

بهینه‌سازی چندهدفه ذخیره‌سازی انرژی در مواد تغییرفازدهنده در یک مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای با دیواره موج

امیربابک انصاری*

استادیار، 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

در مطالعه حاضر، بهینه‌سازی چند هدفه عملکرد ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان در یک مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای با دیواره داخلی موج‌دار انجام شده است که در آن هر دو دیدگاه گرمایی و سیالاتی در نظر گرفته شده است. با استفاده از نرم افزار تجاری Ansys-Fluent، از مدل $k-\epsilon$ RNG برای شبیه سازی جریان آشفته آب داغ و از مدل انتالپی-تخلخل برای شبیه‌سازی رفتار PCM-RT35 استفاده شده است. دامنه و تعداد موج دیواره داخلی به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی و کمترین زمان شارژ PCM و افت فشار جریان آب به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، از روش سطح پاسخ به عنوان روش بهینه‌سازی و از تابع مطلوبیت به عنوان معیار تصمیم‌گیری برای انتخاب سیستم بهینه استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با افزایش دامنه و عدد موج، افت فشار در کانال افزایش یافته و زمان شارژ نیز به دلیل ایجاد گردابه و افزایش سطح انتقال گرما کاهش می‌یابد. همچنین نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که در مقایسه با هندسه ساده، زمان شارژ تا ۴۵٪ کاهش می‌یابد در حالی که افت فشار حدود ۵٪ در سیستم بهینه افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چند هدفه، مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای، مواد تغییرفازدهنده، دیواره موج، روش سطح پاسخ.

Multi-Objective Optimization of Energy Storage in Phase Change Materials in a Double-Pipe Heat Exchanger with a Wavy Wall

A. B. Ansari

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

Abstract

In the present study, multi-objective optimization of latent heat energy storage performance in a double-pipe heat exchanger with wavy inner wall is carried out, in which both thermal and hydraulic perspectives are considered. By using the ANSYS-Fluent commercial software, the $k-\epsilon$ RNG model and enthalpy-porosity model are applied to simulate the turbulent flow of hot water and the behavior of PCM-RT35, respectively. The amplitude and wave number of the internal wall are considered as optimization variables, while minimizing PCM charging time and water flow pressure drop are considered as objective functions. In addition, the response surface method has been used as an optimization method and the desirability function has been used as a decision criterion for choosing the optimal system. The simulation results show that with the increase in amplitude and wave number, the pressure drop in the channel increases, while the charging time decreases due to the vortices and the increase of the heat transfer surface. Also, the optimization results show that compared to the simple geometry, the charging time is reduced by 45%, while the pressure drop is increased by about 5% in the optimized system.

Keywords: Multi-objective optimization, double-pipe heat exchanger, phase change material, wavy wall, response surface method

۱- مقدمه

ذخیره‌سازی انرژی گرمایی با استفاده از مواد تغییرفازدهنده نقش مهمی در بهبود کارایی و پایداری انرژی دارد. مواد تغییرفازدهنده می‌توانند مقادیر زیادی انرژی گرمایی را در طی فرآیند انتقال فاز، ذخیره و آزاد کرده و لذا چگالی ذخیره انرژی بالا و کنترل دمای پایدار را فراهم کنند. این قابلیت به ویژه در کاربردهای مختلف مانند گرمایش و سرمایش [۱-۳]، کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های تهویه مطبوع [۴-۶] و سایر فرآیندهای صنعتی مفید است. همچنین می‌توان از ترکیب مواد تغییرفازدهنده با سیستم‌های خورشیدی، انرژی مازاد را ذخیره‌سازی نمود و در موارد نیاز از آن استفاده نمود [۷-۱۰].

رسانایی گرمایی ماده تغییرفازدهنده به طور مستقیم بر آهنگ انتقال گرما و همچنین سرعت پاسخ آن در فرآیندهای شارژ و دشارژ تاثیر می‌گذارد [۱۱]. رسانایی گرمایی نسبتاً پایین از چالش‌های مواد تغییرفازدهنده محسوب می‌شود که برای غلبه بر این مشکل،

راهکارهای مختلفی توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به اصلاح هندسه، استفاده از مواد افزودنی مانند نانوذرات و فوم‌های فلزی و همچنین استفاده از پره‌ها نام برد. از بین تجهیزات مختلف برای ذخیره سازی انرژی گرمایی، مبادله‌کن‌های گرمایی چندلوله‌ای یکی از تجهیزات بسیار پرکاربرد در صنعت هستند که می‌توان با استفاده از مواد تغییرفاز دهنده در آنها به ذخیره‌سازی انرژی پرداخت. لذا مطالعات مختلفی در جهت بهبود عملکرد راندمان ذخیره‌سازی در این نوع تجهیزات توسط محققان انجام شده است.

یکی از راهکارهای مناسب جهت بهبود عملکرد مبادله‌کن‌های گرمایی لوله‌ای جهت ذخیره‌سازی انرژی در مواد تغییرفازدهنده، تغییر در هندسه جهت افزایش سطح انتقال گرما است [۱۲]. یک راه مناسب در این راستا، استفاده از دیوارهای داخلی موجدار است که علاوه بر افزایش سطح انتقال گرما، تا حدی نقش پره را نیز ایفا می‌کند. دیوارهای موجی علاوه بر افزایش سطح انتقال گرما و نفوذ در ماده تغییرفازدهنده، با سیال انتقال گرما نیز تماس بیشتری داشته و با ایجاد

* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.b.ansari@kgut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳

گردابه در آن به افزایش انتقال گرما کمک می‌کند. استفاده از این نوع دیوارهای موج در مبادله‌کن‌های گرمایی چندلوله‌ای نیز اخیراً مورد توجه محققان مختلف قرار گرفته است. در این راستا ایرانش و مشیزی [۱۳] تاثیر استفاده از یک صفحه میانی موج‌دار را در عملکرد ذخیره‌سازی انرژی در ماده تغییرفازدهنده در یک مبادله‌کن گرمایی سه‌لوله‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی به ازای دامنه موج ثابت و در مقادیر مختلف از ضخامت دیواره میانی و همچنین طول موج دیواره موج نشان داد که می‌توان به کاهش ۱۹/۹۲٪ در زمان ذوب و کاهش ۲/۴۴٪ در زمان انجماد دست یافت. سید و همکاران [۱۴] عملکرد ذخیره‌سازی انرژی در ماده تغییرفازدهنده RT35 را در یک مبادله‌کن گرمایی سه‌لوله‌ای مورد بررسی قرار دادند و تاثیر ساختار هندسی دیوار میانی شامل دیوار سینوسی، زیگ‌زاگ و پله‌ای را بر روی زمان شارژ و دشارژ ماده تغییرفازدهنده مطالعه کردند. نتایج نشان داد که کاهش طول موج، زمان انجماد را تا ۷۰/۱ درصد و افزایش ارتفاع موج تا ۷۴/۴ درصد کاهش می‌دهد. بوجملین و همکاران [۱۵] در مطالعه خود به بررسی رفتار گرمایی-سیالاتی یک مبادله‌کن گرمایی عمودی چندکاناله متشکل از چندین مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای موج جهت ذخیره‌سازی انرژی در مواد تغییرفازدهنده پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش ارتفاع، زمان تغییر فاز را تا ۲۱ درصد کاهش می‌دهد، در حالیکه کاهش گام، نرخ ذخیره‌سازی گرما را تا ۲۸ درصد افزایش می‌دهد. شهسوار و همکاران [۱۶] فرایند ذوب و انجماد یک ماده تغییرفازدهنده را در یک مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای به همراه پره‌های صاف و سینوسی مورد مطالعه و مقایسه قرار دادند. مقایسه نتایج نشان داد که زمان ذوب و انجماد به میزان ۴۳/۴۹٪ و ۱۷/۸۱٪ در مقایسه با حالت بدون پره کاهش می‌یابد. عیسی‌پور و همکاران [۱۷] عملکرد یک سیستم ذخیره‌سازی گرمای نهان در یک مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای با مقطع بیضوی و لوله‌های داخلی موج‌دار و مواد تغییر فاز تقویت‌شده با نانو را بطور عددی و با استفاده از نرم افزار Ansys-Fluent مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در حالت موج‌دار زمان انجماد واحد زیادی کاهش (تا ۳۹ دقیقه) و همچنین نرخ انجماد نیز افزایش می‌یابد. قلمباز و همکاران [۱۸] تأثیر استفاده از لوله‌های موج‌دار در یک سیستم ذخیره‌سازی ترکیبی شامل مواد تغییر فازدهنده و فوم فلزی مورد مطالعه قرار دادند. همچنین تأثیر درصد حجمی نانوذرات، دامنه موج لوله، تعداد موج لوله و ضریب تخلخل بر زمان شارژ، انرژی ذخیره‌شده و عملکرد سیستم ذخیره‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از فوم‌های فلزی و نانوذرات باعث افزایش انتقال گرما و کاهش زمان شارژ شده و همچنین یک لوله ساده بدون سطح موج‌دار افت فشار کمتری نسبت به یک لوله موج‌دار دارد.

