



## بهبود کارایی مبدل حرارتی تریپلکس با استفاده از مواد تغییر فازدهنده

عباس کوثری‌نیا<sup>\*</sup>، امین ضیائی‌فر<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

\*نویسنده مسئول: kosarineia@gmail.com

### چکیده

در پژوهش حاضر به مطالعه عددی فرآیند ذوب ماده تغییر فازدهنده در مبدل حرارتی سه لوله دارای فین به صورت دو بعدی پرداخته شده و نتایج با حالت بدون فین مقایسه گردیده است. در حالت بدون فین زمان ذوب ۱۱۳ دقیقه می باشد. آب به عنوان سیال گرم در لوله‌های داخل و بیرون جریان داشته و لوله میانی با پارافین RT82 به عنوان ماده تغییر فاز دهنده پر شده است. برای شبیه‌سازی ذوب ماده تغییر فازدهنده، از روش انتالپی متخلخل استفاده گردیده است. هدف اصلی در این پژوهش مطالعه اثر هندسه و چیدمان فین‌ها به منظور دستیابی به بیشترین انتقال حرارت و رسیدن به کم-ترین زمان ذوب ماده تغییر فازدهنده می باشد. به دلیل آنکه افزایش سطوح انتقال حرارت موجب کاهش حجم ماده تغییر فاز دهنده در مبدل می شود و کاهش حجم ماده پارافین باعث کاهش ذخیره انرژی در سیستم می شود، مساحت مجموع سطوح انتقال حرارت ثابت در نظر گرفته شد و با استفاده از تغییر زوایا، فاصله و چیدمان فین‌ها زمان ذوب کاهش داده شد. دو حالت فین‌های وی و وی شکل بررسی گردید، که زمان ذوب به ترتیب برای بهترین حالت‌ها ۴۲/۳ دقیقه و ۳۹ دقیقه به دست آمد. در حالت شماره ۲ هندسه‌های وی شکل، زمان ذوب ۳۴/۵ درصد نسبت به حالت بدون فین کاهش داشته است.

**واژگان کلیدی:** مواد تغییر فازدهنده، انتقال حرارت، مبدل حرارتی،

### مقدمه

در طول سه دهه گذشته، ذخیره سازی انرژی حرارتی در مواد تغییر فاز دهنده به شدت توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تراکم انرژی حرارتی بالای آن‌ها در واحد حجم/جرم و پتانسیل آن‌ها برای کاربرد در زمینه‌های مختلف مهندسی با دماهای بسیار گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از مشکلات اساسی انرژی‌های نو ناپایدار بودن این انرژی است که همین موضوع باعث می‌شود نیاز به ذخیره‌سازی انرژی‌های نو پیدا شود. برای مثال انرژی خورشیدی یک انرژی متناوب است که این موضوع موجب عدم تطابق میان عرضه و تقاضای انرژی می‌شود، و بهترین روش برای از بین بردن این مشکل ذخیره انرژی خورشیدی به صورت نهان است. مواد تغییر فازدهنده به دلیل دامنه نوسان دمایی بالا در صنایع مختلف کاربرد دارند. عبیدی و همکاران [۱] اثر چیدمان هشت فین به طول ۴۲ میلی‌متر و عرض یک میلی‌متر را در دو بعد و سه حالت چیدمان داخلی، خارجی و داخلی خارجی را بررسی نمودند، و توانستند با چیدمان داخلی خارجی به کمترین زمان ذوب برسند. تالی و همکاران [۲] از مواد تغییر فازدهنده برای کنترل دمای باتری‌های لیتیومی استفاده نمودند و با استفاده از این ماده توانستند از افزایش دمای باتری که موجب افت ولتاژ می‌گردد جلوگیری نمایند و عملکرد باتری را بهبود بخشند. الگافی و لعدی [۳] در پژوهشی با بکارگیری این مواد در ترکیبات کامپوزیتی، ضریب هدایت حرارتی افزایش دادند. ماهرالمقالش و همکاران [۴] از ماده تغییر فازدهنده در ساختار کامپوزیتی استفاده کردند، که باعث افزایش کارایی حرارتی سیستم‌های ذخیره انرژی می‌گردید. ریو و همکاران [۵] در پژوهشی با استفاده از این مواد در کوره‌های سرامیکی، عملکرد حرارتی کوره را افزایش دادند. بیگدلی و همکاران [۶] در پژوهشی عددی، اثر اضافه کردن یک ردیف لوله درونی روی یک مبدل حرارتی را بررسی نمودند و دریافتند باعث افزایش عملکرد حرارتی مبدل حرارتی می‌گردد. سان و همکاران [۷] در یک مطالعه عددی اثر افزایش هدایت حرارتی روی سیستم تهویه از پنل‌های حامل مواد تغییر فازدهنده نوع آلی را بررسی نمودند. با استفاده از این مواد توانستند هدایت حرارتی را افزایش و کارایی حرارتی کلی سیستم تهویه را بهبود بخشند. ژانگ و چنگ [۸] دریافتند با بکارگیری مواد تغییر فازدهنده در ساختارهای فوم فلزی باتری‌های لیتیوم یونی انتقال حرارت بیشتری انجام می‌شود. چن و



همکاران [۹] در پژوهشی از این مواد در دیواره‌های کامپوزیتی استفاده نموده و دریافتند دیواره‌های کامپوزیتی که در ساختار آنها از PCM استفاده شده بود کارایی حرارتی گرمایشی را تا ۱۴ درصد افزایش و دمای داخلی را ۱/۸ درجه افزایش می‌دهند. امرلسید [۱۰] در پژوهشی عددی ویژگی‌های ذوب پارافین تجاری (موم) به عنوان ماده تغییر فازدهنده PCM را در ظروف استوانه مثلثی بررسی نمود. لی و همکاران [۱۱] در یک پژوهش تجربی با استفاده از یک مخزن حاوی ماده تغییر فازدهنده، گرمای تولید شده از یک محیط صنعتی را ذخیره کردند و آن را به یک محیط ساختمانی انتقال دادند. هدف آنها بررسی تاثیر افزایش دبی سیال ورودی بر فرآیند شارژ ماده بود که به این نتیجه رسیدند با افزایش دبی ورودی فرآیند شارژ سریعتر انجام می‌شود.

