



## بررسی تجربی و مدل سازی عددی فرآیند ذخیره سازی انرژی حرارتی توسط ماده تغییر فاز دهنده تحت زوایای مختلف محفظه

بابک کامکاری<sup>1\*</sup>، محمد وهابی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

\*تهران، صندوق پستی 18155144، kamkari@iausr.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 01 شهریور 1396  
پذیرش: 16 مهر 1396  
ارائه در سایت: 19 آبان 1396

کلید واژگان:

مواد تغییر فاز دهنده  
جابجایی طبیعی  
ذخیره سازی انرژی نهان  
فرآیند ذوب

### چکیده

در این تحقیق فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در داخل محفظه مستطیل شکل به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار می گیرد. هدف از این تحقیق بررسی نقش زاویه قرارگیری محفظه بر تشکیل ساختارهای جریان جابجایی آزاد در فاز مایع و تاثیر آن بر نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده است. در بخش تجربی آشکارسازی فرآیند ذوب با تصویر برداری از ماده تغییر فاز دهنده در یک محفظه شفاف انجام می گیرد. سپس با استفاده از روش پردازش تصویری، کسر مایع در لحظات مختلف به دست می آید. تغییر در شکل سطح مشترک جامد-مایع به خوبی نشان دهنده تغییر ساختار جریانهای جابجایی در داخل محفظه می باشد. مدل سازی عددی فرآیند به روش انتالپی-تخلخل برای زوایای 0، 45 و 90° و در دماهای 55، 60 و 70°C انجام می شود. نتایج نشان می دهد با کاهش زاویه مخزن از 90° به 45° و 0° زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده به ترتیب به میزان 52% و 37% نسبت به محفظه عمودی کاهش می یابد. کاهش زمان ذوب در محفظه با کاهش زاویه به دلیل ظهور جریانهای گردابه ای و تشکیل توده های حرارتی در فاز مایع است. با افزایش عدد استفان از 0.36 به 0.43 و 0.55 میزان انرژی ذخیره شده به ترتیب به میزان 5.4% و 13.8% افزایش می یابد. همچنین با استفاده از رگرسیون غیرخطی داده ها رابطه ای جهت پیش بینی انرژی ذخیره شده در مخزن برای اعداد استفان و زوایای مختلف مورد بررسی در این تحقیق به دست آمده است.

## Experimental investigation and numerical simulation of thermal energy storage in phase change material under different tilt angles of the enclosure

Babak Kamkari<sup>1\*</sup>, Mohammad Vahabi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch Islamic Azad University, Tehran, Iran

\*P.O.B. 18155144, Tehran, Iran, kamkari@iausr.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 23 August 2017  
Accepted 08 October 2017  
Available Online 10 November 2017

### Keywords:

Phase change material  
Natural convection  
Latent heat thermal storage  
Melting process

### ABSTRACT

This paper presents an experimental and numerical investigation of phase change material melting in a rectangular enclosure. The aim of this research is the study of the effect of the tilt angle of the enclosure on the flow structures and the melting rate. In the experimental section, the visualization of the melting process is carried out by the photography of the phase change material through a transparent enclosure. Then, the image processing of the photographs is performed to calculate the instantaneous liquid fractions. The variation of the solid-liquid interface by tilting the enclosure clearly implies the evolution of the flow structures in the liquid phase. Numerical simulation is performed using the enthalpy-porosity approach for tilt angles of 90, 45 and 0° and wall temperatures of 55, 60 and 70 °C. The results show that by decreasing the tilt angle from 90° to 45° and 0°, the melting times are 52% and 37% less than that of the vertical enclosure. Melting time reduction in the inclined enclosure is due to the formation of the vertical flow structures and thermal plums in the liquid phase. By increasing the Stefan number from 0.36 to 0.43 and 0.55 the thermal energy storage increase by 5.4% and 13.8%, respectively. Also, a correlation is developed to predict the thermal energy storage in the tilt enclosures using nonlinear regression.

نیز می شود.

### 1- مقدمه

ذخیره سازی انرژی حرارتی به صورت نهان یکی از روش های ذخیره سازی انرژی حرارتی می باشد. در این روش بر خلاف ذخیره سازی محسوس انرژی که میزان دمای جسم با افزایش انرژی آن متناسب است، مقادیر قابل توجهی از انرژی در محدوده دمایی کوچکی در جسم ذخیره می شود. از مزایای این مواد می توان به گرمای نهان ذوب بالا، محدوده وسیع دمای تغییر فاز و تغییر

در سال های اخیر افزایش نیاز به انرژی، محدودیت سوخت های فسیلی و افزایش تولید گازهای گلخانه ای، به کارگیری سیستم های کارآمدتر با هدف استفاده بهینه از انرژی را ضروری ساخته است. در این میان استفاده از سیستم های ذخیره کننده انرژی علاوه بر کاهش اختلاف میان عرضه و تقاضای انرژی موجب افزایش اطمینان از عملکرد مناسب سیستم های انرژی

### Please cite this article using:

B. Kamkari, M. Vahabi, Experimental investigation and numerical simulation of thermal energy storage in phase change material under different tilt angles of the enclosure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 133-143, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

علاوه بر بررسی تاثیر زاویه در محفظه‌های ذخیره کننده انرژی، تحقیقاتی نیز بر روی دفع کننده‌های گرما و سلول‌های خورشیدی حاوی ماده تغییر فاز دهنده نیز انجام گرفته است. فوک و همکاران [9] تاثیر به‌کارگیری ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد حرارتی دفع کننده گرما را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که تحت اعمال شار حرارتی پایین، زاویه دفع کننده گرما تاثیر اندکی بر عملکرد حرارتی آن دارد. با این وجود ایشان بیان نمودند که تاثیر زاویه در شار حرارتی بالا قابل ملاحظه خواهد بود. نتایج مشابهی توسط وانگ و همکاران [10] به‌دست آمد. در تحقیقی که توسط بابی و بالاجی [11] به‌صورت آزمایشگاهی انجام گرفت تاثیر به‌کارگیری همزمان ماده تغییر فاز دهنده و محیط متخلخل فلزی بر عملکرد حرارتی دفع کننده گرما تحت زوایای مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که به‌کارگیری محیط متخلخل موجب بهبود عملکرد حرارتی می‌شود در حالی که زاویه قرارگیری دفع کننده گرما تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر آن ندارد. علت این امر ایجاد ممانعت از حرکت آزاد جریان مایع در محفظه توسط ساختار محیط متخلخل ذکر گردید که موجب تضعیف نقش جریان جابجایی آزاد در فرآیند ذوب می‌شود. خانان و همکاران [12] راندمان یک سیستم فتوولتائیک را به همراه ماده تغییر فاز دهنده تحت زوایای مختلف به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده با کاهش دمای سلول خورشیدی، راندمان آن را از 17.1% به 19% افزایش می‌دهد. همچنین افزایش زاویه سیستم از 0 به 90 درجه با کاهش دمای سطح سلول از 43.4 به 35.4 درجه سانتی‌گراد موجب افزایش راندمان آن از 18.1% به 19% می‌شود.

با توجه به مطالب بیان شده، تاکنون تحقیق جامعی در رابطه با تاثیر زاویه مخزن با هندسه مکعب مستطیل شکل بر چگونگی تشکیل جریان‌های جابجایی آزاد و تاثیر آن بر رفتار ذوب ماده تغییر فاز دهنده و نرخ ذخیره سازی انرژی حرارتی صورت نگرفته است. بنابراین در تحقیق حاضر رفتار ذوب ماده تغییر فاز دهنده و چگونگی پیشروی سطح مشترک جامد-مایع در محفظه مستطیل شکل به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین تلاش شده است با معرفی گروه اعداد بی‌بعد، رابطه‌ای جهت تعیین انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن تحت زوایای مختلف 0 الی 90° ارائه گردد.

در این تحقیق، ابتدا پیشرفت فرآیند ذوب به‌صورت تجربی با تصویربرداری از ماده تغییر فاز دهنده مطالعه می‌شود، سپس با استفاده از مدل‌سازی عددی، تغییرات کسر مایع با زمان، ضریب انتقال حرارت جابجایی و انرژی ذخیره شده در مخزن برای زوایای گوناگون به‌دست می‌آیند. همچنین تاثیر تغییرات دمای دیواره نیز بر نرخ ذوب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## 2- دستگاه آزمایشگاهی و روند انجام آزمایش‌ها

نمایی شماتیک از دستگاه آزمایشگاهی در "شکل 1" نشان داده شده است. دستگاه آزمایشگاهی شامل محفظه ذخیره کننده ماده تغییر فاز دهنده، مبدل حرارتی، پمپ آب، حمام آب گرم به همراه کنترلر دما، سیستم سرمایش دما ثابت و میز با قابلیت تغییر زاویه است. از آنجایی که هدف از انجام آزمایش‌ها آشکار سازی چگونگی پیشرفت سطح مشترک جامد-مایع می‌باشد، محفظه حاوی ماده تغییر فاز دهنده از ورق پلکسی گلس شفاف به ضخامت 25 mm و به شکل مکعب مستطیل ساخته شد. طول، عرض و ارتفاع محفظه به ترتیب برابر با 120، 50 و 120 mm می‌باشند. برای جلوگیری از اتلاف حرارت، سطوح خارجی محفظه با عایق حرارتی پوشانده شدند. برای اعمال شرط مرزی دما

دمایی اندک به هنگام ذوب و انجماد را نام برد. در دهه اخیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با هدف ذخیره‌سازی انرژی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [1,2].

تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که تشکیل جریان‌های جابجایی آزاد در فاز مایع از ماده تغییر فاز دهنده نقش مهمی در فرآیند ذوب ایفا می‌کند [3,4]. شکوهمند و کامکاری [3] فرآیند ذوب اسید لوریک را در یک محفظه مکعب مستطیل شکل به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. تصویر برداری از فرآیند ذوب نشان داد که تشکیل جریان جابجایی آزاد در داخل محفظه نقش عمده‌ای در انتقال حرارت از دیواره گرم به فاز جامد ایفا می‌کند. همچنین افزایش دمای دیواره گرم با تقویت جریان جابجایی آزاد بهبود نرخ ذوب را به همراه دارد. در تحقیق آزمایشگاهی دیگری که توسط کامکاری و همکاران [4] انجام گرفت تاثیر افزودن پره‌های افقی بر نرخ ذوب و تشکیل جریان‌های جابجایی آزاد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط با افزایش تعداد پره‌ها به دلیل ممانعت از حرکت جریان مایع بالا رانده کاهش می‌یابد. با این وجود، نرخ انتقال حرارت به دلیل افزایش سطح تبادل حرارت افزایش می‌یابد تا جایی که افزودن یک و سه پره به مخزن زمان ذوب را به ترتیب 18% و 37% کاهش می‌دهد. امیر عبداللهیان و جان‌نثاری [5] فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده را در ذخیره کننده پوسته و لوله به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با قرارگیری لوله‌ها پایین محفظه جریان جابجایی آزاد در محفظه بهبود یافته و نرخ ذوب افزایش می‌یابد.

شدت جریان جابجایی آزاد در داخل محفظه تابعی از اختلاف دمای دیواره محفظه با دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده، ابعاد محفظه، خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده و همچنین زمان ذوب می‌باشد. علاوه بر موارد بیان شده تغییر زاویه قرارگیری مخزن نیز می‌تواند موجب تغییر در ساختار جریان جابجایی آزاد و تاثیر گذاری آن بر نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده گردد. آلن و همکاران [6] فرآیند ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده را در یک محفظه استوانه‌ای تحت زوایای مختلف به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه نمودند. همچنین به‌منظور بهبود نرخ ذوب و انجماد تاثیر افزودن ملحقات مختلف به محفظه شامل میله مسی، لوله گرمایی، فویل آلومینیومی و فوم فلزی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییر زاویه مخزن بیشترین تاثیر را بر فرآیند ذوب دارد در حالی که فرآیند انجماد تاثیر چندانی از زاویه مخزن نمی‌پذیرد. چرا که مکانیزم‌های قالب انتقال حرارت در فرآیندهای ذوب و انجماد به ترتیب جابجایی آزاد و هدایت حرارتی می‌باشند. همچنین به‌کارگیری لوله گرمایی با کاهش زمان‌های ذوب و انجماد به ترتیب به میزان 11% و 3% بهترین عملکرد را نسبت به سایر ملحقات به همراه داشت. صدیق و همکاران [7] فرآیندهای ذخیره و آزادسازی انرژی را در یک مبدل دو لوله‌ای در موقعیت‌های عمودی و افقی به‌صورت عددی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که به‌کارگیری مبدل در موقعیت افقی عملکرد حرارتی بهتری را نسبت به مبدل عمودی در فرآیند ذخیره‌سازی انرژی نشان می‌دهد. همچنین در فرآیند آزادسازی انرژی زاویه مخزن تاثیر قابل ملاحظه‌ای را بر عملکرد حرارتی نشان نداد. کوشا و همکاران [8] فرآیندهای ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده را در یک مبدل ذخیره کننده انرژی حرارتی از نوع پوسته و لوله مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در فرآیند ذوب، نرخ انتقال حرارت در مبدل افقی بیشتر از مبدل عمودی است ولی زاویه مخزن تاثیر چندانی بر نرخ انتقال حرارت در فرآیند انجماد ندارد.

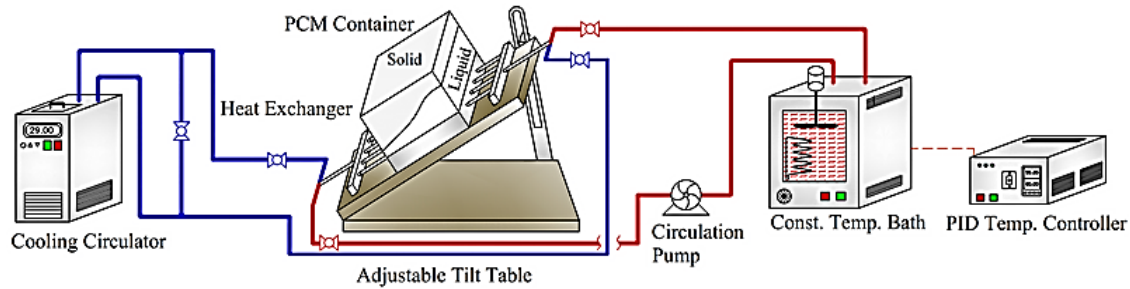


Fig. 1 A schematic view of the experimental setup

شکل 1 نمایی شماتیک از دستگاه آزمایشگاهی

جدول 1 خواص ترموفیزیکی اسید لوریک [3]

مقدار	خاصیت
43.5-48.2	محدود دمای ذوب (°C)
187.2	گرمای نهان ذوب (kJ/kg)
0.16/0.14	ضریب هدایت حرارتی جامد/مایع (W/m K)
2.18/2.39	ظرفیت گرمایی ویژه جامد/مایع (kJ/kg K)
940/885	چگالی جامد/مایع (kg/m <sup>3</sup> )

می‌شود و فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده شروع می‌شود. در بازه‌های زمانی 5 دقیقه، عایق وجه مقابل محفظه برداشته شده و تصویربرداری از محفظه انجام می‌شود و تا ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده ادامه می‌یابد. این فرآیند برای محفظه در زوایای قرارگیری مختلف 90، 45 و 0° تکرار می‌شود.

محاسبه کسر مایع در هر لحظه به کمک پردازش تصویرهای گرفته شده در نرم افزار متلب<sup>3</sup> انجام می‌گیرد. در ابتدا تصویر از حالت رنگی به سیاه-سفید تبدیل می‌شود به نحوی که فاز مایع به رنگ مشکی و فاز جامد سفید رنگ می‌شوند. این تصویر در حقیقت ماتریسی با اعضای صفر و یک است که مقادیر صفر مربوط به پیکسل‌های مشکی و مقادیر یک به پیکسل‌های سفید اختصاص می‌یابند. نسبت تعداد پیکسل‌های مشکی به کل پیکسل‌های تصویر مقدار کسر مایع در هر لحظه را بیان می‌کند.

### 3- معادلات ریاضی حاکم

در مطالعه حاضر جریان سیال و انتقال حرارت در داخل محفظه به صورت دو بعدی در نظر گرفته می‌شود. همچنین جریان آرام و تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود. به منظور مدل‌سازی عددی فرآیند تغییر فاز جامد-مایع از روش انتالپی-تخلخل<sup>4</sup> استفاده می‌شود [14]. در این روش تمامی ناحیه حل به صورت یک ناحیه متخلخل در نظر گرفته می‌شود به نحوی که مقدار ضریب تخلخل در فاز مایع برابر با یک و در فاز جامد برابر صفر محاسبه می‌شود. سطح مشترک جامد-مایع را ناحیه خمیری<sup>5</sup> تشکیل می‌دهد که در این ناحیه ضریب تخلخل بین صفر تا یک تغییر می‌کند. در این روش از یک شبکه ثابت استفاده شده و مکان سطح مشترک جامد-مایع به صورت ضمنی در هر لحظه تعیین می‌شود. در ادامه معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی بیان می‌شوند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

<sup>3</sup> Matlab

<sup>4</sup> Enthalpy-Porosity

<sup>5</sup> Mushy zone

ثابت پنج وجه مکعب از جنس پلکس گلس و وجه سمت راست آن با یک مبدل حرارتی جایگزین گردید تا بتوان شرط مرزی دما ثابت را بر روی این وجه از مکعب اعمال نمود. مبدل حرارتی از جنس آلومینیوم ساخته شده و با ایجاد شش سوراخ طولی در آن و عبور آب با سرعت بالا، دمای سطح مبدل در طول آزمایش به صورت ثابت حفظ گردید. نمایی از مبدل حرارتی و اتصالات مربوط به عبور آب در "شکل 2" نشان داده شده است.