در مطالعات پیشین، عملکرد ذخیره‌سازی انرژی در ماده تغییرفازدهنده فقط بصورت پارامتری انجام شده است بطوریکه با تغییر پارامترهای هندسی، زمان شارژ و دشارژ ماده تغییرفازدهنده مورد بررسی قرار گرفته است. اما برای یافتن بهترین حالت و شرایط عملکردی، نیاز به استفاده از بهینه‌سازی است. برای این منظور روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی توسط محققین در مبادله‌کن‌های گرمایی چندلوله‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا بیانکو و همکاران [۱۹] با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB و

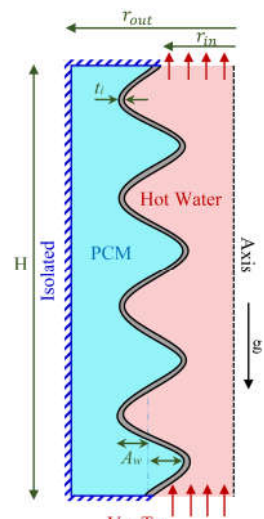
شبیه‌سازی رفتار ماده تغییرفازدهنده در نرم‌افزار COMSOL توانستند زمان شارژ و دشارژ را در یک مبادله‌کن گرمایی پوسته-لوله به حداقل مقدار ممکن برسانند.

یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی عملکرد ذخیره‌سازی مواد تغییرفازدهنده، حجم زیاد محاسبات به دلیل تکرار زیاد شبیه‌سازی است که باعث می‌شود فرآیند بهینه‌سازی بسیار زمان‌بر شود. برای این منظور استفاده از سایر روش‌های بهینه بر پایه طراحی آزمایش مانند روش سطح پاسخ بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. با استفاده از این روش می‌توان با تعداد شبیه‌سازی بسیار کم و ایجاد یک سطح برای پاسخ‌های بدست آمده از شبیه‌سازی، نتایج سایر شبیه‌سازی‌ها را با سرعت و دقت بسیار بالایی تخمین زد. در این راستا انصاری [۲۰] با استفاده از روش سطح پاسخ، چیدمان بهینه پره‌های حلقوی در یک مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای را جهت یافتن عملکرد بهینه ذخیره‌سازی در مواد تغییرفازدهنده، مورد مطالعه و بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که با استفاده از چیدمان بهینه پره‌ها می‌توان زمان شارژ را تا ۵۶٪ کاهش داد. ساکولی و همکاران [۲۱] با استفاده از روش سطح پاسخ، چیدمان بهینه پره‌هایی با شکل شاخه درخت را در یک مبادله‌کن گرمایی پوسته-لوله مورد بررسی قرار دادند. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که با استفاده از ساختار بهینه پره‌ها می‌توان راندمان ذخیره‌سازی را تا ۲۶٪ افزایش داد. لهراسبی و همکاران [۲۲] با استفاده از روش سطح پاسخ، چیدمان بهینه فین‌های V-شکل و همچنین استفاده بهینه از نانوذرات را در یک مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای جهت کاهش زمان انجماد ماده تغییرفازدهنده مورد بررسی قرار دادند.

همانطور که در مرور تحقیقات پیشین بیان شد، استفاده از دیواره موج یک راهکار مناسب جهت افزایش راندمان ذخیره‌سازی انرژی در مواد تغییرفازدهنده است که اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است. اما نکته قابل توجه این است که تاکنون تاثیر دیواره موج بر عملکرد ذخیره‌سازی فقط بصورت پارامتری مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی دیگر در این مطالعات تمرکز اصلی بر عملکرد ماده تغییرفازدهنده بوده و تاثیر تغییرات هندسی دیواره موج بر روی افت فشار ایجاد شده در جریان سیال در نظر گرفته نشده است. به عبارتی دیگر اگرچه افزایش دامنه موج باعث افزایش عملکرد ذخیره‌سازی در ماده تغییرفازدهنده می‌گردد، اما باعث افت فشار بیشتر در کانال جریان سیال می‌گردد. به همین دلیل یافتن ساختار هندسی بهینه دیواره موج در یک مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای جهت رسیدن به کمترین زمان ذخیره‌سازی و در عین حال ایجاد کمترین افت فشار، یک چالش‌های اساسی محسوب می‌گردد. لذا نوآوری تحقیق حاضر، بهینه‌سازی چند هدفه ساختار هندسی دیوار موج هم از دیدگاه ذخیره‌سازی و هم از دیدگاه سیالاتی است که در مطالعات پیشین به آن پرداخته نشده است. برای این منظور نیز از روش سطح پاسخ که بر پایه طراحی آزمایش است، استفاده شده است. از بین ساختارهای پیشنهادی و بر اساس توابع هدف، ساختار بهینه بر اساس تابع مطلوبیت انتخاب شده است. همچنین نتایج بدست آمده از سیستم بهینه با نتایج حالت بدون موج نیز مقایسه شده است که نشان می‌دهد استفاده از دیوار موج با هندسه بهینه تاثیر بسزایی در افزایش عملکرد سیستم ذخیره‌سازی دارد.

۲- مدل سازی سیستم ذخیره سازی

سیستم ذخیره سازی شامل یک مبادله کن گرمایی دولوله ای هم مرکز عمودی است که طرحواره آن در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به تقارن محوری موجود در هندسه، فقط بخشی از آن که در شکل ۱ نشان داده شده است، شبیه سازی و آنالیز می شود. پارامترهای هندسی مربوط به سیستم ذخیره سازی در جدول ۱ ارائه شده است. لوله داخلی از جنس مس با دیواره های موج سینوسی است و ماده تغییر فاز دهنده RT-35 در لوله بیرونی قرار دارد. در لوله داخلی آب داغ با سرعت ثابت (عدد رینولدز ۳۰۰۰) و دمای ثابت ۵۰ °C از پائین وارد شده و در لوله جریان می یابد. همچنین در مقطع خروجی لوله داخلی، شرط خروج جریان به اتمسفر (فشار صفر) در نظر گرفته شده است. در زمان اولیه و شروع شبیه سازی، دمای کل مبادله کن گرمایی ۱۵ °C است و کسر مایع در PCM نیز صفر ($\lambda = 0$) است، به عبارتی دیگر، PCM در حالت جامد قرار دارد. گرما از سیال داغ از طریق دیواره موج لوله به داخل PCM نفوذ کرده و باعث ذوب و شارژ شدن آن می شود. مشخصات ترموفیزیکی PCM و آب نیز در جدول ۲ بطور کامل ارائه شده اند.



شکل ۱- طرحواره سیستم ذخیره سازی

جدول ۱- مشخصات هندسی سیستم ذخیره سازی

پارامترهای هندسی	مقدار (mm)
ارتفاع مبدل، H	۴۰۰
شعاع لوله داخلی، r_{in}	۱۰
ضخامت لوله داخلی، t_i	۱
شعاع لوله بیرونی، r_{out}	۲۰

همانطور که از شکل ۱ مشاهده می گردد، جداره داخلی لوله دارای تعداد N_w موج مشخص با دامنه A_w است. عملکرد سیستم از دیدگاه زمان شارژ PCM و هم از دیدگاه افت فشار در کانال جریان آب به ازای تعداد موج های مختلف با دامنه های مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. اگرچه با افزایش تعداد و دامنه موج ها، سطح انتقال گرما افزایش یافته و در نتیجه زمان شارژ کامل ماده تغییر فاز دهنده کاهش می یابد، اما افت

فشار ایجاد شده در کانال جریان سیال نیز افزایش می یابد. لذا برای دستیابی به بهترین ساختار هندسی از دیوار موج، نیاز به بهینه سازی است که در آن دامنه و تعداد موج ها، متغیرهای طراحی و افت فشار و زمان شارژ کامل ماده تغییر فاز دهنده، توابع هدف هستند که در ادامه مفصلاً تشریح شده اند.