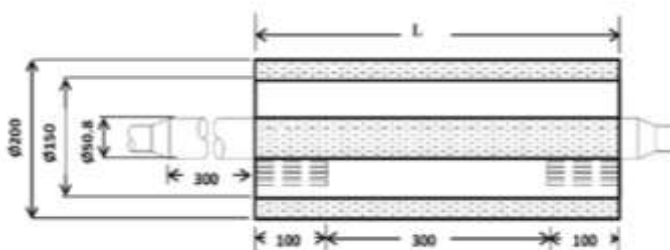
به دلیل آنکه ضعف اصلی مواد تغییر فازدهنده انتقال حرارت این مواد می‌باشد بیشتر مقالات در مورد بررسی روش‌های مختلف افزایش انتقال حرارت در ماده و تاثیر افزایش انتقال حرارت بر عملکرد سیستم‌ها می‌باشد. در این مقاله قصد بر آن است با استفاده از پره‌های طولی زمان شارژ ماده تغییر فازدهنده را کاهش داد.

### فیزیک مساله

در پژوهش حاضر، فرآیند ذوب ماده تغییر فازدهنده در مبدل حرارتی سه لوله شبیه‌سازی می‌گردد. این مبدل شامل سه لوله داخلی، میانی و بیرونی می‌باشد. در این مبدل سیال داغ در لوله‌های داخلی و بیرونی و ماده تغییر فازدهنده در لوله میانی قرار گرفته است و پره‌ها روی سطوح لوله‌های داخلی و میانی نصب شده‌اند. شعاع لوله داخلی ۲۵/۴ میلی‌متر و ضخامت آن ۱/۲ میلی‌متر می‌باشد. شعاع لوله‌های میانی و خارجی ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت هر دو یک میلی‌متر می‌باشد. به دلیل ضریب رسانش بالای مس، در مبدل حرارتی از این فلز استفاده شده است. مشخصات مقطع مبدل در جدول (۱) بیان شده است و خواص ماده تغییر فازدهنده در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات مقطع مبدل حرارتی در حضور فین [۱۲]

مشخصات مبدل حرارتی (میلی متر)	
۲۵/۴	شعاع تیوب داخلی مبدل
۱/۲	ضخامت تیوب داخلی
۷۵	شعاع تیوب میانی
۱۰۰	شعاع تیوب خارجی
۲	ضخامت تیوب میانی و خارجی
۴۲	طول فین
۱	ضخامت فین



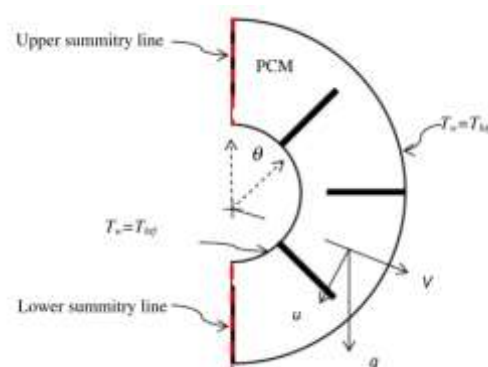
RT82

نوع ماده تغییر فازدهنده

شکل (۱): شکل شماتیک از مقطع روبروی مبدل حرارتی.



برای صرفه جویی در زمان و هزینه محاسبات و با صرف نظر از گرادیان‌ها در راستای طول لوله برای شبیه‌سازی مسئله حاضر از مدل دو بعدی استفاده می‌گردد. همچنین در مدل دو بعدی نیز از نصف دامنه محاسباتی (قطاع ۱۸۰ درجه‌ای مبدل) با بکارگیری شرط مرزی تقارن مطابق شکل (۲) استفاده شده است.



شکل (۲): شرایط مرزی روی قطاع مبدل حرارتی.

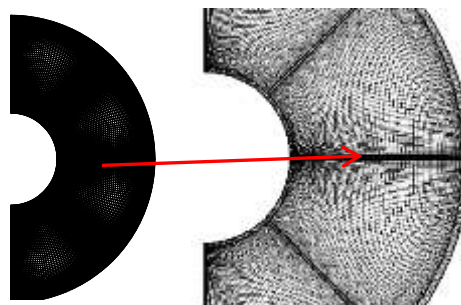
جدول (۲): خواص مواد تغییر فاز دهنده [۱۲].

خواص / واحد	ماده تغییر فاز دهنده پارافین	مس
چگالی ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	۷۷۰-۹۵۰	۸۹۷۸
ظرفیت گرمایی ( $\frac{J}{kg.k}$ )	۲۰۰۰	۳۸۱
ضریب رسانش ( $\frac{W}{m.k}$ )	۰/۲	۳۸۷/۶
ویسکوزیته ( $\frac{kg}{m.s}$ )	۰/۰۳۴۹۹	---
ضریب انبساط ( $\frac{1}{k}$ )	۰/۰۰۱	---
گرمای نهان ذوب ( $\frac{J}{Kg}$ )	۱۷۶۰۰۰	---
دمای جامد شدن (K)	۳۴۳/۱۵	---
دمای مایع شدن (K)	۳۵۵/۱۵	---

محدوده ذوب این ماده بین ۷۰ تا ۸۲ درجه سلسیوس، ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی ۱۷۶ کیلوژول بر کیلوگرم، ظرفیت حرارتی خاص ۲ کیلوژول بر کیلوگرم درجه کلون، میزان تراکم ۰/۷۷ کیلوگرم بر کلون، هدایت حرارتی ۰/۲، میزان افزایش حجم آن ۱۲/۵ درصد، نقطه اشتعال بالاتر از ۲۰۰ درجه سلسیوس، و حداکثر دمای کاری آن ۱۰۰ درجه سلسیوس است. خواص ماده تغییر فاز دهنده و مس مطابق جدول (۲) در نرم افزار فلونت تنظیم شده است.

