



Numerical Investigation of the Effect of Linear, Parabolic, and Radial Fin Geometries on the Melting Performance of RT35 Phase Change Material in a Triple-Tube Heat Exchanger

Tahereh Hassani Jalilian ^a, Ashkan Ghafouri ^{a*}

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Jalilian T H, Ghafouri A. Numerical Investigation of the Effect of Linear, Parabolic, and Radial Fin Geometries on the Melting Performance of RT35 Phase Change Material in a Triple-Tube Heat Exchanger. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2026;5(4):482-503.

 <https://10.52547/masm.5.4.482>

KEYWORDS

Phase Change Material,
Parabolic Fin,
Radial Fin,
Melting Time,
Thermal Performance.

ABSTRACT

The low thermal conductivity of phase change materials (PCMs) remains the main challenge for their widespread application in latent heat thermal energy storage systems. In the present study, the effect of curved-shaped fins on improving the melting rate of RT35 PCM in a triple-tube heat exchanger is numerically and two-dimensionally investigated. Simulations are performed using ANSYS Fluent CFD software employing the enthalpy-porosity method. The effects of two key parameters—the number of linear fins (3, 4, and 5) and fin geometry (linear, parabolic, and radial)—on liquid fraction, temperature distribution, and velocity field during the melting process are studied. The results demonstrate that increasing the number of linear fins from 3 to 5 enhances the liquid fraction by 27% and 41% at 600 seconds, respectively, and improves the PCM temperature by up to 15 K. Comparing different fin shapes reveals that parabolic and radial fins increase the liquid fraction by 13% compared to the linear configuration at 400 seconds. Moreover, the complete melting time in the five-fin parabolic configuration decreases by 50% compared to the five-fin linear case and by 68% compared to the three-fin linear case. Overall, fins with greater curvature exhibit superior thermal performance due to enhanced buoyancy forces and improved natural convection flow. The findings of this research can be utilized in the optimal design of thermal energy storage heat exchangers for applications in air conditioning systems, solar collectors, and industrial waste heat recovery.

Extended Abstract

1. Introduction

The increasing global energy demand and environmental concerns have motivated researchers to develop efficient energy storage technologies [1]. Latent heat thermal energy storage systems using phase change materials offer high energy storage density and nearly isothermal phase transition. However, the low thermal conductivity of PCMs (approximately 0.2 W/mK for RT35, as listed in Table 2) significantly limits their charging and discharging rates. Various enhancement techniques have been proposed, among which fin installation is one of the most effective approaches. Early studies by Lacroix and Benmadda [2] and Lamberg [3] demonstrated the positive effect of fins on melting and solidification. Lamberg et al. [4] showed significant heat transfer

* Corresponding author.

E-mail address: ashkan.ghafouri@iau.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.5.4.482>

Received: August 09, 2026; Received in revised form: August 18, 2026; Accepted: August 28, 2026.

© Author



enhancement with fins. Akhilesh et al. [5] found that increasing fins beyond a critical value does not yield considerable improvement. Trp et al. [6] examined operating and geometric parameters, finding that Reynolds number has negligible impact while temperature difference and length-to-diameter ratio linearly improve performance. Gharebaghi and Sezai [7] showed that vertical heated walls with horizontal fins perform better. Agyenim et al. [8] found that increased inlet temperature significantly reduces melting time. Al-Abidi et al. [9] numerically showed melting time reduces to 34.7% of the finless case, and later confirmed experimentally [10] that fluid temperature dominates the melting process. Alizadeh et al. [11] demonstrated significant improvement in PCM solidification using V-shaped fins and nanoparticles in a triple-tube heat exchanger. Assari et al. [12] used a sinusoidal inner tube, reducing melting time from 32.5 hours to 8 hours. Recently, Ismail et al. [14] showed that vertical fins perform better for short durations while horizontal fins are more effective for longer durations. Liu et al. [15] designed palm-vein mesh fins, reducing melting time to 1600 seconds. Chen et al. [16] developed V-shaped serrated fins, reducing melting time by 37.33%. Chen et al. [17] proposed Y-shaped hierarchical fins, reducing melting time by 68.6% compared to the finless case. Despite these advances, comparative studies on curved fin geometries remain limited. In the present study, linear, parabolic, and radial fins in a triple-tube heat exchanger using RT35 PCM are systematically compared, analyzing fin count and shape effects. Although numerous studies exist on various fins, a comprehensive comparison of these three specific geometries has not been reported thus far. The geometric details are illustrated in Figure 1.

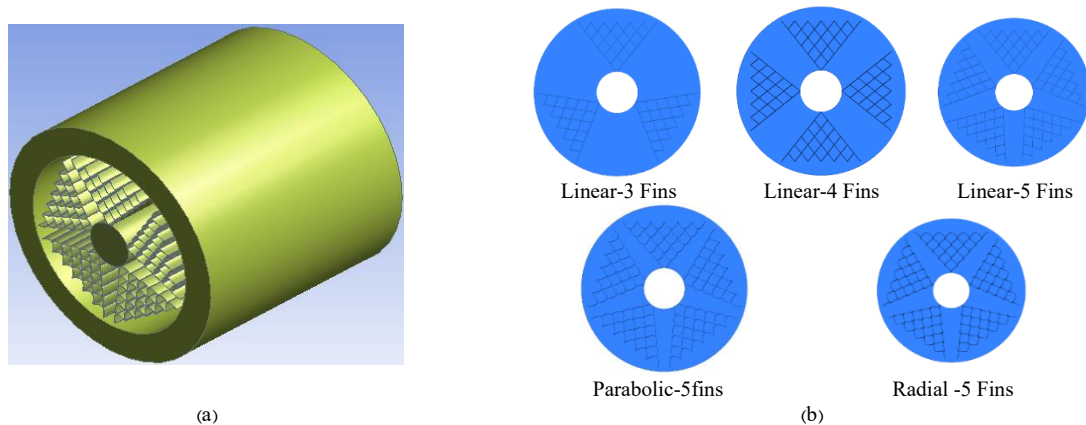


Figure 1. a) Schematic of the triple-tube heat exchanger with parabolic fins; b) Geometric details of different fin shapes (linear, parabolic, radial)

2. Problem description and governing equations

The study is conducted on a triple-tube heat exchanger with an inner tube diameter (D_i) of 20 mm and an outer tube diameter (D_o) of 80 mm, as shown schematically in Figure 1a. The annular space between the inner and outer tubes is filled with RT35 PCM, and copper fins with a thickness of 0.2 mm and total length of 30 mm are attached to the inner tube. Three fin geometries are examined: linear, parabolic, and radial, with 3, 4, and 5 fins for the linear configuration and 5 fins for the parabolic and radial cases. The detailed geometric specifications of the different fin shapes are presented in Figure 1b. The inner tube wall is maintained at a constant temperature of 350 K, while the outer wall is adiabatic. The initial temperature throughout the domain is 298 K, with zero liquid fraction (fully solid state). The thermophysical properties of the PCM (RT35) and copper fins are provided in Tables 1 and 2, respectively.

Table 1. Thermophysical properties of copper (fin material)

Property	Value	Unit
Density	8933	kg/m ³
Thermal conductivity	401	W/m·K
Specific heat	385	J/kg·K

Table 2. Thermophysical properties of RT35 phase change material

Property	Value	Unit
Density	815	kg/m ³
Thermal conductivity	0.2	W/m·K
Melting onset temperature	302	K
Melting complete temperature	309	K
Specific heat	2000	J/kg·K
Dynamic viscosity	0.023	kg/m·s
Thermal expansion coefficient	0.0006	1/K
Latent heat	170000	J/kg

The enthalpy-porosity method is employed to model the phase change process. The governing equations for mass, momentum, and energy conservation are as follows:

The continuity equation for incompressible flow is given by $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$. The momentum equation incorporates the Boussinesq approximation for buoyancy effects and a source term to account for the mushy zone:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = \frac{1}{\rho} \left(-\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g} \beta (T - T_{\text{ref}}) \right) + \mathbf{S}_i \quad (1)$$

where $\mathbf{S}_i = -C((1-\lambda)^2/(\lambda^3 + \epsilon))\mathbf{V}$ represents the Darcy-like damping term. The energy equation is expressed in terms of sensible and latent enthalpy:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho C_p} \nabla h \right) \quad (2)$$

where $H = h + \Delta H$ and $\Delta H = \lambda L$. The liquid fraction λ is defined as a function of temperature, varying from 0 at $T < T_s$ to 1 at $T > T_l$.

Although natural convection is inherently 3D, similar studies have successfully used 2D approaches [2,5,9]. The 2D approach was selected for this comparative study, though it may slightly affect final melting time predictions.

3. Numerical method and validation

The numerical simulations are performed using ANSYS Fluent 19 based on the finite volume method. The pressure-based solver with an implicit transient formulation is employed. The SIMPLE algorithm is used for pressure-velocity coupling. The QUICK scheme is applied for momentum and energy discretization, while PRESTO is used for pressure correction. Under-relaxation factors of 0.7, 0.3, 1.0, and 0.9 are set for pressure, velocity, energy, and liquid fraction, respectively. Convergence criteria of 10^{-3} for continuity and momentum and 10^{-6} for energy are specified. A grid independence study is conducted using five mesh sizes ranging from 209,876 to 1,158,024 triangular elements. The mesh with 945,679 cells is selected, as further refinement results in less than 0.02% variation in liquid fraction. A time-step independence study is also performed with five different time steps (0.1, 0.2, 0.5, 1.0, and 2.0 s). The time step of 0.2 s is chosen as optimal, with further reduction causing less than 0.7% variation and unnecessary computational cost. The numerical model is validated against the experimental work of Al-Abidi et al. [10] for a triple-tube heat exchanger with RT82 PCM. The comparison of average PCM temperature over time, shown in Figure 2, demonstrates excellent agreement with a maximum deviation of approximately 5%, confirming the accuracy of the present numerical approach for phase change heat transfer simulations.

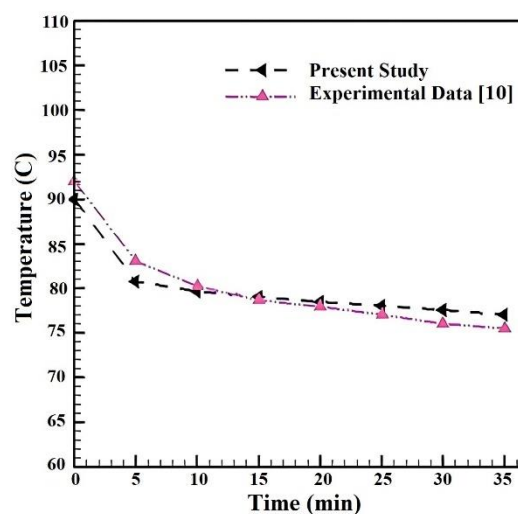


Figure 2. Comparison of numerical results with experimental work of Al-Abidi et al. [10]

The enthalpy-porosity method is material-independent, and validation with RT82 confirms solution accuracy for other materials with similar properties [18].

4. Results and discussion

4.1. Effect of Number of Linear Fins

Figure 3 presents liquid fraction contours for 3-, 4-, and 5-fin linear configurations at different times (10, 200, 400, and 600 s). At 10 seconds, melting begins near the fin surfaces primarily through conduction, with no significant difference observed between configurations. By 600 seconds, the 5-fin case shows significantly more melting, with large portions of the upper region liquefied, while the 3-fin case retains substantial solid PCM. The liquid fraction evolution over time for these configurations is quantitatively presented in Figure 4. The results demonstrate that increasing fins from 3 to 4 and 5 enhances the liquid fraction by 27% and 41% at 600 seconds, respectively. The PCM average temperature improves by 6 K and 15 K for the 4- and 5-fin cases compared to the 3-fin case at the same time. After approximately 1000 seconds, the melting rate decreases in all cases as the system approaches complete melting.

