

بهینه‌سازی چیدمان فین‌ها در مبدل حرارتی دو لوله‌ای جهت بهبود عملکرد ذخیره‌سازی

در مواد تغییرفازدهنده

امیربابک انصاری

پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران،
a.b.ansari@kgut.ac.ir

چکیده

استفاده از سیستم‌های ذخیره گرمای نهان با استفاده از مواد تغییر فازدهنده در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده است. استفاده از فین‌ها یکی از ساده‌ترین و ارزان‌ترین راهکارهای افزایش انتقال حرارت در ماده تغییرفازدهنده و افزایش عملکرد سیستم ذخیره‌سازی است. با توجه به اینکه نحوه چیدمان فین‌ها در مدت زمان شارژ و در نتیجه راندمان انتقال حرارت تاثیر بسزایی دارد، هدف اصلی از این مطالعه، بهینه‌سازی چیدمان فین‌ها در محفظه ماده تغییرفازدهنده در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای، جهت کاهش زمان شارژ و در نتیجه افزایش راندمان سیستم ذخیره‌سازی انرژی است. برای این منظور معادلات حاکم شامل بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای فین‌دار، با استفاده از نرم‌افزار آنسیس-فلوئنت حل شده‌اند و رفتار حرارتی-سیالاتی ماده تغییرفازدهنده و عملکرد سیستم ذخیره‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای یافتن بهترین چیدمان فین‌ها جهت بهینه‌سازی عملکرد ذخیره‌سازی، از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی استفاده شده است. نتایج بدست آمده از سطح پاسخ با منحنی مرتبه سوم رتبه‌کاسته که از ۲۵ شبیه‌سازی حاصل شده است، نشان می‌دهد در مقایسه با حالت بدون فین، چیدمان یکنواخت فین‌ها حدود ۱۹٪ و چیدمان بهینه فین‌ها حدود ۵۶٪ زمان شارژ را کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی

افزایش عملکرد ذخیره‌سازی، مواد تغییرفازدهنده، مبدل حرارتی دولوله‌ای، چیدمان بهینه فین‌ها، روش سطح پاسخ

استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به طور گسترده جهت افزایش راندمان مصرف انرژی در کاربردهای مختلفی مانند صرفه‌جویی انرژی در ساختمان‌ها [۱-۴]، گرمایش و سرمایش خانگی [۵-۸]، کاهش اوج بار مصرفی [۹-۱۱] و بازیافت حرارتی [۱۲-۱۴] مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون مواد تغییرفاز دهنده متعددی با نقاط ذوب و انجماد متفاوت به طور تجربی شناخته شده‌اند و خواص ترموفیزیکی آن‌ها مانند ظرفیت گرمایی، پخش و رسانایی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. یکی از چالش‌های اساسی در مواد تغییرفاز دهنده که امروزه به عنوان یکی از موضوعات تحقیقاتی جذاب مورد توجه محققان قرار گرفته است، رسانایی حرارتی بسیار کم در مواد تغییرفاز دهنده است، زیرا به شدت بر سرعت انتقال حرارت و نرخ پاسخ ماده تغییرفاز دهنده در طول چرخه‌های شارژ-دشارژ و در نتیجه راندمان عملکرد ذخیره‌سازی تأثیر می‌گذارد [۱۵]. به همین دلیل روش‌های مختلفی جهت افزایش رسانایی و انتقال حرارت در ماده تغییرفاز دهنده ارائه شده است که عبارتند از: تغییر در هندسه سیستم ذخیره‌سازی، استفاده از فین‌ها و همچنین استفاده از مواد افزودنی مانند نانوذرات و فوم‌های فلزی. از بین سیستم‌های مختلف ذخیره‌سازی با ماده تغییرفاز دهنده، مبدل‌های حرارتی چندلوله‌ای به دلیل کاربرد فراوان در صنایع مختلف بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

تغییر در هندسه با هدف افزایش سطح انتقال حرارت یکی از راه‌های مناسب جهت افزایش عملکرد سیستم ذخیره‌سازی است. در این راستا، بازیابی و همکاران [۱۶] یک لوله بیضوی در کانال حلقوی را به صورت عددی مطالعه کردند. آنها اثرات نسبت‌های مختلف و موقعیت زاویه‌ای قطرهای بیضی داخلی را در طول فرآیند شارژ بررسی کردند. آنها دریافتند که حداکثر نرخ شارژ تا ۶۱ درصد افزایش یافته و عملکرد سیستم ذخیره‌سازی تا ۲۶ درصد بهبود می‌یابد. شهسوار و همکاران [۱۷] به صورت عددی فرآیندهای تغییر فاز را در یک مبدل مواج دو لوله‌ای مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که زمان لازم برای شارژ و تخلیه ماده تغییرفاز دهنده با استفاده از لوله های موج‌دار در مقایسه با لوله‌های صاف به ترتیب ۲۹ و ۵۸ درصد کاهش می‌یابد. در پژوهشی جداگانه، شهسوار و همکاران [۱۸] کارایی فرآیند تغییر فاز را در مبدل دولوله‌ای مواج ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش دمای ورودی، سرعت متوسط و دامنه موج باعث افزایش عملکرد سیستم می‌شود. زو و همکاران [۱۹، ۲۰] یک سیستم ذخیره‌سازی دو لوله‌ای افقی ترکیب شده با یک محیط متخلخل را بررسی کرد و موقعیت ناحیه متخلخل در سیستم را بهینه کردند. آنها دریافتند که سیستم با فوم نیمه‌پر در قسمت پایه نسبت به حالتی که کاملاً توسط فوم پر شده است، سرعت ذوب را ۸۰ درصد افزایش می‌دهد. آنها همچنین مطالعه انجام شده را در مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای استفاده نیز انجام دادند.

علاوه بر تغییر در هندسه مبدل، یکی از راهکارهای مناسب استفاده از فین‌ها است زیرا مزایای قابل توجهی مانند پیکربندی ساده، نسبت افزایش سطح بالا، هزینه ساخت کم و نصب آسان دارند [۲۱]. فین‌ها با چیدمان مختلف و همچنین با اندازه و پیکربندی‌های مختلف مانند مستطیل، دایره، حلقوی، مخروطی، پین و طولی می‌توانند در محفظه ماده تغییرفاز دهنده در مبدل حرارتی قرار گرفته و با افزایش سطح انتقال حرارت، نرخ پاسخ و عملکرد ماده تغییرفاز دهنده را بشدت افزایش دهند. در این راستا مطالعات مختلفی توسط محققان، مخصوصاً در مبدل‌های حرارتی چند لوله‌ای صورت گرفته است. سینگ و همکاران [۲۲] استفاده از فین‌های حلقوی جهت افزایش راندمان شارژ ماده تغییرفاز دهنده در یک مبدل حرارتی لوله‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که کاهش ارتفاع فین حلقوی نقش بسزایی در جابجایی طبیعی در طول فرآیند ذوب بازی می‌کند. این مطالعه نشان داد که با کاهش ارتفاع فین، بیشترین کاهش در زمان شارژ (۴۳ درصد) رخ می‌دهد. مهدی و همکاران [۲۳] در مطالعه خود در مورد چیدمان فین‌ها به این نتیجه رسیدند که باید یک چیدمان متمایز از فین‌ها بین نیمه‌های بالا و پایین سیستم‌های ذخیره‌سازی افقی وجود داشته باشد، زیرا سرعت ذوب در قسمت‌های بالایی مانند سایر بخش‌ها نیست. اگر فین‌های کمتر و کوتاه‌تری در نیمه بالایی ناحیه ماده تغییرفاز دهنده اعمال شود، می‌توان نقش غالب جابجایی طبیعی در طول ذوب را به طور مؤثر مشاهده کرد. قلمباز و همکاران [۲۴] از روش بهینه‌سازی تاگوچی برای یافتن طول فین‌ها با در نظر گرفتن اثرات جابجایی طبیعی استفاده کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که فین‌های کوتاه و بلند باید به ترتیب در بالا و پایین محفظه قرار گیرند. شهسوار و همکاران [۲۵] چیدمان مختلف فین‌های حلقوی در محفظه ماده تغییرفاز دهنده در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای عمودی را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که توزیع غیریکنواخت فین در جهت عمودی می‌تواند تا حدود ۲۴ درصد مدت زمان لازم برای ذوب ماده تغییرفاز دهنده را در مقایسه با

توزیع غیریکنواخت کاهش دهد. با این حال، اعمال توزیع غیریکنواخت فین‌ها نمی‌تواند نتایج خوبی در طول حالت انجماد به همراه داشته باشد.

در پژوهش‌های فوق از مطالعه پارامتری جهت بررسی و بهبود عملکرد سیستم ذخیره‌سازی استفاده شده است. اما جهت دستیابی به عملکرد بهینه سیستم ذخیره‌سازی باید از روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده نمود [۲۶]. اما با توجه به ماهیت گذرا بودن و در نتیجه زمان‌بر بودن شبیه‌سازی در این مسائل، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک و غیره مقرون‌به‌صرفه نیست؛ زیرا در این روش‌ها نیاز به تعداد شبیه‌سازی زیادی است که فرآیند بهینه‌سازی را بسیار زمان‌بر و غیرممکن می‌سازد. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی بر پایه طراحی آزمایش در مسائل مهندسی مانند ذخیره‌سازی انرژی گرمان نهان در مبدل‌های لوله‌ای [۲۷]، یک راهکار بسیار مناسب جهت غلبه بر این مشکل است. روش سطح پاسخ^۱ یکی از کارآمدترین روش‌های بر پایه طراحی آزمایش است. در این روش با استفاده از طراحی آزمایش، تعداد مشخصی شبیه‌سازی طراحی و انجام شده و با استفاده از نتایج بدست آمده، یک منحنی (سطح پاسخ) بر روی نتایج برازش می‌شود. سپس با استفاده از این سطح پاسخ می‌توان نتایج را به ازای سایر ورودی‌های بدست آورد که علاوه بر دقت بالا، با صرف زمان بسیار کمی می‌توان مقدار بهینه مساله را نیز بدست آورد. در این راستا نیز مطالعات مختلفی در مبدل‌های حرارتی جهت بهبود عملکرد ذخیره‌سازی در ماده تغییرفاز دهنده صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است.

لهراسبی و همکاران [۲۸] با استفاده از فین‌های وی شکل عملکرد ذخیره‌سازی حرارتی در ماده تغییرفاز دهنده را در یک مبدل حرارتی لوله‌ای مورد بررسی قرار دادند. ضخامت، ارتفاع و زاویه بین فین‌ها به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شدند. همچنین با استفاده از روش سطح پاسخ و اعمال طرح مرکب مرکزی^۲، پیکربندی بهینه جهت رسیدن به بهترین عملکرد سیستم ذخیره‌سازی بدست آمد. نتایج نشان داد در مقایسه با حالت بدون فین عملکرد سیستم ذخیره‌سازی تا ۴ برابر افزایش می‌یابد. همچنین در پیکربندی بهینه، تاثیر استفاده از نانوذرات مس در ماده تغییرفاز دهنده نیز مورد بررسی قرار گرفت. چنانچه پور و همکاران [۲۹] در یک مطالعه آزمایشگاهی از نانو کپسول‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده که مشخصات ساختاری و حرارتی آنها نیز بطور دقیق آنالیز شد، جهت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای استفاده کردند. جهت دستیابی به بیشترین راندمان حرارتی در ماده تغییرفاز دهنده از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی استفاده شد و عدد رینولدز، دمای سیال ورودی به مبدل حرارتی و میزان غلظت ماده تغییرفاز دهنده به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. هوانگ و همکاران [۳۰] جهت افزایش عملکرد ذخیره‌سازی انرژی در ماده تغییرفاز دهنده از یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای به همراه فین‌های طولی استفاده کردند. برای دستیابی به عملکرد بهینه سیستم ذخیره‌سازی نیز از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی استفاده شد که در آن ضخامت فین‌ها، خروج از مرکز بودن لوله داخلی و همچنین زاویه چرخش فین‌ها به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. نتایج بدست آمده نشان داد در مقایسه با حالت بدون فین، سیستم بهینه ۲۳/۸۷٪ زمان شارژ ماده تغییرفاز دهنده را کاهش می‌دهد. همچنین در تاثیر پارامترهای مختلف در سیستم بهینه شامل طول فین‌ها، دمای اولیه ماده تغییرفاز دهنده، جنس فین‌ها و دمای دیواره لوله‌ها نیز مورد آنالیز و بررسی قرار گرفت. مهدی و همکاران [۳۱] به بررسی عملکرد سیستم ذخیره‌سازی ماده تغییرفاز دهنده در یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای افقی پرداختند که در آن ماده تغییرفاز دهنده در لوله میانی قرار گرفته و سیال در لوله‌های داخلی و بیرونی جریان داشت. در این مطالعه آنها با استفاده از روش پاسخ، چیدمان بهینه فین‌های طولی را که به لوله‌های داخلی و بیرونی متصل بود، بدست آوردند. همچنین تاثیر استفاده از مواد نانوسیال در ماده تغییرفاز دهنده نیز مورد بررسی قرار گرفت که نشان داد تاثیر استفاده از فین‌ها در عملکرد ذخیره‌سازی بسیار بیشتر از نانو سیال است. پارسا زاده ودوان [۳۲] عملکرد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در ماده تغییرفاز دهنده را در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای به همراه چیدمان یکنواخت فین مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، غلظت مواد نانو سیال در ماده تغییرفاز دهنده، زاویه فین‌ها و فاصله بین فین‌ها به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شد و با استفاده از روش سطح پاسخ