در تحقیقات آزمایشگاهی پیشین مرتبط با ذوب ماده تغییر فاز دهنده از چیدمان ترموکوپل‌ها در داخل محفظه جهت تعیین رفتار حرارتی ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است [3,4,13]. در این مطالعه به منظور حذف تاثیر ترموکوپل‌ها به عنوان جسم خارجی بر ساختار جریان‌های جابجایی آزاد در فاز مایع از ترموکوپل استفاده نشده است تا بتوان با دقت بالاتری پیشروی سطح مشترک جامد-مایع را ثبت نمود.

در این آزمایش از اسید لوریک<sup>1</sup> به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده می‌شود. اسید لوریک ماده‌ای سفید رنگ است که تحت عنوان روغن نارگیل نیز شناخته می‌شود و در دسته‌بندی مواد تغییر فاز دهنده در گروه مواد آلی غیر پارافینی (اسیدهای چرب<sup>2</sup>) قرار می‌گیرد. خواص ترموفیزیکی اسید لوریک در جدول 1 نشان داده شده است.

قبل از شروع آزمایش آب در دمای 26°C توسط سیستم سرمایش دما ثابت وارد مبدل حرارتی می‌شود تا دمای ماده تغییر فاز دهنده به صورت یکنواخت به 26°C برسد. سپس آب گرم در دمای 70°C وارد مبدل حرارتی

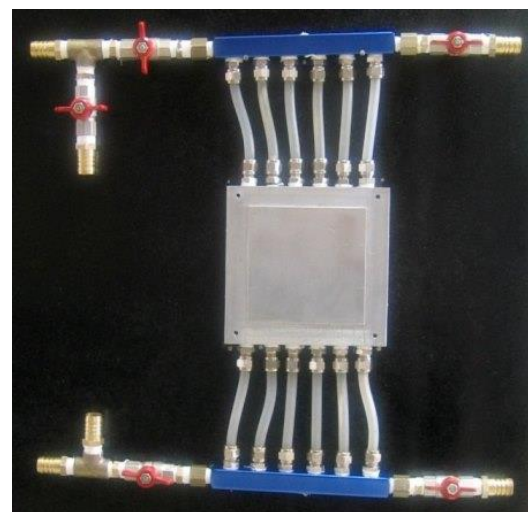


Fig. 2 Photograph of heat exchanger with constant wall temperature

شکل 2 نمایی از مبدل حرارتی با سطح دما ثابت

<sup>1</sup> Lauric acid

<sup>2</sup> Fatty acids

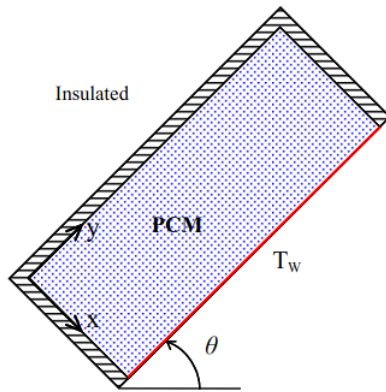


Fig.3 A schematic view of the phase change material enclosure

شکل 3 نمایی شماتیک از محفظه حاوی ماده تغییر فاز دهنده

به کار گرفته می‌شوند. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی به ترتیب برابر با  $10^{-4}$ ،  $10^{-5}$  و  $10^{-6}$  در نظر گرفته می‌شوند. جهت بررسی استقلال نتایج از شبکه، سه شبکه با ابعاد  $80 \times 200$ ،  $100 \times 250$  و  $120 \times 300$  مورد مطالعه قرار گرفتند. "شکل 4" تغییرات کسر مایع با زمان را برای سه شبکه محاسباتی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده حداکثر اختلاف کسر مایع بین شبکه  $120 \times 300$  با شبکه‌های  $80 \times 200$  و  $100 \times 250$  به ترتیب برابر با 1.2% و 0.6% است. بنابراین به منظور حفظ دقت و کاهش زمان محاسباتی شبکه با ابعاد  $100 \times 250$  مورد استفاده قرار گرفت. مطالعه‌ای مشابه جهت تعیین گام زمانی مناسب بین گام‌های زمانی 0.05، 0.1 و 0.03 ثانیه انجام گرفت و در نهایت گام زمانی 0.05 ثانیه برای انجام محاسبات انتخاب گردید.

#### 6- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی حاضر نتایج عددی با نتایج به دست آمده از آزمایش مقایسه می‌شوند. "شکل 5" نتایج عددی و تجربی برای تغییرات کسر مایع با زمان را در سه زاویه 0، 45، 90 و 0° مورد مقایسه قرار می‌دهد. حداکثر اختلاف بین نتایج حل عددی و نتایج تجربی برای زوایای 0، 45 و 90° به ترتیب برابر با 2.5%، 5% و 6.5% است. به منظور اطمینان بیشتر از صحت و عملکرد مناسب مدل‌سازی عددی، فرآیند ذوب فلز گالیوم مطابق شرایط اولیه و مرزی بیان شده در تحقیق

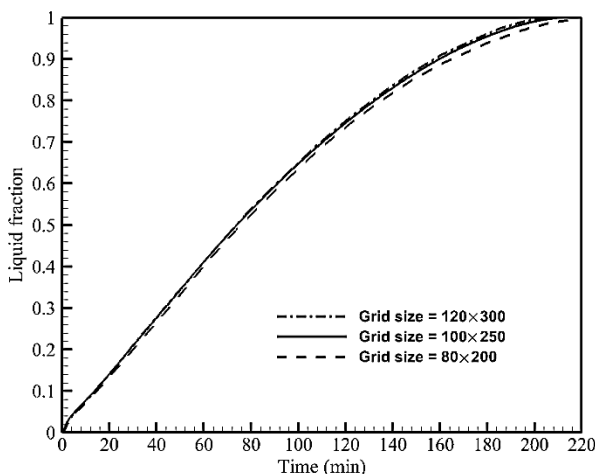


Fig.4 Liquid fraction versus time for three different grid sizes

شکل 4 تغییرات کسر مایع با زمان برای سه شبکه محاسباتی با ابعاد متفاوت

معادله بقای مومنوم در راستای x:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta \cos(\theta) (T - T_m) + Au \quad (2)$$

معادله بقای مومنوم در راستای y:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta \sin(\theta) (T - T_m) + Av \quad (3)$$

در معادلات مومنوم عبارت A، بیانگر تابع تخلخل است که توسط برنت و همکاران [15] با الهام از رابطه کوزنی-کارمن<sup>1</sup> که مربوط به جریان در محیط متخلخل است به دست آمده است.

$$A = -C \frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} \quad (4)$$

در رابطه فوق C، ثابت خمیری است که برابر  $10^6$  در نظر گرفته می‌شود [16]. همچنین  $\varepsilon$ ، مقدار کوچکی برابر با  $10^{-3}$  است تا از تقسیم کسر فوق بر مقدار صفر در حالتی که مقدار کسر مایع (γ) برابر صفر است اجتناب شود. مقدار کسر مایع نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma = \frac{\Delta H}{h_{sl}} = \begin{cases} 0 & \text{اگر } T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & \text{اگر } T_{liquidus} < T < T_{solidus} \\ 1 & \text{اگر } T > T_{solidus} \end{cases} \quad (5)$$

معادله بقای انرژی:

$$\rho \left( \frac{\partial}{\partial t} (C_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (C_p u T) + \frac{\partial}{\partial y} (C_p v T) \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) - S_T \quad (6)$$

که:

$$S_T = \rho \left( \frac{\partial}{\partial t} (\Delta H) + \frac{\partial}{\partial x} (u \Delta H) + \frac{\partial}{\partial y} (v \Delta H) \right) \quad (7)$$

#### 4- شرایط مرزی و اولیه

"شکل 3" نمایی شماتیک از محفظه حاوی ماده تغییر فاز دهنده را نشان می‌دهد. در این تحقیق دیواره سمت راست محفظه دما ثابت فرض می‌شود و سایر وجه‌ها عایق می‌باشند. مدل‌سازی عددی برای سه زاویه 0، 45 و 90° در دماهای دیواره 55، 60 و 70°C انجام می‌شوند. دمای اولیه ماده تغییر فاز دهنده و کسر مایع به ترتیب برابر با 26°C و 0 در نظر گرفته می‌شوند.