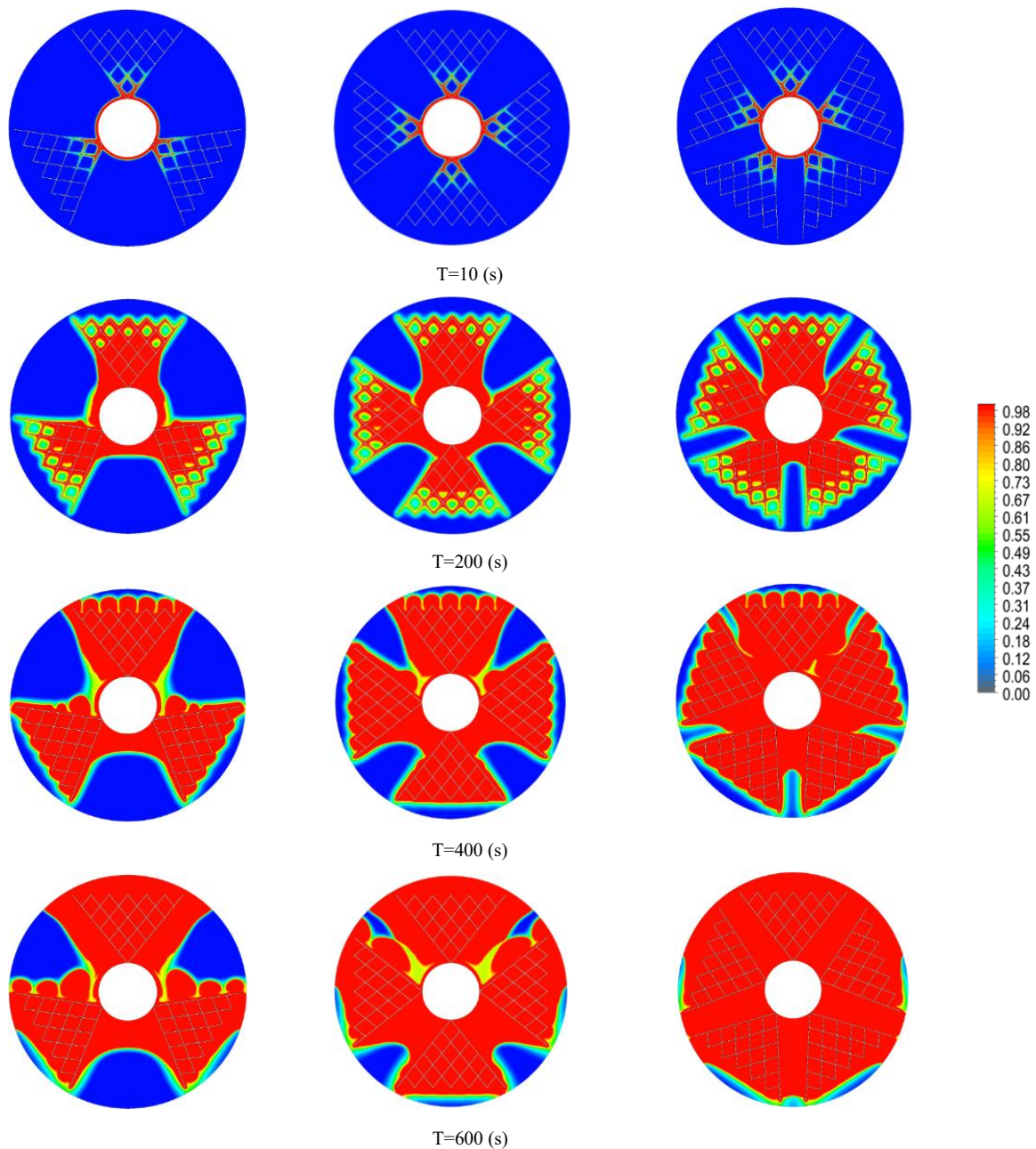


Figure 3. Liquid fraction contours for 3-, 4-, and 5-fin linear configurations at different times (10, 200, 400, and 600 s)

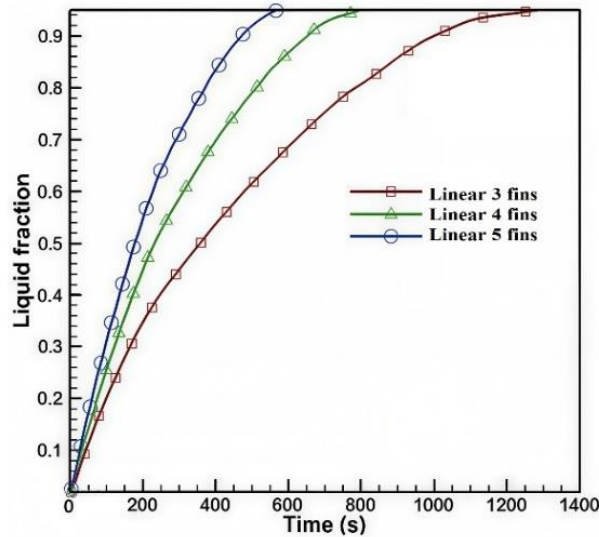


Figure 4. Liquid fraction evolution for linear fins (3, 4, and 5 fins)

4.2. Effect of Fin Geometry

The comparison of linear, parabolic, and radial fins (all with 5 fins) reveals significant performance differences. The geometric configurations of these three fin shapes are illustrated in Figure 1b. The liquid fraction evolution for the three fin geometries is quantitatively compared in Figure 5, indicating that parabolic and radial fins increase the liquid fraction by 13% compared to the linear case at 400 seconds. This superiority is attributed to the curved geometry, which reduces wake regions and enhances buoyancy-driven flow, promoting the formation of larger and more stable convection cells.

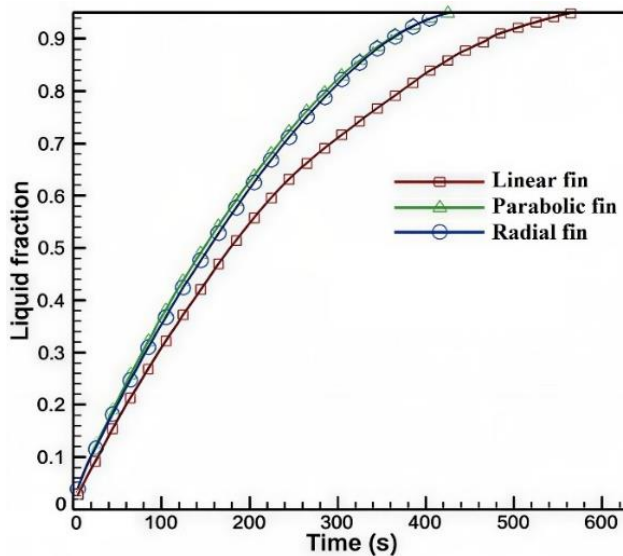


Figure 5. Liquid fraction evolution for different fin shapes (linear, parabolic, and radial)

The complete melting time for all configurations is compared in Figure 6. The five-fin parabolic configuration decreases the melting time by 50% compared to the five-fin linear case and by 68% compared to the three-fin linear case. The five-fin radial configuration also reduces melting time by 14% compared to the five-fin linear case. Notably, curved fins exhibit faster melting in the early stages, but after 200 seconds, the linear fin shows slightly higher temperature growth, attributed to the stabilization of convection cells around curved fins, which lose some advantage as the melted region becomes more uniform.

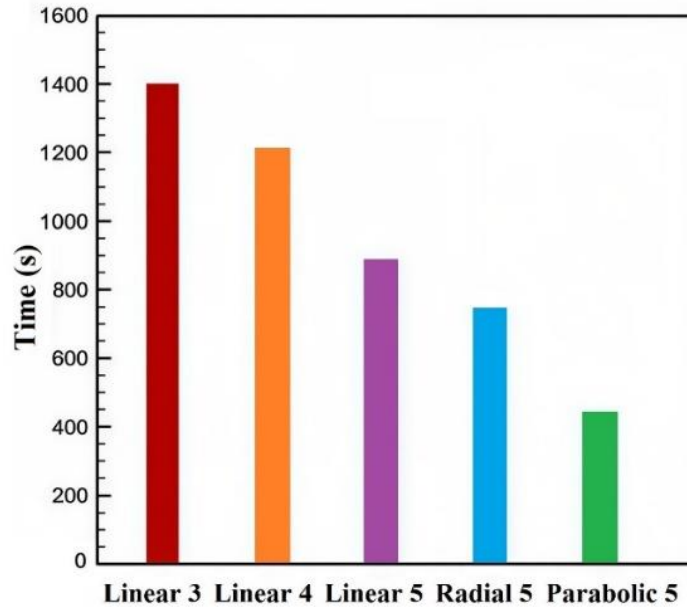


Figure 6. Complete melting time comparison for all configurations

5. Conclusion

The simultaneous effects of fin count and geometry on the melting performance of RT35 PCM in a triple-tube heat exchanger were numerically investigated. The key findings are as follows: increasing the number of linear fins from 3 to 5 enhances the liquid fraction by 27% and 41% at 600 seconds (Figure 4) and improves the PCM temperature by up to 15 K, primarily due to increased heat transfer surface area and reduced conductive resistance. Parabolic and radial fins increase the liquid fraction by 13% compared to linear fins at 400 seconds (Figure 5), which is attributed to reduced wake regions and enhanced natural convection. Fins with greater curvature exhibit superior thermal performance due to enhanced buoyancy forces and more stable convection cell formation. The complete melting time in the five-fin parabolic configuration decreases by 50% compared to the five-fin linear case and by 68% compared to the three-fin linear case (Figure 6). Conduction dominates the early melting stage, while natural convection becomes the primary heat transfer mechanism as the liquid layer thickens. Curved fins show faster early-stage melting; however, this advantage diminishes slightly after 200 seconds as the melted region becomes more uniform. These findings provide valuable insights for the optimal design of latent heat thermal energy storage heat exchangers in air conditioning, solar collector, and industrial waste heat recovery applications.



بررسی عددی تأثیر هندسه پره‌های خطی، سهموی و رادیکالی بر عملکرد ذوب ماده تغییرفازدهنده RT35 در مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای

طاهره حسنی جلیلیان الف، اشکان غفوری ب*

الف کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، 1820304698@iau.ir

ب دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، ashkan.ghafouri@iau.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
رسانایی گرمایی پایین مواد تغییرفازدهنده چالش اصلی در کاربرد گسترده آن‌ها در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، تأثیر استفاده از پره‌های با هندسه منحنی‌شکل بر بهبود نرخ ذوب ماده تغییرفازدهنده RT35 در یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای به‌صورت عددی و دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی انسیس فلونت و با به‌کارگیری روش آنتالپی-تخلخل انجام شده است. تأثیر دو پارامتر کلیدی شامل تعداد پره‌های خطی (۳، ۴ و ۵ تایی) و شکل هندسی پره‌ها (خطی، سهموی و رادیکالی) بر کسر حجمی مایع، توزیع دما و میدان سرعت در فرآیند ذوب مطالعه گردید. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد پره‌های خطی از ۳ به ۵ تایی، کسر حجمی را در زمان ۶۰۰ ثانیه به ترتیب ۲۷ و ۴۱ درصد افزایش می‌دهد و دمای ماده تغییرفازدهنده را تا ۱۵ درجه کلین بهبود می‌بخشد. با مقایسه اشکال مختلف پره، مشخص گردید پره‌های سهموی و رادیکالی در زمان ۴۰۰ ثانیه، کسر حجمی را ۱۳ درصد نسبت به حالت خطی افزایش می‌دهند. همچنین زمان ذوب کامل در حالت پره سهموی پنج‌تایی نسبت به پره خطی پنج‌تایی ۵۰ درصد و نسبت به حالت سه‌تایی خطی ۶۸ درصد کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، پره‌های با انحنای بیشتر به دلیل افزایش نیروی شناوری و بهبود جریان جابجایی آزاد، عملکرد حرارتی بهتری از خود نشان می‌دهند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در طراحی بهینه مبدل‌های حرارتی ذخیره‌ساز انرژی با کاربرد در سیستم‌های تهویه مطبوع، کلکتورهای خورشیدی و بازیافت حرارت صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.	مواد تغییرفازدهنده، پره سهموی، پره رادیکالی، زمان ذوب، عملکرد حرارتی.

