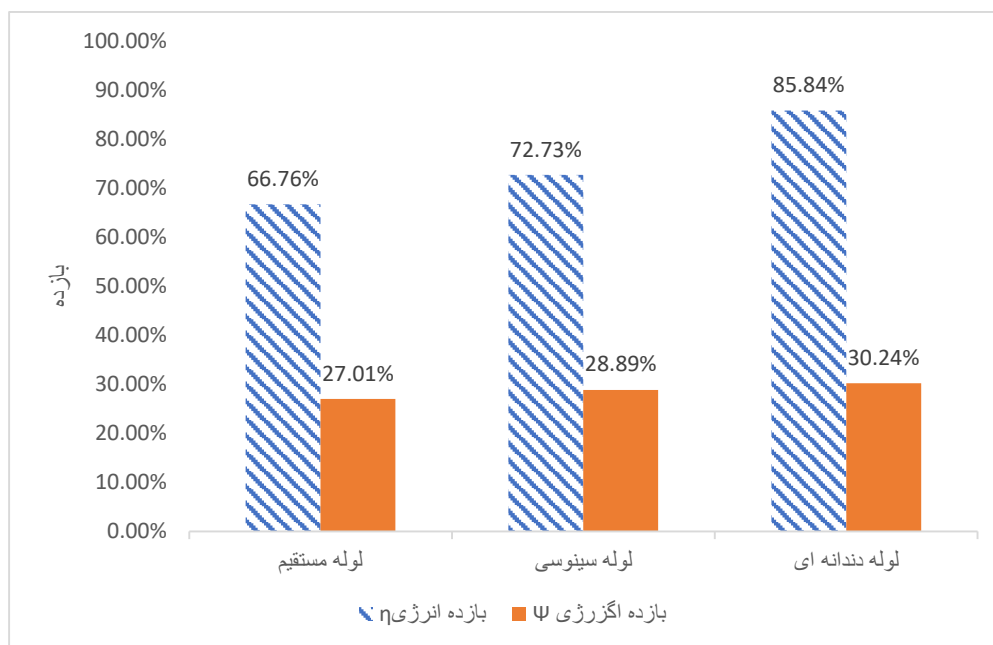
شکل (۱۱) بازده های تحلیل انرژی و انرژی را برای دبی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه به ازای دمای ۳۴۳ درجه کلون نشان می دهد. همانطور که دیده می شود بازده انرژی برای لوله مستقیم ۰/۶۶۷۶، سینوسی ۰/۷۲۷۳ و دندانهای ۰/۸۵۸۴ می باشد، که به ترتیب لوله سینوسی و دندانهای نسبت به حالت لوله مستقیم ۸/۹۴ درصد و ۲۸/۵۷ درصد بازده انرژی افزایش می یابد. در تحلیل انرژی برای لوله مستقیم بازده ۰/۲۷۰۱، سینوسی ۰/۲۸۸۹ و دندانهای ۰/۳۰۲۴ می باشد. علت تغییر ناچیز بودن در بازده انرژی به این علت می تواند باشد که مبدل کوچک بوده و در نتیجه اتلاف حرارتی کمتری داشته است. بنابراین در تحلیل انرژی و انرژی لوله دندانهای نسبت به حالت سینوسی و مستقیم بازده بالاتر و بهتری را دارد.



شکل ۱۰- تاثیر افزایش دبی جرمی بر کسر حجمی ذوب در مبدل حرارتی سه لوله ای به ازای دمای ۳۴۳ درجه کلون