#### دامنه و شبکه محاسباتی

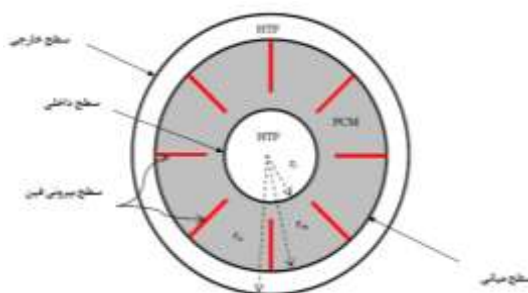
برای تولید شبکه محاسباتی ابتدا دامنه محاسباتی به تعدادی چهارضلعی منطقی تقسیم می‌گردد. در واقع با این تقسیم بندی بلاک بندی مورد نیاز برای تولید شبکه محاسباتی انجام می‌گیرد. با توجه به آرایش فین‌ها فضای محاسباتی به ۳۲ بلاک مطابق شکل (۳) تقسیم می‌شود. برای تولید شبکه مناسب المان‌های چهارضلعی را در آرایشی سازمان یافته روی این بلاک‌ها قرارداده و در نواحی حساس دارای گرادیان‌های بیشتر، تراکم شبکه مطابق شکل (۳) افزایش داده می‌شود. بلاک بندی این امکان را می‌دهد که بتوان روی شبکه کنترل بیشتری داشت و در صورت نیاز نواحی شبکه مورد نظر را ریز یا درشت نمود.



شکل (۳): شبکه محاسباتی.

### شرایط مرزی

همه مرزها از نوع شرط مرزی دیوار می‌باشند که شرط عدم لغزش (صفر بودن همه مولفه‌های سرعت روی آن) برقرار می‌باشد. سطوحی که در مجاورت سیال داغ قرار دارند از شرط مرزی دما ثابت با دمای ۳۶۳/۱۵ کلوین برخوردار بوده و سطوح مشترک بین ناحیه جامد و سیال از نظر حرارتی کوپل می‌باشند (شکل ۴).



شکل (۴): قرارگیری فین‌ها روی سطح بیرونی [۱۲].

### معادلات حاکم

توزیع دما و معادله حرکت سیال توسط معادلات نوین-استوکس توصیف شده است. جریان آرام در حال گذرا، تراکم ناپذیر و ویسکوزیته آن بسیار کم است. بنابراین خصوصیات ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده شامل ظرفیت گرمایی، رسانش گرمایی، ویسکوزیته باید ثابت باشند. تاثیرات همرفت طبیعی بر اساس تقریب شناوری در نظر گرفته شده است. تنها تغییرات چگالی ماده تغییر فاز دهنده با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\rho = \frac{\rho_1}{(\beta(T - T_1) + 1)} \quad (1)$$

در رابطه (۱) چگالی ماده تغییر فاز در دمای  $T_1$  و  $\beta$  ضریب گرمای انبساطی است.

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c \Delta T \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $h$  آنتالپی محسوس می‌باشد و آنتالپی کل بصورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$H = h + \Delta H \quad (3)$$



که در آن  $h_{ref}$  در دمای مرجع  $T_{ref} = 273$  درجه کلوین است.  $C$  گرمای ویژه است و  $\Delta H$  گرمای نهان ویژه ماده تغییر فاز دهنده است کمیت  $\gamma$  کسر مایع تولید شده در طول فرایند ذوب است و به صورت رابطه (۴) تعریف می شود:

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} \quad (4)$$

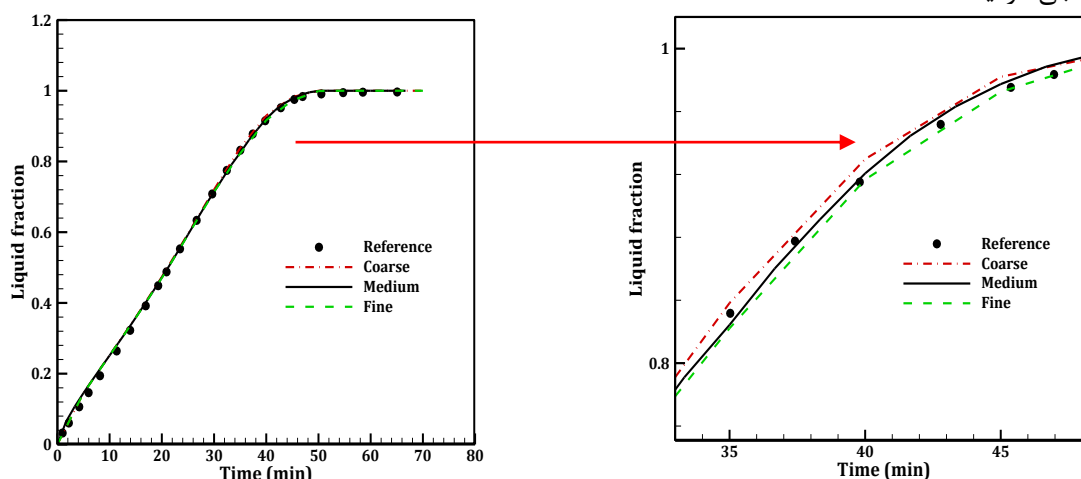
$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_s \\ 1 & \text{if } T > T_1 \\ \frac{(T - T_s)}{T_1 - T_s} & \text{if } T_1 > T > T_s \end{cases} \quad (5)$$

فرایند تغییر فاز هنگامی اتفاق می افتد که  $T_1 > T > T_s$  باشد.

### یافته های تحقیق

#### اعتبار سنجی و استقلال حل از شبکه

برای بررسی صحت مدل سازی نیاز به مقایسه نتایج حاصل از نرم افزار با داده های تجربی یا عددی تحقیقات پیشین برای یک مدل خاص می باشد. از این رو مدل حاضر در این پژوهش، با مدل تجربی و عددی مرجع [۱۲] مطابق شکل (۵) مقایسه و اعتبار سنجی گردید.



شکل (۵): اعتبار سنجی و استقلال حل از شبکه برای کسر مایع.

برای بررسی استقلال نتایج حل عددی از شبکه، مسئله برای سه نوع شبکه ریز با تعداد سلول های ۲۷۵۳۸، متوسط با تعداد سلول های ۲۳۴۹۰ و درشت با تعداد سلول های ۱۶۵۷۵ مطابق شکل (۵) مقایسه شد و نتایج در جدول (۳) ارائه شده است. همانطور که در این شکل کاملاً مشهود است نمودارها تقریباً بر روی هم منطبق شده و ریز کردن مش تاثیر بر روی زمان ذوب نداشته و تغییرات متوقف شده است.