۱- مقدمه

افزایش روزافزون تقاضای انرژی، کاهش منابع سوخت فسیلی و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه آن‌ها، محققان را به‌سوی توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، بازیافت انرژی حرارتی اتلافی و بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال حرارت سوق داده است [۱]. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به‌عنوان یکی از کارآمدترین روش‌ها، نقش کلیدی در کاهش شکاف بین عرضه و تقاضای انرژی ایفا می‌کند. در این میان، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان با به‌کارگیری مواد تغییرفازدهنده^۱ به دلیل چگالی بالای ذخیره انرژی و قابلیت ذوب و انجماد در دمای تقریباً ثابت، مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. با این حال، رسانایی گرمایی پایین پایین‌ترین PCM ها (حدود ۰/۲ W/mK برای RT35) چالش اصلی در کاربرد گسترده آن‌ها محسوب می‌شود و منجر به

^۱ Phase Change Materials - PCMs

کاهش نرخ شارژ و دشارژ در سیستم‌های ذخیره‌سازی می‌گردد. از این‌رو، ارائه روش‌های مؤثر برای بهبود انتقال حرارت در این مواد، یکی از حوزه‌های پژوهشی فعال در سال‌های اخیر بوده است. در این راستا، پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی روش‌های افزایش انتقال حرارت در PCM ها متمرکز شده است. در ابتدا، لاکروکس و بنمادا [۲] در سال ۱۹۹۷ فرآیند ذوب را در یک محفظه مستطیلی با پره‌های افقی متصل به دیواره عمودی گرم مطالعه کردند و دریافتند که نرخ ذوب به‌شدت وابسته به تعداد و طول پره‌هاست. لامبرگ [۳] در سال ۲۰۰۳ با ارائه مدل ریاضی و بررسی تجربی، تأثیر مثبت پره‌ها را بر بهبود فرآیند ذوب و انجماد تأیید کرد. وی در ادامه، همراه با همکارانش [۴] در سال ۲۰۰۴ به مقایسه سیستم با دو پره و بدون پره پرداخت و افزایش چشمگیر انتقال حرارت را در حضور پره‌ها نشان داد. آخیلش و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۵ با بررسی محفظه مستطیلی با دیواره بالایی گرم، نشان دادند افزایش تعداد پره‌ها بیش از یک مقدار بحرانی، بهبود قابل‌توجهی در کارایی حرارتی ایجاد نمی‌کند. در سال ۲۰۰۶، ترپ و همکاران [۶] تأثیر شرایط کاری و پارامترهای هندسی را بر عملکرد مبدل پوسته-لوله‌ای در فرآیند ذوب و انجماد بررسی کردند و دریافتند تغییرات عدد رینولدز تأثیر ناچیزی بر مقادیر انرژی شارژ و دشارژ دارد، درحالی‌که افزایش اختلاف دما و نسبت طول به قطر مبدل، به‌طور خطی عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشد. قرباغی و سزایی [۷] در سال ۲۰۰۸ با بررسی محفظه مستطیلی مجهز به پره‌های افقی و عمودی، نشان دادند دیواره‌های گرم عمودی با پره‌های افقی عملکرد بهتری نسبت به حالت معکوس دارند و افزایش تعداد پره‌ها بیش از یک مقدار خاص، منجر به افزایش ناچیز انتقال حرارت می‌شود. در سال ۲۰۱۱، آگنیم و همکاران [۸] به‌صورت تجربی تأثیر دمای ورودی سیال گرم را در مبدل پوسته-لوله مجهز به پره طولی بررسی کردند و دریافتند افزایش دمای ورودی، زمان ذوب را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۱۳، آل‌عبیدی و همکاران [۹] به‌صورت عددی تأثیر پره‌های داخلی و خارجی در مبدل سه‌لوله‌ای را بررسی کرده و نشان دادند زمان ذوب در حضور پره‌ها به ۷/۳۴ درصد حالت بدون پره کاهش می‌یابد. آن‌ها در سال ۲۰۱۴ با انجام مطالعه تجربی [۱۰] بر روی همان مبدل، نتایج عددی خود را تأیید کرده و دریافتند که دمای سیال انتقال حرارت نسبت به نرخ جریان، تأثیر غالب‌تری بر روند ذوب دارد. در سال ۲۰۱۹، علی‌زاده و همکاران [۱۱] با استفاده از پره‌های V شکل و نانوذرات در مبدل سه‌لوله‌ای، بهبود قابل‌توجهی در فرآیند انجماد ماده تغییرافزاینده نشان دادند. عساری و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از لوله داخلی سینوسی در مبدل سه‌لوله‌ای، زمان ذوب را از ۳۲/۵ ساعت (در حالت مستقیم) به ۸ ساعت کاهش دادند. در سال‌های اخیر، پژوهشگران به‌سراغ اشکال نوین و پیچیده‌تر پره‌ها رفته‌اند و هم‌زمان، به‌کارگیری نانوسیالات به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش هدایت حرارتی و بهبود عملکرد سیستم‌های انتقال حرارت، به‌ویژه در مبدل‌های حرارتی و ذخیره‌سازهای انرژی، مورد توجه قرار گرفته است [۱۳]. در سال ۲۰۲۵، اسماعیل و همکاران [۱۴] با بررسی عددی تأثیر هندسه پره‌ها بر عملکرد سیستم‌های مدیریت حرارتی مبتنی بر ماده تغییرافزاینده نشان دادند که استفاده از پره‌های عمودی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت و پره‌های افقی در بازه‌های بلندمدت، عملکرد حرارتی بهتری دارند. در سال ۲۰۲۶، لیو و همکاران [۱۵] با الهام از ساختار رگبرگ‌های درخت نخل، پره‌های مشبک کف‌دستی با انشعابات ثانویه را در مبدل سه‌لوله‌ای طراحی کردند و با بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک NSGA-II، زمان ذوب را به ۱۶۰۰ ثانیه کاهش داده و نرخ انتقال حرارت را تا ۸/۹۵۹ وات افزایش دادند. در سال ۲۰۲۶، چن و همکاران [۱۶] با الهام از ساختار برگ، پره‌های دنداندار V شکل برای مبدل سه‌لوله‌ای طراحی کردند که زمان ذوب را ۳۷/۳۳ درصد کاهش و توان شارژ را ۵۵/۶۴ درصد افزایش داد. همچنین طراحی مجدد بخش ثانویه پره از مستطیل به مثلث، ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت را ۱/۲۳ درصد افزایش داد. در سال ۲۰۲۶، چن و همکاران [۱۷] با ارائه پره‌های سلسله‌مراتبی Y شکل چندشاخه، زمان ذوب کامل ماده تغییرافزاینده را در مبدل سه‌لوله‌ای نسبت به حالت بدون پره ۶/۶۸ درصد و نسبت به پره مستقیم ۴/۴۱ درصد کاهش دادند و نشان دادند که چیدمان چرخشی پره‌ها می‌تواند زمان ذوب را تا ۲۹/۸ درصد نسبت به چیدمان‌های دیگر کاهش دهد.

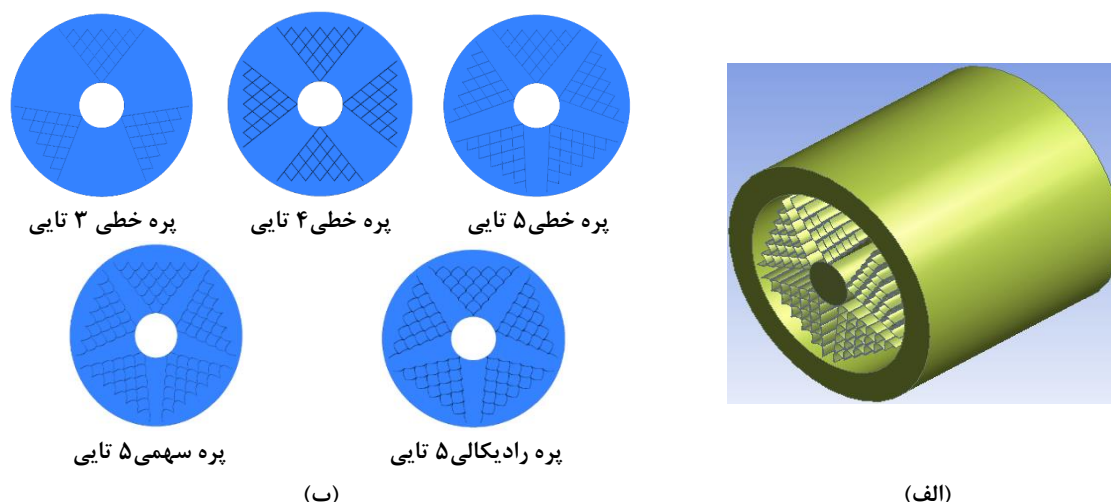
در پژوهش حاضر، تأثیر همزمان سه هندسه پره شامل خطی، سهموی و رادیکالی بر بهبود عملکرد ذوب ماده تغییرافزاینده RT35 در یک مبدل حرارتی سه‌لوله‌ای به‌صورت عددی و دوبعدی مورد بررسی و مقایسه کمی قرار گرفته است. نوآوری اصلی این پژوهش در سه جنبه قابل تبیین است: (۱) مقایسه کمی سه هندسه پره در یک چارچوب واحد با تعداد پره‌های یکسان و شرایط مرزی مشابه، (۲) تحلیل دقیق مکانیزم‌های حاکم بر انتقال حرارت در هر یک از هندسه‌ها، و (۳) ارائه داده‌های کمی نظیر درصد بهبود کسر حجمی و کاهش زمان ذوب که می‌تواند به‌عنوان مرجعی برای طراحی بهینه مبدل‌های ذخیره‌ساز انرژی مورد

استفاده قرار گیرد. اگرچه پژوهش‌های متعددی در زمینه پره‌های مختلف در مبدل‌های سه لوله‌ای انجام شده، اما بررسی هم‌زمان و مقایسه جامع این سه هندسه خاص در یک مطالعه واحد، تاکنون گزارش نشده است.