جدول ۶- ضریب کارایی برای مبدل سه لوله‌ای در هندسه‌های مختلف در حالت پنج گام

درصد تغییر با مقایسه لوله مستقیم	ضریب کارایی (ε)	تعداد واحدهای انتقال (NTU)	ضریب کلی انتقال حرارت (W/m ² K)	نوع لوله	دبی جرمی (kg/s)
-	۰/۷۲۰۱	۱/۲۷۳۳	۴۶۶۰/۴۸	مستقیم	۰/۰۰۶
۷/۸۸٪	۰/۷۷۶۹	۱/۵۰۰۱	۵۲۵۴/۹۸	دندانه ای	
۵/۸۷٪	۰/۷۶۲۴	۱/۴۳۷۱	۵۰۳۴/۲۸	سینوسی	
-	۰/۷۹۱۸	۱/۵۶۹۵	۱۱۰۰۰/۹۵	مستقیم	۰/۰۱۲
۴/۸۴٪	۰/۸۳۰۲	۱/۷۷۳۴	۱۲۴۳۰/۱۱	دندانه ای	
۳/۲۹٪	۰/۸۱۷۹	۱/۷۰۳۵	۱۱۹۴۰/۲۰	سینوسی	
-	۰/۸۸۲۱	۲/۱۳۷۹	۲۹۹۵۶/۹۷	مستقیم	۰/۰۲۴
۵/۹۶٪	۰/۹۳۴۷	۲/۷۲۸۷	۳۸۲۳۵/۴۶	دندانه ای	
۵/۳٪	۰/۹۲۸۹	۲/۶۴۳۶	۳۷۰۴۳/۰۱	سینوسی	



شکل ۱۱- مقایسه بازده انرژی و آگرژی در مبدل حرارتی سه لوله‌ای با دبی ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه در فرآیند شارژ

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر فرآیند ذوب پارافین RT۳۵ در مبدل حرارتی سه لوله‌ای با مواد تغییر فازدهنده شبیه سازی عددی شده و مقایسه‌ای بین لوله مستقیم، لوله دندانه‌ای و لوله سینوسی انجام گرفت. آب به عنوان سیال در لوله‌های داخلی و خارجی جریان داشته و در لوله میانی با RT۳۵ به عنوان ماده تغییر فازدهنده پر شده‌است.

بررسى جهت بهترين طراحى شكل لوله در مبدل حرارتى براى يافتن بالاترين كارايى، بالاترين بازده انرژى و اگزرسى و ذوب ماده تغييرفازدهنده در مبدل بوده و بر اين اساس نتايج زير حاصل شده است:

بهترين زمان ذوب را در مبدل سه لوله اى، لوله سينوسى دارد و بهترين اثر گام بين سه و پنج، پنج گام مى باشد. در نتيجه هرچه تعداد گام را بيشتر كنيم زمان ذوب کاهش مى يابد. مبدل حرارتى سه لوله اى با لوله سينوسى داراى كمترين زمان ذوب مى باشد. اما داراى دماى متوسط نهايى مشابه با مبدل حرارتى لوله مستقيم و دندانده اى است. مى توان گفت كه مقدار آنتالپى دريافتى ماده تغيير فازدهنده در هر هندسه در محدوده ۴ الى ۶ درصد با مقدار دماى متوسط نهايى در ان هندسه رابطه مستقيم دارد. در مبدل هاى سه لوله اى با افزايش ديبى براى جريان آرام از ۰/۰۰۶ كيلوگرم بر ثانيه تا ۰/۰۱۲ كيلوگرم بر ثانيه زمان ذوب حداكثر تا ۲/۶ درصد کاهش مى يابد. ولى زمان ذوب براى جريان مغشوش با ديبى ۰/۰۰۶ كيلوگرم بر ثانيه تا ۰/۰۲۴ كيلوگرم بر ثانيه حداكثر تا ۱۳/۵ درصد کاهش مى يابد. ضريب كارايى مبدل هاى سينوسى و دندانده اى بهتر از لوله مستقيم مى باشد. در تحليل انرژى لوله دندانده اى نسبت به حالت سينوسى و مستقيم به ترتيب با درصد ۱/۸ و ۲۸/۵۷ بازده بالاتر و بهترى را دارد. و در تحليل اگزرسى با وجود اتلاف كم حرارتى در هر سه لوله، لوله دندانده اى نسبت به لوله سينوسى و لوله مستقيم با درصد ۴/۶۷ و ۱۱/۹۵ بازده بهترى را دارد.