¹ Response Surface Method (RSM)

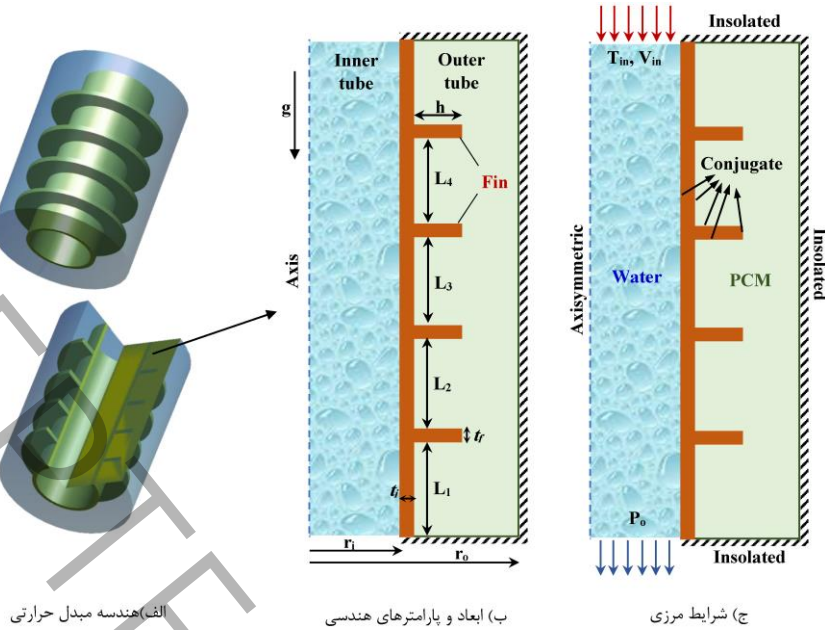
² Central Composite Design (CCD)

عملکرد بهینه سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که غلظت نانوسیال بکار رفته و همچنین زاویه فین‌ها تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد سیستم ذخیره‌سازی دارد.

استفاده از فین‌های حلقوی در محفظه ماده تغییرفاز دهنده در مبدل‌های حرارتی لوله‌ای یک راهکار مناسب جهت بهبود عملکرد ذخیره‌سازی است. همانطور که در مرور تحقیقات پیشین بیان شد، تاثیر چیدمان فین‌های حلقوی بر عملکرد ذخیره‌سازی فقط بصورت پارامتری مورد بررسی قرار گرفته است. به همین دلیل یافتن چیدمان بهینه و غیریکنواخت فین‌های حلقوی در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای جهت رسیدن به کمترین زمان ذخیره‌سازی، یکی از چالش‌های اساسی است که به عنوان نوآوری و هدف اصلی در این مطالعه به آن پرداخته شده و تاکنون در مطالعات پیشین نیز انجام نشده است. برای این منظور نیز از روش سطح پاسخ که بر پایه طراحی آزمایش است، استفاده شده است. همچنین نتایج بدست آمده از حالت بهینه با حالت بدون فین و همچنین چیدمان یکنواخت فین‌ها نیز مقایسه شده است که نشان می‌دهد استفاده از چیدمان بهینه فین‌ها تاثیر بسزایی در افزایش عملکرد سیستم ذخیره‌سازی دارد.

۲- توصیف هندسه و شرایط عملکردی سیستم ذخیره‌سازی

در این مطالعه یک مبدل حرارتی دولوله‌ای عمودی به همراه ماده تغییرفاز دهنده به عنوان سیستم ذخیره‌سازی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است که شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است. سیستم ذخیره‌سازی شامل دو لوله هم‌مرکز از جنس مس است که ماده تغییرفاز دهنده در لوله بیرونی قرار دارد. همچنین در لوله داخلی آب داغ با سرعت و دمای ثابت از بالا وارد شده و در لوله جریان می‌یابد. شایان ذکر است که با توجه به شرایط دمایی و عملکردی، از RT-35 به عنوان ماده تغییرفاز دهنده استفاده شده است. برای افزایش راندمان ذخیره‌سازی انرژی در ماده تغییرفاز دهنده، چهار فین از جنس مس که ضریب هدایت حرارتی بالایی دارد، با ضخامت t_f و ارتفاع h با فواصل مختلف L_1 ، L_2 ، L_3 و L_4 در داخل محفظه ماده تغییرفاز دهنده قرار دارند که به لوله داخلی متصل شده‌اند. حرارت از سیال داغ از طریق جداره لوله و همچنین جداره فین‌ها به داخل ماده تغییرفاز دهنده نفوذ کرده و باعث ذوب و شارژ شدن آن می‌شود. ضمناً با توجه به تقارن محوری موجود در هندسه، فقط بخشی از آن که در شکل ۱ نشان داده شده است، شبیه‌سازی و آنالیز می‌شود. همچنین مقادیر پارامترهای هندسی مربوط به سیستم ذخیره‌سازی در جدول ۱ و مشخصات ترموفیزیکی ماده تغییرفاز دهنده و آب نیز به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ بطور کامل ارائه شده‌اند. شایان ذکر است که منظور از عملکرد ذخیره‌سازی در این مطالعه، مدت زمان لازم جهت شارژ ماده تغییرفاز دهنده است که وجود فین‌ها به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت این زمان را کاهش می‌دهند. اما یکی از نکات مهم که باید به آن توجه داشت، چیدمان فین‌ها است که بشدت در مدت زمان شارژ ماده تغییرفاز دهنده تأثیرگذار خواهد بود. به همین دلیل برای دستیابی به بهترین چیدمان فین‌ها نیاز به استفاده از بهینه‌سازی است که در ادامه مفصلاً تشریح شده است. نکته دیگری که باید به آن توجه داشت، نوع ماده تغییرفاز دهنده انتخابی است. با توجه به خواص مختلف مواد تغییرفاز دهنده، رفتار حرارتی و در نتیجه مدت زمان شارژ و دشارژ آنها متفاوت خواهد بود. لذا نتایج ارائه شده در این مطالعه فقط برای RT-35 معتبر است و برای سایر مواد تغییرفاز دهنده باید این مطالعه مجدداً انجام شود.



(الف) هندسه مبدل حرارتی

(ب) ابعاد و پارامترهای هندسی

(ج) شرایط مرزی

شکل ۱ شماتیک مبدل حرارتی به همراه ماده تغییر فاز دهنده

Figure 1. Schematic of heat exchanger with PCM

جدول ۱ مشخصات هندسی سیستم ذخیره سازی

Table 1. Geometrical parameters of storage system

مقدار (mm)	پارامترهای هندسی
۱۶۰	ارتفاع مبدل، L
۱۰	ارتفاع فین، h
۱٫۲	ضخامت فین، t_f
۸	شعاع لوله داخلی جریان آب، r_i
۱	ضخامت لوله داخلی، t_i
۲۲	شعاع لوله بیرونی مخزن PCM، r_o

جدول ۲ مشخصات ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده RT-35 [۲۵]

Table 2. Thermo-physical properties of phase change material RT-35 [25]

ویسکوزیته μ (N.s/m ²)	دمای انجماد $T_{Solidus}$ (K)	دمای ذوب $T_{Liquidus}$ (K)	ضریب انبساط حرارتی β (1/K)	گرمای نهان L_f (kJ/kg)	ضریب هدایت حرارتی k (W/m.K)	گرمای ویژه c_p (J/kg.K)	چگالی ρ (kg/m ³)
۰/۰۲۳	۳۰۲	۳۰۹	۰/۰۰۰۶	۱۷۰	۰/۲	۲۰۰۰	۸۱۵

جدول ۳ مشخصات ترموفیزیکی آب در دمای ورود

Table 3. Thermo-physical properties of water at inlet temperature

ویسکوزیته μ (N.s/m ²)	دما T (K)	ضریب هدایت حرارتی k (W/m.K)	گرمای ویژه c_p (J/kg.K)	چگالی ρ (kg/m ³)
۰/۰۰۰۵۳	۳۲۳	۰/۶۴۴	۴۰۶۶	۹۸۷

۳- مدل سازی ریاضی و شبیه سازی

برای شبیه سازی رفتار حرارتی-سیالاتی سیستم ذخیره سازی، ابتدا فرضیات حاکم بر مساله مشخص می شوند و بر اساس آن معادلات حاکم بر پدیده های فیزیکی شامل بقای انرژی در سیال و ماده تغییر فاز دهنده، بقای جرم، بقای ممنتوم و همچنین تغییر فاز در ماده تغییر فاز دهنده نیز مشخص می شوند. با توجه به اینکه فرآیند شارژ ماده تغییر فاز دهنده یک فرآیند متغیر با زمان است، دستگاه معادلات باید بصورت ناپایا حل شوند. بطور کلی فرضیات حاکم بر مساله جهت مدل سازی ریاضی را می توان بصورت زیر بیان کرد:

- خواص ترموفیزیکی سیال داغ (آب) ثابت فرض شده و از تغییرات آنها با دما و فشار صرفه نظر شده است.
 - برای محاسبه تغییرات چگالی و اعمال نیروی شناوری (جابجایی آزاد) در ماده تغییر فاز دهنده از تقریب بوزینسک^۱ استفاده شده است.
 - سیال داغ که در لوله داخلی جریان دارد، از نوع نیوتنی، آرام و تراکم ناپذیر است.
 - با توجه به وجود تقارن در هندسه، شبیه سازی بصورت دوبعدی و تقارن محوری انجام شده است.
 - از تغییر حجم ماده تغییر فاز دهنده در طی فرآیند تغییر فاز صرف نظر شده است.
 - تاثیر گرانش بر روی حرکت سیال در ماده تغییر فاز دهنده در راستای محور طولی و رو به پایین در نظر گرفته شده است.
 - از جمله های اتلافی در معادله ممنتوم صرفه نظر شده است.
 - شرط عدم لغزش بر روی دیوارها در نظر گرفته شده است.
- با توجه به فرضیات فوق، معادلات حاکم بر سیستم ذخیره سازی بصورت زیر بیان می شوند:

بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (1)$$

بقای ممنتوم (اندازه حرکت)

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu (\nabla^2 \vec{V}) - \rho \beta (T - T_{ref}) \vec{g} - \vec{S} \quad (2)$$

بقای انرژی

$$\frac{\rho C_p \partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p \vec{V} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) - S_L \quad (3)$$

شایان ذکر است که جمله آخر در معادله ممنتوم، معادله (۲)، جهت اعمال تأثیر مواد تغییر فاز دهنده است که طبق قانون دارسی [۲۵] از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\vec{S} = A_m \frac{(1-LF)^2}{LF^3 + 0.001} \vec{V} \quad (4)$$

که در آن A_m ثابت ناحیه خمیری^۲ است که مقدار آن برابر با 10^5 در نظر گرفته می شود [۲۵]. همچنین برای در نظر گرفتن تأثیر مواد تغییر فاز دهنده در معادله انرژی نیز جمله چشمه S_L نیز در نظر گرفته شده است که از رابطه زیر محاسبه می گردد [۳۳]:

$$S_L = \frac{\rho \partial (LF L_f)}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{V} LF) \quad (5)$$

که در رابطه فوق L_f گرمای نهان ذوب و LF کسر مایع در ماده تغییر فاز دهنده است که از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$LF = \frac{\Delta H}{L_f} = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s} & T_s < T < T_L \\ 1 & T > T_L \end{cases} \quad (6)$$

¹ Boussinesq approximation

² Mushy Zone Constant

که در رابطه فوق T_L و T_S به ترتیب دمای شروع انجماد و شروع ذوب هستند. همچنین تغییرات چگالی ناشی از تغییرات دما در ماده تغییرفازدهنده نیز بر طبق تقریب بوزینسک محاسبه می‌گردد بطوریکه مقدار چگالی ثابت در نظر گرفته می‌شود ولی تأثیر تغییرات آن با دما در معادله ممنوم بصورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۵]:

$$\rho = \rho_{ref} (1 - \beta(T - T_{ref})) \quad (7)$$

همچنین در معادلات فوق طبق فرضیات بیان شده خواص سیال شامل چگالی، ویسکوزیته، ضریب رسانش و غیره ثابت در نظر گرفته شده‌اند. شایان ذکر است که در این مطالعه کل دامنه محاسباتی شامل تمام نواحی بصورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شوند بطوریکه معادلات حاکم برای تمام نواحی صدق می‌کند.