۲- مدل‌سازی عددی و معادلات حاکم

۲-۱- هندسه مسئله و شبکه‌بندی

پژوهش حاضر بر روی یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای انجام شده است که در صنعت کاربرد گسترده‌ای در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان دارد. شکل ۱-الف نمای شماتیک مبدل حرارتی را نشان می‌دهد. قطر لوله داخلی (D_i) برابر ۲۰ میلی‌متر و قطر لوله خارجی (D_o) برابر ۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. فضای حلقوی بین دو لوله با ماده تغییر فاز دهنده RT35 پر شده و پره‌ها با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر و طول کلی ۳۰ میلی‌متر بر روی لوله داخلی نصب شده‌اند. زاویه بین پره‌های مجاور ۴۵ درجه بوده و طول هر شاخه پره ۵ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱ الف) شماتیک مبدل سه لوله‌ای با پره سهموی و ب) جزئیات هندسی پره‌های مختلف

سه هندسه پره شامل خطی، سهموی و رادیکالی با تعداد ۳، ۴ و ۵ تایی (برای حالت خطی) و ۵ تایی (برای حالت‌های سهموی و رادیکالی) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱-ب جزئیات هندسی پره‌های مختلف را نمایش می‌دهد.

شایان ذکر است که گرچه پدیده جابجایی طبیعی در این نوع مسائل دارای ماهیت سه‌بعدی است، اما در پژوهش‌های متعددی که بر روی مبدل‌های سه لوله‌ای با پیکربندی‌های مشابه انجام شده، رویکرد دوبعدی با موفقیت به کار گرفته شده و نتایج قابل قبولی ارائه داده است [۲، ۵، ۹]. با توجه به حجم بالای محاسبات و هدف اصلی این پژوهش که مقایسه کیفی و کمی سه هندسه مختلف پره در شرایط یکسان است، رویکرد دوبعدی انتخاب شده است. با این حال، پذیرفته شده است که فرض دوبعدی ممکن است منجر به خطایی اندک در پیش‌بینی دقیق زمان ذوب نهایی گردد.

۲-۲- معادلات حاکم

برای مدل‌سازی فرآیند تغییر فاز از روش آنتالپی-تخلخل استفاده شده است. این روش مبتنی بر فرض یک ناحیه خمیری^۱ است که در آن فازهای جامد و مایع به صورت هم‌زمان حضور دارند. تخلخل در این ناحیه معادل کسر حجمی مایع بوده و از صفر (جامد کامل) تا یک (مایع کامل) تغییر می‌کند. معادلات حاکم بر جریان شامل بقای جرم، مومنتوم و انرژی به صورت زیر می‌باشند [۱۸]:

^۱ Mushy Zone

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (۱)$$

معادله ۱ بیانگر بقای جرم برای جریان تراکم‌ناپذیر است. جمله واگرایی سرعت صفر در نظر گرفته شده که نشان‌دهنده ثابت ماندن چگالی در طول جریان می‌باشد.

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} \left(-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \beta (T - T_{ref}) \right) + \vec{S}_l \quad (۲)$$

معادله ۲ بقای مومنتوم را نشان می‌دهد. جمله اول سمت چپ، شتاب زمانی و جمله دوم، شتاب همرفتی سیال را بیان می‌کند. در سمت راست، به‌ترتیب نیروهای ناشی از گرادیان فشار، تنش‌های ویسکوز، نیروی شناوری (با استفاده از تقریب بوزینسک) و ترم چشمه ناشی از ناحیه خمیری قرار دارند. تقریب بوزینسک تغییرات چگالی را تنها در جمله نیروی شناوری مؤثر در نظر می‌گیرد و از تغییرات چگالی در سایر جمله‌ها صرف‌نظر می‌کند که این امر برای جریان‌های با عدد رایلی متوسط تا پایین معتبر است.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho C_p} \nabla h \right) \quad (۳)$$

معادله ۳ بیانگر بقای انرژی است. جمله اول، نرخ تغییرات آنتالپی محسوس، جمله دوم، نرخ تغییرات آنتالپی نهان (ناشی از تغییر فاز) و جمله سوم، انتقال آنتالپی محسوس توسط جابجایی را نشان می‌دهند. سمت راست معادله نیز بیانگر نرخ انتقال حرارت هدایتی در سیال می‌باشد که در آن ρ چگالی، V بردار سرعت، P فشار، μ لزجت دینامیکی، T دما، β ضریب انبساط حجمی، h آنتالپی محسوس و H آنتالپی کل می‌باشند [۱۹]. آنتالپی کل از مجموع آنتالپی محسوس و گرمای نهان به‌دست می‌آید:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (۴)$$

$$\Delta H = \lambda L \quad (۵)$$

$$H = h + \Delta H \quad (۶)$$

که در آن λ کسر حجمی مایع و L گرمای نهان ماده تغییرفازدهنده است. کسر حجمی مایع نیز به‌صورت تابعی از دما تعریف می‌شود [۲۰]:

$$\lambda = 0 \quad \text{if } T < T_s$$

$$\lambda = 1 \quad \text{if } T > T_l$$

$$\lambda = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad \text{if } T_s < T < T_l \quad (۷)$$

ترم چشمه در معادله مومنتوم به‌منظور اعمال اثرات ناحیه خمیری بر میدان جریان به‌کار رفته و به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$\vec{S}_l = -\frac{C(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + \varepsilon} \vec{V} \quad (۸)$$

این ترم چشمه که در معادله مومنتوم به‌کار رفته، به‌عنوان یک نیروی درگ در ناحیه خمیری عمل می‌کند. زمانی که ماده کاملاً جامد است ($\lambda=0$)، ضریب ترم چشمه بسیار بزرگ شده و عملاً سرعت را به صفر می‌رساند. با افزایش کسر مایع، این ضریب کاهش یافته و جریان سیال آزادانه‌تر حرکت می‌کند. ثابت C در این رابطه، ضریب ناحیه خمیری نامیده شده و مقدار آن بسته به ساختار ماده تغییرفازدهنده بین 10^4 تا 10^7 تغییر می‌کند. در پژوهش حاضر، مقدار 10^5 برای این ضریب در نظر گرفته شده است. همچنین ε مقدار کوچکی ($0/001$) برای جلوگیری از صفر شدن مخرج کسر در نظر گرفته شده است.

۲-۳- شرایط مرزی و خواص مواد

شرایط اولیه شامل دمای یکنواخت ۲۹۸ کلوین در کل دامنه محاسباتی و کسر حجمی مایع صفر (حالت کاملاً جامد) می‌باشد. دیواره لوله داخلی در دمای ثابت ۳۵۰ کلوین (شرط مرزی دیریکله) نگهداری می‌شود و دیواره لوله خارجی به‌صورت عایق حرارتی

در نظر گرفته شده است. همچنین شرط عدم لغزش برای سرعت در تمامی دیواره‌های جامد اعمال می‌گردد. شکل ۲ شرایط مرزی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

جریان به صورت تراکم‌ناپذیر، آرام و ناپایدار فرض شده است. برای مدل‌سازی اثر نیروی شناوری ناشی از تغییرات چگالی در فاز مایع، از تقریب بوزینسک استفاده شده است. در این تقریب، چگالی در تمام جمله‌های معادله مومنتوم به جز جمله نیروی شناوری، ثابت در نظر گرفته می‌شود. این تقریب برای جریان‌های با عدد رایلی متوسط تا پایین (که در پژوهش حاضر صادق است) از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.



شکل ۲ الف) شرایط مرزی و ب) مشخصات هندسی مبدل سه لوله‌ای

ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این پژوهش RT35 از شرکت روبیترم^۱ می‌باشد که به دلیل دمای ذوب مناسب (۳۰۲ تا ۳۰۹ کلوین) و گرمای نهان نسبتاً بالا (۱۷۰۰۰۰ ژول بر کیلوگرم)، برای کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در محدوده دمایی نزدیک به دمای محیط بسیار مناسب است. جنس پره‌ها از مس با هدایت حرارتی بالا انتخاب شده است تا مقاومت حرارتی در مسیر انتقال گرما از دیواره داغ به ماده تغییر فاز دهنده به حداقل برسد (جدول ۱).

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی مس (جنس پره‌ها)

واحد	مقدار	خاصیت
kg/m ³	۸۹۳۳	چگالی
W/m·K	۴۰۱	ضریب هدایت حرارتی
J/kg·K	۳۸۵	گرمای ویژه

همچنین خواص ترموفیزیکی RT35 شرکت روبیترم در جدول ۲ ارائه شده است:

جدول ۲ خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده RT35

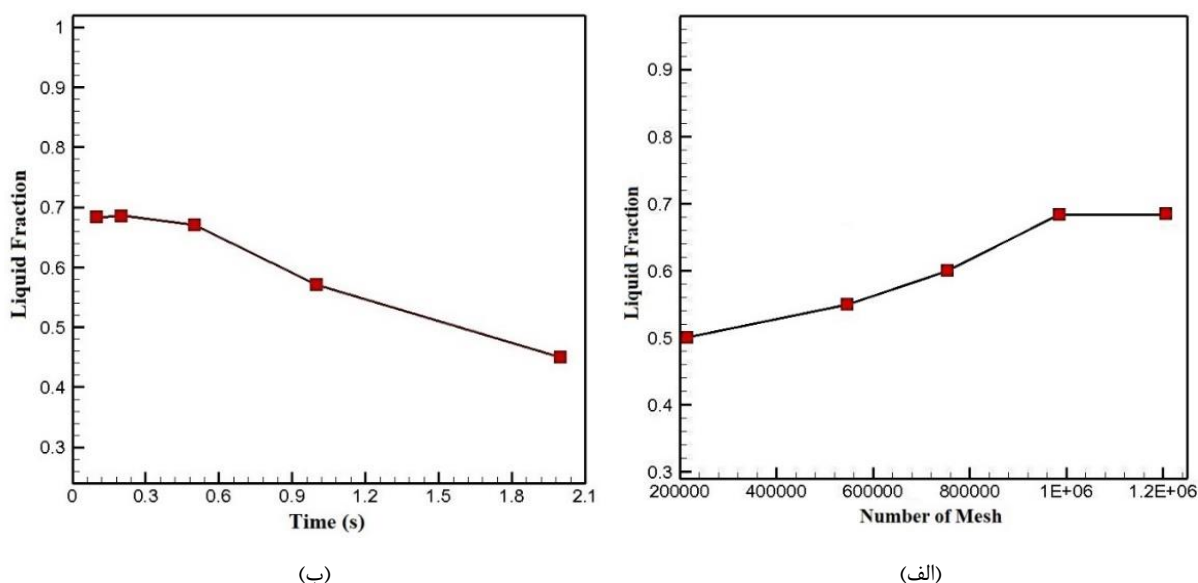
واحد	مقدار	خاصیت
kg/m ³	۸۱۵	چگالی
W/m·K	۰/۲	ضریب هدایت حرارتی
K	۳۰۲	دمای شروع ذوب
K	۳۰۹	دمای پایان ذوب
J/kg·K	۲۰۰۰	گرمای ویژه
kg/m·s	۰/۰۲۳	ویسکوزیته دینامیکی
1/K	۰/۰۰۰۶	ضریب انبساط حرارتی
J/kg	۱۷۰۰۰۰	گرمای نهان

^۱ Rubitherm

۲-۴- روش حل عددی و بررسی استقلال از شبکه و گام زمانی

شبیه‌سازی‌های عددی این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی انسیس فلوئنت ۱۹ و بر اساس روش حجم محدود انجام شده است. حل گر از نوع فشار مبنا انتخاب شده و به دلیل ناپایدار بودن جریان، از رویکرد وابسته به زمان به صورت ضمنی استفاده گردید. الگوریتم سیمپل برای کوپل کردن معادلات فشار و سرعت به کار گرفته شده است. برای گسسته‌سازی معادلات مومنوم و انرژی از طرح مرتبه دوم کوئیک و برای معادله تصحیح فشار از طرح پرس تو استفاده گردید. ضرایب تخفیف برای فشار، سرعت، انرژی و کسر حجمی مایع به ترتیب 10^{-3} ، 10^{-3} ، 10^{-3} و 10^{-6} در نظر گرفته شده است. برای معادلات پیوستگی و مومنوم 10^{-3} و برای معادله انرژی 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

شبکه‌بندی دامنه محاسباتی با استفاده از المان‌های مثلثی و با ساختار غیرسازمان یافته انجام شده است. برای دستیابی به نتایج مستقل از شبکه، پنج شبکه با تعداد سلول‌های ۲۰۹۸۷۶، ۵۲۹۶۲۹، ۷۷۲۸۹۵، ۹۴۵۶۷۹ و ۱۱۵۸۰۲۴ مورد آزمون قرار گرفت. شکل ۳-الف تغییرات کسر حجمی مایع را در زمان‌های مختلف برای شبکه‌های مذکور نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که از شبکه با ۹۴۵۶۷۹ سلول به بالا، تغییر محسوسی در نتایج رخ نمی‌دهد (کمتر از ۰/۰۲٪)؛ از این رو، این شبکه به عنوان شبکه مطلوب برای ادامه شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید. همچنین برای اطمینان از استقلال نتایج از گام زمانی، پنج گام زمانی مختلف شامل ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۲ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳-ب تغییرات کسر حجمی را برای گام‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، گام زمانی ۰/۲ ثانیه به عنوان گام زمانی مطلوب انتخاب شد، چراکه کاهش بیشتر گام زمانی تأثیر قابل توجهی بر نتایج نداشته (کمتر از ۰/۷٪) و تنها زمان محاسبات را افزایش می‌دهد.