برای شبیه سازی پدیده های فیزیکی در سیستم ذخیره سازی شامل انتقال گرما و جریان سیال، نیاز به حل معادلات حاکم شامل بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی در ماده تغییر فاز دهنده و سیال انتقال گرما است. جهت مدل سازی ریاضی سیستم ذخیره سازی، ابتدا فرضیات حاکم بصورت زیر بیان می شوند:

- با توجه به وجود تقارن در هندسه، شبیه سازی بصورت دوبعدی و تقارن محوری انجام شده است.
- از تغییر حجم PCM در طی فرآیند تغییر فاز صرف نظر شده است.
- تاثیر گرانش بر روی حرکت سیال در PCM در راستای محور طولی و رو به پایین در نظر گرفته شده است.
- برای محاسبه تغییرات چگالی و اعمال نیروی شناوری (جابجایی آزاد) در PCM از تقریب بوزینسک استفاده شده است.
- جریان سیال لایه ای در محفظه PCM در نظر گرفته شده است.
- خواص ترموفیزیکی سیال داغ (آب) ثابت فرض شده و از تغییرات آنها با دما و فشار صرف نظر شده است.
- سیال داغ در لوله داخلی، از نوع نیوتنی و تراکم ناپذیر است.
- با توجه به عدد رینولدز جریان سیال داغ، رژیم جریان آشفته است.
- شرط عدم لغزش بر روی دیوارها در نظر گرفته شده است.
- با توجه به اینکه فرآیند شارژ PCM وابسته به زمان است، دستگاه معادلات باید بصورت ناپایا حل شوند. با توجه به فرضیات فوق، معادلات حاکم بر ماده تغییر فاز دهنده شامل بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی به ترتیب طبق معادلات (۱) تا (۳) بیان می شوند [۱۶].

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

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

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

در معادلات فوق جملات چشمه $\vec{S}$ و S_L طبق روابط زیر محاسبه می شوند [۱۶]:

$$\vec{S} = \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} A_m \vec{V}, \quad S_L = \frac{\rho \partial (\lambda L_f)}{\partial t} + \rho \nabla (\vec{V} \lambda) \quad (4)$$

در روابط فوق A_m ثابت ناحیه خمیری^۱، L_f گرمای نهان ذوب و λ کسر مایع در ماده تغییر فاز دهنده است که از رابطه زیر محاسبه می گردد [۱۶]:

$$\lambda = \frac{\Delta H}{L_f} = \begin{cases} 0 & T < T_S \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & T_S < T < T_L \\ 1 & T > T_L \end{cases} \quad (5)$$

¹ Mushy Zone Constant

جدول ۲- مشخصات ترموفیزیکی ماده تغییر فازدهنده RT35 و آب در دمای ورود (۵۰ °C)

ماده	چگالی $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	گرمای ویژه $c_p \text{ (J/kg.K)}$	رسانایی گرمایی $k \text{ (W/m.K)}$	گرمای نهان $L_f \text{ (kJ/kg)}$	ضریب انبساط گرمایی $\beta \text{ (1/K)}$	دمای ذوب $T_{\text{Liquidus}} \text{ (K)}$	دمای انجماد $T_{\text{Solidus}} \text{ (K)}$	لزجت $\mu \text{ (N.s/m}^2\text{)}$
RT35	۸۱۵	۲۰۰۰	۰٫۲	۱۷۰	۰٫۰۰۰۶	۳۰۹	۳۰۲	۰٫۰۲۳
آب	۹۸۷	۴۰۶۶	۰٫۶۴۴	---	---	---	---	۰٫۰۰۰۵۳

همچنین شایان ذکر است که با توجه به رژیم جریان آشفته در سیال آب و همچنین ساختار چرخشی سیال، از مدل k-ε RNG برای مدل سازی جریان آشفته استفاده شده است. همچنین از روش انتالپی-تخلخل نیز برای مدل سازی رفتار PCM استفاده شده است. برای حل معادلات حاکم و شبیه سازی عملکرد گرمایی-سیالاتی سیستم ذخیره سازی، از نرم افزار تجاری Ansys-Fluent نیز استفاده شده است. همچنین برای حل جریان سیال و کوپل میدان سرعت و فشار، از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. جهت افزایش دقت محاسبات و با توجه به وجود مکانیزم جابجایی آزاد در ناحیه PCM، برای گسسته سازی معادله فشار از روش PRESTO و برای گسسته سازی سایر معادلات نیز از روش QUICK استفاده شده است. همچنین برای همگرایی بهتر در فرآیند شبیه سازی، از ضریب زیرتخفیف ۰٫۳ برای فشار، ضریب زیرتخفیف ۰٫۹ برای معادله انرژی و ضریب زیرتخفیف ۰٫۵ برای سایر معادلات استفاده شده است. 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.

۳- بهینه سازی عملکرد سیستم ذخیره سازی

همانطور که قبلاً نیز بیان شد، هدف از این مطالعه بهینه سازی عملکرد گرمایی-سیالاتی یک سیستم ذخیره سازی است. در واقع هدف اصلی، تغییر پارامترهای هندسی جداره لوله موج داخلی شامل دامنه و تعداد موج های سینوسی (متغیرهای طراحی) جهت رسیدن به کمترین زمان شارژ کامل در ماده تغییر فازدهنده و در عین حال ایجاد کمترین افت فشار در کانال جریان سیال است که این دو مورد به عنوان توابع هدف در نظر گرفته می شوند. با توجه به ابعاد هندسی و همچنین محدودیت های ساخت لوله، متغیرهای طراحی یا به عبارتی متغیرهای بهینه سازی در محدوده مشخصی می توانند تغییر کنند که در این مطالعه دامنه A_w بین ۱ تا ۸ میلی متر و همچنین عدد موج N_w بین ۱ تا ۱۱ تغییر می کند. بنابراین می توان مساله بهینه سازی سیستم ذخیره سازی شامل توابع هدف و قیدهای بهینه سازی را طبق معادله (۶) بیان کرد:

$$\begin{aligned} \text{Objective functions:} \\ \text{Minimizing the charging time, } t_{\lambda=1}(A_w, N_w) \\ \text{Minimizing the pressure drop, } \Delta p(A_w, N_w) \\ \text{Constraints:} \\ 1 < A_w < 8(\text{mm}) \quad 1 < N_w < 11 \end{aligned} \quad (6)$$

برای حل مساله بهینه سازی و معادلات فوق، باید از الگوریتم های بهینه سازی استفاده کرد. با توجه به اینکه فرایند شبیه سازی شارژ کامل ماده تغییر فازدهنده بسیار زمان بر است، لذا باید از روش های بهینه سازی

مانند روش سطح پاسخ^۱ (RSM) که بر پایه طراحی آزمایش است، استفاده نمود. در این روش برخلاف روش های ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک، با تعداد اندکی شبیه سازی می توان پاسخ بهینه را بدست آورد. در واقع در این روش با استفاده از روش طراحی آزمایش چندین سیستم ذخیره سازی بر اساس پارامترهای طراحی تعیین شده و به ازای مقادیر مختلف متغیرهای طراحی، چندین شبیه سازی انجام شده و مقادیر توابع هدف به ازای هر حالت بدست می آیند. سپس با استفاده از روش سطح پاسخ، یک سطح بر روی توابع هدف که همان پاسخ های سیستم هستند، برازش می شود. سطح پاسخ در واقع رابطه ای است که تغییرات پاسخ را به عنوان تابعی از متغیرهای طراحی مشخص می کند. به عبارتی دیگر در مطالعه حاضر برای زمان شارژ PCM و همچنین افت فشار در کانال جریان، یک رابطه (سطح پاسخ) بر حسب متغیرهای طراحی شامل A_w و N_w بدست می آید که می توان آن را طبق معادله (۷) بیان کرد. شایان ذکر است که در مطالعه حاضر برای طراحی آزمایش از روش طراحی مرکب مرکزی^۲ (CCD) استفاده شده است [۲۲].

$$f = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (7)$$

که در آن f سطح پاسخ، x_i ها متغیرهای طراحی (دامنه و طول موج در مطالعه حاضر) و b_i جمله عرض از مبدأ است. همچنین b_i ($i=1,2,\dots,n$) ضرایب همبستگی^۳ چندجمله ای هستند که با استفاده از روش حداقل مربع ها تخمین زده می شوند. یکی از موارد مهم در این روش، بررسی و آنالیز دقت سطح پاسخ یا معادله فوق در تخمین مقادیر توابع هدف به ازای پارامترهای طراحی مختلف است.