۱-۳- شرایط مرزی و اولیه

برای حل دستگاه معادلات فوق، نیاز به اعمال شرایط مرزی و اولیه مناسب است که بطور خلاصه بصورت زیر بیان می‌شوند:

- سیال داغ که آب در نظر گرفته شده است با دمای 50°C و با سرعت ثابت (عدد رینولدز ۱۰۰۰) وارد لوله داخلی می‌گردد.
- در مقطع خروجی لوله داخلی، شرط توسعه یافتگی در نظر گرفته شده است. به عبارتی دیگر گرادینان صفر برای مولفه‌های سرعت در جهت جریان و در مرز خروجی اعمال شده است.
- در مقطع خروجی لوله داخلی، شرط فشار ثابت (فشار صفر) در نظر گرفته شده است.
- در زمان اولیه و شروع شبیه‌سازی، دمای کل مبدل حرارتی 15°C است و کسر مایع در ماده تغییرفازدهنده نیز صفر ($LF=0$) است. به عبارتی دیگر، ماده تغییرفازدهنده در حالت جامد قرار دارد و با گذشت زمان شارژ شده و بصورت مایع در می‌آید.

۲-۳- شبیه‌سازی و روش محاسباتی

برای شبیه‌سازی عملکرد حرارتی-سیالاتی سیستم ذخیره‌سازی معادلات حاکم به همراه شرایط مرزی و اولیه ارائه شده باید حل شوند. برای این منظور از نرم‌افزار تجاری انسیس-فلوئنت استفاده شده است. همچنین برای شبیه‌سازی عملکرد ماده تغییرفازدهنده از روش انتالپی-تخلخل استفاده شده است که اولین بار توسط برنت و همکاران [۳۳] ارائه شد. جهت افزایش دقت محاسبات و با توجه به وجود مکانیزم جابجایی آزاد در ناحیه ماده تغییرفازدهنده، برای گسسته‌سازی معادله فشار از روش پرستو^۲ و برای گسسته‌سازی معادله ممنوم و انرژی نیز از روش روش کوئیک^۳ استفاده شده است. همچنین برای همگرایی شبیه‌سازی از ضریب زیرتخفیف ۰/۵ برای معادلات ممنوم و کسر حجمی، ضریب ۰/۳ برای فشار و ضریب ۰/۹ برای معادله انرژی استفاده شده است. شایان ذکر است که اگر چه کاهش گام زمانی باعث همگرایی بهتر شبیه‌سازی می‌شود، اما با کاهش گام زمانی، مدت زمان هر شبیه‌سازی نیز به شدت افزایش می‌یابد. لذا با استفاده از ضرایب زیرتخفیف ارائه شده و بازه زمانی ۰/۵ ثانیه می‌توان علاوه بر همگرایی مناسب و دقت بالای نتایج، شبیه‌سازی را در مدت زمان کوتاه‌تری انجام داد. همچنین برای همه معادلات حاکم رسیدن به خطای نسبی 10^{-6} به عنوان معیار همگرایی و اتمام محاسبات در هر بازه زمانی در نظر گرفته شده است. همچنین محاسبات تا رسیدن به حالت پایا و کسر مایع برابر با یک (شارژ کامل) ادامه می‌یابد.

۴- بهینه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی

همانطور که قبلاً نیز بیان شد، هدف از این مطالعه بهینه‌سازی چیدمان فین‌های حلقوی در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای با هدف رسیدن به کمترین زمان شارژ کامل ماده تغییرفازدهنده است که در آن کسر مایع برابر با یک شده است ($LF=1$). همچنین متغیرهای بهینه‌سازی شامل چهار فاصله بین فین‌ها (L_1, L_2, L_3 و L_4) هستند که بر اساس محدودیت‌های ساخت و همچنین

¹ Semi-Implicit Pressure Linked Equatiojns (SIMPLE)

² PRESTO

³ QUICK

پوشش کل ناحیه ماده تغییرفاز دهنده، از ۵ میلی‌متر تا ۳۵ میلی‌متر مطابق شکل ۱ می‌تواند تغییر کند. بنابراین می‌توان مساله بهینه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی شامل تابع هدف و قیدهای بهینه‌سازی را با روابط زیر بیان کرد:

Objective function:

$$\text{Minimizing the charging time, } t_{\lambda=1}(L_1, L_2, L_3, L_4)$$

Constraints:

$$5 < L_1 < 35 \text{ (mm)}$$

$$5 < L_2 < 35 \text{ (mm)}$$

$$5 < L_3 < 35 \text{ (mm)}$$

$$5 < L_4 < 35 \text{ (mm)}$$

(۸)

همانطور که از شکل ۱ مشاهده می‌گردد، L_1 فاصله اولین فین تا کف کانال است و پس از تعیین فاصله بین سایر فین‌ها، فاصله بین فین بالایی تا سقف مبدل نیز بدست می‌آید.

۴-۱- روش سطح پاسخ

با توجه به اینکه هر شبیه‌سازی مبدل حرارتی جهت بررسی عملکرد شارژ ماده تغییرفاز دهنده بسیار زمان‌بر است، لذا استفاده از الگوریتم‌های مرسوم بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک و غیره با توجه به تعداد زیاد شبیه‌سازی، فرآیند بسیار زمان‌بری خواهد بود. برای چنین مسائلی استفاده از روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای طراحی آزمایش استفاده می‌شود که در این پژوهش از روش سطح پاسخ استفاده شده است. در این روش به ازای مقادیر مختلف از متغیرهای طراحی (عوامل)، مقدار تابع هدف مربوطه (پاسخ) مشخص می‌شود. سپس یک سطح پاسخ بر روی مقادیر بدست آمده برازش می‌شود. سطح پاسخ در واقع نموداری یا رابطه‌ای است که تغییرات پاسخ را به عنوان تابعی از متغیرهای طراحی مشخص می‌کند. به عبارتی دیگر در مطالعه حاضر برای زمان شارژ ماده تغییرفاز دهنده یک رابطه (سطح پاسخ) بر حسب متغیرهای طراحی، شامل چهار فاصله بین فین‌ها (L_1, L_2, L_3, L_4) بدست می‌آید. در روش سطح پاسخ بر پایه طراحی مرکب مرکزی از یک چندجمله‌ای به عنوان تابع سطح پاسخ استفاده می‌شود. به عنوان مثال می‌توان از چندجمله‌ای مرتبه دوم بصورت زیر به عنوان سطح پاسخ استفاده نمود:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^f b_i x_i + \sum_{i=1}^f b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{f-1} \sum_{j=i+1}^f b_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

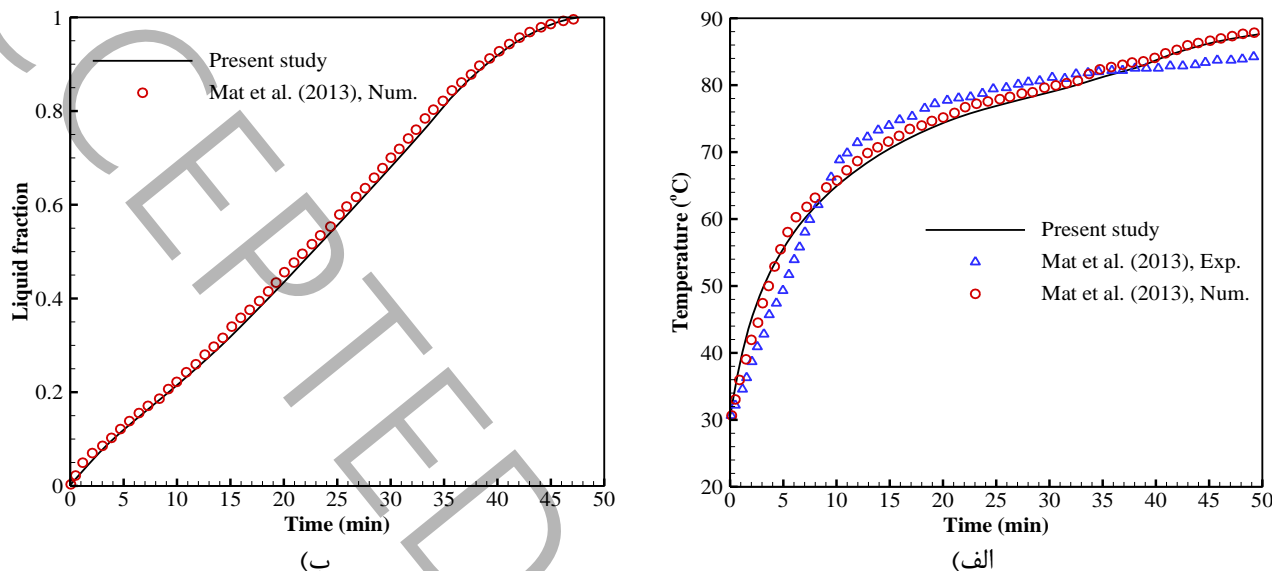
که در آن Y سطح پاسخ (زمان شارژ ماده تغییرفاز دهنده در مطالعه حاضر)، x_i ها متغیرهای طراحی (فاصله بین فین‌ها در مطالعه حاضر) و b_0 جمله عرض از مبدأ است. همچنین b_i ضرایب همبستگی^۱ چندجمله‌ای هستند که با استفاده از روش حداقل مربع‌ها تخمین زده شوند. شایان ذکر است که میزان دقت و تناسب معادله سطح پاسخ توسط آنالیز واریانس آزموده شود. آنالیز واریانس در واقع یک آنالیز آماری است که توسط آن می‌توان تفاوت بین دو جمعیت آماری مستقل را بررسی کرد. به عبارتی دیگر با استفاده از آنالیز واریانس می‌توان تفاوت بین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده در طراحی آزمایش را با نتایج بدست آمده از سطح پاسخ مقایسه کرد و دقت معادله منحنی برازش شده را مورد ارزیابی قرار داد. شایان ذکر است که در مطالعه حاضر برای طراحی آزمایش و حل مساله بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ، از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استفاده شده است.

۵- اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت و دقت مدل عددی، مدل آزمایشگاهی مت و همکاران [۳۴] بصورت عددی شبیه‌سازی شده است و نتایج عددی بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. در این مطالعه یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای فین‌دار به همراه PCM-RT82 بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مبدل حرارتی آب داغ در لوله‌های داخلی و بیرونی جریان دارند درحالی‌که ماده تغییرفاز دهنده در لوله میانی قرار دارد. نتایج ارائه شده شامل کسر مایع و دمای میانگین ماده تغییرفاز دهنده در طول فرآیند شارژ (دوب) است. آنها همچنین یک مدل عددی برای شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی ارائه دادند و نتایج مدل عددی را با نتایج تجربی مورد مقایسه و بررسی قرار دادند که از تطابق بسیار خوبی برخوردار بود. در مطالعه حاضر نیز از این مدل آزمایشگاهی برای

¹ Regression coefficients

اعتبارسنجی نتایج استفاده شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی شامل تغییرات دمای میانگین و همچنین کسر حجمی ماده تغییر فاز دهنده با گذشت زمان به ترتیب در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب ارائه شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و همچنین نتایج آزمایشگاهی وجود دارد که نشان‌دهنده اعتبار و صحت روش عددی بکاررفته در مطالعه حاضر است.