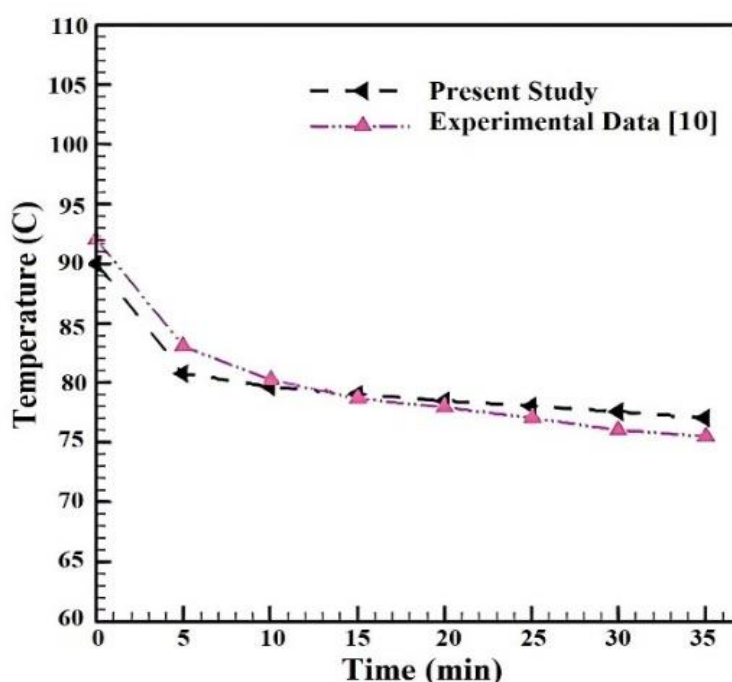


شکل ۳ الف) بررسی استقلال از اندازه شبکه و ب) بررسی استقلال از گام زمانی

۲-۵- اعتبارسنجی مدل عددی

برای اعتبارسنجی مدل عددی حاضر، نتایج شبیه‌سازی با کار تجربی آل عبیدی و همکاران [۱۰] مقایسه شده است. در این راستا، یک مبدل سه‌لوله‌ای با مشخصات هندسی مشابه کار مرجع (قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت پره ۱ میلی‌متر) و با ماده تغییرفازدهنده RT82 شبیه‌سازی گردید. دیواره‌های داخلی و خارجی در دمای ۳۴۱ کلوین و دمای اولیه ۳۶۳ کلوین اعمال شد. شکل ۴ مقایسه تغییرات دمای میانگین ماده تغییرفازدهنده را در طول زمان نشان می‌دهد. تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و تجربی مشاهده شده و حداکثر خطا حدود ۵ درصد است. در دقایق ابتدایی، دمای ماده تغییرفازدهنده به سرعت از حدود ۹۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد و سپس با شیب ملایم‌تری به حدود ۷۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. حداکثر اختلاف در تمام نقاط کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد است که بیانگر دقت مناسب مدل در پیش‌بینی رفتار حرارتی ماده تغییرفازدهنده می‌باشد. شایان ذکر است که روش آنتالپی-تخلخل به کاررفته در این مدل‌سازی، روشی عمومی

و مستقل از نوع ماده بوده و دقت آن به ورودی دقیق خواص ترموفیزیکی بستگی دارد. بنابراین، صحت‌سنجی موفق با RT82 بیانگر عملکرد صحیح الگوریتم‌های حل است و با جایگزینی خواص RT35، همان سطح از دقت برای ماده مورد نظر انتظار می‌رود [۱۸].



شکل ۴ مقایسه نتایج عددی با کار تجربی آل‌عبیدی و همکاران [۱۰]

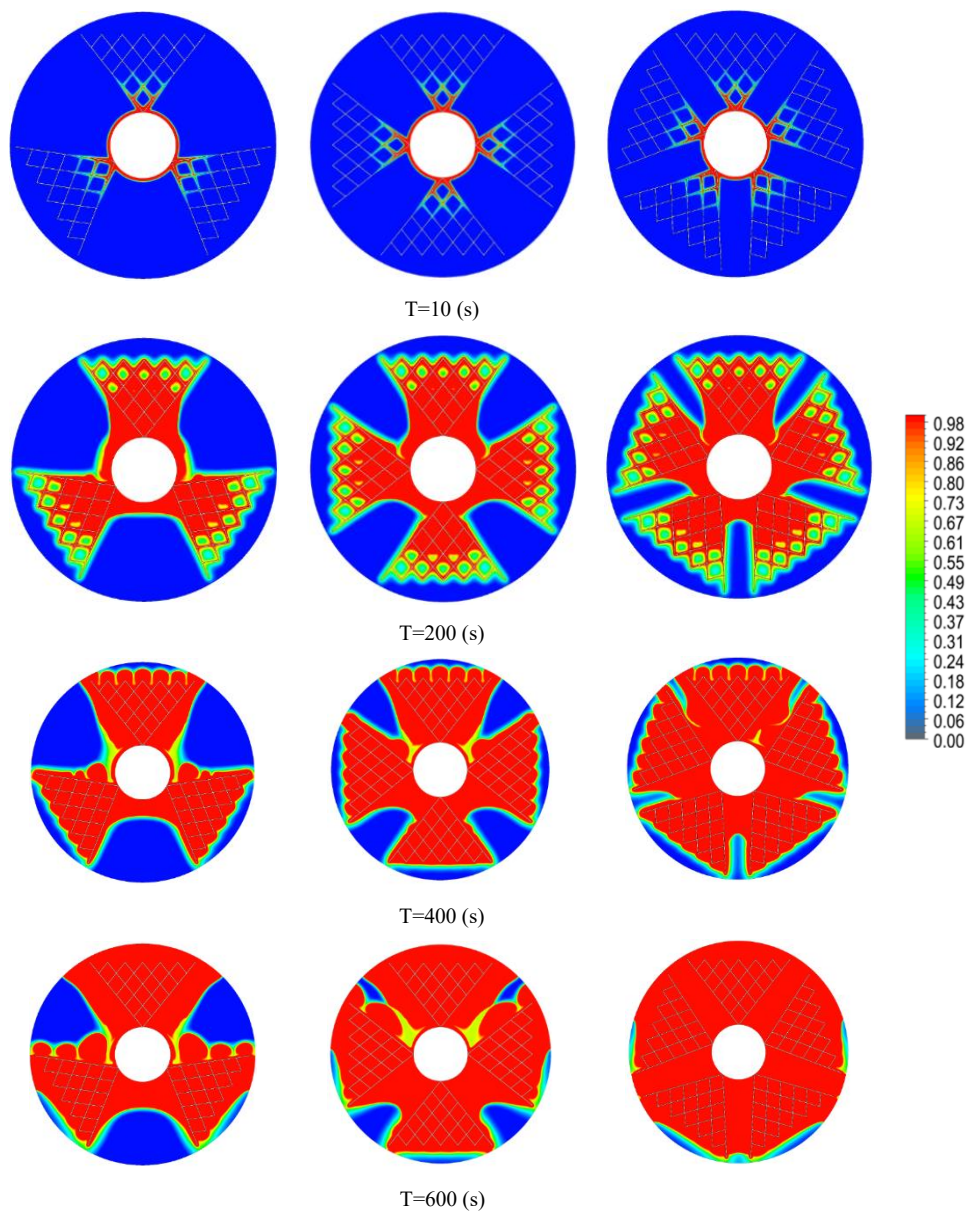
۳- نتایج و تحلیل‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ذوب ماده تغییر فاز دهنده RT35 در مبدل سه لوله‌ای ارائه و تحلیل می‌شوند. ابتدا تأثیر افزایش تعداد پره‌های خطی بر معیارهای عملکردی نظیر کسر حجمی مایع، توزیع دما و میدان سرعت بررسی می‌گردد. سپس، تأثیر تغییر شکل هندسی پره‌ها (خطی، سهموی و رادیکالی) بر پارامترهای مذکور و زمان ذوب کامل مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در تمامی شبیه‌سازی‌ها، دمای دیواره داخلی ۳۵۰ کلوین، دمای اولیه ۲۹۸ کلوین و گام زمانی ۰/۲ ثانیه اعمال شده است.

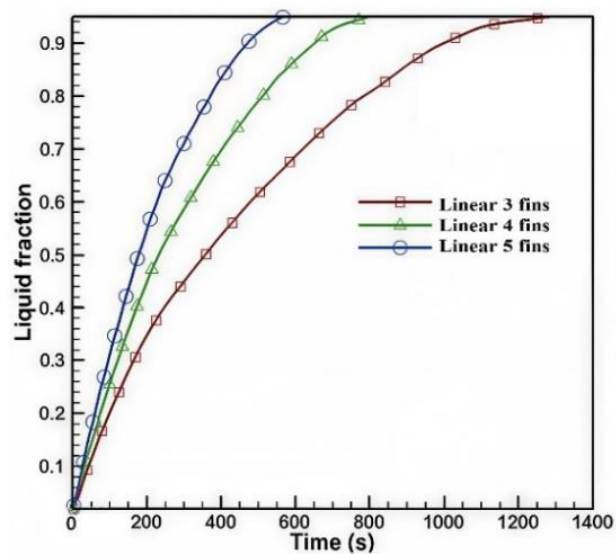
۳-۱- تأثیر تعداد پره‌های خطی بر فرآیند ذوب

شکل ۵ کانتورهای کسر حجمی مایع را برای پیکربندی‌های ۳، ۴ و ۵ تایی پره خطی در زمان‌های ۱۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ ثانیه نشان می‌دهد. در لحظات ابتدایی (۱۰ ثانیه)، تفاوت قابل توجهی در الگوی ذوب بین حالت‌های مختلف دیده نمی‌شود و ذوب عمدتاً در نزدیکی سطح پره‌ها و با مکانیزم رسانش آغاز می‌شود. با گذشت زمان، افزایش تعداد پره‌ها به وضوح نرخ پیش‌روی جبهه ذوب را تسریع می‌کند. در زمان ۶۰۰ ثانیه، مشاهده می‌شود که در حالت ۵ تایی، بخش بزرگی از ناحیه بالایی محفظه ذوب شده است، در حالی که در حالت ۳ تایی، بخش قابل توجهی از ماده تغییر فاز دهنده همچنان به صورت جامد باقی مانده است.