آنالیز واریانس یا ANOVA^۴، یک روش آماری قدرتمند برای مقایسه دو جمعیت آماری مستقل است. در روش بهینه سازی سطح پاسخ، از ANOVA برای تعیین تاثیر عوامل مختلف بر روی پاسخ استفاده می شود. با استفاده از ANOVA می توان تفاوت بین نتایج بدست آمده از شبیه سازی های 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. همچنین با استفاده از ANOVA می توان فهمید کدام عوامل یا پارامترهای طراحی بیشترین تاثیر را بر روی پاسخ دارند، که این اطلاعات به بهبود فرایند و یافتن شرایط بهینه کمک می کند. شایان ذکر است که در مطالعه حاضر برای طراحی آزمایش و حل مساله بهینه سازی به روش سطح پاسخ، از نرم افزار Design Expert

¹ Response Surface Method (RSM)

² Central Composite Design (CCD)

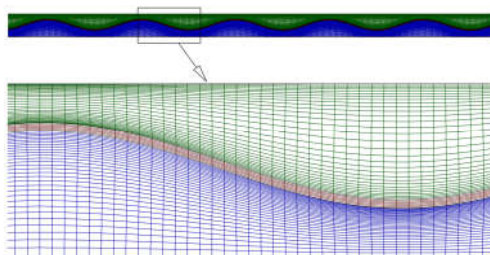
³ Regression coefficients

⁴ Analysis of Variance

مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای با دیوار داخلی موج که در لوله داخلی آب داغ و در لوله خارجی آب سرد با رژیم آشفته جریان دارد، مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته است. در شکل ۲-ب تغییرات افت فشار در کانال موج به ازای اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مبادله‌کن گرمایی با نتایج الزهرانی [۲۴] مقایسه شده است که برای شبیه‌سازی جریان آشفته آب نیز از مدل $k-\epsilon$ RNG نیز استفاده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌گردد، تطابق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد که نشان‌دهنده اعتبار و صحت روش عددی بکار رفته جهت شبیه‌سازی رفتار سیالاتی در مطالعه حاضر است.

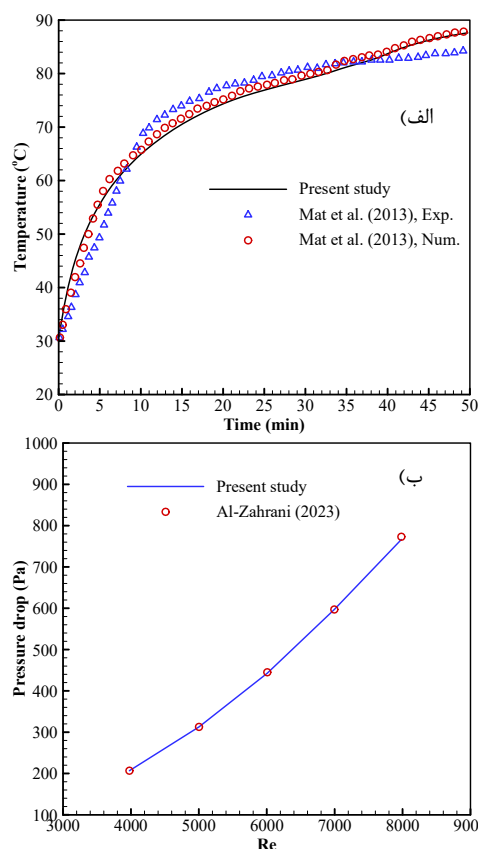
۵- مطالعه استقلال از شبکه

جهت اطمینان از عدم وابستگی نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی به شبکه محاسباتی، مطالعه استقلال از شبکه جهت دستیابی به شبکه بهینه بطور کامل و جامع انجام شده است. طرحواره شبکه محاسباتی در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، برای دستیابی به نتایج بهتر و دقیق‌تر و همچنین استفاده از تعداد شبکه کمتر، شبکه محاسباتی در نزدیکی مرزها که گرادیان متغیرهای وابسته زیاد است، متمرکز شده است. برای بدست آوردن شبکه بهینه، ابتدا مطالعه شبکه به ازای چهار شبکه مختلف انجام شده است و تغییرات کسر مایع و همچنین افت فشار به ازای این چهار شبکه محاسباتی برای هندسه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش تعداد شبکه، نمودار تغییرات کسر مایع و همچنین افت فشار دارای تغییراتی است اما از شبکه با تعداد ۳۲۷۰۰ گره محاسباتی به بعد، تغییرات بسیار ناچیز و قابل صرفنظر است. لذا می‌توان این شبکه محاسباتی را به عنوان شبکه بهینه در نظر گرفت.



شکل ۳- طرحواره شبکه محاسباتی در مبادله‌کن گرمایی در حالت متقارن محوری

با توجه به اینکه فرایند شارژ ماده تغییرفازدهنده، یک مساله گذرا و وابسته به زمان است، علاوه بر شبکه مکانی، بازه زمانی نیز بشدت در دقت نتایج تاثیرگذار است. لذا برای بررسی و انتخاب بازه زمانی بهینه جهت شبیه‌سازی نیز یک مطالعه کامل و جداگانه انجام شده است. برای این منظور عملکرد سیستم ذخیره‌سازی به ازای پنج بازه زمانی مختلف و در شبکه منتخب با ۳۲۷۰۰ گره محاسباتی مجدداً شبیه‌سازی شده است. برای بررسی تاثیر بازه زمانی، زمان شارژ کامل که در آن ماده تغییرفازدهنده بطور کامل ذوب شده است ($\lambda=1$) و همچنین افت فشار در کانال جریان به ازای بازه‌های زمانی مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که از این جدول مشاهده می‌گردد، با



شکل ۲- الف) تغییرات میانگین دما در فرآیند شارژ PCM-RT82 با نتایج آزمایشگاهی [۲۳] ب) تغییرات افت فشار در کانال جریان با دیواره سینوسی [۲۴]

استفاده شده است.

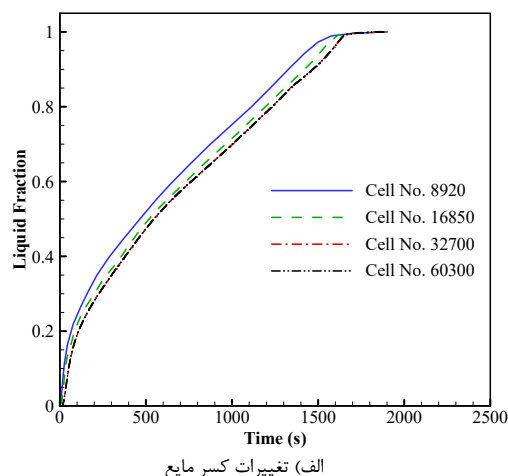
۴- اعتبارسنجی

با توجه به اینکه در این مطالعه عملکرد سیستم ذخیره‌سازی از هر دو دیدگاه گرمایی و سیالاتی مورد بررسی قرار گرفته است، لذا برای اطمینان از صحت و دقت مدل عددی نیز مقایسه نتایج شبیه‌سازی با دو مطالعه مختلف و مرتبط با این مطالعه انجام شده است.

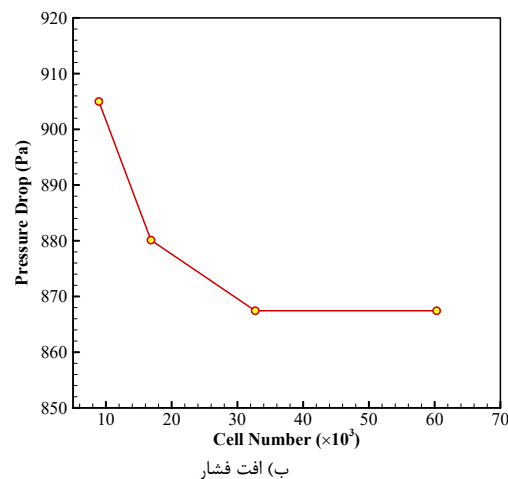
ابتدا جهت اطمینان از مدل ارائه شده برای شبیه‌سازی عملکرد ماده تغییرفازدهنده، مدل آزمایشگاهی مت و همکاران [۲۳] شبیه‌سازی شده است که در آن یک مبادله‌کن گرمایی چندلوله‌ای با جریان آب داغ در طرفین و ماده تغییرفازدهنده RT82 در لوله میانی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین یک مدل عددی نیز برای شبیه‌سازی فرایند شارژ نیز توسط آنها ارائه شد. در شکل ۲-الف تغییرات دمای میانگین ماده تغییرفازدهنده با نتایج آزمایشگاهی و عددی مت و همکاران [۲۳] مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، تطابق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد که نشان‌دهنده اعتبار و صحت روش عددی بکاررفته جهت شبیه‌سازی عملکرد ماده تغییرفازدهنده در مطالعه حاضر است.