مراجع

- [1] Rahimi, M., Ranjbar, A., Ganji, D., Sedighi, K., and Hosseini, M., "Experimental Investigation of Phase Change Inside a Finned-tube Heat Exchanger", *Journal of Engineering*, Vol. 2014, pp. 1-11, (2014), <https://www.hindawi.com/journals/je/2014/641954/>.
- [2] Rahimi, M., Ranjbar, A., Ganji, D., Sedighi, K., Hosseini, M., and Bahrapoury, R., "Analysis of Geometrical and Operational Parameters of PCM in a Fin and Tube Heat Exchanger", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 109-115, (2014).
- [3] Mat, S., Al-Abidi, A.A., Sopian, K., Sulaiman, M.Y., and Mohammad, A.T., "Enhance Heat Transfer for PCM Melting in Triplex Tube with Internal-external Fins", *Energy Conversion and Management*, Vol. 74, pp. 223-236, (2013).
- [4] Pethkool, S., Eiamsa-Ard, S., Kwankaomeng, S., and Promvonge, P., "Turbulent Heat Transfer Enhancement in a Heat Exchanger using Helically Corrugated Tube", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 3, pp. 340-347, (2011).
- [5] Chen, C., Zhang, H., Gao, X., Xu, T., Fang, Y., and Zhang, Z., "Numerical and Experimental Investigation on Latent Thermal Energy Storage System with Spiral Coil Tube and Paraffin/Expanded Graphite Composite PCM", *Energy Conversion and Management*, Vol. 126, pp. 889-897, (2016).

- [6] Amini, R., Amini, M., Jafarinia, A., and Kashfi, M., "Numerical Investigation on Effects of using Segmented and Helical Tube Fins on Thermal Performance and Efficiency of a Shell and Tube Heat Exchanger", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 138, pp. 750-760, (2018).
- [7] Al-Abidi, A.A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M., and Mohammad, A.T., "Internal and External Fin Heat Transfer Enhancement Technique for Latent Heat Thermal Energy Storage in Triplex Tube Heat Exchangers", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 53, No. 1, pp. 147-156, (2013).
- [8] Al-Abidi, A.A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M., and Mohammad, A.T., "Experimental Study of PCM Melting in Triplex Tube Thermal Energy Storage for Liquid Desiccant Air Conditioning System", *Energy and Buildings*, Vol. 60, pp. 270-279, (2013).
- [9] Al-Abidi, A.A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M., and Mohammad, A.T., "Experimental Study of Melting and Solidification of PCM in a Triplex Tube Heat Exchanger with Fins", *Energy and Buildings*, Vol. 68, pp. 33-41, (2014).
- [10] Subramaniyan, M., and Parameshwaranpillai, T., "Experimental Analysis of Heat Transfer During the Melting of a Phase-change Material in Triplex Tube Heat Exchanger", *International Journal of Engineering Research and Technology*, Vol. 03, No. 01, (2014).
- [11] Sari, A., and Kaygusuz, K., "Thermal and Heat Transfer Characteristics in a Latent Heat Storage System using Lauric Acid", *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, No. 18, pp. 2493-2507, (2002).
- [12] Esapour, M., Hosseini, M., Ranjbar, A., Pahamli, Y., and Bahrapoury, R., "Phase Change in Multi-tube Heat Exchangers", *Renewable Energy*, Vol. 85, pp. 1017-1025, (2016).
- [13] Eslamnezhad, H., and Rahimi, A.B., "Enhance Heat Transfer for Phase-change Materials in Triplex Tube Heat Exchanger with Selected Arrangements of Fins", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 813-821, (2017).
- [14] Assari, M., Basirat Tabrizi, H., Parvar, M., and Alkasir Farhani, M., "Experimental Investigation of Sinusoidal Tube in Triplex-tube Heat Exchanger During Charging and Discharging Processes using Phase Change Materials", *International Journal of Engineering*, Vol. 32, No. 7, pp. 999-1009, (2019).
- [15] Al-Abidi, A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, Y., and Mohammad, A., "Heat Transfer Enhancement for PCM Thermal Energy Storage in Triplex Tube Heat Exchanger", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 37, No. 7-8, pp. 705-712, (2016).
- [16] Ezan, M.A., Erek, A., and Dincer, I., "Energy and Exergy Analyses of an Ice-on-coil Thermal Energy Storage System", *Energy*, Vol. 36, No. 11, pp. 6375-6386, (2011).
- [17] Yang, K., Zhu, N., Chang, C., Yu, H., and Yang, S., "Numerical Analysis of Phase-change Material Melting in Triplex Tube Heat Exchanger", *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 867-877, (2020).
- [18] Mehling, H., and Cabeza, L.F., "*Heat and Cold Storage with PCM*", Springer, Berlin, (2008).