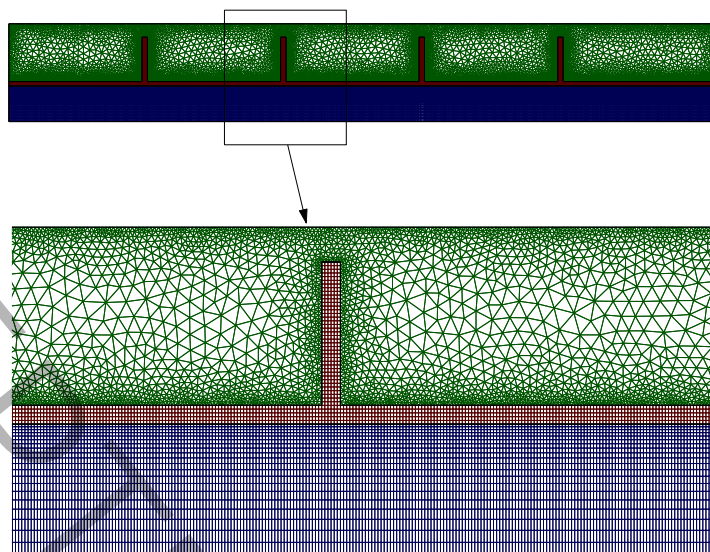
شکل ۲: مقایسه تغییرات الف) دما و ب) کسر مایع در فرآیند شارژ PCM-RT82 با نتایج مت و همکاران [۳۴]

Figure 2. Comparing the variation of a) Temperature and b) liquid fraction during the charge process of PCM-RT82 with the results of Mat et al. [34]

۶- مطالعه استقلال از شبکه

شبکه محاسباتی به شدت در دقت نتایج عددی تاثیرگذار است، به همین دلیل باید استقلال نتایج از شبکه محاسباتی بطور کامل بررسی شده و شبکه بهینه بدست آید. شایان ذکر است که در مطالعه حاضر برای دستیابی به نتایج بهتر و دقیق‌تر و همچنین استفاده از تعداد شبکه کمتر، شبکه محاسباتی در نزدیکی مرزها به دلیل وجود گرادینان زیاد در متغیرهای وابسته، متمرکز شده است که شماتیک آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

در مطالعه حاضر، مبدل حرارتی مورد نظر به ازای شبکه‌های محاسباتی مختلف شبیه‌سازی شده است و نتایج به‌دست آمده در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که از این جدول مشاهده می‌گردد مقدار کسر مایع در ناحیه ماده تغییر فاز دهنده و مقدار میانگین دمای ماده تغییر فاز دهنده در زمان ۴۰۰۰ ثانیه و همچنین زمان شارژ کامل که در آن کسر مایع برابر با یک می‌شود نیز به ازای شبکه‌های مختلف ارائه شده است. یکی از نکات قابل توجه در مسائل گذرا، بازه زمانی است که به شدت دقت محاسبات را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در نتیجه علاوه بر اندازه شبکه، اندازه بازه زمانی نیز باید بطور همزمان مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور نتایج بدست آمده از شبکه‌های محاسباتی مختلف، به ازای بازه‌های زمانی مختلف نیز در جدول ۴ ارائه شده است که بتوان آنالیز بهتر و دقیق‌تری از مطالعه شبکه ارائه کرد. همانطور که از نتایج مشاهده می‌گردد با کاهش بازه زمانی میزان تغییرات در نتایج نیز کاهش می‌یابد. همچنین در شبکه‌های محاسباتی درشت (تعداد کم نقاط محاسباتی)، اختلاف نتایج زیاد است اما با ریزتر شدن شبکه محاسباتی، خطای محاسباتی نیز کاهش می‌یابد. بطور کلی با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ مشاهده می‌گردد که بازه زمانی ۰/۵ ثانیه و شبکه محاسباتی با ۳۴۸۰۰ گره محاسباتی باید به عنوان شبکه بهینه انتخاب گردد زیرا علاوه بر دقت مناسب، نتایج عددی وابسته به شبکه محاسباتی و بازه زمانی نیستند و می‌توان با کمترین حجم محاسبات، به نتایج بسیار خوبی دست یافت. بنابراین سایر محاسبات و همچنین نتایج ارائه شده در ادامه بر اساس این شبکه محاسباتی و بازه زمانی ارائه شده است.



شکل ۳ شماتیک شبکه محاسباتی در میدل حرارتی در حالت متقارن محوری

Figure 3. Schematic of computational grid inside the axisymmetric heat exchanger

جدول ۴ نتایج مطالعه استقلال از شبکه محاسباتی

Table 4. Results of grid independence study

زمان شارژ کامل (ثانیه)	دمای میانگین در ۴۰۰۰ ثانیه	کسر مایع در ۴۰۰۰ ثانیه	اندازه شبکه محاسباتی	بازه زمانی (ثانیه)
۷۱۵۰	۳۱۷,۳۴	۰,۹۳۸	۱۷۰۰۰	$\Delta t = 5$
۷۵۵۱	۳۱۵,۲۱	۰,۹۰۶	۲۴۳۰۰	
۷۷۸۶	۳۱۲,۵۱	۰,۸۸۴	۳۴۸۰۰	
۷۹۱۰	۳۱۰,۶۱	۰,۸۷۱	۳۸۳۰۰	
۷۰۹۵	۳۱۸,۶۴	۰,۹۴۱	۱۷۰۰۰	$\Delta t = 1$
۷۴۵۰	۳۱۶,۵۲	۰,۹۱۶	۲۴۳۰۰	
۷۷۵۱	۳۱۴,۴۴	۰,۸۹۵	۳۴۸۰۰	
۷۷۶۱	۳۱۲,۳۶	۰,۸۸۳	۳۸۳۰۰	
۷۰۶۸	۳۲۰,۷۵	۰,۹۴۵	۱۷۰۰۰	$\Delta t = 0.5$
۷۴۲۰	۳۱۷,۲۴	۰,۹۱۸	۲۴۳۰۰	
۷۷۲۱	۳۱۶,۴۴	۰,۹۰۱	۳۴۸۰۰	
۷۷۲۲	۳۱۶,۴۳	۰,۹۰۱	۳۸۳۰۰	
۷۰۶۷	۳۲۱,۰۹	۰,۹۴۷	۱۷۰۰۰	$\Delta t = 0.25$
۷۴۱۸	۳۱۷,۵۹	۰,۹۱۹	۲۴۳۰۰	
۷۷۲۱	۳۱۶,۴۴	۰,۹۰۱	۳۴۸۰۰	
۷۷۲۱	۳۱۶,۴۴	۰,۹۰۱	۳۸۳۰۰	

۷- نتایج بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ

برای انجام بهینه‌سازی و بدست آوردن چیدمان بهینه فین‌ها از روش سطح پاسخ، با توجه به تعداد متغیرهای طراحی (شامل ۴ فاصله بین فین‌ها) و ماهیت مساله که شبیه‌سازی است، تعداد ۲۵ چیدمان از فین‌ها جهت شبیه‌سازی طراحی می‌شود. سپس به ازای هر کدام از هندسه‌های طراحی شده باید یک شبیه‌سازی انجام شده و نتیجه آن شامل زمان شارژ کامل ماده تغییر فاز دهنده تعیین گردد. در جدول ۵ تعداد و داده‌های ورودی آزمایش‌ها یا هندسه‌های مختلف جهت شبیه‌سازی ارائه شده است. همانطور که مشاهده

می‌گردد، ۲۵ هندسه شامل فواصل مختلف از فین‌ها توسط این روش طراحی شده است که شامل نقاط ابتدایی، انتهایی و میانی بازه‌های تعیین شده در معادله (۸) است. شایان ذکر است که در ستون سمت راست جدول ۵ نیز تابع هدف که همان زمان شارژ کامل ماده تغییرفاز دهنده و رسیدن به کسر مایع برابر با یک است، قرار دارد. برای این منظور ۲۵ شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار انسیس-فلوئنت انجام شده و زمان شارژ کامل ماده تغییرفاز دهنده به ازای هر چیدمان از فین‌ها بدست آمده و در ستون مربوطه قرار گرفته است.

۷-۱- آنالیز واریانس و تعیین سطح پاسخ مناسب

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها و محاسبه مقادیر تابع هدف (زمان شارژ کامل)، یک معادله چندجمله‌ای به عنوان سطح پاسخ باید تعیین گردد. به عبارتی دیگر، یک رابطه برای تابع هدف بر حسب متغیرهای طراحی شامل L_1 تا L_4 تعیین می‌گردد که برای سنجش دقت این سطح پاسخ نیز از آنالیز واریانس استفاده می‌گردد. شایان ذکر است که یکی از معیارهای اصلی برای سنجش منحنی برازش شده، مقدار پارامترهایی مانند ضریب تعیین، ضریب تعدیل شده و ضریب تعیین پیش‌بینی شده توسط منحنی است. این سه پارامتر مقداری بین صفر و یک دارند که هر چه به همدیگر نزدیکتر بوده و در کل به عدد یک نزدیک باشند، نشان از کیفیت بالای پراکندگی داده‌ها و همچنین دقت بالای منحنی برازش شده است. همچنین یکی دیگر از پارامترهای مهم در تعیین کیفیت منحنی برازش شده، پارامتر پی-ولیو است که باید مقداری کمتر از ۰/۰۵ داشته باشد. هر چه مقدار این پارامتر برای جمله‌های بکاررفته در معادله منحنی بیشتر باشد به این معنا است که آن جمله (یا برهمکنش) تاثیر بر روی دقت نتایج بدست آمده از معادله منحنی برازش شده دارد.

جدول ۵ طراحی آزمایش به روش مرکب مرکزی و نتایج شبیه‌سازی

Table 5. Design of experiment based on CCD and simulation results

ردیف	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	L_4 (mm)	زمان (s)
۱	۲۰	۲۰	۲۰	۳۵	۵۶۵۱
۲	۲۰	۵	۲۰	۲۰	۶۹۵۸
۳	۳۵	۵	۵	۵	۷۱۲۴
۴	۲۰	۲۰	۵	۲۰	۶۲۲۷
۵	۵	۵	۳۵	۳۵	۴۷۸۱
۶	۵	۵	۳۵	۵	۵۲۱۹
۷	۵	۵	۵	۳۵	۴۸۲۶
۸	۳۵	۲۰	۲۰	۲۰	۷۹۵۹
۹	۲۰	۳۵	۲۰	۲۰	۶۵۴۸
۱۰	۵	۳۵	۵	۳۵	۵۴۴۴
۱۱	۳۵	۳۵	۳۵	۵	۸۰۵۱
۱۲	۵	۲۰	۲۰	۲۰	۴۸۵۶
۱۳	۳۵	۳۵	۵	۳۵	۸۱۰۷
۱۴	۳۵	۵	۳۵	۵	۷۰۷۲
۱۵	۵	۳۵	۳۵	۳۵	۵۲۹۸
۱۶	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۷۷۸۹
۱۷	۵	۳۵	۳۵	۵	۵۰۸۵
۱۸	۵	۵	۵	۵	۶۰۲۰
۱۹	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۶۷۰۹
۲۰	۳۵	۳۵	۵	۵	۸۰۲۶
۲۱	۳۵	۵	۳۵	۳۵	۷۲۷۸
۲۲	۲۰	۲۰	۳۵	۲۰	۵۹۸۵
۲۳	۵	۳۵	۵	۵	۵۶۹۳
۲۴	۲۰	۲۰	۲۰	۵	۶۴۶۳
۲۵	۳۵	۵	۵	۳۵	۷۳۵۳

در مطالعه حاضر با توجه به تعداد متغیرهای طراحی، یک منحنی چندجمله‌ای مرتبه سوم رتبه کاسته طبق معادله (۱۰) به عنوان سطح پاسخ در نظر گرفته شده است.

$$Time = 6750.8434 - 2.9852L_1 - 167.777L_2 - 31.4L_3 + 8.8638L_4 + 4.6561L_1L_2 + 0.9144L_1L_3 + 1.85144L_1L_4 + 1.0915L_2L_4 + 0.8233L_3L_4 + 3.81899L_2^2 - 1.64101L_4^2 - 0.040963L_1L_2L_4 - 0.02933L_1L_3L_4 + 0.03958L_1^2L_2 + 0.0022094L_1^2L_4 - 0.118333L_1L_2^2 \quad (10)$$

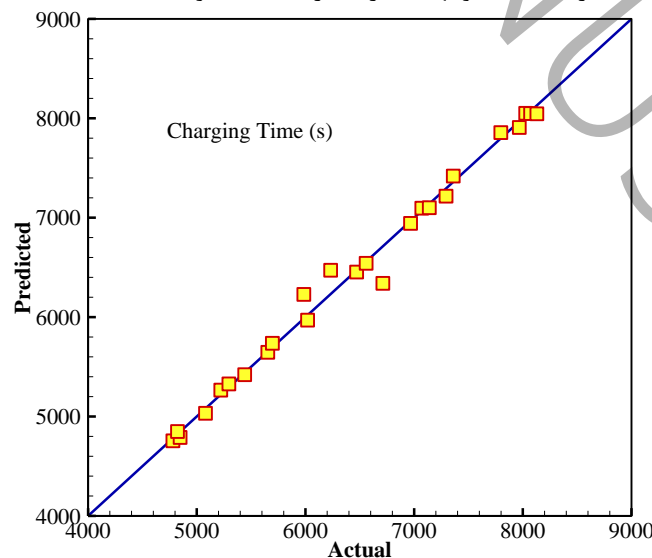
همچنین آنالیز واریانس آن در جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که از نتایج این جدول مشاهده می‌گردد، ضریب تعیین برابر با ۰/۹۹۰۵ که مقدار بسیار مطلوبی است. همچنین ضرایب تعدیل شده و پیش‌بینی شده نیز به ترتیب برابر با ۰/۹۷۱۶ و ۰/۹۷۱۱ هستند که علاوه بر اینکه مقداری نزدیک به هم دارند، به مقدار یک نیز نزدیک هستند. به عبارتی دیگر این مقادیر نشان می‌دهد که این منحنی با دقت بسیار بالایی می‌تواند داده‌های شبیه‌سازی را تخمین بزند. سایر پارامترهای ارائه شده در جدول ۶ از آنالیز واریانس منحنی برازش شده، نشان دهنده دقت بالای سطح پاسخ هستند.