از طرفی دیگر برای اطمینان از صحت مدل عددی و نتایج شبیه‌سازی جریان آشفته در مجرای سینوسی، مدل مورد مطالعه توسط الزهرانی [۲۴] شبیه‌سازی شده است. در این مطالعه عملکرد یک

کاهش بازه زمانی از ۵ ثانیه، خطای محاسبات کاهش یافته بطوریکه بعد از بازه زمانی ۰/۵ ثانیه، تغییرات بسیار ناچیز و قابل صرف نظر است. با توجه به مطالعه شبکه انجام شده، شبکه مکانی با ۳۲۷۰۰ گره محاسباتی و بازه زمانی $\Delta t = 0.5$ به عنوان شبکه مکانی و زمانی بهینه در این مطالعه انتخاب شده است و در تمام شبیه سازی ها از آن استفاده شده است. زیرا علاوه بر دقت مناسب، نتایج عددی وابسته به شبکه محاسباتی و بازه زمانی نیستند و می توان با کمترین حجم محاسبات، به نتایج بسیار خوبی دست یافت. بنابراین سایر محاسبات و همچنین نتایج ارائه شده در ادامه بر اساس این شبکه و بازه زمانی ارائه شده است.



الف) تغییرات کسر مایع



ب) افت فشار

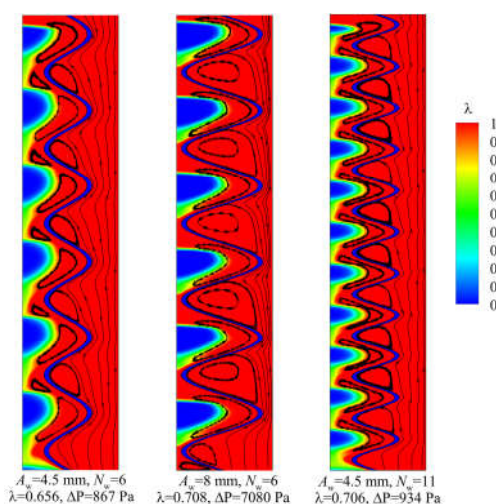
شکل ۴- استقلال از شبکه در سیستم ذخیره سازی

جدول ۳- نتایج مطالعه استقلال از شبکه- بازه زمانی

افت فشار (Pa)	زمان شارژ کامل (s)	بازه زمانی (s)
۸۹۶٫۲۵	۱۷۹۱	۵
۸۸۰٫۷۹	۱۸۰۵	۲
۸۷۱٫۱۲	۱۸۱۳	۱
۸۶۷٫۴۴	۱۸۱۶	۰٫۵
۸۶۷٫۴۴	۱۸۱۶	۰٫۲۵

۶- نتایج و بحث

پس از تعریف مساله و تعیین شرایط عملکردی و همچنین تعریف شرایط و قیود بهینه سازی، نتایج حاصل از عملکرد سیستم ذخیره سازی در این قسمت مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا برای درک بهتر از رفتار سیالاتی سیستم ذخیره سازی، در شکل ۵ خطوط جریان در کانال آب و محفظه PCM به ازای طول موج ها و عدد موج های مختلف در زمان ۱۵ دقیقه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد، پشت هر موج سینوسی در کانال جریان آب داغ، یک گردابه ایجاد شده است. از مزیت های اصلی این گردابه، برهم زدن لایه مرزی و ایجاد تلاطم در جریان سیال است که به شدت به افزایش آهنگ انتقال گرما کمک می کند. اما از طرفی دیگر این گردابه باعث اتلاف انرژی جنبشی سیال نیز شده و در نتیجه منجر به ایجاد افت فشار در جریان سیال می گردد. بنابراین برای ایجاد جریان سیال به پمپ قوی تری نیاز است.



شکل ۵- بررسی تاثیر پارامترهای طراحی بر عملکرد گرمایی- سیالاتی سیستم ذخیره سازی

همانطور که از نتایج شکل ۵ مشاهده می گردد با افزایش طول موج، گردابه های بزرگتر و با افزایش عدد موج، تعداد گردابه های بیشتری ایجاد می شود که این امر منجر به اتلاف بیشتر انرژی جنبشی سیال شده و لذا افت فشار نیز به شدت افزایش می یابد. بنابراین برای برقراری جریان به پمپ سیال قوی تری نیاز است. از طرفی دیگر، با افزایش دو پارامتر طراحی، سطح انتقال گرما یا سطحی که ماده تغییر فازدهنده با سیال داغ در تماس است نیز افزایش می یابد. علاوه بر این، با افزایش دامنه موج، میزان نفوذ سطح داغ به داخل محفظه ماده تغییر فازدهنده نیز افزایش می یابد. بنابراین می توان انتظار داشت که با افزایش دو پارامتر طراحی، آهنگ انتقال گرما افزایش یابد و در نتیجه مدت زمان شارژ کامل ماده تغییر فازدهنده نیز کاهش یابد که در نتایج ارائه شده در شکل ۵ قابل مشاهده است، بطوریکه در یک زمان مشخص، با افزایش عدد موج و دامنه موج، کسر مایع در ماده تغییر فازدهنده نیز افزایش یافته است.

همچنین همانطور که مشاهده می گردد، PCM ذوب شده در مجاورت دیواره موج به دلیل کاهش چگالی به سمت بالا در جریان است. همچنین PCM ذوب شده روی سطح بالایی موج های سینوسی

(۸) و (۹) ارائه شده‌اند.

$$\Delta P (\text{Pa}) = 793.54 + 13243.42 A_w + 203.15 N_w - 2.47E5 A_w N_w - 2.13E6 A_w^2 + 4.54E7 A_w^2 N_w \quad (8)$$

$$\text{Time (s)} = 2921.72 - 1.69E5 A_w + 68.4 N_w - 71694.29 A_w N_w + 3.75E7 A_w^2 - 2.16 N_w^2 + 3368.57 A_w N_w^2 \quad (9)$$

برای اطمینان و سنجش دقت این معادلات یا سطوح پاسخ، از آنالیز واریانس ANOVA استفاده می‌شود. برای این منظور از سه پارامتر مختلف شامل ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین تعدیل شده (R^2 -Adjusted) و ضریب تعیین پیش‌بینی شده (R^2 -Predicted) استفاده می‌شود. بازه تغییرات این سه پارامتر بین صفر و یک است و هرچه مقدار آنها به هم نزدیک‌تر بوده و در عین حال هرچه به مقدار یک نزدیک‌تر باشند، نشان دهنده کیفیت و دقت بالای معادله برازش شده بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده است. به عبارتی دیگر نشان می‌دهد که معادله مورد نظر با دقت بالایی می‌تواند نتایج حاصل از هندسه‌هایی با سایر مقادیر طراحی که در جدول ۴ نیز ارائه نشده‌اند را با دقت بالایی تخمین بزند. نتایج حاصل از آنالیز واریانس معادلات سطوح پاسخ در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد ضرایب مورد نظر علاوه بر اینکه مقداری نزدیک به هم دارند، به مقدار یک نیز نزدیک هستند. به عبارتی دیگر این مقادیر نشان می‌دهد که هر دو منحنی با دقت بسیار بالایی می‌تواند داده‌های شبیه‌سازی را تخمین بزند.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در تعیین کیفیت منحنی برازش شده، پارامتر p-value است که طبق استاندارد باید مقداری کمتر از ۰/۰۵ داشته باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد، این پارامتر برای هر دو سطوح برازش شده توابع هدف، مقدار بسیار کوچکی است ($p\text{-value} \leq 0.0004$) که نشان دهنده دقت و کیفیت بالای منحنی‌های سطوح پاسخ است.

جدول ۵- آنالیز سطوح پاسخ

تابع هدف	R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2	p-value
زمان شارژ	۰/۹۹۸۷	۰/۹۹۴۸	۰/۹۶۰۶	۰/۰۰۳۹
افت فشار	۰/۹۹۷۷	۰/۹۹۳۹	۰/۹۶۹۳	۰/۰۰۰۴

پس از اطمینان از دقت سطوح پاسخ برازش شده بر روی نتایج، می‌توان از معادلات این سطوح برای محاسبه مقدار بهینه توابع هدف استفاده نمود. همانطور که قبلاً نیز بیان شد، دو تابع هدف در سیستم ذخیره‌سازی در تقابل با یکدیگر هستند. لذا انتخاب یک سیستم بهینه که کمترین افت فشار و کمترین زمان شارژ را داشته باشد، عملاً امکان‌پذیر نیست. به عبارتی دیگر مجموعه‌ای از جواب‌ها برای مساله وجود دارد که به ازای برخی از متغیرهای طراحی، کمترین زمان شارژ ممکن ولی بیشترین افت فشار وجود دارد، یا برعکس، کمترین افت فشار و بیشترین زمان شارژ وجود دارد. همچنین طرح‌هایی از سیستم ذخیره‌سازی با وزن‌های مختلفی از توابع هدف نیز وجود دارد. به عنوان مثال، به ازای برخی از متغیرها، طرح‌هایی وجود دارد که افت فشار و زمان شارژ هر دو از اهمیت یکسانی برخوردار هستند. لذا انتخاب یک سیستم بهینه از بین همه این موارد عملاً امکان‌پذیر نیست. در نتیجه

نیز به سمت بالا حرکت کرده و شروع به چرخش می‌کند و گردابه ایجاد می‌گردد که به افزایش انتقال گرما و در نتیجه افزایش عملکرد مبادله‌کن گرمایی کمک می‌کند. از این موضوع می‌توان دریافت که دامنه و تعداد موج‌ها و همچنین فضای ایجاد شده بین فین و دیواره خارجی می‌تواند نقش مهمی در میزان تبادل گرما و سرعت شارژ PCM داشته باشد.