#### 5- نحوه انجام محاسبات

در مطالعه عددی حاضر، حل معادلات حاکم به کمک نرم‌افزار انسیس فلونت انجام می‌شود. از مدل جریان آرام برای ویسکوزیته و الگوریتم سیمپل<sup>2</sup> برای کوپل کردن میدان سرعت و فشار استفاده می‌شود. به منظور گسسته‌سازی عبارت‌های پخش و جابجایی به ترتیب روش‌های تفاضل مرکزی<sup>3</sup> و کوئیک<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Kozney -Carman

<sup>2</sup> SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)

<sup>3</sup> Central difference

<sup>4</sup> Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics

"شکل 7" فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده را در محفظه عمودی نشان می‌دهد. در شروع فرآیند ذوب پیشروی سطح جامد-مایع تقریباً به صورت یکنواخت و موازی دیواره گرم انجام می‌گیرد که این امر نشان دهنده وجود انتقال حرارت هدایتی به عنوان مکانیزم غالب انتقال حرارت در ابتدای فرآیند ذوب می‌باشد. با گذشت زمان، پیشروی سطح مشترک از حالت یکنواخت خارج شده و نرخ ذوب بالاتری در بالای محفظه دیده می‌شود. تغییر شکل سطح مشترک از حالت مسطح به منحنی ناشی از تشکیل جریان جابجایی آزاد در فاز مایع است. با افزایش ضخامت لایه مایع، ماده تغییر فاز دهنده در مجاورت دیوار، گرم شده و در راستای آن به سمت بالا حرکت می‌کند، پس از رسیدن به دیواره بالایی محفظه به سمت چپ منحرف شده و با برخورد به فاز جامد موجب ذوب آن می‌شود. سپس سرد شده و در امتداد سطح مشترک به سمت پایین حرکت می‌کند. بدین ترتیب یک جریان چرخشی در داخل فاز مایع شکل می‌گیرد. با گذشت حدود 60 دقیقه از شروع فرآیند ذوب، سطح مشترک جامد-مایع به دیواره مقابل محفظه می‌رسد و انحنای آن از محدب به مقعر تغییر می‌یابد. از این لحظه به بعد همان‌طور که خطوط جریان نیز نشان می‌دهند از سرعت جریان جابجایی آزاد در قسمت بالای محفظه کاسته می‌شود. رفتاری مشابه توسط هو و ویسکانتا [18] و بنارد و همکاران [19] در طی ذوب ماده تغییر فاز دهنده در محفظه عمودی گزارش گردیده است. با نزدیک شدن به پایان فرآیند ذوب و کوچک شدن فاز جامد، کاهش چگالی خطوط جریان در بالای محفظه نشان‌دهنده تضعیف جریان سیال در این قسمت است. همچنین توزیع دما نیز به خوبی نشان می‌دهد که سیال از لحاظ دمایی به صورت لایه‌ای<sup>1</sup> درآمده به نحوی که لایه‌های گرمتر بر روی لایه‌های سردتر قرار می‌گیرند.

"شکل 8" فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده را در محفظه 45° نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در 10 دقیقه ابتدایی، فرآیند ذوب در محفظه 45° مشابه محفظه 90° است. با گذشت زمان (20 دقیقه) نرخ ذوب در پایین محفظه افزایش می‌یابد و سطح مشترک مقعر شکل می‌شود. همان‌طور که خطوط جریان نشان می‌دهند، برخلاف جریان در محفظه عمودی که یک گردابه غالب در آن وجود داشت، جریان در محفظه 45° حاوی چندین گردابه است. مقایسه تصاویر ذوب با میدان فازی به دست آمده از حل عددی نشان می‌دهد که مدل‌سازی انجام شده به خوبی موقعیت و شکل سطح مشترک را در 40 دقیقه ابتدایی ذوب پیش‌بینی می‌کند. با گذشت زمان و افزایش ضخامت مایع از دقت حل عددی در پیش‌بینی شکل سطح مشترک اندکی کاسته می‌شود که آن را می‌توان به تشکیل ساختارهای سه‌بعدی در فاز مایع نسبت داد. لازم به ذکر است که رفتاری مشابه در تشکیل ساختارهای سه‌بعدی به هنگام ذوب ماده تغییر فاز دهنده در استوانه مایل توسط شریفی و همکاران [20] گزارش شده است.

"شکل 9" فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده را در محفظه افقی نشان می‌دهد. در شروع فرآیند ذوب، لایه‌ای از مایع با ضخامت بسیار کم در مجاورت سطح گرم ایجاد می‌شود که یکنواختی آن بیانگر نقش غالب هدایت حرارتی در فاز مایع می‌باشد. پس از گذشت 10 دقیقه از شروع ذوب، سطح مشترک جامد-مایع مواج می‌گردد. خطوط جریان به خوبی نشان می‌دهند که موجی شدن سطح مشترک به دلیل تشکیل جریان‌های گردابه‌ای است. بدین ترتیب که جریان گرم در مرز مشترک هر دو سلول چرخشی که در خلاف جهت یکدیگر می‌چرخند به سمت بالا حرکت کرده و با برخورد به سطح

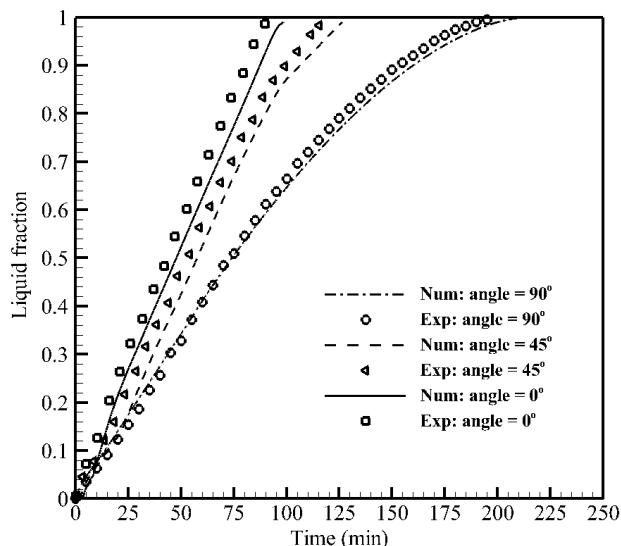


Fig.5 Comparison of melt fraction variation with time between experimental and numerical results for three different tilt angles of 90, 45 and 0°

شکل 5 مقایسه تغییرات کسر مایع با زمان بین نتایج عددی و تجربی در سه زاویه 0°، 45° و 90°

تجربی گا و ویسکانتا [17] مدل‌سازی شده و نتایج در "شکل 6" مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل‌سازی عددی به خوبی موقعیت مکانی و شکل جبهه مذاب را پیش‌بینی می‌کند.

### 7- نتایج و بحث

"شکل‌های 7 تا 9" توزیع دما، خطوط جریان و پیشروی سطح مشترک جامد-مایع را در زوایای مختلف 0°، 45°، 90° برای حالتی که دمای دیواره برابر با 70°C است را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهند. همچنین در این شکل‌ها امکان مقایسه تصاویر ذوب حاصل از آزمایش با نتایج به دست آمده از حل عددی فراهم شده است. در تصاویر ذوب، بخش سفید و مشکی رنگ به ترتیب بیانگر فازهای جامد و مایع می‌باشند.

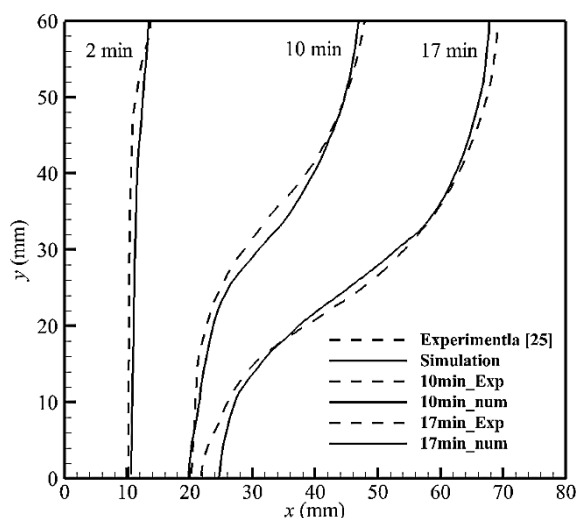


Fig. 6 Comparison between numerical and experimental results for melt front evolution