جدول (۳): مشخصات شبکه های مطالعه شده در استقلال حل از شبکه.

شماره شبکه	نوع شبکه	تعداد کل سلول های شبکه
۱ شبکه	درشت	۱۶۵۷۵
۲ شبکه	متوسط	۲۳۴۹۰
۳ شبکه	ریز	۲۷۵۳۸



با توجه به اینکه این سه نوع شبکه دارای نتایج نزدیک به یکدیگر می‌باشند، بنابراین هر سه نوع شبکه برای ادامه شبیه‌سازی مناسب می‌باشند. برای اطمینان شبکه با تعداد سلول‌های متوسط برای شبیه‌سازی انتخاب می‌گردد. جدول (۴) استقلال حل عددی از گام زمانی را نشان می‌دهد.

جدول (۴): بررسی استقلال حل از گام زمان برای چهار گام زمانی

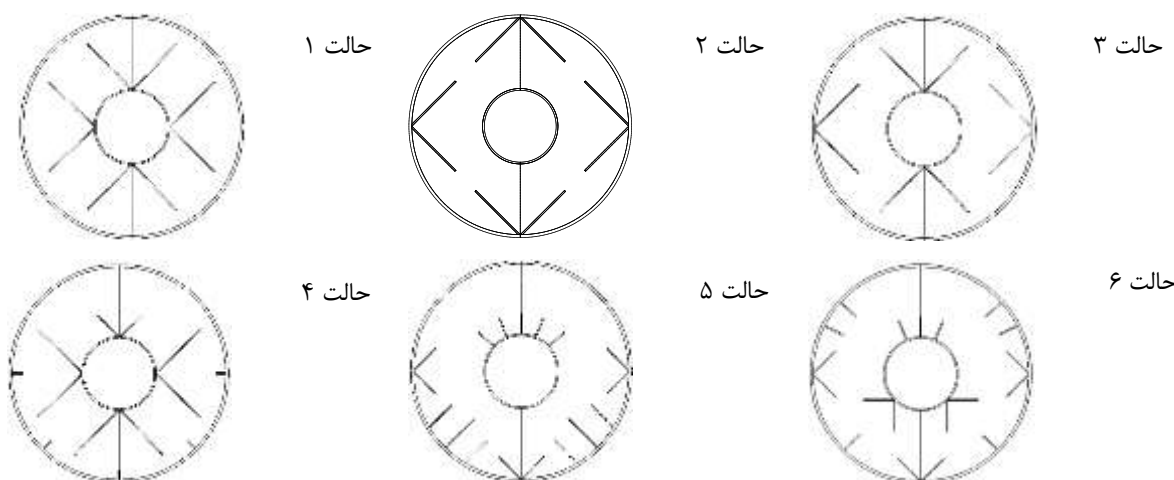
گام زمانی	زمان ها		
	۳۰۰	۱۸۰۰	۲۷۰۰
۰/۱	۰/۱۴۵۶	۰/۷۱۷۳	۰/۹۸۲۶
۰/۲۵	۰/۱۴۵۶	۰/۷۱۷۱	۰/۹۸۲۶
۰/۵	۰/۱۴۵۵	۰/۷۱۴۱	۰/۹۷۷۴
۱	۰/۱۴۵۴	۰/۶۶۸۸	۰/۹۴۰۸

#### نتایج شبیه سازی برای مبدل‌های حرارتی فین‌دار حالت وی شکل

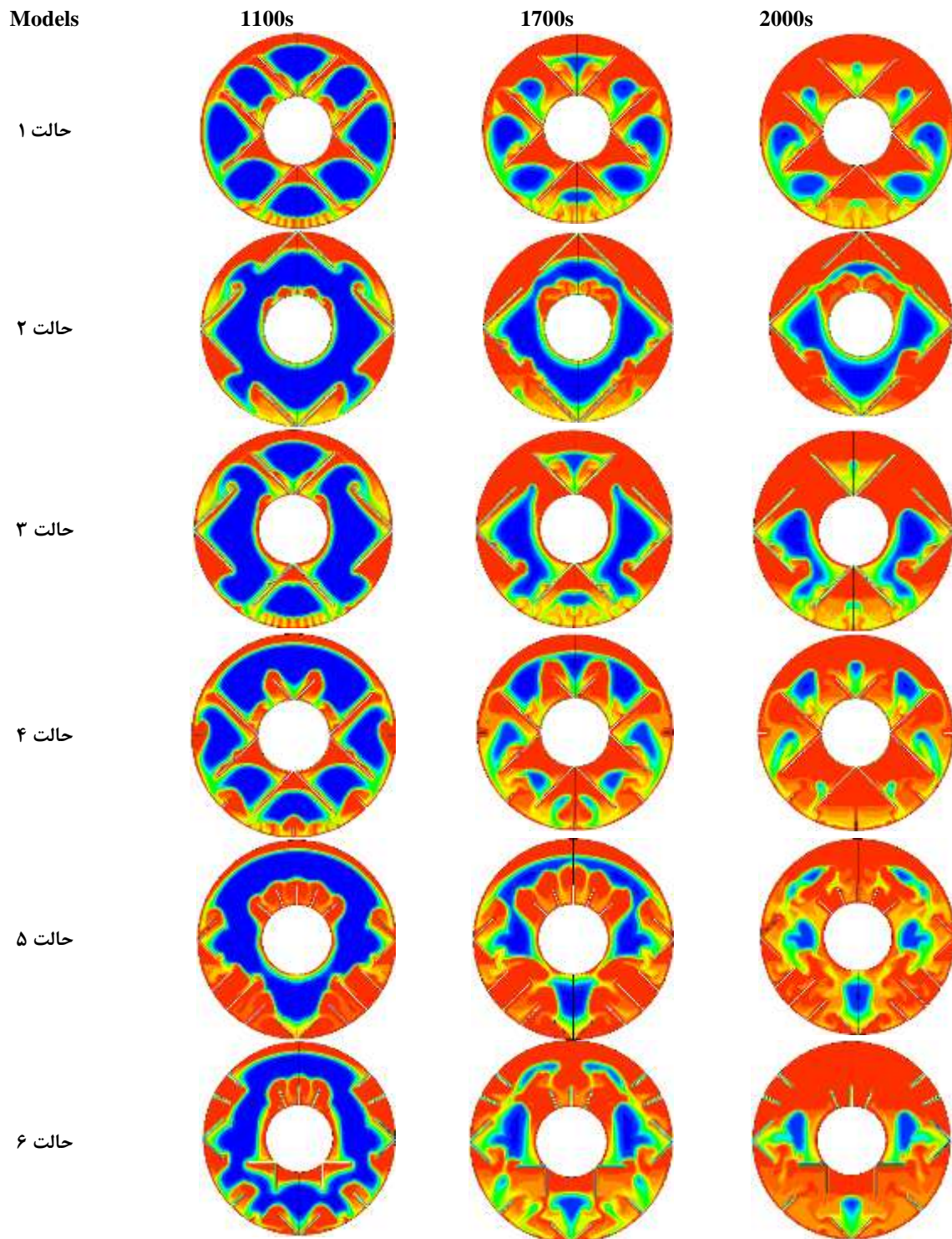
در این بخش قصد برآن است با بکارگیری فین‌ها در آرایش وی شکل زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده کاهش داده شود. در این حالت مساحت فین‌ها در مجموع ثابت است و اثر آرایش فین‌ها بررسی می‌گردد. توجه داشته باشید در این حالت وی شکل زاویه بین دو فین تشکیل دهنده چیدمان وی، ۹۰ درجه می‌باشد. در حالت اول فین‌های وی شکل به صورت متقارن روی سطح مبدل توزیع می‌گردند. اساس کار فین‌های وی شکل محصور کردن ماده است. نکته‌ای که باید در نظر گرفت تا به چیدمان مناسب رسیده شود، این است که برای آن که در یک مبدل حرارتی بتوان زمان ذوب را کاهش داد باید یک ذوب هم زمان در مبدل ایجاد نمود، که در حالت‌های ۵ و ۶ شکل (۶) کاملاً مشهود است. به دلیل آن که ماده ذوب شده به واسطه نیروی شناوری در بالای مبدل جمع می‌شود پس در بالا به فین‌های کمتری نیاز می‌باشد. به همین علت از فین‌های بالا کم کرده و به همان اندازه به پایین مبدل اضافه می‌گردد تا ذوب هم زمان ایجاد شود. در جدول (۵) کاملاً مشخص است که در حالت شماره ۴ به یک چیدمان مناسب رسیده و زمان ذوب ماده به ۴۳/۴ دقیقه کاهش یافته است.