پس از بررسی عملکرد گرمایی و سیالاتی سیستم‌های ذخیره‌سازی مختلف، نیاز به طراحی سیستم بهینه است که برای این منظور نیز از روش سطح پاسخ استفاده شده است. لذا ابتدا بر اساس تعداد متغیرهای بهینه‌سازی، طراحی آزمایش بر پایه طرح مرکب مرکزی انجام شده است که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، به ازای مقادیر مختلف از متغیرهای بهینه‌سازی که در معادله (۶) ارائه شد، ۹ آزمایش یا شبیه‌سازی طراحی شده است. به عبارتی دیگر، به ازای دامنه و عدد موج‌های مختلف در دیواره میانی مبادله‌کن گرمایی، هندسه‌های مختلف طراحی و پیشنهاد شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، هندسه‌های پیشنهادی شامل نقاط ابتدایی، میانی و انتهایی بازه‌های تعیین شده در معادله (۶) است. نتایج این ۹ شبیه‌سازی شامل زمان شارژ کامل و افت فشار نیز به ازای هر مورد در جدول ۴ ارائه شده است. یکی از نکات قابل توجه از نتایج جدول ۴، تفاوت رفتار توابع هدف شامل زمان شارژ و افت فشار است بطوریکه با افزایش دامنه و عدد موج، زمان شارژ کاهش یافته اما افت فشار افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر تغییرات هندسی که منجر به افزایش سطح انتقال گرما شده، مانع از حرکت سیال نیز شده است و اگر چه آهنگ انتقال گرما به ماده تغییرافزاینده افزایش یافته و منجر به کاهش زمان شارژ شده، اما افت فشار در کانال جریان نیز افزایش یافته است. البته استثنائاً در یک مورد و در عدد موج ۱، با افزایش دامنه از ۱ به ۸ mm، زمان شارژ افزایش یافته که به دلیل تجمع ماده تغییرافزاینده ذوب نشده در بالای تک موج است.

جدول ۴- نتایج طراحی آزمایش به روش CCD

ردیف	دامنه موج $A_w (\text{mm})$	عدد موج N_w	زمان (s)	افت فشار $\Delta P (\text{Pa})$
۱	۸	۱۱	۱۳۹۷	۱۳۴۷۵/۶۰
۲	۸	۶	۱۸۵۵	۷۰۸۰/۱۱
۳	۴/۵	۶	۱۸۱۶	۸۶۷/۴۴
۴	۱	۱۱	۲۸۸۴	۸۲۰/۶۴
۵	۴/۵	۱	۲۶۹۵	۸۲۵/۱۲
۶	۱	۱	۲۷۸۰	۸۰۶/۳۸
۷	۸	۱	۳۴۸۲	۲۱۳۹/۰۷
۸	۱	۶	۲۸۳۷	۸۱۲/۶۲
۹	۴/۵	۱۱	۱۷۲۷	۹۳۴/۸۹

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها و محاسبه توابع هدف، می‌توان یک منحنی یا سطح با استفاده از روش سطح پاسخ بر روی هر تابع هدف برازش کرد و برای هر تابع هدف یک معادله چندجمله‌ای بر حسب متغیرهای بهینه‌سازی بدست آورد. معادلات حاکم بر سطوح پاسخ بدست آمده برای زمان شارژ کامل و افت فشار به ترتیب در معادلات

برای انتخاب یک سیستم از بین همه این موارد، نیاز به استفاده از یک معیار تصمیم‌گیری است. تابع مطلوبیت^۱ یکی از معیارهای مناسب در این راستا است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (۱۰)$$

که در این معادله n تعداد توابع هدف و d_i مقدار توابع هدف به ازای هر طرح از سیستم ذخیره‌سازی است. به عبارتی دیگر با استفاده از رابطه فوق، به هر طرح از سیستم که به ازای مقادیر مختلفی از متغیرهای طراحی بدست آمده است، یک عدد یا امتیاز به نام مطلوبیت اختصاص داده می‌شود. مقدار تابع مطلوبیت بین صفر و یک است. هر چه این عدد بیشتر بوده و به سمت یک نزدیک‌تر باشد، سیستم بهتری جهت انتخاب نهایی خواهد بود.

در مطالعه حاضر نیز می‌توان به ازای مقادیر مختلف متغیرهای طراحی که در معادله (۶) ارائه شد، سیستم‌های ذخیره‌سازی مختلفی را طراحی کرده و پس از ارزیابی مقادیر توابع هدف هر سیستم با توجه به معادلات مربوط به سطوح پاسخ، معادلات (۸) و (۹)، می‌توان مطلوبیت آن را بدست آورد. سپس سیستمی که بیشترین مطلوبیت را دارد، به عنوان سیستم بهینه انتخاب می‌گردد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی برای ۱۰ طرح برتر از سیستم ذخیره‌سازی در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- نتایج بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ

ردیف	دامنه موج A_w (mm)	عدد موج N_w	زمان (s)	افت فشار ΔP (Pa)	مطلوبیت
۱	۴	۹,۷۵۹	۱۶۹۲,۵۴	۸۴۴,۵۱	۰,۹۶۵
۲	۴	۹,۷۹۱	۱۶۹۲,۵۶	۸۴۴,۴۸	۰,۹۶۵
۳	۴	۹,۶۷۹	۱۶۹۲,۶۳	۸۴۴,۴۸	۰,۹۶۵
۴	۴	۹,۶۳۳	۱۶۹۲,۷۵	۸۴۴,۴۸	۰,۹۶۵
۵	۴	۹,۹۰۳	۱۶۹۲,۸۱	۸۴۴,۵۱	۰,۹۶۵
۶	۴	۱۰,۰۱۷	۱۶۹۳,۳۴	۸۴۴,۴۵	۰,۹۶۵
۷	۴	۱۰,۰۵۶	۱۶۹۳,۶۷	۸۴۴,۵۱	۰,۹۶۵
۸	۴	۱۰,۳	۱۶۹۶,۲۸	۸۴۴,۴۷	۰,۹۶۴
۹	۴	۹,۱۷۵	۱۶۹۶,۸۷	۸۴۴,۴۸	۰,۹۶۴
۱۰	۴	۱۰,۴۳۷	۱۶۹۸,۴۱	۸۴۴,۵۳	۰,۹۶۴

همانطور که مشاهده می‌گردد، بیشترین مقدار تابع مطلوبیت برابر با ۰,۹۶۵ است که در ۷ طرح پیشنهادی اول در جدول ۶ ارائه شده است. لذا باید از بین این موارد یک طرح را انتخاب نمود. یکی از نکات قابل توجه در این جدول مقدار دامنه موج است که در بازه ۱ تا ۸ میلی‌متر، مقدار ۴ میلی‌متر به عنوان بهترین دامنه موج انتخاب شده است. همچنین همانطور که مشاهده می‌گردد، برای عدد موج نیز در بازه ۱ تا ۱۱، مقادیر نزدیک به ۱۰ N_w انتخاب شده است. همانطور که قبلاً نیز بیان شد، اگر عدد موج، یک عدد صحیح باشد لذا می‌توان اطمینان داشت که به ازای همه اعداد موج حجم یکسان از ماده تغییرافزدهنده در سیستم ذخیره‌سازی وجود دارد و لذا تمام

شبیه‌سازی‌های انجام شده با شرایط یکسان خواهند بود. به همین دلیل با توجه بهینه‌سازی ارائه شده در جدول ۶، می‌توان عدد موج ۱۰ $N_w =$ را به عنوان عدد موج بهینه انتخاب نمود. لذا سطر ۶ در جدول ۶ را می‌توان به عنوان سیستم بهینه انتخاب نمود.