شکل 6 مقایسه نتایج تجربی و عددی برای پیشروی سطح مشترک جامد-مایع

<sup>1</sup> Stratified

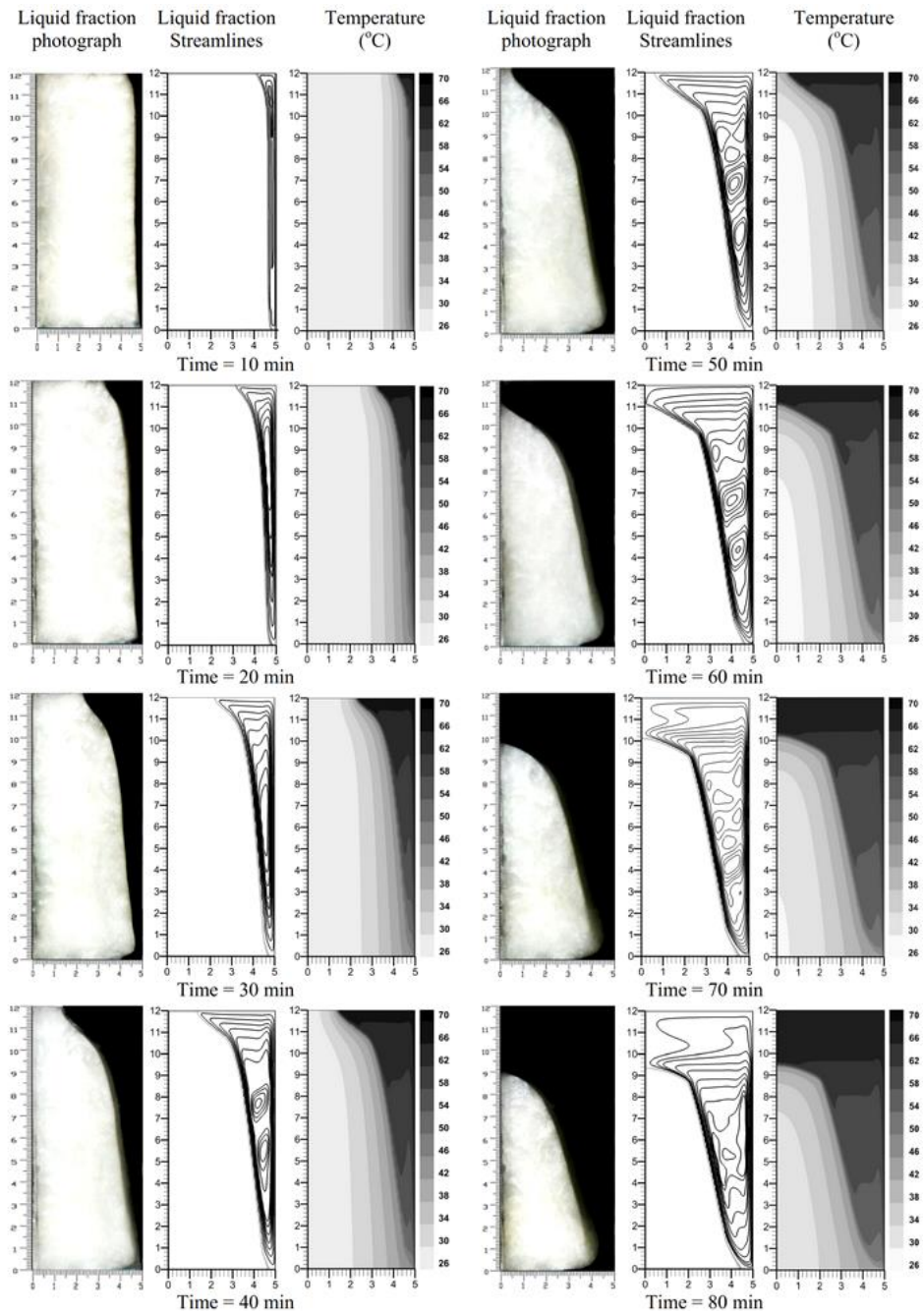


Fig. 7 Temperature contours, streamlines and solid-liquid interface evolution during melting in vertical enclosure

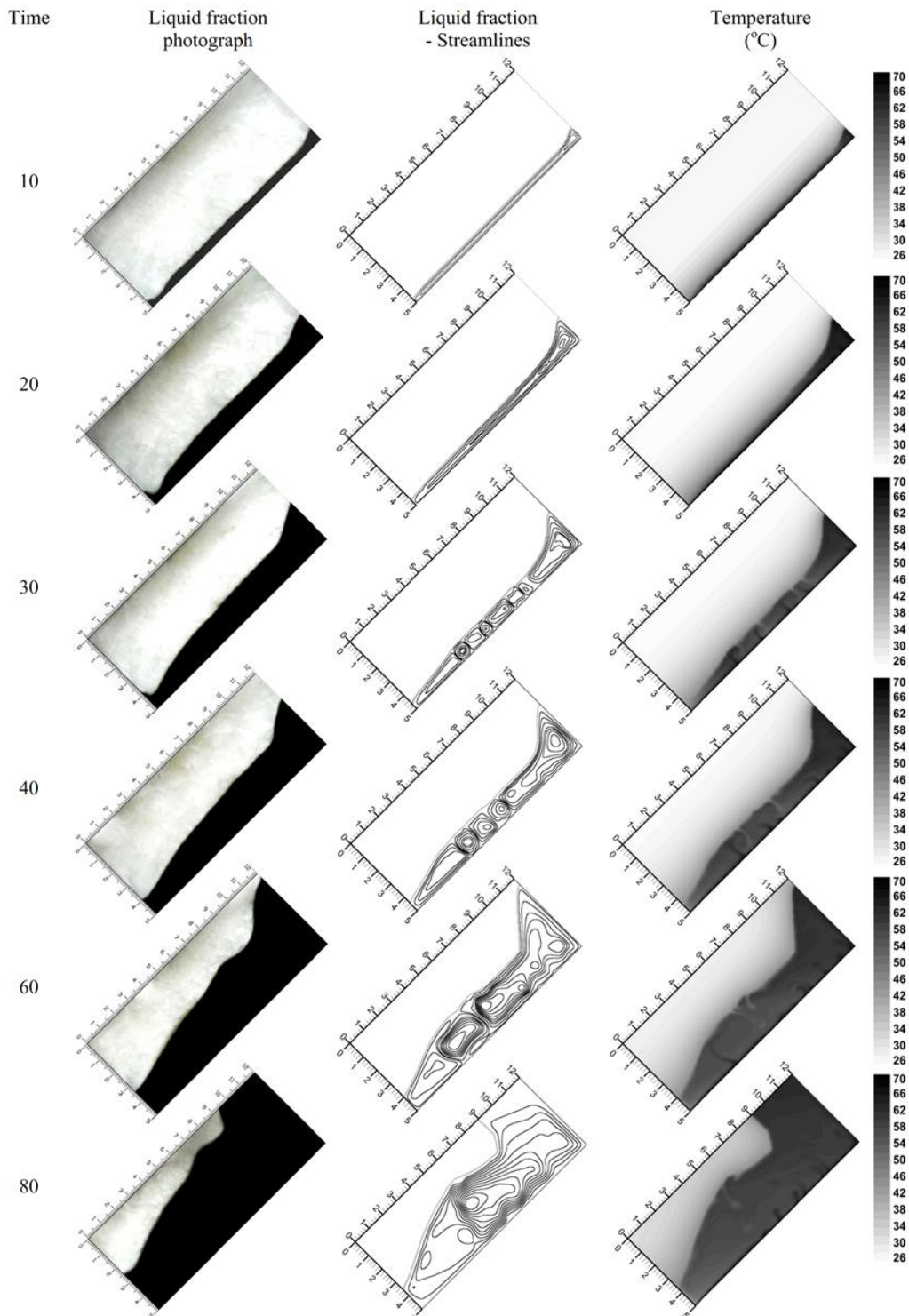
شکل 7 توزیع دما، خطوط جریان و پیشروی سطح مشترک جامد-مایع در فرآیند ذوب در محفظه عمودی

مشترک نشان دهنده تشکیل ساختارهای جریان جابجایی آزاد نامتقارن در فاز مایع است. رفتار مشابهی در ذوب ماده تغییرفاز دهنده با گرمایش از سطح تحتانی توسط گانگ و موجومدار [21] و فتیتی و نصراله [22] مشاهده شده است.

"شکل 10" تغییرات کسر مایع با زمان را برای زوایا و اعداد استفان مختلف نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر دمای اولیه ماده تغییرفاز دهنده 20 °C پایین تر از دمای ذوب آن انتخاب شده است. بنابراین از عدد استفان<sup>1</sup> اصلاح شده استفاده شده است تا بتوان اثر گرمایش محسوس هر دو فاز جامد و مایع را در نظر گرفت [23].