شکل ۶ روند تکامل کسر حجمی مایع را برای سه حالت مورد بررسی تا زمان ۱۵۰۰ ثانیه ترسیم می‌کند. افزایش تعداد پره از ۳ به ۴ و ۵ تایی، سطح مؤثر انتقال حرارت را افزایش داده و مقاومت هدایتی را کاهش می‌دهد و در نتیجه سرعت ذوب به طور چشمگیری بالا می‌رود. در زمان ۶۰۰ ثانیه، کسر حجمی در حالت‌های ۴ و ۵ تایی به ترتیب ۲۷ و ۴۱ درصد بیشتر از حالت ۳ تایی است. پس از حدود ۱۰۰۰ ثانیه، نرخ افزایش کسر حجمی در هر سه حالت کاهش می‌یابد که نشان دهنده نزدیک شدن به ذوب کامل و کاهش اثر جابجایی آزاد در مراحل انتهایی فرآیند است.

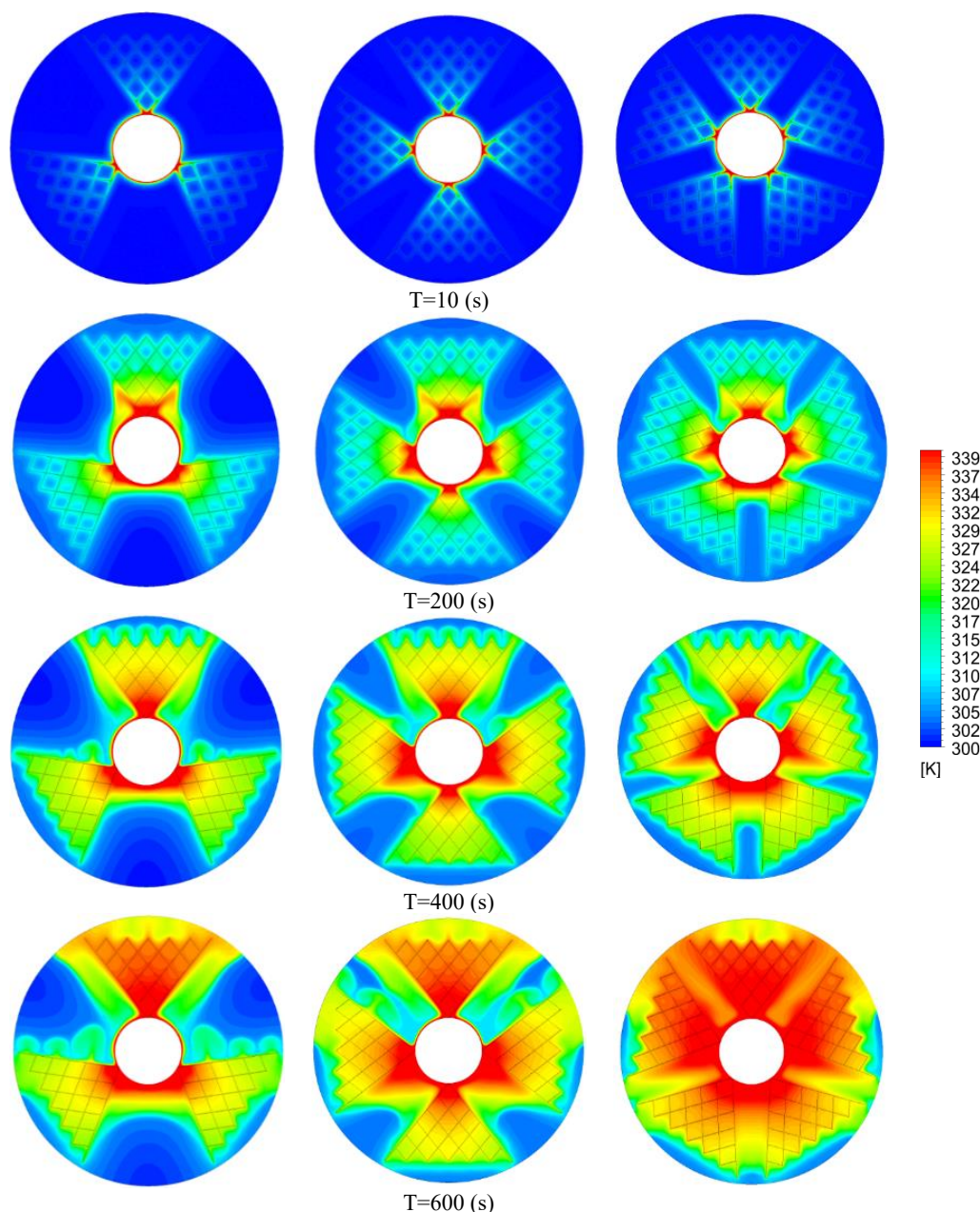


شکل ۵ کانتورهای کسر حجمی برای پره‌های خطی ۳، ۴ و ۵ تایی در زمان‌های مختلف



شکل ۶ مقایسه کسر حجمی مایع برای پره‌های خطی ۳، ۴ و ۵ تایی

شکل ۷ کانتورهای دما را در زمان‌های ۱۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ ثانیه برای سه پیکربندی نشان می‌دهد.

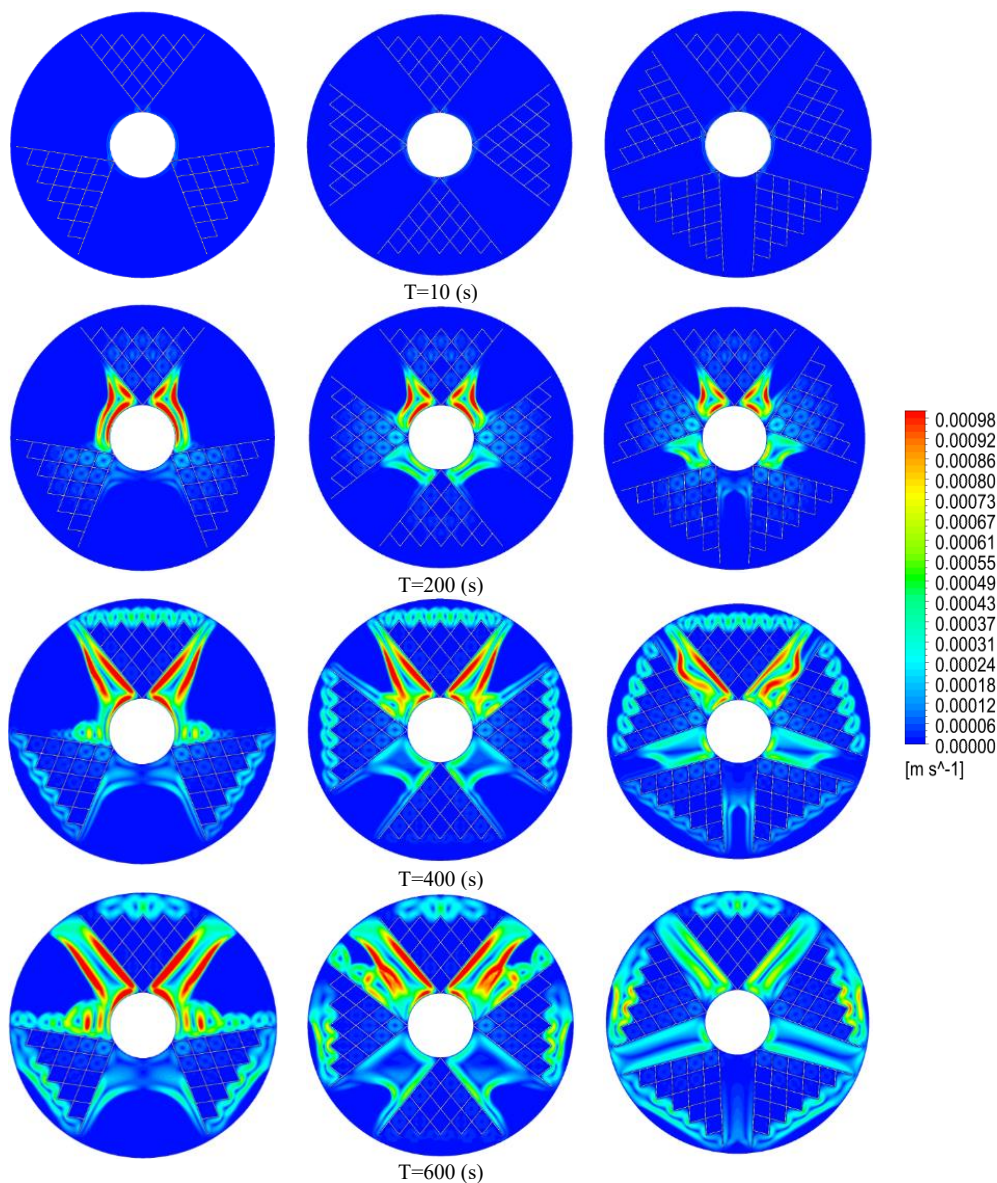


شکل ۷ کانتورهای دما برای پره‌های خطی ۳، ۴ و ۵ تایی در زمان‌های مختلف

در زمان ۱۰ ثانیه، توزیع دما عمدتاً متمرکز بر نواحی اطراف پره‌هاست و افزایش تعداد پره با کاهش مقاومت هدایتی، نفوذ حرارت به نقاط دورتر را تسهیل می‌کند که بیانگر نقش غالب رسانش در مراحل اولیه است. با گذشت زمان، جبهه دما در حالت ۵ تایی به مراتب گسترده‌تر شده و نواحی بیشتری از ماده تغییر فاز دهنده به دمای نزدیک به دیواره گرم (۳۵۰ کلوین) می‌رسند. در زمان ۶۰۰ ثانیه، دمای میانگین ماده تغییر فاز دهنده در حالت‌های ۴ و ۵ تایی به ترتیب ۶ و ۱۵ کلوین بیشتر از حالت ۳ تایی است. این افزایش دما نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر گرما در اثر افزایش پره‌هاست که از تمرکز حرارت در نزدیکی دیواره گرم جلوگیری کرده و گرادیان دمایی را کاهش می‌دهد.

شکل ۸ کانتورهای سرعت را در زمان‌های ۱۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ ثانیه نشان می‌دهد. در زمان ۱۰ ثانیه، به دلیل غالب بودن مکانیزم رسانش و عدم تشکیل جریان جابجایی قابل توجه، میدان سرعت تقریباً صفر است. با گذشت زمان و افزایش ضخامت لایه مذاب، نیروی شناوری ناشی از اختلاف چگالی، جریان‌های جابجایی را در ناحیه بالایی محفظه شکل می‌دهد. در حالت ۵ تایی، سلول‌های جابجایی بزرگ‌تر و متعددی تشکیل می‌شوند که نقش مؤثری در انتقال حرارت از نواحی گرم به نواحی سردتر ایفا

می‌کنند. نکته قابل توجه این است که در زمان ۶۰۰ ثانیه، در حالت ۵ تایی، به دلیل یکپارچگی نسبی ناحیه مذاب، سرعت جریان کاهش یافته که نشان از تضعیف جابجایی طبیعی در مراحل انتهایی ذوب دارد.