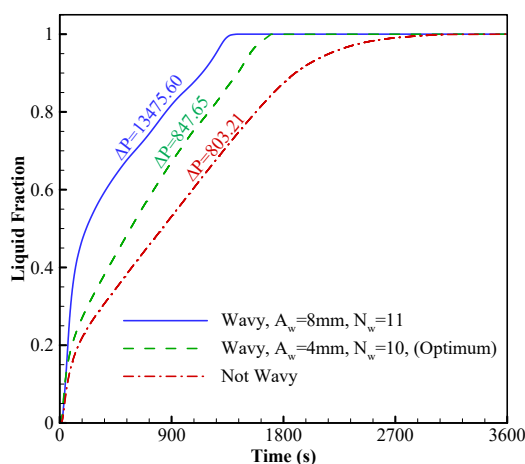
یکی دیگر از نکاتی که باید بدان توجه داشت، مقادیر بهینه انتخاب شده برای متغیرهای طراحی است. همانطور که مشاهده می‌گردد، مقادیر بهینه بدست آمده ($N_w = ۱۰$ و $A_w = ۴$ mm) جزو طرح‌های مورد آزمایش در جدول ۴ نیستند و مقادیر میانی که قبلاً شبیه‌سازی نشده بودند، به عنوان طرح‌های بهینه انتخاب شده‌اند.

در نهایت با توجه به اینکه متغیرهای طراحی و در نتیجه سیستم ذخیره‌سازی بهینه بر اساس سطوح پاسخ بدست آمده‌اند، جهت اطمینان کامل از نتیجه بهینه‌سازی انجام شده، سیستم بهینه منتخب مجدداً شبیه‌سازی شده و توابع هدف آن شامل زمان شارژ کامل و افت فشار بدست آمده‌اند. نتایج شبیه‌سازی سیستم بهینه نشان می‌دهد که زمان شارژ برابر با ۱۷۰۰,۱۲ ثانیه بوده که در مقایسه با مقدار تخمین زده شده از روش سطح پاسخ (۱۶۹۳,۳۴ ثانیه) ۰,۴ درصد خطا دارد. همچنین افت فشار در شبیه‌سازی سیستم بهینه برابر با ۸۴۷,۶۵ پاسکال است که در مقایسه با مقدار تخمین زده شده از روش سطح پاسخ (۸۴۴,۴۵ پاسکال) ۰,۳۷ درصد خطا دارد که این مقدار کم خطا ناشی از منحنی‌های برازش شده است. بنابراین با توجه به اینکه می‌توان نتیجه گرفت که سطوح پاسخ بدست آمده برای سیستم ذخیره‌سازی از دقت بالایی برخوردار بوده و بخوبی می‌توانند عملکرد گرمایی-سیالاتی سیستم را تخمین بزنند.

برای مقایسه و بررسی بهتر عملکرد PCM در سیستم ذخیره‌سازی، تغییرات زمانی کانتورهای کسر مایع در دو حالت، شامل مبدل با دیوار صاف و با دیوار موج بهینه، در طول فرآیند شارژ در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۶-الف مشاهده می‌گردد، گرما از دیواره لوله آب گرم در سرتاسر لوله به داخل محفظه PCM نفوذ کرده و با گذشت زمان، PCM از قسمت سطح تماس با جداره میانی شروع به تغییر فاز کرده و ذوب می‌شود. با توجه به چگالی کمتر PCM در حالت مایع نسبت به حالت جامد، PCM مایع در خلاف جهت گرانش و به سمت بالا حرکت کرده و لذا در قسمت بالایی محفظه جریان می‌یابد. با گذشت زمان، نفوذ گرما از طریق دیوار و انتقال گرما از طریق حرکت PCM ذوب شده باعث می‌شود که تمام محفظه PCM به حالت مایع درآمده و اصطلاحاً PCM کاملاً شارژ شود. برای بررسی تاثیر دیواره موج بر روی عملکرد سیستم ذخیره‌سازی، کانتورهای تغییرات زمانی کسر مایع در مبادله‌کن گرمایی با دیواره موج بهینه در شکل ۶-ب نشان داده شده است. همانطور که قبلاً نیز بیان شد، استفاده از دیواره موج می‌تواند تا حد بسیار زیادی به بهبود عملکرد مبادله‌کن گرمایی در شارژ PCM کمک کند زیرا باعث افزایش سطح انتقال گرما و نفوذ بیشتر گرما به داخل PCM می‌شود. برای مقایسه عملکرد سیستم ذخیره‌سازی با حالت دیواره صاف، تغییرات زمانی کانتورهای کسر مایع در مبادله‌کن گرمایی با دیواره موج بهینه در شکل ۶-ب نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد موج‌های سینوسی در سرتاسر محفظه تا حد بسیار زیادی گرمای ناشی از جریان آب داغ را به داخل PCM منتقل کرده‌اند، بطوریکه در زمان ۳۰ دقیقه ماده تغییرافزدهنده در سیستم بهینه بطور کامل شارژ شده (کسر مایع برابر با یک) در

^۱ Desirability Function

بهینه و دیوار موج با بیشترین طول موج و عدد موج (بیشترین افت فشار) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، نسبت به حالت صاف، زمان شارژ در سیستم بهینه (۱۷۰۰ s) بسیار کمتر از سیستم با دیواره صاف است (۳۰۷۵ s) بطوریکه حدود ۴۵٪ کاهش در زمان شارژ مشاهده می‌گردد. اما در بین سیستم‌های پیشنهادی در جدول ۴، سیستم مورد بررسی در سطر اول جدول ($A_w = 8$ mm و $N_w = 11$) دارای زمان شارژ کمتری است. اما با توجه به اینکه در این مطالعه بهینه‌سازی دوهدفه انجام شده و علاوه بر زمان شارژ، افت فشار جریان سیال داغ نیز مدنظر قرار گرفته است، لذا سیستم بهینه دارای زمان شارژ بیشتر ولی افت فشار بسیار کمتری نسبت به سیستم پیشنهادی در سطر اول جدول ۴ است.



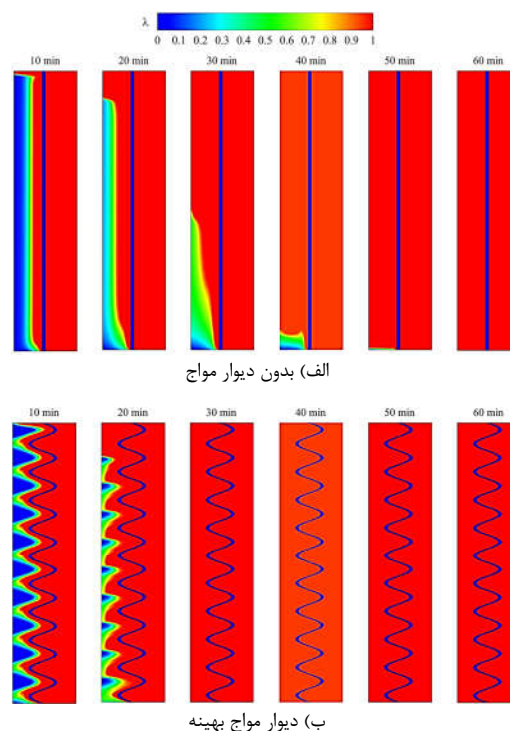
شکل ۷- تغییرات زمانی میانگین کسر مایع در مبادله‌کن گرمایی با دیوارهای میانی مختلف

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی دوهدفه سیالاتی-گرمایی یک سیستم ذخیره‌سازی به همراه ماده تغییرفازدهنده در یک مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای با دیواره میانی موج انجام شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که سیستم ذخیره‌سازی با دامنه موج برابر با $A_w = 4$ mm و عدد موج $N_w = 10$ بهترین سیستم ذخیره‌سازی است که علاوه بر زمان شارژ کم دارای افت فشار کم نیز است. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که در سیستم ذخیره‌سازی بهینه زمان شارژ برابر با ۱۶۹۳/۳۴ ثانیه و افت فشار در کانال جریان نیز برابر با ۸۴۴/۴۵ پاسکال است. همچنین شبیه‌سازی مجدد سیستم بهینه نشان داد که زمان شارژ و افت فشار در سیستم بهینه به ترتیب برابر با ۱۷۰۰/۱۲ ثانیه و ۸۴۷/۶۵ پاسکال است که این اختلاف جزئی نیز ناشی از دقت سطح پاسخ برازش شده است. همچنین مقایسه سیستم‌های ذخیره‌سازی با دیوارهای موج مختلف نشان داد که در مقایسه با حالت دیوار صاف، سیستم بهینه حدود ۴۵٪ زمان شارژ را کاهش می‌دهد که عدد قابل توجهی است اما افت فشار حدود ۵٪/۵ افزایش می‌یابد که مقدار قابل توجهی نیست. همچنین عملکرد گرمایی-سیالاتی PCM در مبادله‌کن گرمایی با رسم کانتورهای کسر مایع و خطوط جریان بطور کامل تحلیل شد که نشان داد علاوه بر

حالیکه در همین زمان و در سیستم ذخیره‌سازی با دیواره صاف هنوز شارژ کامل صورت نگرفته است. یکی از نکات قابل توجه از مقایسه نتایج شکل ۶-الف با شکل ۶-ب، PCM موجود در ناحیه پائینی محفظه است که دیرتر از بقیه نواحی ذوب می‌شود. بنابراین با استفاده از دیواره موج، موج‌های سینوسی به داخل این ناحیه نفوذ کرده و آهنگ انتقال گرما در این ناحیه را افزایش می‌دهند و شارژ PCM در این ناحیه نیز با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد.