جدول ۶ نتایج آنالیز آماری سطح پاسخ

Table 6. Statistical analysis of the response Surface

انحراف معیار	مقدار متوسط	ضریب تعیین R ²	ضریب تعیین تعدیل شده Adjusted R ²	ضریب تعیین پیش‌بینی شده Predicted R ²
۱۸۸/۰۴	۶۴۲۰/۸۸	۰/۹۹۰۵	۰/۹۷۱۶	۰/۹۷۱۱

برای درک بهتر از دقت سطح پاسخ، آنالیز واریانس برای جمله‌های منحنی برازش شده نیز در جدول ۷ نیز ارائه شده است. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، مقدار پی-ولیو باید طبق استاندارد مقداری کمتر از ۰/۰۵ داشته باشد. در سطر اول جدول ۷ مقدار پی-ولیو منحنی سطح پاسخ ارائه شده است که عدد بسیار کوچکی است (۰/۰۰۰۱) که نشان دهنده دقت و کیفیت بالای منحنی سطح پاسخ است. همچنین جزئیات آنالیز واریانس برای سایر جملات و برهمکنش‌های چند جمله‌ای نیز در جدول ۷ ارائه شده است که نشان دهنده دقت و تاثیرگذاری جملات معادله سطح پاسخ است. در نهایت نیز برای درک بهتر از کیفیت سطح پاسخ بدست آمده، مقادیر واقعی که از شبیه‌سازی بدست آمده‌اند با مقادیر تخمینی از معادله منحنی برازش شده (سطح پاسخ) نیز در شکل ۴ مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌گردد مقادیر تخمین زده شده انحراف بسیار کمی از مقادیر واقعی دارند که نشان می‌دهد با می‌توان با اطمینان خاطر از این سطح پاسخ برای سایر محاسبات و بهینه‌سازی نیز استفاده نمود.



شکل ۴ مقایسه مقادیر دقیق و تخمینی از سطح پاسخ مرتبه ۳ رتبه کاسته

Figure 4. Comparison of actual and predicted values of the reduced 3rd order response surface

جدول ۷ نتایج آنالیز واریانس منحنی چندجمله‌ای مرتبه ۳ رتبه‌کاسته

Table 7. Results of ANOVA for reduced 3rd order polynomial

پارامتر	مجموع مربعات	میانگین مربعات	اف-ولیو	پی-ولیو
مدل	$2/958 \times 10^7$	$1/849 \times 10^6$	59/29	<0/0001
L_1	$4/814 \times 10^6$	$4/814 \times 10^6$	136/16	<0/0001
L_2	84050	84050	2/38	0/1617
L_3	$2/843 \times 10^5$	$2/843 \times 10^5$	8/04	0/0220
L_4	$3/297 \times 10^5$	$3/297 \times 10^5$	9/32	0/0157
L_1L_2	$3/819 \times 10^5$	$3/819 \times 10^5$	10/80	0/0111
L_1L_3	87025	87025	2/46	0/1533
L_1L_4	$2/309 \times 10^5$	$2/309 \times 10^5$	6/53	0/0339
L_2L_4	60025	60025	1/70	0/2288
L_3L_4	45369	45369	1/28	0/2901
L_2^2	$5/067 \times 10^5$	$5/067 \times 10^5$	14/33	0/0053
L_4^2	$2/856 \times 10^5$	$2/856 \times 10^5$	8/08	0/0217
$L_1L_2L_4$	$3/058 \times 10^5$	$3/058 \times 10^5$	8/65	0/0187
$L_1L_3L_4$	$1/568 \times 10^5$	$1/568 \times 10^5$	4/44	0/0683
$L_1^2L_2$	$3/501 \times 10^5$	$3/501 \times 10^5$	9/90	0/0137
$L_1^2L_4$	$1/794 \times 10^5$	$1/794 \times 10^5$	5/07	0/0544
$L_1L_2^2$	$2/836 \times 10^5$	$2/836 \times 10^5$	8/02	0/0221

۷-۲- محاسبه چیدمان بهینه فین‌ها

پس از تعیین سطح پاسخ و اطمینان از دقت معادله برازش شده با استفاده از آنالیز واریانس، می‌توان پاسخ بهینه را بدست آورد. برای این منظور در بازه تغییرات متغیرهای طراحی ($35 < L_i < 5$)، مینیمم مقدار تابع هدف را که زمان شارژ کامل ماده تغییر فاز دهنده است، قابل محاسبه است. لذا با استفاده از معادله سطح پاسخ، پاسخ‌های بهینه (شامل مقادیر بهینه محلی) بر اساس تابع مطلوبیت^۱ محاسبه می‌شوند که ۲۰ مقدار بهینه به همراه مقادیر متغیرهای طراحی در جدول ۸ ارائه شده‌اند. شایان ذکر است که تابع مطلوبیت برابر با یک، بدین معنا است که مقدار تابع هدف بدست آمده خارج از بازه مقادیر شبیه‌سازی شده اولیه است. به عبارتی دیگر در نتایج شبیه‌سازی که در جدول ۵ ارائه شده است، زمان شارژ کامل ماده تغییر فاز دهنده در بازه $8107 < \text{زمان} < 4784$ قرار دارد درحالی‌که در نتایج بهینه‌سازی، زمان کمتر از ۴۷۸۴ ثانیه نیز بدست آمده است. همانطور که از نتایج ارائه شده در جدول ۸ مشاهده می‌گردد، با استفاده از چیدمان فین‌ها با فواصل $L_1 = 6/051$ ، $L_2 = 17/109$ ، $L_3 = 22/563$ و $L_4 = 34/142$ می‌توان به بهترین عملکرد مبدل حرارتی در شارژ ماده تغییر فاز دهنده دست یافت. به عبارتی دیگر می‌توان با این چیدمان از فین‌ها، ماده تغییر فاز دهنده را در مدت زمان $4389/885$ ثانیه ذوب کرد. همچنین یکی از نکات قابل توجه در پاسخ بهینه این است که فواصل بدست آمده در حالت بهینه شامل مقادیر استفاده شده در طراحی آزمایش که در جدول ۵ ارائه شد، نبودند.

^۱ Desirability

در نهایت برای اطمینان از نتیجه بدست آمده، عملکرد ماده تغییرفاز دهنده در مبدل حرارتی به ازای چیدمان فین‌ها در شرایط بهینه مجدداً شبیه‌سازی شده است که زمان محاسبات بدست آمده برابر با ۴۳۱۰ ثانیه است که ۱/۸٪ با مقدار بدست آمده از سطح پاسخ خطا دارد که این اختلاف نیز ناشی از منحنی برازش شده است.

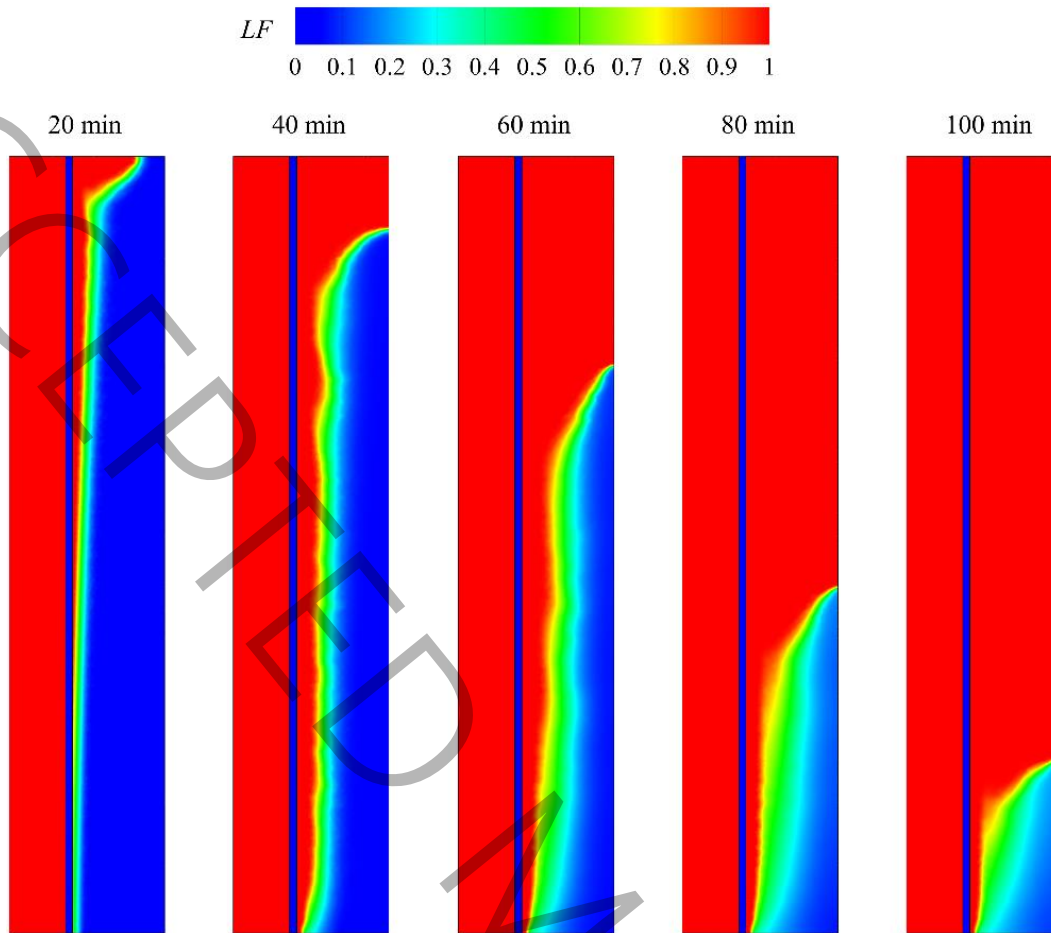
جدول ۸ نتایج بهینه‌سازی روش سطح پاسخ با استفاده از سطح پاسخ مرتبه ۳ رتبه‌کاسته

Table 8. Optimization results of RSM with reduced 3rd order response surface

ردیف	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	زمان (S)	مقدار مطلوبیت
۱	۶/۰۵۱	۱۷/۱۰۹	۲۲/۵۶۳	۳۴/۱۴۲	۴۳۸۹/۸۸۵	۱
۲	۵/۲۳۳	۲۰/۹۶۰	۱۹/۲۱۲	۳۳/۳۵۵	۴۴۱۵/۴۴۲	۱
۳	۵/۰۲۲	۲۲/۱۸۶	۳۴/۱۷۱	۳۱/۹۶۳	۴۴۲۲/۱۵۲	۱
۴	۵/۴۶۵	۱۷/۵۶۳	۱۶/۵۰۴	۳۲/۰۸۲	۴۴۷۴/۹۶۰	۱
۵	۸/۲۰۱	۱۸/۷۱۴	۳۳/۷۲۳	۳۴/۹۰۴	۴۴۷۸/۸۰۳	۱
۶	۹۴۶,۶	۱۵/۴۴۹	۱۰/۴۳۲	۳۴/۷۷۸	۴۴۹۲/۵۳۱	۱
۷	۵/۵۰۵	۱۸/۹۷۲	۲۱/۶۴۱	۳۱/۰۹۹	۴۵۰۰/۳۴۱	۱
۸	۵/۵۰۸	۲۲/۲۴۲	۲۵/۴۹۲	۳۱/۶۴۴	۴۵۱۴/۹۴۹	۱
۹	۵/۰۹۵	۱۹/۷۸۰	۳۱/۰۸۷	۶/۶۶۳	۴۵۱۵/۰۳۴	۱
۱۰	۶/۹۲۴	۲۳/۲۳۸	۱۴/۹۸۱	۳۴/۷۵۱	۴۵۲۳/۹۸۱	۱
۱۱	۵/۳۸۲	۲۴/۷۷۵	۳۰/۵۸۲	۵/۰۰۹	۴۵۵۴/۱۹۰	۱
۱۲	۶/۱۲۹	۲۶/۱۲۰	۳۳/۶۲۷	۳۴/۶۳۳	۴۵۵۹/۳۱۸	۱
۱۳	۵/۰۱۷	۲۷/۶۱۴	۳۳/۰۹۱	۵/۲۸۸	۴۵۶۱/۹۴۵	۱
۱۴	۵/۳۹۰	۱۶/۳۲۴	۳۱/۹۴۲	۲۷/۲۴۷	۴۵۶۹/۹۴۲	۱
۱۵	۵/۷۱۰	۱۶/۴۶۹	۹/۲۱۱	۳۱/۵۳۷	۴۵۷۱/۹۵۲	۱
۱۶	۵/۳۴۸	۱۳/۲۴۲	۲۰/۶۹۶	۳۰/۹۹۶	۴۵۷۲/۷۵۵	۱
۱۷	۵/۰۴۳	۸/۲۱۷	۱۷/۰۹۴	۳۴/۸۲۲	۴۵۸۵/۰۵۳	۱
۱۸	۶/۲۸۳	۲۴/۲۷۵	۱۳/۰۷۵	۳۳/۸۰۳	۴۵۹۸/۱۲۶	۱
۱۹	۵/۰۳۱	۲۴/۳۸۰	۱۱/۳۹۷	۳۲/۵۳۶	۴۵۹۹/۶۶۷	۱
۲۰	۷/۵۳۳	۲۰/۱۵۷	۱۷/۷۶۷	۳۲/۹۳۶	۴۶۰۲/۸۶۸	۱