جدول (۵): جدول زمان ذوب و کاهش زمان شش حالت کسرمایع برای فین وی شکل.

حالت‌ها	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶
حداقل زمان ذوب	۵۰	۶۵	۵۰	۴۳.۳	۴۸.۴	۴۶
کاهش زمان ذوب	۴۴/۲۵	۵۷/۵۲	۴۴/۲۵	۳۸/۳۲	۴۲/۸۳	۴۰

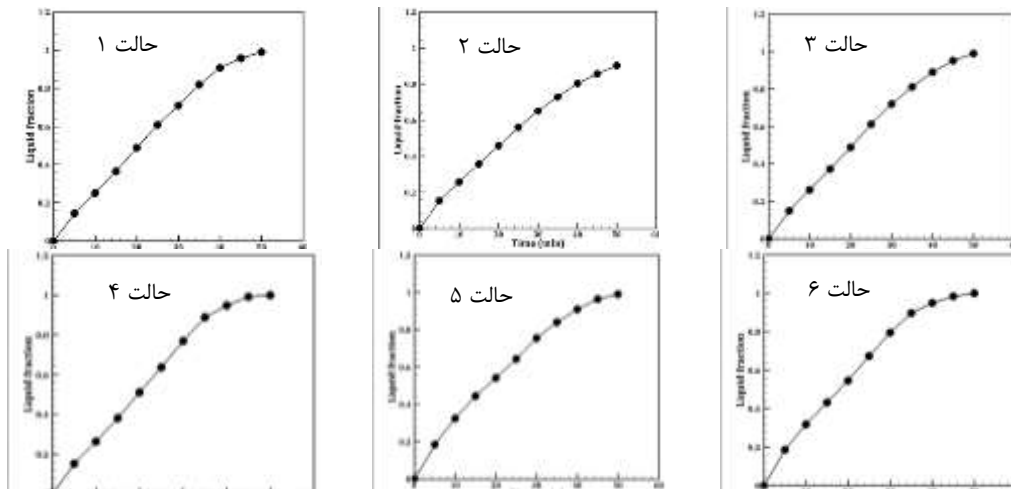


شکل (۶): هندسه وی شکل برای حالت‌های مختلف.



شکل (۷): نمایش کانتورهای کسرمایع برای فین‌های وی شکل در چیدمان‌های مختلف.

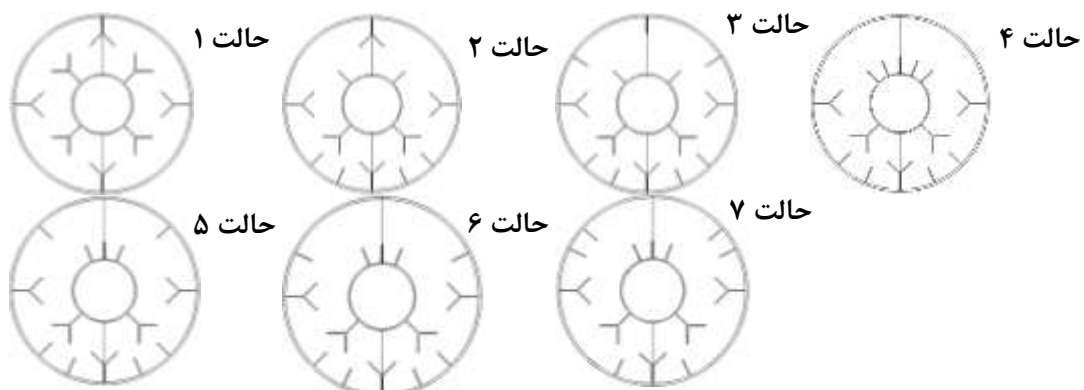
در شکل (۸) نمودار تغییرات کسرمایع با زمان برای حالات مختلف فین‌وی شکل بایکدیگر مقایسه شده است.