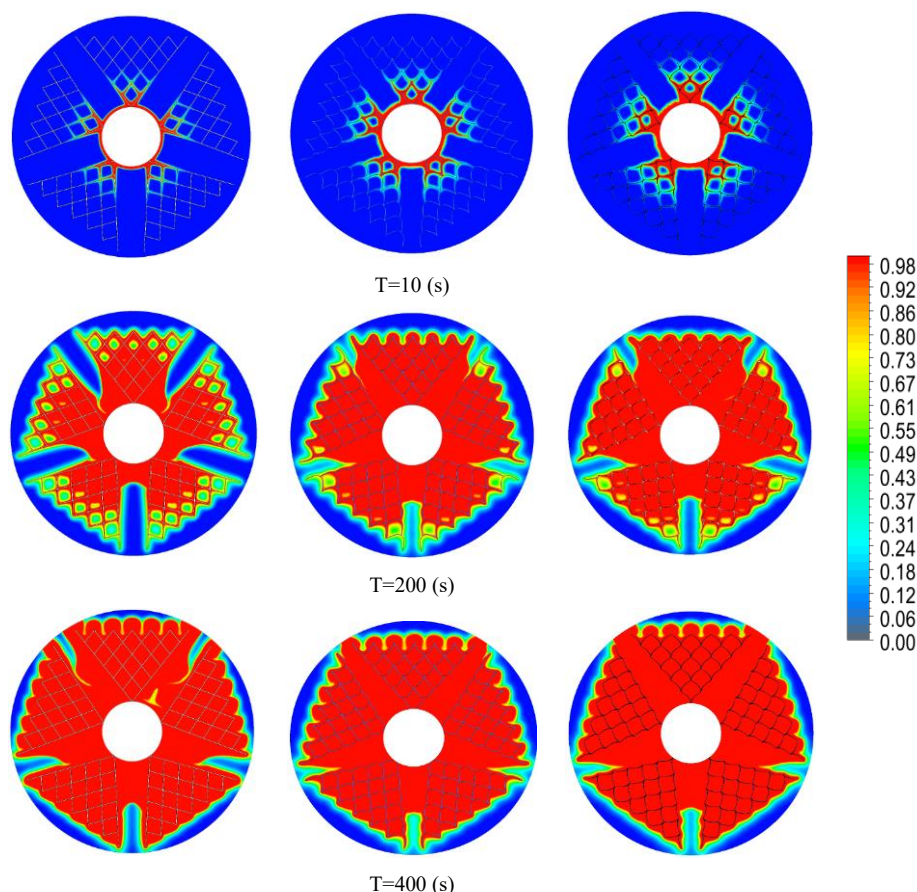


شکل ۸ کانتورهای سرعت برای پره‌های خطی ۳، ۴ و ۵ تایی در زمان‌های مختلف

۳-۲- تأثیر شکل هندسی پره‌ها بر فرآیند ذوب

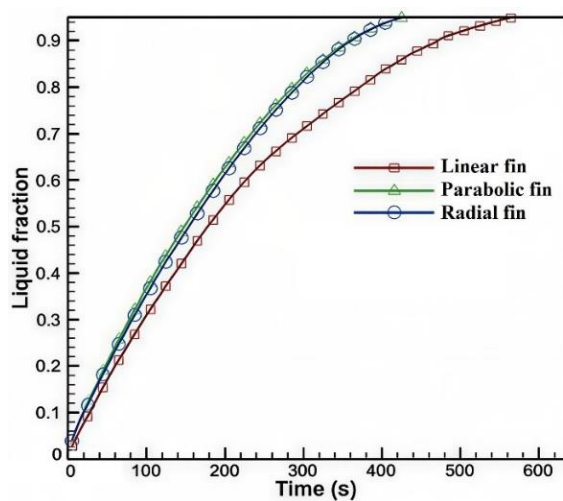
پس از بررسی تأثیر تعداد پره‌ها، در این بخش تأثیر شکل پره‌ها در سه هندسه خطی، سهموی و رادیکالی (هر سه با ۵ پره) مورد تحلیل قرار می‌گیرد. حجم اشغال شده توسط ماده تغییرافازدهنده در تمام موارد یکسان در نظر گرفته شده تا مقایسه‌ها دقیق و معتبر باشند. هندسه‌های مورد بررسی در شکل ۱-ب به تصویر کشیده شده‌اند.

شکل ۹ کانتورهای کسر حجمی را برای سه شکل پره در زمان‌های ۱۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ ثانیه نشان می‌دهد. در زمان ۱۰ ثانیه، تفاوت قابل توجهی بین اشکال مختلف وجود ندارد و ذوب عمدتاً در مجاورت پره‌ها رخ می‌دهد. با گذشت زمان، پره‌های سهموی و رادیکالی نرخ ذوب بالاتری از خود نشان می‌دهند. در زمان ۴۰۰ ثانیه، ناحیه ذوب‌شده در پیکربندی سهموی به مراتب گسترده‌تر از حالت خطی است.



شکل ۹ کانتورهای کسر حجمی برای اشکال مختلف پره در زمان‌های مختلف

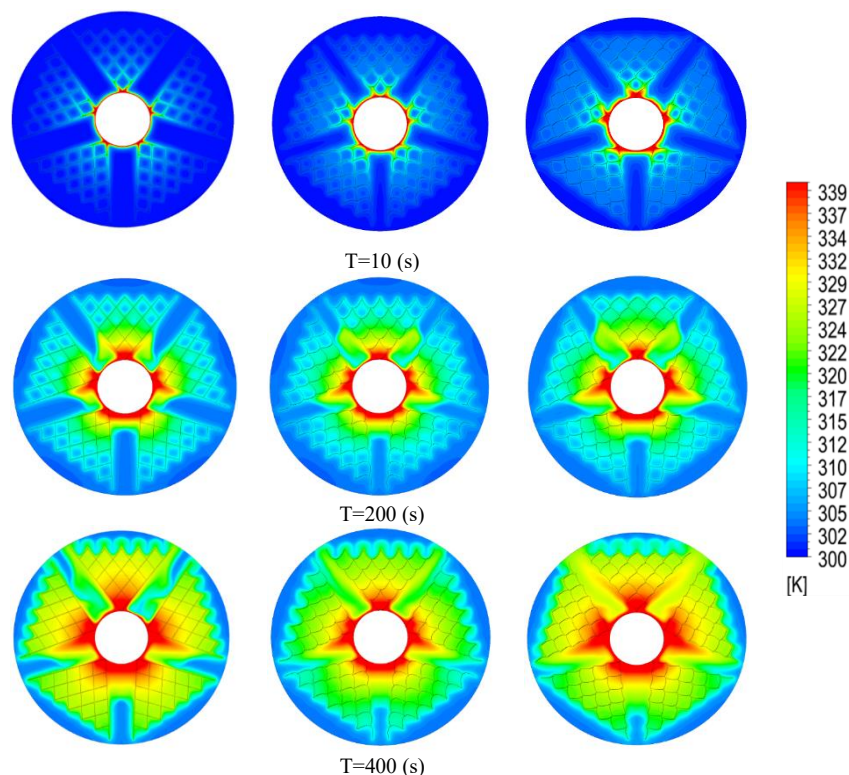
شکل ۱۰ روند تغییرات کسر حجمی مایع را برای سه شکل پره نشان می‌دهد. کسر حجمی در حالت‌های سهموی و رادیکالی در زمان ۴۰۰ ثانیه حدود ۱۳ درصد بیشتر از حالت خطی است. این برتری به هندسه منحنی پره‌ها نسبت داده می‌شود که با کاهش نواحی پشت‌گردابی و افزایش نیروی شناوری مؤثر، شرایط را برای تشکیل سلول‌های جابجایی پایدارتر فراهم می‌آورد. همچنین مشاهده می‌شود که در ابتدای فرآیند (تا حدود ۲۰۰ ثانیه)، پره سهموی بیشترین نرخ ذوب را دارد، اما پس از آن، اختلاف بین سه حالت کاهش می‌یابد.



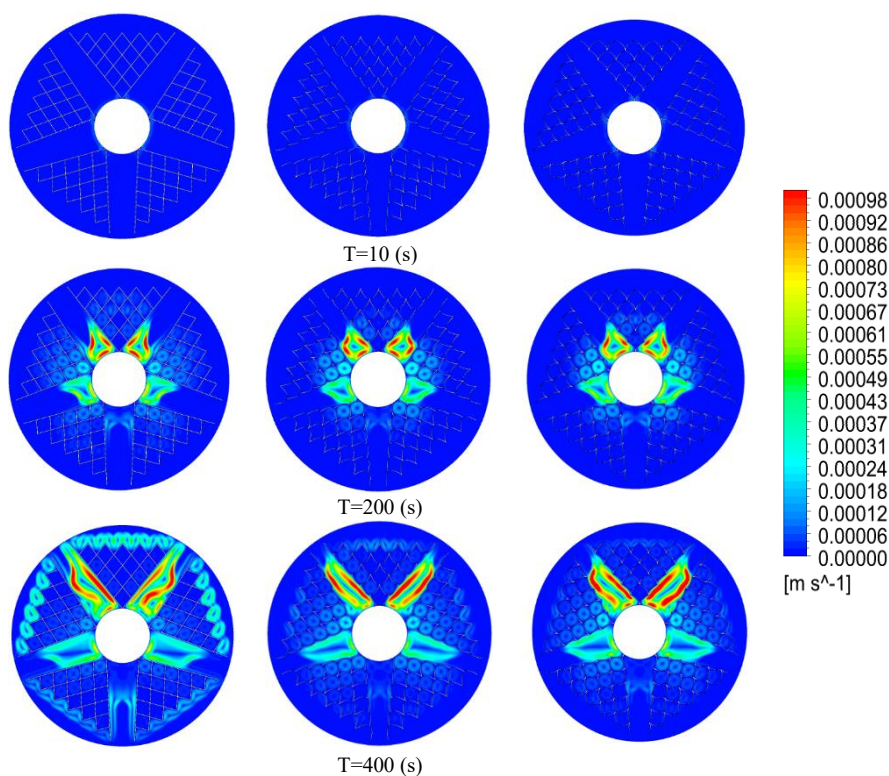
شکل ۱۰ مقایسه کسر حجمی مایع برای اشکال مختلف پره

شکل ۱۱ کانتورهای دما را برای سه شکل پره در زمان‌های ۱۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ ثانیه نشان می‌دهد. در پره‌های منحنی، نفوذ جبهه دما به نواحی پایینی محفظه به مراتب بهتر از پره خطی صورت می‌گیرد. این پدیده ناشی از انحنای پره‌هاست که مسیر

جریان گرما را تغییر داده و هدایت حرارتی را در جهت‌های مختلف تسهیل می‌کند. در زمان ۴۰۰ ثانیه، توزیع دما در حالت سهموی یکنواخت‌ترین و در حالت خطی ناهموارترین الگو را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ کانتورهای دما برای اشکال مختلف پره در زمان‌های مختلف

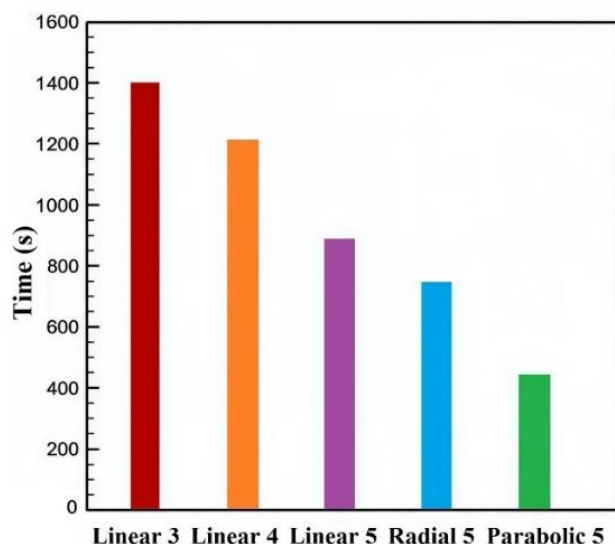


شکل ۱۲ کانتورهای سرعت برای اشکال مختلف پره در زمان‌های مختلف

شکل ۱۲ کانتورهای سرعت را برای سه شکل پره نشان می‌دهد. پره‌های سهموی، جریان‌های چرخشی با ابعاد بزرگ‌تری

ایجاد می کنند که نقش مؤثری در انتقال حرارت از نواحی بالایی به پایینی ایفا می کنند. در مقابل، در پره خطی، الگوی جریان عمدتاً محدود به نواحی بین دو پره مجاور است. در پره رادیکالی نیز سلول های جابجایی متعددی شکل می گیرند که ناشی از انشعابات پره و تغییر جهت جریان های بالارونده است.