۷-۳- تاثیر چیدمان فین‌ها در عملکرد ماده تغییرفاز دهنده

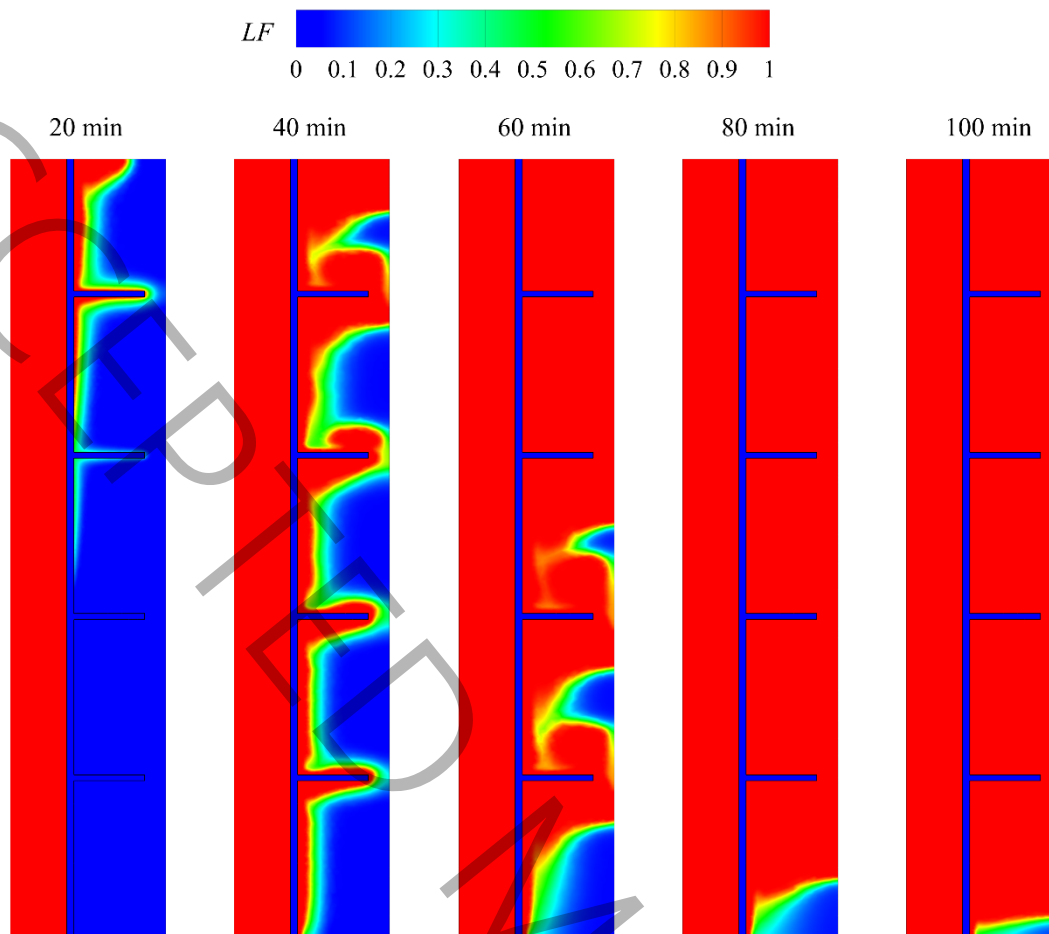
برای بررسی بهتر عملکرد ماده تغییرفاز دهنده در ذخیره‌سازی انرژی، کانتورهای کسر مایع ماده تغییرفاز دهنده در زمان‌های مختلف در فرآیند شارژ و به ازای چیدمان‌های مختلف از فین‌ها شامل چیدمان بهینه ارائه شده است. همچنین نمودار تغییرات میانگین کسر مایع نیز ارائه و مقایسه شده است. در شکل ۵ تغییرات زمانی کانتورهای کسر مایع در مبدل حرارتی بدون فین و در ناحیه ماده تغییرفاز دهنده در طول فرآیند شارژ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با گذشت زمان ماده تغییرفاز دهنده از قسمت بالایی محفظه شروع به تغییر فاز داده و ذوب می‌شود. همچنین حرارت از دیواره لوله آب گرم در سرتاسر لوله به داخل محفظه ماده تغییرفاز دهنده نفوذ می‌کند. با توجه به اینکه ماده تغییرفاز دهنده در حالت مایع دارای چگالی کمتری است، ماده تغییرفاز دهنده ذوب شده به سمت بالا و در خلاف جهت گرانش حرکت می‌کند و در بالای محفظه، ماده تغییرفاز دهنده مایع جریان می‌یابد. با گذشت زمان، حرارت هم از ناحیه دیواره لوله و هم از طریق ماده تغییرفاز دهنده در حال چرخش در بالای محفظه به داخل ماده تغییرفاز دهنده منجمد نفوذ می‌کند. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که کل ماده تغییرفاز دهنده به حالت مایع در آمده و کسر مایع برابر با یک می‌شود. همانطور که از شکل ۵ مشاهده می‌گردد، بعد از گذشت ۱۰۰ دقیقه هنوز بخشی از ماده تغییرفاز دهنده در حالت مایع قرار دارد و بطور کامل ذوب نشده است.



شکل ۵ کانتور تغییرات زمانی کسر مایع در مبدل حرارتی بدون فین

Figure 5. Time variant countours of liquid fraction in the heat exchanger without fin

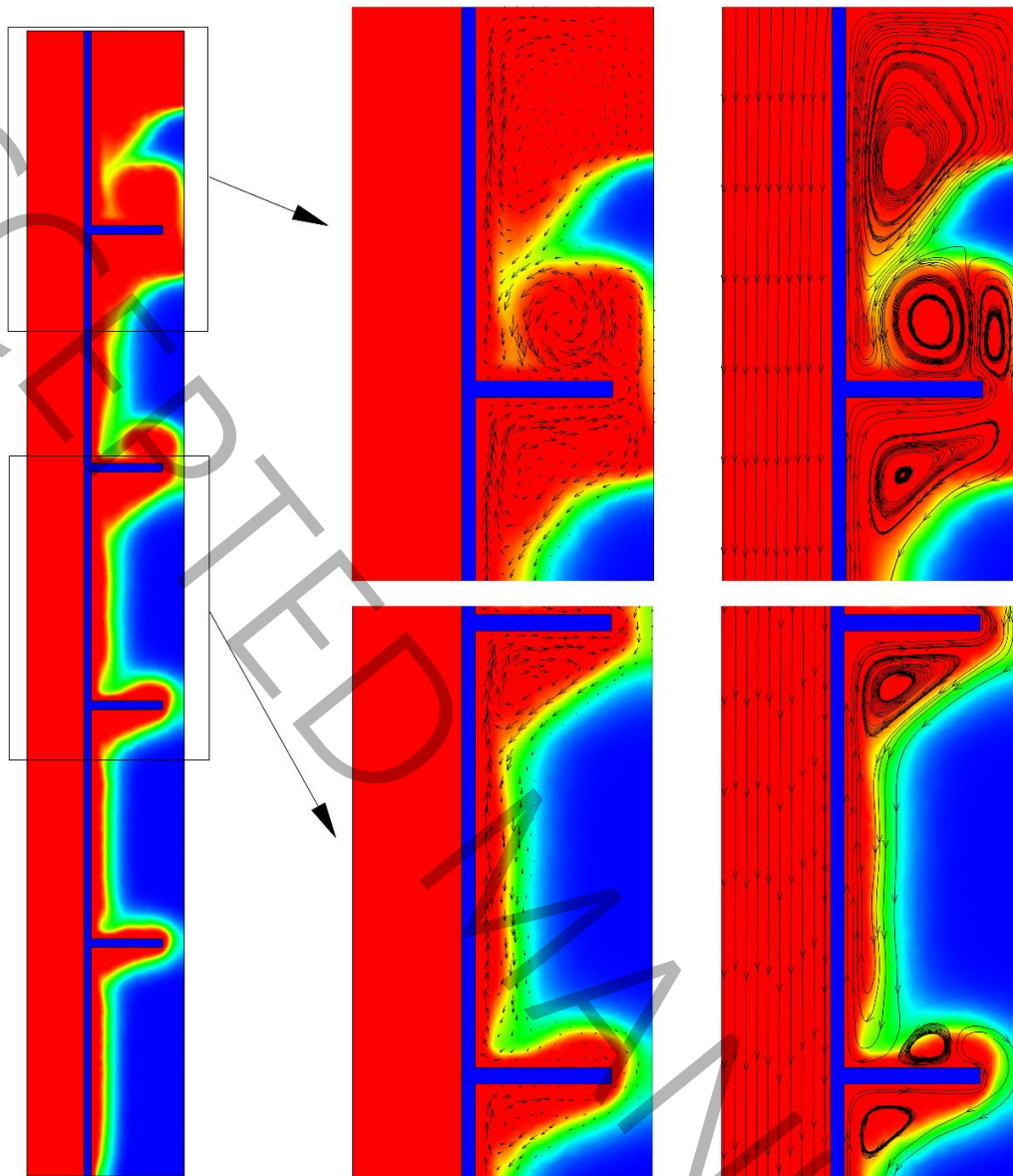
همانطور که قبلا نیز بیان شد، اضافه کردن فین می‌تواند تا حد بسیار زیادی به بهبود عملکرد مبدل حرارتی در شارژ ماده تغییرفاز دهنده کمک کند زیرا باعث افزایش سطح انتقال حرارت و نفوذ بیشتر حرارت به داخل ماده تغییرفاز دهنده می‌شود. یکی از ساده‌ترین روش‌ها، استفاده از چیدمان یکنواخت فین در سرتاسر مبدل حرارتی است. برای درک بهتر این موضوع، کانتورهای تغییرات زمانی کسر مایع در مبدل حرارتی با چیدمان فین یکنواخت در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد فین‌ها تا حد بسیار زیادی حرارت ناشی از جریان آب داغ را به داخل ماده تغییرفاز دهنده منتقل کرده‌اند و در واقع این انتقال حرارت در سرتاسر محفظه اتفاق افتاده است. همچنین همانطور که مشاهده می‌گردد، در زمان ۴۰ دقیقه، ماده تغییرفاز دهنده روی فین که ذوب شده است به سمت بالا حرکت کرده و به ذوب شدن ماده تغییرفاز دهنده منجمد در ناحیه بالای خودش کمک می‌کند. به همین دلیل در مدت زمان کمتری حجم بسیار بیشتری از ماده تغییرفاز دهنده ذوب شده و در مقایسه با حالت بدون فین و در زمان‌های یکسان، مبدل حرارتی عملکرد بهتری داشته است.