شکل (۸): نمودار تغییرات کسرمایع با زمان و میانگین دما با زمان برای حالات مختلف فین وی شکل.

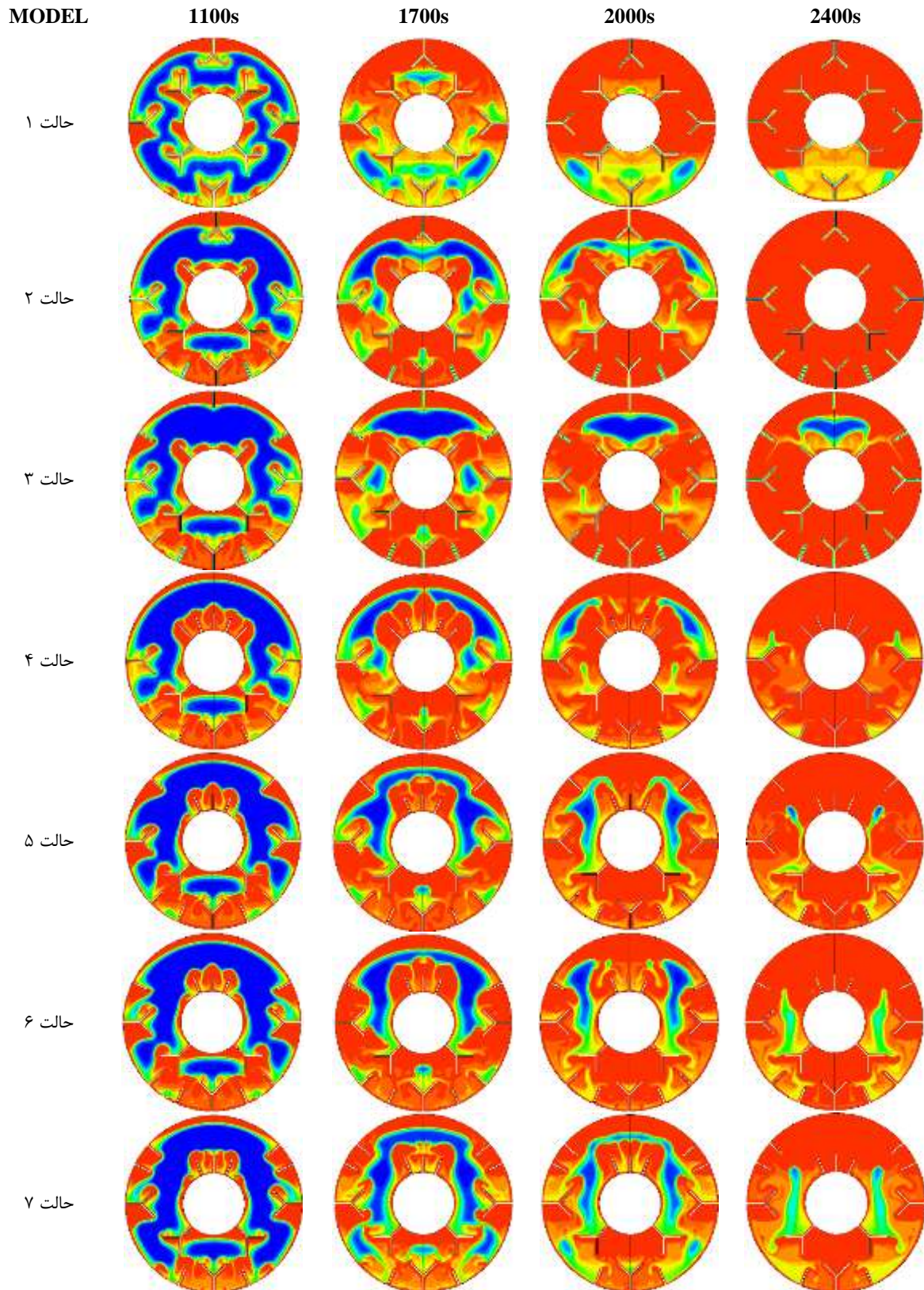
نتایج شبیه سازی برای مبدل‌های حرارتی فین‌دار وی شکل

همانطور که در کانتورهای شکل (۷) مشاهده می‌گردد، اساس عملکرد فین‌های وی شکل محصور کردن ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد، که همین موضوع موجب می‌گردد انتقال حرارت جابه‌جایی که عامل آن حرکت سیال ناشی از اختلاف چگالی به وجود آمده بر اثر اختلاف دما هست به خوبی اتفاق نیافتد. به همین دلیل در ادامه کار برای کاهش زمان ذوب فین‌های وی- شکل مطابق شکل (۹) طراحی شده‌اند و در این حالت تلاش شده در نیمه پایین مبدل انتقال حرارت هدایت تقویت و در نیمه بالایی جابه‌جایی تقویت گردد. در حالت شماره ۲ شکل (۱۰) کاملاً مشهود هست که پس از بررسی هفت چیدمان و حالت‌های مختلف با ایجاد یک جریان جابه‌جایی مناسب در نیمه بالای مبدل، زمان ذوب را به میزان قابل توجهی کاهش داده و زمان ذوب ماده به ۳۹ دقیقه رسانیده شده است.



شکل (۹): هندسه مبدل حرارتی دارای فین وی شکل با چیدمان مختلف.