مشترک موجب تسریع ذوب در ناحیه برخورد می‌شود سپس با از دست دادن گرما مجدداً به سمت دیواره گرم باز می‌گردد. کانتورهای دما نیز مراکز تشکیل توده‌های حرارتی و جریان گرم بالارونده را نشان می‌دهند. با گذشت زمان گردابه‌های کوچک به یکدیگر می‌پیوندند و گردابه‌های بزرگتری تشکیل می‌شوند. مقایسه تصاویر ذوب و میدان فاز ناشی از حل عددی نشان می‌دهد که مدل‌سازی انجام شده به خوبی پیشروی و موقعیت مکانی سطح مشترک را پیش بینی می‌کند اگرچه در محل تشکیل برآمدگی‌های سطح مشترک از دقت کمتری برخوردار است. علت این امر را می‌توان به ایجاد سلول‌های جابجایی بنارد نسبت داد که رفتاری سه بعدی را از خود نشان می‌دهند. همچنین همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، عدم تقارن در شکل سطح

<sup>1</sup> Stefan number



**Fig. 8** Temperature contours, streamlines and solid-liquid interface evolution during melting in 45° inclined enclosure

شکل 8 توزیع دما، خطوط جریان و پیشروی سطح مشترک جامد-مایع در فرآیند ذوب در محفظه با زاویه 45°

جابجایی آزاد در محفظه با کاهش طول سطح مشترک جامد-مایع است. چرا که در پدیده انتقال حرارت جابجایی در محفظه بسته، دیواره گرم به عنوان منبع گرم و سطح مشترک به عنوان منبع سرد عمل می کنند. در نتیجه با کوچک شدن سطح مشترک، جریان جابجایی آزاد نیز در محفظه تضعیف می شود. در محفظه افقی بر خلاف محفظه های 45° و 90°، روند تغییرات کسر مایع تقریباً تا پایان فرآیند ذوب به صورت خطی باقی ماند. در محدوده اعداد استفان مورد بررسی، نتایج نشان می دهد که زمان ذوب برای محفظه های 0

$$Ste^* = \frac{C_{p,s}(T_m - T_0) + C_{p,l}(T_w - T_m)}{h_{sl}} \quad (8)$$

در "شکل 10" اعداد استفان 0.36، 0.43 و 0.55 به ترتیب متناظر با دماهای دیواره 60، 55 و 70 °C هستند. در تمامی زاویه ها، روند تغییرات کسر مایع با زمان در مراحل ابتدایی ذوب تقریباً به صورت خطی می باشد. با افزایش کسر مایع در محفظه های 45° و 90° از نرخ ذوب کاسته شده و روند تغییرات کسر مایع با زمان کند می شود. علت این امر کاهش شدت جریان

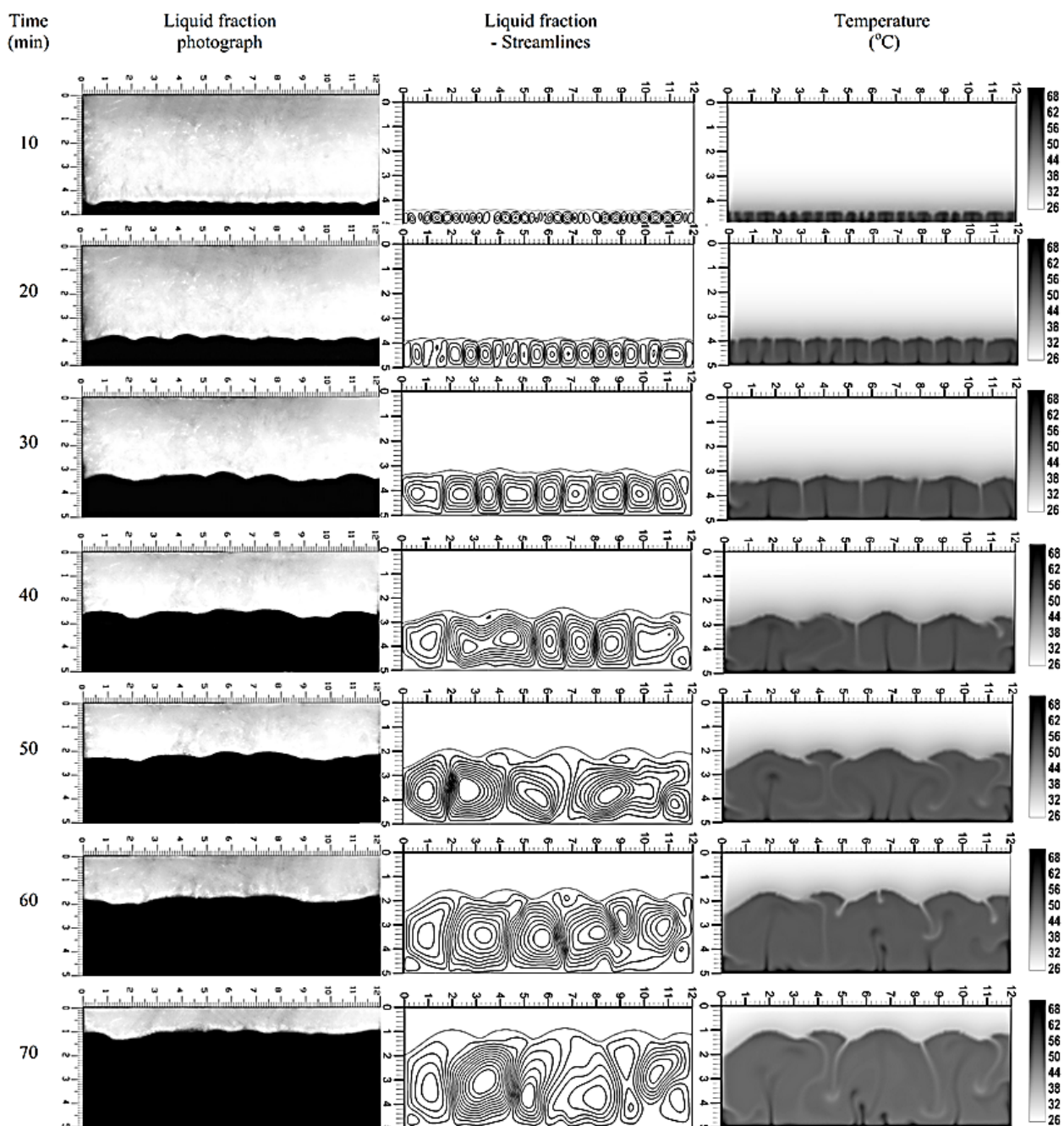


Fig. 9 Temperature contours, streamlines and solid-liquid interface evolution during melting in horizontal enclosure

شکل 9 توزیع دما، خطوط جریان و پیشروی سطح مشترک جامد-مایع در فرآیند ذوب در محفظه افقی

هدایتی توجیه نمود. در ابتدای فرآیند به دلیل تماس سطح جامد با دیواره گرم، انتقال حرارت به روش هدایتی انجام می‌گیرد. این پدیده را ذوب تماسی<sup>1</sup> گویند که نرخ بالای انتقال حرارت را به همراه دارد [24]. سپس با افزایش ضخامت لایه مایع به دلیل افزایش مقاومت حرارتی، نرخ انتقال حرارت کاهش یافته تا جایی که با غلبه نیروی شناوری بر نیروی لزجت جریان جابجایی آزاد در محفظه شکل گرفته و روند کاهشی مسیر معکوس را طی می‌کند و نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در ادامه فرآیند نرخ انتقال حرارت با توجه به زاویه مخزن متفاوت خواهد بود. در محفظه عمودی، نرخ انتقال حرارت در بازه زمانی 10 الی 55 دقیقه تقریباً ثابت است. پس از رسیدن سطح مشترک به دیواره مقابل (55 دقیقه)، روند کاهش سطح

45° به ترتیب به میزان 52% و 37% کمتر از محفظه عمودی است. کاهش زمان ذوب در محفظه‌های مایل و افقی نسبت به محفظه عمودی را می‌توان به تقویت شدت جریان جابجایی آزاد در محفظه و تشکیل توده‌های حرارتی نسبت داد.

"شکل 11" تغییرات عدد ناسلت دیواره گرم را برای زوایای مختلف در عدد استفان 0.55 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای تمامی زوایا مقدار عدد ناسلت از یک مقدار ماکزیمم شروع شده و کاهش می‌یابد. سپس افزایش یافته و پس از گذراندن یک دوره نسبت ثابت مجدداً کاهش می‌یابد. دلیل افت ناگهانی عدد ناسلت در لحظات ابتدایی ذوب را که برای تمامی زوایا قابل مشاهده است را می‌توان با توجه به مکانیزم انتقال حرارت

<sup>1</sup> Close contact melting

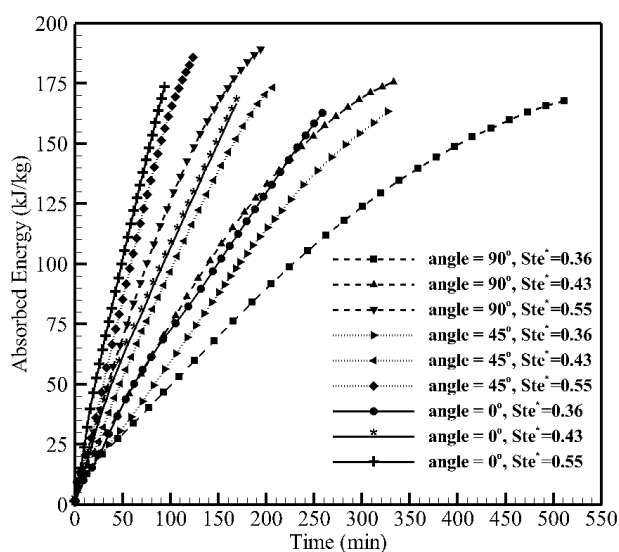


"شکل 12" تغییرات انرژی ذخیره شده در محفظه با زمان را برای زوایا و اعداد استفان مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد استفان میزان انرژی ذخیره شده در محفظه نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، برای محفظه عمودی میزان انرژی ذخیره شده در پایان فرآیند ذوب برای اعداد استفان 0.36، 0.43 و 0.55 به ترتیب برابر با 167، 176 و 190 kJ است. همچنین به ازای یک عدد استفان ثابت با کاهش زاویه مخزن از میزان انرژی ذخیره شده در مخزن کاسته می‌شود. به عنوان مثال، برای محفظه با عدد استفان 0.55، میزان انرژی ذخیره شده در محفظه با زوایای 0، 45 و 90° به ترتیب برابر با 184، 190 و 171 kJ است.