شکل ۶ کانتور تغییرات زمانی کسر مایع در مبدل حرارتی با چیدمان فین یکنواخت

Figure 6. Time variant contours of liquid fraction in the heat exchanger with uniform fin arrangement

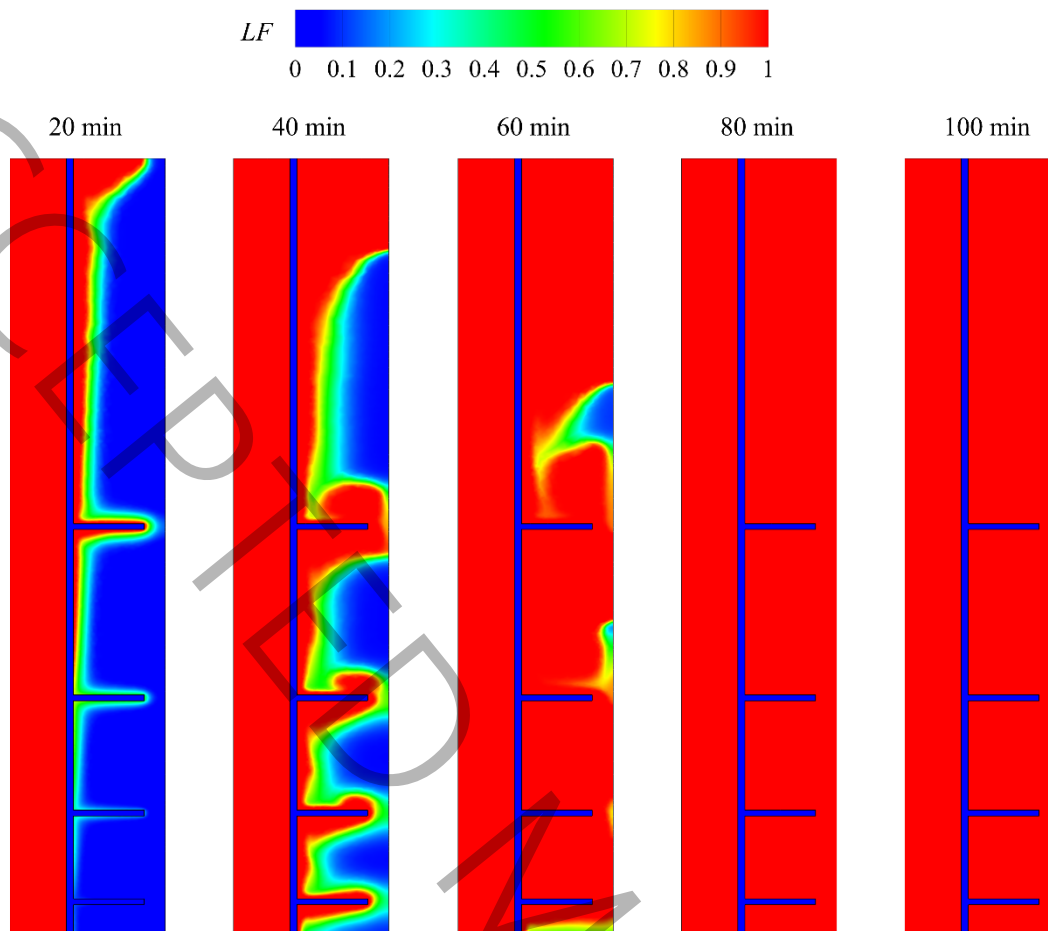
برای درک بهتر از نحوه جریان ماده تغییرفاز دهنده ذوب شده، بردارهای سرعت و خطوط جریان در داخل محفظه در شکل ۷ و در زمان ۴۰ دقیقه نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌گردد، ماده تغییرفاز دهنده ذوب شده در مجاورت دیواره عمودی به دلیل کاهش چگالی به سمت بالا در جریان است. همچنین ماده تغییرفاز دهنده ذوب شده روی سطح بالایی فین‌ها نیز به سمت بالا حرکت می‌کند و در مواردی که بالای آن ماده تغییرفاز دهنده منجمد وجود دارد، شروع به چرخش کرده و گردابه ایجاد می‌گردد که همین گردابه نیز به افزایش انتقال حرارت و در نتیجه افزایش عملکرد مبدل حرارتی کمک می‌کند. یکی دیگر از موارد قابل توجه در شکل ۷، جاری شدن ماده تغییرفاز دهنده ذوب شده در فاصله بین فین و دیواره خارجی محفظه ماده تغییرفاز دهنده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌گردد، بخشی از ماده تغییرفاز دهنده از سمت راست فین‌ها به سمت بالا حرکت کرده و بخشی از آن پس از چرخش در گردابه ایجاد شده در بالای فین، مجدداً از کنار دیواره خارجی به سمت ناحیه زیرین فین جریان می‌یابد. از این موضوع می‌توان دریافت که ارتفاع فین و در نتیجه فضای ایجاد شده بین فین و دیواره خارجی می‌تواند نقش مهمی در میزان تبادل حرارت از بالا و پائین فین‌ها و در نتیجه سرعت شارژ ماده تغییرفاز دهنده داشته باشد. به عبارتی دیگر، اگر ارتفاع فین زیاد باشد، امکان جاری شدن ماده تغییرفاز دهنده بین فین و دیواره خارجی بسیار سخت بوده و ممکن است عملکرد فین تحت تأثیر قرار بگیرد.



شکل ۷ تغییرات بردارهای سرعت (سمت چپ) و خطوط جریان (سمت راست) در مبدل با چیدمان یکنواخت فین‌ها

Figure 7. Variation of velocity vectors (left) and streamlines (right) in the heat exchanger with uniform fin arrangement

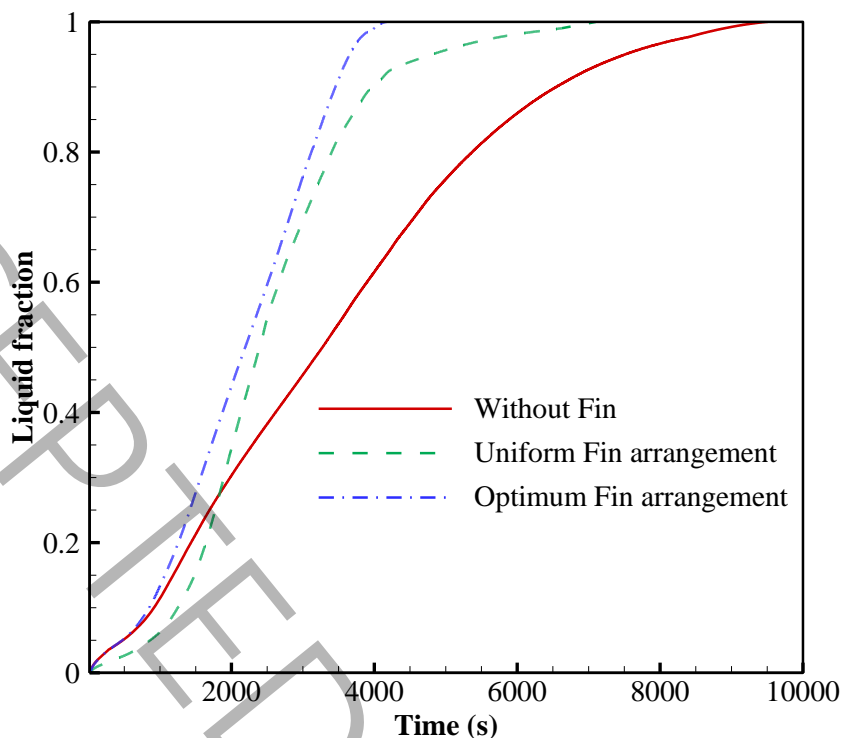
همانطور که در بخش قبل و از نتایج بهینه‌سازی مشاهده شد، می‌توان از سطح پاسخ ایجاد شده یک چیدمان بهینه از فین‌ها بدست آورد که با استفاده از آن بتوان در کمترین زمان ممکن محفظه ماده تغییرفاز دهنده را شارژ کرد. نتایج بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ نشان داد که استفاده از چیدمان فین‌ها با فواصل $L_1 = 6/051$ ، $L_2 = 17/109$ ، $L_3 = 22/563$ و $L_4 = 34/142$ بهترین چیدمان خواهد بود. برای بررسی صحت نتیجه بدست آمده، مبدل حرارتی با چیدمان بهینه شبیه‌سازی شده است و کانتورهای کسر مایع در زمان‌های مختلف در طول فرآیند شارژ در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، در زمان ۸۰ دقیقه، ماده تغییرفاز دهنده بطور کامل شارژ شده و کسر مایع مقدار یک دارد. یکی از نکاتی که از مقایسه نتایج شکل ۸ با شکل ۶ قابل مشاهده است، این است که ماده تغییرفاز دهنده موجود در ناحیه پائینی محفظه دیرتر از بقیه نواحی ذوب می‌شود. به عبارتی دیگر می‌توان از نتایج ارائه شده در چیدمان یکنواخت دریافت که بهتر است فین اول در فاصله کمتری از کف مبدل حرارتی قرار داشته باشد که ماده تغییرفاز دهنده موجود در این ناحیه نیز سریع‌تر ذوب شود. به همین دلیل همانطور که از نتایج بهینه‌سازی ارائه شده در شکل ۸ نیز مشاهده می‌گردد، فین اول در ناحیه پائینی محفظه ماده تغییرفاز دهنده قرار دارد.



شکل ۸ کانطور تغییرات زمانی کسر مایع در مبدل حرارتی با آرایش فین بهینه

Figure 8. Time variant contours of liquid fraction in the heat exchanger with optimal fin arrangement

در نهایت برای درک بهتر از عملکرد مبدل حرارتی در شارژ ماده تغییر فاز دهنده، تغییرات کسر مایع محفظه ماده تغییر فاز دهنده در طی فرآیند شارژ در شکل ۹ به ازای سه حالت بدون فین، چیدمان فین یکنواخت و چیدمان بهینه فین‌ها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، اختلاف بسیار زیادی بین زمان شارژ کامل ماده تغییر فاز دهنده در سه حالت وجود دارد بطوریکه با استفاده از چیدمان یکنواخت فین‌ها نسبت به حالت بدون فین حدود ۱۹٪ از زمان شارژ ماده تغییر فاز دهنده کاسته می‌شود، درحالیکه با استفاده از چیدمان بهینه فین‌ها نسبت به حالت بدون فین حدود ۵۶٪ از زمان شارژ ماده تغییر فاز دهنده کاسته می‌شود که عدد قابل توجهی است. یکی دیگر از نکاتی که باید به آن توجه داشت، زمان رسیدن به شارژ کامل در چیدمان بهینه است که طبق شبیه‌سازی انجام شده برابر با ۴۳۱۰ ثانیه است در حالی که نتایج بهینه‌سازی بدست آمده از سطح پاسخ مقدار ۴۳۸۹ ثانیه را نشان داد. دلیل این اختلاف جزئی خطای ناشی از منحنی برازش شده برای سطح پاسخ است که مطابق با شکل ۴ مقداری عدم انطباق بین نتایج وجود دارد که البته بسیار جزئی و قابل صرف نظر است.



شکل ۹ مقایسه تغییرات زمانی کسر مایع در مبدل حرارتی با چیدمان‌های مختلف از فین‌ها

Figure 9. Comparison of time variant liquid fraction in heat exchanger with different fin arrangements

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه یافتن چیدمان بهینه فین‌ها در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای جهت رسیدن به کمترین زمان شارژ ماده تغییرفاز دهنده و بهترین عملکرد سیستم ذخیره‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور نیز از روش سطح پاسخ به عنوان روش بهینه‌سازی استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که با توجه به تعداد چهار متغیر طراحی، نیاز به ۲۵ شبیه‌سازی برای یافتن پاسخ بهینه است. با استفاده از نرم‌افزار دیزاین-اکسپرت، ۲۵ چیدمان مختلف از فین‌ها طراحی شد و شبیه‌سازی عملکرد سیستم ذخیره‌سازی به ازای این چیدمان‌ها با استفاده از نرم‌افزار انسیس-فلوئنت انجام شد. نتایج بدست آمده شامل زمان شارژ کامل ماده تغییرفاز دهنده و رسیدن به کسر مایع برابر با یک بود. بر اساس نتایج بدست آمده یک سطح پاسخ با منحنی مرتبه ۳ رتبه‌کاسته بر روی نتایج برازش شد که طبق آنالیز واریانس از دقت بسیار خوبی برخوردار بود. با استفاده از سطح پاسخ بدست آمده نیز مقدار مینیمم زمان شارژ ماده تغییرفاز دهنده و چیدمان بهینه فین‌ها بدست آمد. نتایج نشان داد که چیدمان فین‌ها با فواصل $L_1 = 6/0.51$ ، $L_2 = 17/1.09$ ، $L_3 = 22/0.563$ و $L_4 = 34/1.42$ بهترین چیدمان است و همچنین زمان شارژ مربوط به این چیدمان نیز ۴۳۸۹ ثانیه است. شبیه‌سازی انجام شده با چیدمان بهینه نشان داد که شارژ کامل در مدت زمان ۴۳۱۰ ثانیه رخ می‌دهد که این اختلاف جزئی نیز ناشی از دقت سطح پاسخ برازش شده است. همچنین مقایسه سیستم‌های ذخیره‌سازی با چیدمان‌های مختلف نشان داد که در مقایسه با حالت بدون فین، چیدمان یکنواخت حدود ۱۹٪ و چیدمان بهینه حدود ۵۶٪ زمان شارژ را کاهش می‌دهد که عدد قابل توجهی است. همچنین عملکرد حرارتی-سیالاتی ماده تغییرفاز دهنده در مبدل حرارتی با رسم کانتورهای کسر مایع، بردارهای سرعت و خطوط جریان بطور کامل تحلیل شد که نشان داد چرخش ماده تغییرفاز دهنده ذوب شده در بالای فین‌ها و همچنین جریان ماده تغییرفاز دهنده بین فین‌ها تاثیر بسزایی در سرعت انتقال حرارت و بهبود عملکرد سیستم ذخیره‌سازی دارد. در نهایت، نتایج نشان داد که روش سطح پاسخ یک روش بسیار مناسب جهت بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی است که شبیه‌سازی آنها بسیار زمان‌بر بوده و نمی‌توان در این مسائل از سایر روش‌های بهینه‌سازی استفاده نمود. شایان ذکر است که در این مطالعه چیدمان بهینه فین‌ها برای حالت شارژ

ماده تغییرفاز دهنده بدست آمد. قطعاً با توجه به اینکه در فرایند دشارژ، ماده تغییرفاز دهنده رفتار حرارتی و سیالاتی متفاوتی نسبت به حالت شارژ دارد، لذا برای حالت دشارژ چیدمان بهینه فین‌ها متفاوت خواهد بود که نیاز به مطالعه جداگانه‌ای دارد.