یکی دیگر از نکاتی که باید بدان توجه داشت، سهم هر یک از دو مکانیزم افزایش انتقال گرما (سطح انتقال گرما و گردابه‌های ایجاد شده) در بهبود عملکرد سیستم ذخیره‌سازی است. برای این منظور، یک مبادله‌کن گرمایی معادل بدون دیواره موج شبیه‌سازی شده است بطوریکه مساحت انتقال گرما و حجم ماده‌تغییرفازدهنده در آن دقیقاً با حالت بهینه یکسان باشد. در این صورت فقط تاثیر افزایش سطح در نظر گرفته شده و تاثیر گردابه‌ها حذف می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اگر سطح انتقال گرما در هندسه پایه (بدون موج) به اندازه سطح هندسه بهینه افزایش یابد، زمان شارژ از ۳۰۷۵ به اندازه ۱۰۱۷ ثانیه کاهش یافته و به مقدار ۲۰۵۸ ثانیه می‌رسد. همچنین اگر تاثیر گردابه‌ها نیز در نظر گرفته شده (هندسه بهینه)، زمان شارژ کامل به ۱۷۰۰ ثانیه کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت سهم کل افزایش سطح انتقال گرما حدود ۷۴٪ و سهم گردابه‌ها نیز حدود ۲۶٪ است.



شکل ۸- کانتور تغییرات زمانی کسر مایع در سیستم ذخیره‌سازی (الف) بدون دیوار موج و (ب) با دیوار موج بهینه

در نهایت برای درک بهتر از عملکرد مبادله‌کن گرمایی در شارژ PCM، تغییرات کسر مایع محفظه PCM در طی فرآیند شارژ در شکل ۷ به ازای سه حالت شامل دیوار صاف (کمترین افت فشار)، دیوار موج

- [11] Mahdi JM, Lohrasbi S, Nsofor EC. Hybrid heat transfer enhancement for latent-heat thermal energy storage systems: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019; 137:630-49.
- [۱۲] نعمت‌پور الف و شیخ الاسلامی م، بررسی عددی اثر افزایش تعداد و چیدمان لوله داخلی درون مبادله‌کن گرمایی سه لوله‌ای بر رفتار انجماد مواد تغییر فاز دهنده با نانو ذرات Al_2O_3 . *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د ۵۱، ش ۱، ص ۲۵۷-۲۶۶، ۱۴۰۰.
- [13] Iranmanesh A, Moshizi SA. Enhancing melting and solidification characteristics of a triple-pipe latent heat energy storage system via a wavy central wall with a sinusoidal fixed wavelength. *Journal of Energy Storage*. 2024; 79:110218.
- [14] Said A, Togun H, Abed AM, Biswas N, Mohammed HI, Sultan HS, Mahdi JM, Talebizadehsardari P. Evaluation of wavy wall configurations for accelerated heat recovery in triplex-tube energy storage units for building heating applications. *Journal of Building Engineering*. 2024; 94:109762.
- [15] Boudjemline A, Togun H, Mohammed HI, Mahdi JM, Khedher NB, Talebizadehsardari P, Keshmiri A. Analysis and comparative assessment of charging dynamics in vertical multi-channel latent heat storage system with corrugated wavy channels. *Journal of Energy Storage*. 2024; 90:111903.
- [16] Shahsavari A, Goodarzi A, Talebizadehsardari P, Arıcı M. Numerical investigation of a double-pipe latent heat thermal energy storage with sinusoidal wavy fins during melting and solidification. *International Journal of Energy Research*. 2021; 45 20934-48.
- [17] Eisapour M, Eisapour AH, Shafaghat AH, Mohammed HI, Talebizadehsardari P, Chen Z. Solidification of a nano-enhanced phase change material (NePCM) in a double elliptical latent heat storage unit with wavy inner tubes Author links open overlay panel. *Solar Energy*. 2022; 241:39-53.
- [18] Ghalambaz M, Melaibari, AA, Chamkha AJ, Younis O, Sheremet M. Phase change heat transfer and energy storage in a wavy-tube thermal storage unit filled with a nano-enhanced phase change material and metal foams. *Journal of Energy Storage*. 2023; 54:105277.
- [19] Bianco N, Fragnito A, Iasiello M, Mauro GM, Mongibello L. Multi-objective optimization of a phase change material-based shell-and-tube heat exchanger for cold thermal energy storage: experiments and numerical modeling. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 215:119047.
- [20] Ansari AB. Optimization of Fin Arrangement in a Double-Pipe Heat Exchanger to Improve the Storage Performance of Phase Change Materials. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2024; 56:345-70.
- [21] Sciacovelli A, Gagliardi F, Verda V. Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins. *Applied Energy*. 2015; 137:707-15.
- [22] Lohrasbi S, Sheikholeslami M, Ganji DD. Multi-objective RSM optimization of fin assisted latent heat thermal energy storage system based on solidification process of phase change Material in presence of copper nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 118: 430-47.
- [23] Mat S, Al-Abidi AA, Sopian K, Sulaiman MY, Mohammad AT. Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins. *Energy Conversion and Management*. 2013; 74:223-36.
- [24] Al-Zahrani S. Heat transfer characteristics of innovative configurations of double pipe heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*. 2023; 59:1661-75.

افزایش سطح انتقال گرما در حالت وجود دیواره موج، چرخش PCM ذوب شده در بالای موج‌های دیواره میانی هم در ناحیه جریان سیال و هم در محفظه PCM تاثیر بسزایی در سرعت انتقال گرما و بهبود عملکرد سیستم ذخیره‌سازی دارد. در نهایت، نتایج نشان داد که روش RSM یک روش بسیار مناسب جهت بهینه‌سازی چندهدفه سیستم‌های ذخیره‌سازی است که شبیه‌سازی آنها بسیار زمان‌بر است.

۸- سپاسگزاری

از حمایت مالی پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته از این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره ۰۳/۵۵۷/۵۵۷ و تقدردانی می‌گردد.

۹- مراجع

- [1] Briache A, Afass A, Ouardouz M, Ahachad M, Mahdaoui M. A Comparative Analysis of Enhancement Techniques in a PCM-Embedded Heat Sink: Fin forms, Nanoparticles, and Metal Foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024; 229:125730.
- [2] Gür M, Gürgeç E, Coşanay H, Öztop HF. Novel nano-Y2O3/myristic acid nanocomposite PCM for cooling performances of electronic device with various fin designs. *Journal of Energy Storage*. 2024; 100:113646.
- [3] Mahdavi A, Farhadi M, Gorji-Bandpy M, Mahmoudi A. A comprehensive study on passive cooling of a PV device using PCM and various fin configurations: Pin, spring, and Y-shaped fins. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 252:123519.
- [4] Liang Y, Yang H, Wang H, Bao X, Cui H. Enhancing energy efficiency of air conditioning system through optimization of PCM-based cold energy storage tank: A data center case study. *Energy*. 2024; 286:129641.
- [5] Priyadarshi G, Kiran Naik B. Experimental study of novel desiccant coated energy exchanger employing PCM – Silica gel working pair for air conditioning and thermal energy storage application. *Energy Conversion and Management*. 2024; 321:119042.
- [6] Sharma RK, Kumar A, Rakshit D. A phase change material (PCM) based novel retrofitting approach in the air conditioning system to reduce building energy demand. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 238:121872.
- [7] Bashir MA, Ali HM. Design and analysis of PCM integrated solar receiver with double-helical tube structure. *Journal of Energy Storage*. 2024; 84:110872.
- [8] Fallah Najafabadi M, Farhadi M, Talebi Rostami H. Numerically analysis of a Phase-change Material in concentric double-pipe helical coil with turbulent flow as thermal storage unit in solar water heaters. *Journal of Energy Storage*. 2022; 55:105712.
- [۹] اشرفی م، محمدیون ح و دیبایی بناب م، بهبود عملکرد گردآور خورشیدی و افزایش بهره‌وری انرژی خورشید با بکارگیری مواد تغییر فاز. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د ۵۱، ش ۱، ص ۲۹-۳۸، ۱۴۰۰.
- [10] Qasem NAA, Abderrahmane A, Belazreg A, Younis O, Khetib Y, Guedri K. Investigation of phase change heat transfer in a rectangular case as function of fin placement for solar applications. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024; 54:103996.