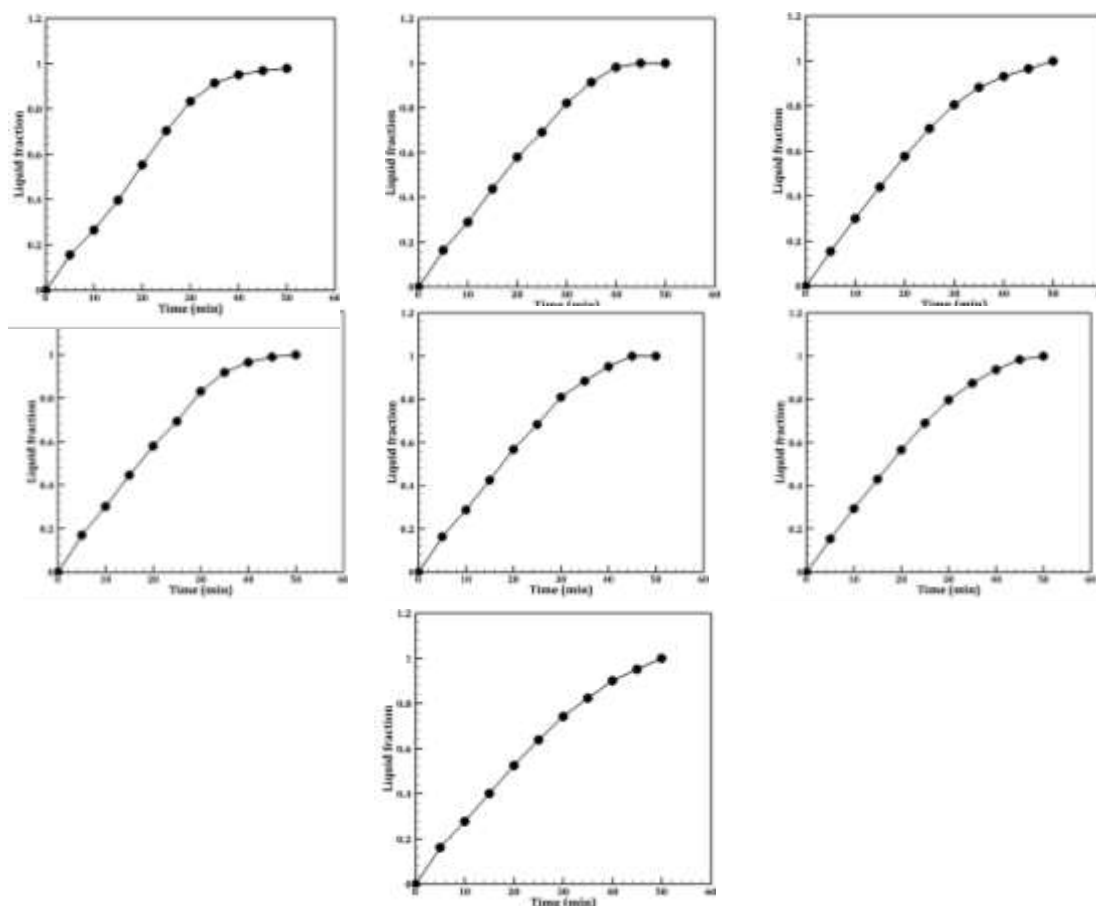




شکل (۱۰): مقایسه کانتورهای کسرمايع برای حالت مبدل حرارتی دارای فین وای شکل برای هفت حالت.



در شکل (۱۱) نمودارهای کسرهای با زمان و نمودارهای تغییرات میانگین دما با زمان برای فین‌های وای شکل در هفت حالت، نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۱): مقایسه نمودارهای کسرهای با زمان و نمودارهای تغییرات میانگین دما با زمان برای فین‌های وای شکل در هفت حالت.

در جدول (۶) زمان ذوب برای مبدل حرارتی دارای فین وای شکل در چیدمان‌های مختلف ارائه شده است.

جدول (۶): جدول زمان ذوب برای مبدل حرارتی دارای فین وای شکل در چیدمان‌های مختلف.

حالت‌ها	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷
حداقل زمان ذوب	۵۰	۳۹	۵۱/۶۶	۴۳/۴۴	۴۴/۲	۵۰/۲۷	۴۹/۹۸
کاهش زمان ذوب	۴۴/۲۵	۳۴/۵۱	۴۵/۷۲	۳۸/۴۴	۳۹/۱۲	۴۴/۴۹	۴۴/۲۳

پژوهش حاضر به شبیه‌سازی عددی میدان جریان و دما در مبدل حرارتی سه لوله پرداخته است و از طریق نصب فین‌های وای شکل (شکل ۶) و فین‌های وای شکل (شکل ۹) زمان ذوب ماده تغییر فازدهنده کاهش داده شد. نتایج شبیه‌سازی بشرح زیر حاصل گردید:

(۱) مساحت مجموع سطوح انتقال حرارت در همه طراحی‌های وای وای شکل ثابت در نظر گرفته شده است. به دلیل آن که در دقایق اولیه انتقال حرارت، حاکم بر مبدل هدایت می باشد، میزان ذوب ماده تغییر فازدهنده در سیزده



حالت بررسی شده وی و وای شکل در همه حالت‌ها یکسان و نزدیک به هم بوده است. از طرفی با گذشت زمان و اثر انتقال حرارت، همرفت طبیعی در مبدل‌ها بیشتر گردید و تغییر چیدمان فین‌ها در نیمه بالایی اثر خود را گذاشته و مبدلی که بهترین چیدمان را در نیمه بالایی داشته به کمترین زمان ذوب رسیده است. این مورد در نمودارهای شکل (۸) و (۱۱) مشاهده می‌شود.

(۲) برای آنکه در یک مبدل حرارتی زمان ذوب کاهش داده شود باید یک ذوب هم زمان و هماهنگ در مبدل ایجاد نمود. (۳) با توجه به اینکه انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در نیمه بالایی مبدل بیشتر می‌باشد، بنابراین در همه حالات ماده تغییر فزاینده در نیمه بالایی سریع‌تر از نیمه پایینی ذوب می‌شود. پس باید در نیمه پایینی از تعداد بیشتری فین نسبت به نیمه بالایی استفاده نمود و در نیمه پایینی مبدل باید اثر هدایت و در نیمه بالایی اثر همرفت طبیعی را تقویت کرد. در کانتورهای شکل (۷) و (۹) کاملاً مشخص است که در حالت‌های اولیه که چیدمان در بالا و پایین متقارن بوده فرآیند ذوب به خوبی اتفاق نیفتاده است. در ادامه با کم کردن فین‌ها در نیمه بالایی ذوب یکسان‌تری در نیمه بالا و پایین ایجاد شده است.

(۴) به طور کلی نصب فین به دلیل افزایش سطح موثر انتقال حرارت، باعث کاهش زمان ذوب ماده تغییر فزاینده می‌شود. آرایش و چیدمان فین‌ها به دلیل اثری که روی تولید جریان ناشی از انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی دارند حائز اهمیت می‌باشد.