۹- تشکر و قدردانی

نویسنده این مقاله از حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته از این مقاله که در قالب طرح پژوهشی به شماره ۰۱/۱۱۹۳ انجام شده است، تشکر و قدردانی می‌کند.

۱۰- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A_m	ثابت ناحیه خمیری
cp	گرمای ویژه، J/kg.K
g	شتاب گرانش، m/s ²
h	ارتفاع فین، mm
H	آنتالپی، J/kg
k	ضریب هدایت حرارتی، W/m.K
L	ارتفاع مبدل، mm
L_f	گرمای نهان، kJ/kg
LF	کسر مایع
P	فشار، Pa
r	شعاع، mm
S	جمله چشمه در معادله ممنتوم، kg/m ² s ²
S_L	جمله چشمه در معادله انرژی، W/m ³
t	زمان، s
t_f	ضخامت فین، mm
t_i	ضخامت لوله داخلی، mm
T	دما، K
V	سرعت، m/s
Y	تابع سطح پاسخ

علائم یونانی

β	ضریب انبساط حرارتی، 1/K
μ	ویسکوزیته، N.s/m ²
ρ	چگالی، kg/m ³

زیرنویس

i	داخلی
o	بیرونی
ref	مرجع
L	شروع ذوب
S	شروع انجماد

۱۱- مراجع

[1] M. Alvarez-Rodriguez, M. Alonso-Martinez, I. Suarez-Ramon, P. José García-Nieto, Numerical model for determining the effective heat capacity of macroencapsulated PCM for building applications, Applied Thermal Engineering, 242 (2024) 122478.

- [2] B.E. Jebasingh, A.V. Arasu, A comprehensive review on latent heat and thermal conductivity of nanoparticle dispersed phase change material for low-temperature applications, *Energy Storage Materials*, 24 (2020) 52-74.
- [3] T. Pirasaci, A. Sunol, Potential of phase change materials (PCM) for building thermal performance enhancement: PCM-composite aggregate application throughout Turkey, *Energy*, 292 (2024) 130589.
- [4] A. Refahi, A. Rostami, M. Amani, Implementation of a double layer of PCM integrated into the building exterior walls for reducing annual energy consumption: Effect of PCM wallboards position, *Journal of Energy Storage*, 82 (2024) 110556.
- [5] Z. Hu, W. Li, C. Yang, H. Huang, Y. Guo, F. Ge, Y. Zhang, Thermal performance of an active casing pipe macro-encapsulated PCM wall for space cooling and heating of residential building in hot summer and cold winter region in China, *Construction and Building Materials*, 422 (2024) 135831.
- [6] H. Kitagawa, T. Asawa, M.A. Del Rio, T. Kubota, A.R. Trihamdani, Thermal energy simulation of PCM-based radiant floor cooling systems for naturally ventilated buildings in a hot and humid climate, *Building and Environment*, 238 (2023) 110351.
- [7] H. Kitagawa, T. Asawa, T. Kubota, A.R. Trihamdani, Numerical simulation of radiant floor cooling systems using PCM for naturally ventilated buildings in a hot and humid climate, *Building and Environment*, 226 (2022) 109762.
- [8] S. Yang, Y. Zhang, Y. Zhao, J.F. Torres, X. Wang, PCM-based ceiling panels for passive cooling in buildings: A CFD modelling, *Energy and Buildings*, 285 (2023) 112898.
- [9] S.M. Alghamdi, M.N. Ajour, N.H. Abu-Hamdeh, A. Karimipour, Using PCM for building energy management to postpone the electricity demand peak load and approving a new PID controller to activate alternative chiller, *Journal of Building Engineering*, 57 (2022) 104884.
- [10] G. Gholamibozanjani, M. Farid, Peak load shifting using a price-based control in PCM-enhanced buildings, *Solar Energy*, 211 (2020) 661-673.
- [11] N. Stathopoulos, M. El Mankibi, R. Issoglio, P. Michel, F. Haghghat, Air-PCM heat exchanger for peak load management: Experimental and simulation, *Solar Energy*, 132 (2016) 453-466.
- [12] F.K. Malik, M.M. Khan, H.F. Ahmed, M. Irfan, I.U. Ahad, Performance characteristics of PCM based thermal energy storage system for fluctuating waste heat sources, *Case Studies in Thermal Engineering*, 34 (2022) 102012.
- [13] V. Soni, A. Kumar, V.K. Jain, Performance evaluation of nano-enhanced phase change materials during discharge stage in waste heat recovery, *Renewable Energy*, 127 (2018) 587-601.
- [14] V. Soni, A. Kumar, V.K. Jain, Fast waste heat recovery in 100-150 ° C using close-contact charging of nano-enhanced PCM composite, *Journal of Molecular Liquids*, 285 (2019) 347-361.
- [15] J.M. Mahdi, S. Lohrasbi, E.C. Nsofor, Hybrid heat transfer enhancement for latent-heat thermal energy storage systems: A review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137 (2019) 630-649.
- [16] H. Bazai, M.A. Moghimi, H.I. Mohammed, R. Babaei-Mahani, P. Talebizadehsardari, Numerical study of circular-elliptical double-pipe thermal energy storage systems, *Journal of Energy Storage*, 30 (2020) 101440.
- [17] A. Shahsavari, H.M. Ali, R.B. Mahani, P. Talebizadehsardari, Numerical study of melting and solidification in a wavy double-pipe latent heat thermal energy storage system, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141(5) (2020) 1785-1799.
- [18] A. Shahsavari, J. Khosravi, H.I. Mohammed, P. Talebizadehsardari, Performance evaluation of melting/solidification mechanism in a variable wave-length wavy channel double-tube latent heat storage system, *Journal of Energy Storage*, 27 (2020) 101063.

- [19] Y. Xu, M.-J. Li, Z.-J. Zheng, X.-D. Xue, Melting performance enhancement of phase change material by a limited amount of metal foam: Configurational optimization and economic assessment, *Applied Energy*, 212 (2018) 868-880.
- [20] Y. Xu, Q. Ren, Z.-J. Zheng, Y.-L. He, Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media, *Applied Energy*, 193 (2017) 84-95.
- [21] A.M. Abdulateef, S. Mat, J. Abdulateef, K. Sopian, A.A. Al-Abidi, Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (2018) 1620-1635.
- [22] R.P. Singh, H. Xu, S.C. Kaushik, D. Rakshit, A. Romagnoli, Effective utilization of natural convection via novel fin design & influence of enhanced viscosity due to carbon nano-particles in a solar cooling thermal storage system, *Solar Energy*, 183 (2019) 105-119.
- [23] 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.
- [24] M. Ghalambaz, S.A.M. Mehryan, M. Mozaffari, O. Younis, A. Ghosh, The Effect of Variable-Length Fins and Different High Thermal Conductivity Nanoparticles in the Performance of the Energy Storage Unit Containing Bio-Based Phase Change Substance, *Sustainability*, 13(5) (2021) 2884.
- [25] A. Shahsavari, A. Goodarzi, H.I. Mohammed, A. Shirneshan, P. Talebizadehsardari, Thermal performance evaluation of non-uniform fin array in a finned double-pipe latent heat storage system, *Energy*, 193 (2020) 116800.
- [26] Y. Xu, Z.-J. Zheng, C. Yang, X. Cai, Intelligent optimization of horizontal fins to improve the melting performance of phase change materials in a square cavity with isothermal vertical wall, *Journal of Energy Storage*, 44 (2021) 103334.
- [27] B. Hussain, M. Irfan, M.M. Khan, S. Ullah, F.u. Hasnain, Geometric optimization of fin structures for accelerated melting of phase change material in a triplex tube heat exchanger, *Journal of Energy Storage*, 79 (2024) 110162.
- [28] S. Lohrasbi, S.Z. Miry, M. Gorji-Bandpy, D.D. Ganji, Performance enhancement of finned heat pipe assisted latent heat thermal energy storage system in the presence of nano-enhanced H₂O as phase change material, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(10) (2017) 6526-6546.
- [29] A. Chananipoor, Z. Azizi, B. Raei, N. Tahmasebi, Optimization of the thermal performance of nano-encapsulated phase change material slurry in double pipe heat exchanger: Design of experiments using response surface methodology (RSM), *Journal of Building Engineering*, 34 (2021) 101929.
- [30] X. Huang, S. Yao, X. Yang, R. Zhou, Melting performance assessments on a triplex-tube thermal energy storage system: Optimization based on response surface method with natural convection, *Renewable Energy*, 188 (2022) 890-910.
- [31] J.M. Mahdi, S. Lohrasbi, D.D. Ganji, E.C. Nsofor, Simultaneous energy storage and recovery in the triplex-tube heat exchanger with PCM, copper fins and Al₂O₃ nanoparticles, *Energy Conversion and Management*, 180 (2019) 949-961.
- [32] M. Parsazadeh, X. Duan, Numerical study on the effects of fins and nanoparticles in a shell and tube phase change thermal energy storage unit, *Applied Energy*, 216 (2018) 142-156.
- [33] A.D. Brent, V.R. Voller, K.J. Reid, ENTHALPY-POROSITY TECHNIQUE FOR MODELING CONVECTION-DIFFUSION PHASE CHANGE: APPLICATION TO THE MELTING OF A PURE METAL, *Numerical Heat Transfer*, 13(3) (1988) 297-318.
- [34] S. Mat, A.A. Al-Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, A.T. Mohammad, Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins, *Energy Conversion and Management*, 74 (2013) 223-236.

ACCEPTED MANUSCRIPT

Optimization of Fin Arrangement in a Double-Pipe Heat Exchanger to Improve the Storage Performance of Phase Change Materials

Amir Babak Ansari¹

Assistant Professor, Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

ABSTRACT

Using latent heat storage systems with phase change materials (PCM) is an effective way to store thermal energy, which has been of great interest in recent years. Using fins is one of the simplest and cheapest ways to increase heat transfer in PCMs and increase the performance of the storage system. Since the fin arrangement has a significant impact on the charging time of the PCM, the main goal of this study is to optimize the fin arrangement in the PCM chamber in a double-pipe heat exchanger in order to decrease the charging time, and thus increase the efficiency of the storage system. For this purpose, the governing equations, including conservation of mass, momentum, and energy in a finned double-pipe heat exchanger have been solved using ANSYS-Fluent software to investigate the thermal-hydraulic behavior of PCM. Also, to find the optimal fin arrangement and maximize the storage performance, the response surface method based on the central composite design have been implemented. The results obtained from the response surface with the reduced cubic equation show that compared to the case without fins, the charging time reduces by 19% using the uniform fin configuration, while reduces by 56% using the optimal fin arrangement.

KEYWORDS:

Increasing storage performance, Phase change material, Double-pipe heat exchanger, Optimal fin arrangement, Response surface method

¹ Corresponding Author: Email: a.b.ansari@kgut.ac.ir