در ادامه به منظور ارائه رابطه‌ای که بتوان تغییرات انرژی ذخیره شده در مخازن زاویه دار را در غالب یک رابطه بیان نمود، از ترکیب گروه اعداد بی‌بعد مناسب با توجه به فیزیک مساله استفاده می‌شود. هو و ویسکانتا [18] و شتیکیان و همکاران [25] با ترکیب اعداد بی‌بعد استفان، فوریه و رایلی روابطی را برای محاسبه تغییرات کسر مایع ارائه نمودند. حاصل ضرب اعداد بی‌بعد استفان و فوریه بیانگر انتقال حرارت هدایتی و تغییر فاز در ماده تغییر فاز دهنده است [18]. همان‌طور که قبلاً بیان شد، انتقال حرارت جابجایی نقش قابل توجهی در فرآیند ذوب را ایفاء می‌کند که تاثیر آن از طریق عدد رایلی در نظر گرفته می‌شود.

"شکل 13" تغییرات انرژی ذخیره شده در محفظه را برحسب گروه اعداد بی‌بعد  $Ste^2 Fo Ra^2$  نشان می‌دهد. آنالیز نتایج به دست آمده نشان داد در صورتیکه به جای زمان برحسب ثانیه از ترکیب گروه اعداد بی‌بعد  $Ste^2 Fo Ra^{0.25}$  استفاده شود داده‌های مربوط به هر زاویه در مقایسه با "شکل 12" به خوبی به یکدیگر نزدیک می‌شوند [4]. حاصل ضرب  $Ste^2 Fo Ra^{0.25}$  بیانگر نقش انتقال حرارت هدایتی در فرآیند ذوب گذرای ماده تغییر فاز دهنده است و  $Ra^{0.25}$  نقش جریان جابجایی آزاد در پیشبرد فرآیند را بیان می‌کند.

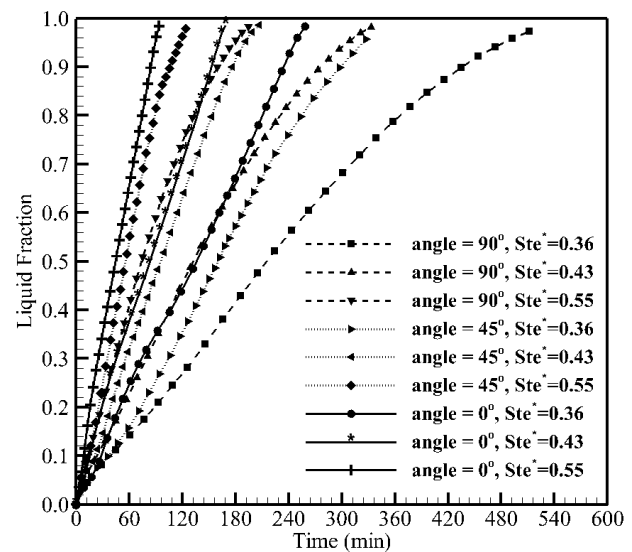
جهت دستیابی به تابعی که بتواند علاوه بر تاثیر عدد استفان، نقش زاویه محفظه را در ذخیره‌سازی انرژی بیان کند لازم است تاثیر زاویه نیز به گروه اعداد بی‌بعد اضافه شود. تحلیل داده‌ها نشان داد در صورتی که که عبارت



**Fig. 12** Variation of absorbed energy with time for different tilt angles and Stefan numbers

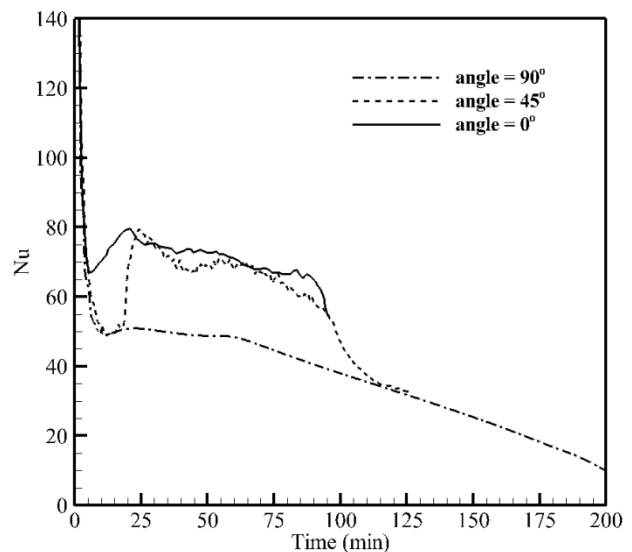
"شکل 12" تغییرات انرژی ذخیره شده در مخزن با زمان برای زوایا و اعداد استفان متفاوت

مشترک شروع شده و متناسب با آن نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت نیز تا پایان فرآیند ذوب به تدریج کاهش می‌یابند. تغییرات عدد ناسلت در محفظه 45° مشابه محفظه عمودی می‌باشد. با این تفاوت که نرخ انتقال حرارت در این محفظه بیشتر از محفظه عمودی است. در محفظه افقی نیز عدد ناسلت نسبت به سایر زوایا بالاتر بوده و روند کاهش نرخ انتقال حرارت با شیب ملایم‌تری رخ می‌دهد. علت بالاتر بودن نرخ انتقال حرارت در این محفظه وجود جریان‌های گردابه‌ای متعدد و تشکیل توده‌های حرارتی می‌باشد. همچنین بر خلاف محفظه عمودی که مساحت سطح مشترک جامد-مایع با زمان کاهش می‌یابد، در این محفظه مساحت سطح مشترک از ابتدا تا پایان فرآیند تقریباً ثابت است که این امر موجب پایداری بیشتر در نرخ انتقال حرارت می‌شود.



**Fig. 10** Variation of liquid fraction with time for different tilt angles and Stefan numbers

"شکل 10" تغییرات کسر مایع با زمان برای مخازن با زوایا و اعداد استفان متفاوت



**Fig. 11** Variation of Nusselt number with time for different tilt angles at  $Ste^* = 0.55$

"شکل 11" تغییرات عدد ناسلت با زمان برای زوایای مختلف مخزن در عدد استفان 0.55

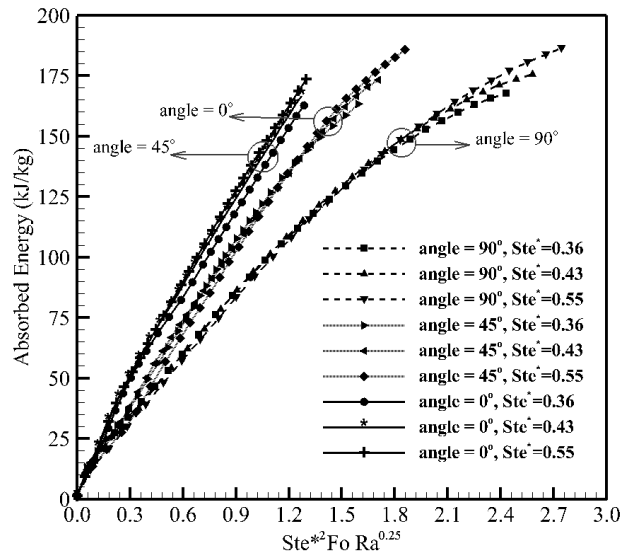
**8- نتیجه گیری**

در تحقیق حاضر فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در محافظه مکعب مستطیل شکل تحت زوایای قرارگیری مختلف به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق را می توان به صورت زیر جمع بندی نمود:

- در شروع فرآیند ذوب مکانیزم غالب انتقال حرارت به روش هدایت حرارتی می باشد که با افزایش ضخامت لایه مایع و غلبه نیروی شناوری بر نیروی ویسکوزیته از نقش هدایت حرارتی کاسته شده و مکانیزم غالب به جریان جابجایی آزاد تغییر می یابد.
- تغییر در زاویه مخزن با تغییر در ساختار جریان جابجایی آزاد در فاز مایع موجب تغییر شکل سطح مشترک جامد-مایع در طی فرآیند ذوب می شود.
- زمان ذوب ماده تغییر فاز دهنده با تغییر زاویه مخزن از 90° به 45° و 0° به ترتیب به میزان 37% و 52% کاهش می دهد. کاهش زمان ذوب با تغییر زاویه مخزن به دلیل تشکیل جریان های گردابه ای و توده های حرارتی در فاز مایع است.
- به ازای یک عدد استفان ثابت با کاهش زاویه مخزن از میزان انرژی ذخیره شده در مخزن کاسته می شود.
- با تعریف گروه اعداد بی بعد شامل استفان، فوریه و رایلی رابطه ای جهت تعیین انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن مکعب مستطیل شکل در محدوده اعداد استفان 0.36 تا 0.55 و زوایای قرارگیری 0° تا 90° ارائه گردید.