(۵) در حالت‌های وی شکل، نصب فین روی سطح بیرونی با محصور کردن جریان، مانع از انتقال حرارت هدایت از سطح بیرونی مبدل به ماده تغییر فزاینده می‌شود. با توجه به کاهش میزان ذوب و محصور کردن جریان، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی را کاهش می‌دهد. بنابراین از طریق نصب فین وی شکل روی سطح بیرونی مبدل نمی‌توان اثر بخشی حرارتی را افزایش داد. مکان مناسب برای نصب فین وی شکل سطح داخلی مبدل می‌باشد، زیرا ماده تغییر فزاینده بیشترین سطح موثر انتقال حرارت (سطح داغ بیرونی مبدل و سطوح فین‌ها) را دارا می‌باشد. برای دسترسی به حالت بهینه در مدل وی شکل با توجه به غالب بودن انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در نیمه بالایی از مساحت فین در این ناحیه کاسته و به نیمه پایینی (به صورت فین ساده مستطیلی) که زمان ذوب بیشتری دارد، افزوده می‌شود.

در حالت وی شکل بیشترین اثربخشی حرارتی مربوط به حالت ۴ با زمان ذوب ۴۳/۳۰ دقیقه، و بیشترین زمان ذوب مربوط به حالت ۲ با زمان ذوب ۶۵ دقیقه می‌باشد. آرایش‌های وی شکل با محصور کردن جریان اثر قابل توجهی روی کاهش نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و جریان یافتن مواد PCM ذوب شده می‌گذارد.

نصب فین‌های وای شکل به صورت داخلی خارجی در حالت ۱ شکل (۱۰) عملکرد خوبی در بخش بالایی مبدل دارد، ولی در پایین‌ترین قسمت مبدل فرآیند ذوب به کندی صورت می‌گیرد. این اختلاف زمانی در ذوب بخش بالایی و پایینی، عملکرد سیستم را کاهش می‌دهد و زمان ذوب از زمان ذوب بهینه ۲۲ درصد بیشتر می‌شود. در چیدمان داخلی خارجی وای شکل، حالت ۱ شکل (۹) با کاهش مساحت فین‌ها در نیمه بالایی و افزودن آن به صورت فین ساده در نیمه پایینی در آرایش وای شکل، می‌توان زمان ذوب سیستم را در نیمه پایینی کاهش داد و به کمترین زمان ذوب رسید. در آرایش وای کم‌ترین زمان ذوب برای حالت ۲ در شکل (۱۰) با زمان ذوب ۳۹ دقیقه و بیشترین زمان ذوب برای حالت ۳ با زمان ذوب ۵۱/۶۶ دقیقه می‌باشد.

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش به طراحی یک سیستم ذخیره سازی انرژی حاوی ماده تغییر فاز دهنده پرداخته شد. هدف کاهش زمان ذوب ماده تغییر فزاینده با استفاده از پره‌های طولی بوده است. در نظر بوده است بدون تغییر مساحت مجموع سطوح انتقال حرارت، بتوان با تغییر چیدمان، هندسه و زوایای پره‌ها زمان ذوب را کاهش و عملکرد سیستم را افزایش داد. همچنین با



افزایش مساحت فین‌ها حجم ماده تغییر فازدهنده در مبدل کاهش پیدا نموده و موجب کاهش ذخیره انرژی در سیستم می‌شود. طبق نتایج شبیه‌سازی، در آرایش وای شکل کم‌ترین زمان ذوب برای حالت ۲ با زمان ذوب ۳۹ دقیقه و بیشترین زمان ذوب برای حالت ۳ با زمان ۵۱/۶۶ دقیقه می‌باشد. در نهایت بهترین چیدمان که کم‌ترین زمان ذوب را دارد مربوط به حالت ۲ در آرایش وای شکل می‌باشد. در واقع در این حالت زمان ذوب نسبت به حالت مبنا که حالت بدون فین است ۶۵/۴۹ درصد کاهش یافته است.

## مراجع

- [1] Mat, S., Al-Abidi, A. A., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., Mohammad, A. T. (2013). Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins. *Energy conversion and management*, 74, pp223-236.
- [2] Talluri, T., Kim, T. H., Shin, K. J. (2020). Analysis of a battery pack with a phase change material for the extreme temperature conditions of an electrical vehicle. *Energies*, 13(3), pp507.
- [3] Elgafy, A., Lafdi, K. (2005). Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials. *Carbon*, 43(15), pp3067-3074.
- [4] Al-Maghalseh, M., Mahkamov, K. (2018). Methods of heat transfer intensification in PCM thermal storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, pp62-94.
- [5] Royo, P., Acevedo, L., Ferreira, V. J., García-Armingol, T., López-Sabirón, A. M., Ferreira, G. (2019). High-temperature PCM-based thermal energy storage for industrial furnaces installed in energy-intensive industries. *Energy*, 173, pp1030-1040.
- [6] سهیلا بیگدلی، علی کشاورز ولیان، علی اکبر رنجبر. (۱۳۹۴). بهینه سازی مبدل حرارتی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده. هفتمین کنفرانس مبدلهای گرمایی، تهران.
- [7] Sun, W., Huang, R., Ling, Z., Fang, X., Zhang, Z. (2020). Numerical simulation on the thermal performance of a PCM-containing ventilation system with a continuous change in inlet air temperature. *Renewable Energy*, 145, pp1608-1619.
- [8] Zhang, Z., Cheng, J., He, X. (2017). Numerical simulation of flow and heat transfer in composite PCM on the basis of two different models of open-cell metal foam skeletons. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 112, pp959-971.
- [9] Chen, S., Yang, Y., Olomi, C., Zhu, L. (2019, October). Numerical study on the winter thermal performance and energy saving potential of thermo-activated PCM composite wall in existing buildings. In *Building simulation* (pp. 1-20). Tsinghua University Press.
- [10] Elsayed, A. O. (2018). Numerical investigation on PCM melting in triangular cylinders. *Alexandria engineering journal*, 57(4), pp2819-2828.
- [11] Wang, W., Li, H., Guo, S., He, S., Ding, J., Yan, J., Yang, J. (2015). Numerical simulation study on discharging process of the direct-contact phase change energy storage system. *Applied Energy*, 150, pp61-68.
- [12] Al-Abidi, A. A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., Mohammad, A. T. (2014). Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins. *Energy and Buildings*, 68, pp33-41.