شکل ۱۳ زمان ذوب کامل را برای چیدمان های مختلف مقایسه می کند. پیکربندی سهموی ۵ تایی، زمان ذوب را نسبت به حالت خطی ۵ تایی حدود ۵۰ درصد و نسبت به حالت خطی ۳ تایی حدود ۶۸ درصد کاهش می دهد.



شکل ۱۳ مقایسه زمان ذوب کامل در چیدمان های مختلف

پیکربندی رادیکالی ۵ تایی نیز زمان ذوب را نسبت به حالت خطی ۵ تایی حدود ۱۴ درصد کاهش می دهد. این نتایج به وضوح نشان می دهد که طراحی هندسی پره ها، فراتر از افزایش صرف تعداد، تأثیر شگرفی بر عملکرد حرارتی سیستم های ذخیره سازی انرژی نهان دارد.

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر هم زمان تعداد و شکل هندسی پره ها بر عملکرد ذوب ماده تغییر فاز دهنده RT35 در یک مبدل حرارتی سه لوله ای با رویکرد عددی دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا تأثیر افزایش تعداد پره های خطی از ۳ به ۴ و ۵ تایی بر کسر حجمی مایع، میدان دما و الگوی جریان تحلیل گردید. در ادامه، سه هندسه پره شامل خطی، سهموی و رادیکالی با تعداد ثابت (۵ تایی) از نظر نرخ ذوب، توزیع دما و شکل گیری سلول های جابجایی مقایسه شدند. شبیه سازی ها با به کارگیری روش آنتالپی-تخلخل در نرم افزار انسیس فلونت انجام و نتایج در قالب کانتورهای کسر حجمی، دما و سرعت ارائه شده است. مهم ترین یافته های این پژوهش به شرح زیر است:

۱. افزایش تعداد پره های خطی از ۳ به ۵ تایی، کسر حجمی مایع را در زمان ۶۰۰ ثانیه به ترتیب ۲۷ و ۴۱ درصد افزایش می دهد. این بهبود عمدتاً ناشی از افزایش سطح مؤثر انتقال حرارت و کاهش مقاومت هدایتی در مسیر نفوذ گرما به اعماق ماده تغییر فاز دهنده است.

۲. دمای ماده تغییر فاز دهنده در زمان ۶۰۰ ثانیه برای حالت های ۴ و ۵ تایی نسبت به حالت ۳ تایی به ترتیب ۶ و ۱۵ کلوین افزایش می یابد. این افزایش دما بیانگر توزیع یکنواخت تر گرما در اثر افزایش پره ها است که از تمرکز حرارت در نواحی نزدیک به دیواره گرم جلوگیری می کند.

۳. پره های سهموی و رادیکالی در زمان ۴۰۰ ثانیه، کسر حجمی را ۱۳ درصد نسبت به حالت خطی افزایش می دهند. علت این برتری را می توان به هندسه منحنی این پره ها نسبت داد که با کاهش نواحی پشت گردابی و هدایت بهتر جریان سیال مذاب،

شرایط را برای تشکیل سلول‌های جابجایی بزرگ‌تر و پایدارتر فراهم می‌آورد.

۴. پره‌های با انحنای بیشتر به دلیل افزایش نیروی شناوری و بهبود جریان جابجایی آزاد، عملکرد حرارتی بهتری دارند. در واقع، انحنای پره باعث تغییر جهت جریان‌های بالارونده سیال مذاب شده و با ایجاد مسیرهای جریان طولانی‌تر، زمان تماس سیال داغ با نواحی سردتر را افزایش می‌دهد.

۵. زمان ذوب کامل در حالت پره سهموی پنج‌تایی نسبت به پره خطی پنج‌تایی ۵۰ درصد و نسبت به حالت سه‌تایی خطی ۶۸ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش چشمگیر نشان می‌دهد که انتخاب همزمان تعداد و شکل مناسب پره، به مراتب مؤثرتر از افزایش صرف تعداد پره‌هاست.

۶. در ابتدای فرآیند ذوب، مکانیزم غالب انتقال حرارت رسانش است، اما با گذشت زمان، جابجایی آزاد ناشی از نیروی شناوری نقش اصلی را ایفا می‌کند. دلیل این گذار، افزایش ضخامت لایه مذاب در مجاورت پره‌هاست که با کاهش مقاومت هدایتی، امکان شکل‌گیری جریان‌های جابجایی را فراهم می‌آورد.

۷. با افزایش زمان ذوب و ذوب شدن ماده تغییرفازدهنده، رفتار آن مشابه یک جسم یکپارچه شده و مقاومت هدایتی نسبت به مقاومت جابجایی کاهش می‌یابد. این پدیده نشان می‌دهد که در مراحل پایانی ذوب، کل ناحیه مایع تقریباً دارای دمای یکنواختی است و انتقال حرارت عمدتاً از طریق جابجایی در مقیاس بزرگ انجام می‌شود.

۸. پره‌های سهموی و رادیکالی در مراحل ابتدایی ذوب سرعت بیشتری دارند، اما پس از ۲۰۰ ثانیه، پره خطی رشد دمایی بیشتری نشان می‌دهد. این رفتار را می‌توان به تشکیل سلول‌های جابجایی متعدد و پایدار در اطراف پره‌های منحنی در مراحل اولیه نسبت داد که با گذشت زمان، با یکپارچه شدن ناحیه مذاب، مزیت اولیه خود را تا حدی از دست می‌دهند.

با توجه به یافته‌های این پژوهش، بررسی تأثیر پره‌های منحنی با درجات انحنای متفاوت بر فرآیند انجماد، مطالعه عددی اثر موقعیت قرارگیری پره‌ها بر روی لوله داخلی، و همچنین استفاده از روش‌های ترکیبی نظیر افزودن نانوذرات به ماده تغییرفازدهنده به‌عنوان مسیرهای پژوهشی آینده پیشنهاد می‌شود.

Authorship Contribution Statement

Tahereh Hassani Jalilian



Biography: M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft.

Dr. Ashkan Ghafouri



Biography: Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Resources, Investigation, Supervision, Project administration, Writing – review & editing.

۵- فهرست علائم

نماد	توضیح	واحد
C	ثابت ناحیه خمیری (مشاری)	-
C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت	J/kg·K
D_i	قطر لوله داخلی	mm
D_o	قطر لوله خارجی	mm
g	شتاب گرانش	m/s ²
H	آنتالپی کل	J/kg
h	آنتالپی محسوس	J/kg
k	ضریب هدایت حرارتی	W/m·K
L	گرمای نهان ویژه	J/kg
P	فشار	Pa
S_i	ترم چشمه در معادله مومنوم	N/m ³
T	دما	K
علائم یونانی		
β	ضریب انبساط حرارتی	1/K
ε	ثابت جلوگیری از صفر شدن مخرج	-
λ	کسر حجمی مایع	-
μ	لزجت دینامیکی	kg/m·s
ρ	چگالی	kg/m ³
ΔH	آنتالپی نهان (گرمای نهان)	J/kg

۶- مراجع

- [1] Keshavari Tabatabaei SS, Mostafavi SA, Khalili M. Design and construction of a heating-cooling chamber using waste energy from vehicles. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(2):135-156.
- [2] Lacroix M, Benmadda M. Numerical simulation of natural convection-dominated melting and solidification from a finned vertical wall. *Numerical Heat Transfer*. 1997;31:71–86.
- [3] Lamberg P. Mathematical modeling and experimental investigation of melting and solidification in a finned phase change material storage. Doctoral Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland. 2003.
- [4] Lamberg P, Lehtiniemi R, Henell AM. Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *International Journal of Thermal Science*. 2004;43:277–87.
- [5] Akhilesh R, Balaji C, Narasimhan A. Method to improve geometry for heat transfer enhancement in PCM composite heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005;48:2759–70.
- [6] Trp A, Lenic K, Frankovic B. Analysis of the influence of operating conditions and geometric parameters on heat transfer in water-paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*. 2006;26:1830–39.
- [7] Gharebaghi M, Sezai I. Enhancement of heat transfer in latent heat storage modules with internal fins. *Numerical Heat Transfer*. 2008;53:749–65.
- [8] Agyenim F, Eames P, Smyth M. Experimental study on the melting and solidification behaviour of a medium temperature phase change storage material (Erythritol) system augmented with fins to power a LiBr/H₂O absorption cooling system. *Renewable Energy*. 2011;36:108-117.
- [9] Al-Abidi AA, Mat S, Sopian K, Sulaiman M, Mohammad AT. Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2013;53(1):147-156.

- [10] Al-Abidi AA, Mat S, Sopian K, Sulaiman M, Mohammad AT. Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins. *Energy and Buildings*. 2014;68:33-41.
- [11] Alizadeh M, Hosseinzadeh K, Shahavi M, Ganji D. Solidification acceleration in a triplex-tube latent heat thermal energy storage system using V-shaped fin and nano-enhanced phase change material. *Applied Thermal Engineering*. 2019;163:114436.
- [12] Assari M, Basirat Tabrizi H, Parvar M, Alkasir Farhani M. Experimental Investigation of Sinusoidal Tube in Triplex-Tube Heat Exchanger during Charging and Discharging Processes Using Phase Change Materials. *International Journal of Engineering*. 2019;32(7):999-1009.
- [13] Mokhtarian A, Rahimi M, Hashemian M. Modeling and optimization of relative viscosity and thermal conductivity ratio of water-based MWCNT-Y2O3 hybrid nanofluid using artificial neural network and multi-objective particle swarm optimization. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(2):212-233.
- [14] Ismail M, Panter JR, Landini S. Numerical investigation of fin geometries on the effectiveness of passive, phase-change material-based thermal management systems for lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*. 2025;262:125216.
- [15] Liu Z, Wang Z, Yang L, Zhang D, Cui W. Melting performance study and multi-objective optimisation of phase change triplex tube heat exchangers with secondary branching palmate mesh vein fins. *Renewable Energy*. 2026;261:125340.
- [16] Chen X, Zhang X, Zhen M, Dong X, Yao S. Geometric optimization of bio-inspired V-profile serrated fins to enhance melting performance in triple-tube latent heat thermal energy storage units. *Journal of Energy Storage*. 2026;175:123267.
- [17] Chen Z, Wu X, Li H, Li H, Hu H, Zhang S. Multi-branch Y-shaped fins for accelerated melting in shell-and-tube latent heat storage: An integrated 2D geometric screening and 3D operating-condition study. *Processes*. 2026;14(13):2084.
- [18] Voller VR, Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1987;30(8):1709-1719.
- [19] Brent AD, Voller VR, Reid KJ. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal. *Numerical Heat Transfer*. 1988;13(3):297-318.
- [20] Swaminathan CR, Voller VR. A general enthalpy method for modeling solidification processes. *Metallurgical Transactions B*. 1992;23(5):651-664.