[19] Bergman, T.L., Incropera, F.P., DeWitt, D.P., and Lavine, A.S., "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*", John Wiley & Sons, New Jersey (NJ), (2011).

فهرست نمادهای انگلیسی

A	: مساحت بر حسب مترمربع
C_p	: ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب ژول بر کیلوگرم در کلوین
D	: قطر بر حسب میلیمتر
L	: گرمای نهان ماده
ΔH	: آنتالپی نهان
$E_{x_{\text{stored}}}$: انرژی ذخیره شده
g	: گرانش بر حسب متر بر مجذور ثانیه
h	: انتالپی بر حسب ژول بر کیلوگرم
K	: ضریب انتقال حرارت هدایتی بر حسب وات بر متر در کلوین
\dot{m}	: دبی جرمی بر حسب کیلوگرم بر ثانیه
P	: فشار بر حسب پاسکال
Q	: گرمای کل ذخیره شده
q''	: شار حرارتی
S	: ترم چشمه
T	: دما بر حسب کلوین
u	: سرعت در راستای X بر حسب متر بر ثانیه
U	: ضریب کلی انتقال حرارت بر حسب وات در مجذور متر مربع در کلوین
v	: سرعت در راستای Y بر حسب متر بر ثانیه
w	: سرعت در راستای Z بر حسب متر بر ثانیه

نمادهای یونانی

ρ	: چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب
μ	: ویسکوزیته دینامیکی بر حسب کیلوگرم بر متر در ثانیه
β	: ضریب انبساط حجمی بر حسب یک بر کلوین
λ	: کسرمايع
ε	: ضریب کارایی
τ	: تنش برشی بر حسب نیوتن بر مترمربع
η	: بازده انرژی
Ψ	: بازده انرژی

Abstract

Different inner tube shapes of the triplex tube heat exchanger with phase change material has been investigated numerically. Water is used as the working fluid in the inner and outer tubes, and the middle tube is filled with RT35 as a phase change material (PCM). The PCM effectiveness among the inner tube shapes such as straight, indented, and sinusoidal in a triplex tube heat exchanger were studied. Energy and exergy efficiencies, and the effect of mass flow rate on the melting process of PCM have been sought. Enthalpy-porosity method has been applied for the simulation. Results demonstrate that the best melting time in triplex tube heat exchanger has been observed in the sinusoidal tube, and by increasing the number of pitches, the melting time decreases. In addition, sinusoidal and indented tube heat exchangers effectiveness are better than straight tube. Melting time is reduced by maximum of 2.6% by increasing the flow rate of a laminar flow from 0.006 kg/s to 0.012 kg/s. Moreover, the melting time is reduced by a maximum of 13.5% for the turbulent condition with flow rate of 0.024 kg/s. In the analysis of energy and exergy, the indented tube shows higher and preferable efficiency in comparison to the sinusoidal and straight type.