**9- فهرست علایم**

- A تابع تخلخل
- C ثابت خمیری ( $\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )
- $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
- e انرژی ذخیره شده در واحد جرم ماده تغییر فاز دهنده ( $\text{Jkg}^{-1}$ )
- Fo عدد فوریه  $\text{Fo} = \frac{\alpha t}{H^2}$
- g شتاب گرانش ( $\text{ms}^{-2}$ )
- H ارتفاع محافظه (m)
- $h_{sl}$  گرمای نهان تغییر فاز ( $\text{Jkg}^{-1}$ )
- K ضریب هدایت حرارتی ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
- Nu عدد ناسلت
- p فشار (Pa)
- Ra عدد رایلی
- $\text{Ste}^*$  عدد استفان اصلاح شده
- t زمان (s)
- T دما ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_{liquidus}$  دمای ذوب ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_{solidus}$  دمای انجماد ( $^{\circ}\text{C}$ )
- u مولفه سرعت در راستای محور x ( $\text{ms}^{-1}$ )
- v مولفه سرعت در راستای محور y ( $\text{ms}^{-1}$ )
- x, y مختصات دکارتی (m)
- علایم یونانی
- $\alpha$  ضریب پخش حرارتی ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )



**Fig.13** Variation of absorbed energy with  $\text{Ste}^*2 \text{Fo Ra}^{0.25}$  for different tilt angles and Stefan numbers

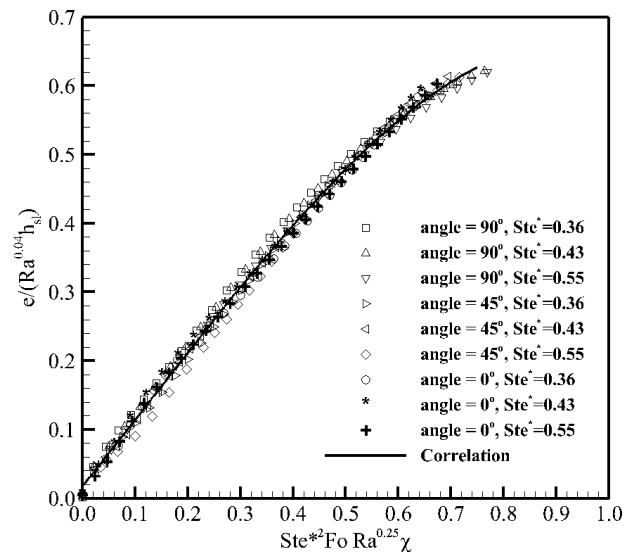
شکل 13 تغییرات انرژی ذخیره شده در مخزن بر حسب  $\text{Ste}^*2 \text{Fo Ra}^{0.25}$  برای زوایا و اعداد استفان متفاوت

تمامی داده ها با دقت خوبی به یکدیگر نزدیک می شوند که نتایج آن در "شکل 14" قابل مشاهده است. در نهایت با استفاده از رگرسیون غیرخطی داده ها، تابع زیر جهت پیش بینی انرژی ذخیره شده در محافظه تحت زوایای گوناگون به دست آمد.

$$\frac{e}{\text{Ra}^{0.04} h_{sl}} = -0.131X^3 - 0.280X^2 + 1.128X \quad (9)$$

که  $X = \text{Ste}^*2 \text{Fo Ra}^{0.25}$  است.

در رابطه فوق مقدار خطای جذر میانگین مربعات بین مقدار پیش بینی شده توسط مدل و داده ها برابر 0.011 و همچنین مقدار  $R^2$  برابر 0.99 می باشد.



**Fig.14** Variation of absorbed energy with  $\text{Ste}^*2 \text{Fo Ra}^{0.25}$  for different tilt angles and Stefan numbers

شکل 14 تغییرات انرژی ذخیره شده در مخزن بر حسب  $\text{Ste}^*2 \text{Fo Ra}^{0.25}$  برای زوایا و اعداد استفان متفاوت

- storage unit - an experimental study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 112, pp. 1497–1509, 2016.
- [9] S. C. C. Fok, W. Shen, F. L. L. Tan, Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 109–117, 2010.
- [10] X. Q. Wang, A. S. Mujumdar, C. Yap, Effect of orientation for phase change material (PCM)-based heat sinks for transient thermal management of electric components, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 801–808, 2007.
- [11] R. Baby, C. Balaji, Experimental investigations on thermal performance enhancement and effect of orientation on porous matrix filled PCM based heat sink, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 27–30, 2013.
- [12] S. Khanna, K. S. Reddy, T. K. Mallick, Performance analysis of tilted photovoltaic system integrated with phase change material under varying operating conditions, *Energy*, Vol. 133, pp. 887–899, 2017.
- [13] B. Kamkari, H. Shokouhmand, F. Bruno, Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 72, pp. 186–200, 2014.
- [14] V. R. Voller, C. Prakash, A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1709–1719, 1987.
- [15] A. D. Brent, V. R. Voller, K. J. Reid, Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 297–318, 1988.
- [16] H. Shmueli, G. Ziskind, R. Letan, Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 4082–4091, 2010.
- [17] C. Gau, R. Viskanta, Melting and solidification of a pure metal on a vertical wall, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 174–181, 1986.
- [18] C. J. Ho, R. Viskanta, Heat transfer during melting from an isothermal vertical wall, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 12–19, 1984.
- [19] C. Benard, D. Gobin, F. Martinez, Melting in rectangular enclosures: experiments and numerical simulations, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 107, No. 4, pp. 794–803, 1985.
- [20] N. Sharifi, C. W. Robak, T. L. Bergman, A. Faghri, Three-dimensional PCM melting in a vertical cylindrical enclosure including the effects of tilting, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 798–806, 2013.
- [21] Z. Gong, A. S. Mujumdar, Numerical study of interaction between the fluid structure and the moving interface during the melting from below in a rectangular closed enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 17, pp. 2573–2580, 1998.
- [22] M. Fteiti, S. Ben Nasrallah, Numerical study of interaction between the fluid structure and the moving interface during the melting from below in a rectangular closed enclosure, *Computational Mechanics*, Vol. 35, No. 3, pp. 161–169, Nov. 2004.
- [23] C. W. Robak, T. L. Bergman, A. Faghri, Enhancement of latent heat energy storage using embedded heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 3476–3484, Jul. 2011.
- [24] Y. Kozak, T. Rozenfeld, G. Ziskind, Close-contact melting in vertical annular enclosures with a non-isothermal base: Theoretical modeling and application to thermal storage, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 72, pp. 114–127, May 2014.
- [25] V. Shatikian, G. Ziskind, R. Letan, Numerical investigation of a PCM-based heat sink with internal fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 3689–3706, 2005.

$\beta$  ضریب انبساط حجمی ( $K^{-1}$ )

$\gamma$  کسر مایع

$\mu$  لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )

$\rho$  چگالی ( $kgm^{-3}$ )

$\theta$  زاویه محفظه

$\Delta H$  محتوای گرمای نهان ماده ( $Jkg^{-1}$ )

$\epsilon$  عدد ثابت بسیار کوچک

زیر نویس

l مایع

m ذوب

o اولیه

s جامد

w دیوار

## 10- تقدیر و تشکر

تحقیق فوق برگرفته از طرح پژوهشی (شبهه‌سازی عددی بهبود فرآیند ذخیره سازی انرژی حرارتی نهان با افزودن پره تحت زوایای قرارگیری مختلف مخزن) می‌باشد که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری به اجرا درآمده است. بدین وسیله از آن واحد دانشگاهی تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

## 11- مراجع

- [1] J. Pereira da Cunha, P. Eames, Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials - A review, *Applied Energy*, Vol. 177, pp. 227–238, 2016.
- [2] D. Zhou, C. Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy*, Vol. 92, pp. 593–605, 2012.
- [3] H. Shokouhmand, B. Kamkari, Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 50, pp. 201–212, 2013.
- [4] B. Kamkari, H. Shokouhmand, Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 78, pp. 839–851, 2014.
- [5] S. Amirabdollahian, H. Jannesari, Enhancement of latent heat thermal storage performance by changing the direction of natural convection flow, *Moadares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 267–275, 2017.
- [6] M. J. Allen, N. Sharifi, A. Faghri, T. L. Bergman, Effect of inclination angle during melting and solidification of a phase change material using a combined heat pipe-metal foam or foil configuration, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 80, pp. 767–780, 2015.
- [7] S. Seddegh, X. Wang, A. D. Henderson, A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 93, pp. 348–358, 2016.
- [8] N. Kousha, M. J. Hosseini, M. R. Aligoodarz, R. Pakrouh, R. Bahrapoury, Effect of inclination angle on the performance of a shell and tube heat