



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

بابک کامکاری^{1*}، محمد وهابی²

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

چکیده

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

جایجایی طبیعی

ذخیره سازی انرژی نهان

فرآیند ذوب

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 جایجایی 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 جایجایی 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^{1*}, Mohammad Vahabi²

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:

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

تحقیقات پیشین نشان داده اند که تشکیل جریان های جابجایی آزاد در فاز مایع از ماده تغییر فاز دهنده نقش مهمی در فرآیند ذوب ایفا می کند [4,3]. شکوهمند و کامکاری [3] فرآیند ذوب اسید لوریک را در یک محفظه مکعب مستطیل شکل به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. تصویر برداری از فرآیند ذوب نشان داد که تشکیل جریان جابجایی آزاد در داخل محفظه نقش عمده ای در انتقال حرارت از دیواره گرم به فاز جامد ایفا می کند. 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 پره های افقی بر نرخ ذوب و تشکیل جریان های جابجایی آزاد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط با افزایش تعداد پره ها به دلیل ممانعت از حرکت جریان مایع بالا رفته کاهش می یابد. با این وجود، نرخ انتقال حرارت به دلیل افزایش سطح تبادل حرارت افزایش می یابد تا جایی که افزودن یک و سه پره به مخزن زمان ذوب را به ترتیب 18% و 37% کاهش می دهد. امیر عبداللهیان و جان نثاری [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 لوله ها پایین محفظه جریان جابجایی آزاد در محفظه بهبود یافته و نرخ ذوب افزایش می یابد.

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 می باشد. علاوه بر موارد بیان شده تغییر زاویه قرارگیری مخزن نیز می تواند 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 استوانه ای تحت زوایای مختلف به صورت آزمایشگاهی مطالعه نمودند. همچنین به منظور 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 نمی پذیرد. چرا که مکانیزم های قالب انتقال حرارت در فرآیندهای ذوب و انجماد به ترتیب جابجایی آزاد و هدایت حرارتی می باشند. همچنین به کارگیری لوله گرمایی با کاهش زمان های 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 آزاد سازی انرژی را در یک مبدل دو لوله ای در موقعیت های عمودی و افقی به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که به کارگیری مبدل در موقعیت افقی عملکرد حرارتی بهتری را نسبت به مبدل عمودی در فرآیند ذخیره سازی انرژی نشان می دهد. همچنین در فرآیند آزاد سازی انرژی زاویه مخزن تاثیر قابل ملاحظه ای 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.

علاوه بر بررسی تاثیر زاویه در محفظه های ذخیره کننده انرژی، تحقیقاتی نیز بر روی دفع کننده های گرم و سلول های خورشیدی حاوی ماده تغییر فاز دهنده نیز انجام گرفته است. فوک و همکاران [9] تاثیر به کارگیری ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد حرارتی دفع کننده گرم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که تحت اعمال شار حرارتی پایین، زاویه دفع کننده گرم 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] به دست آمد. در تحقیقی که توسط بابی و بالاجی [11] به صورت آزمایشگاهی انجام گرفت تاثیر به کارگیری همزمان ماده تغییر فاز دهنده و محیط متخلخل فلزی بر عملکرد حرارتی دفع کننده گرم تحت زوایای مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که به کارگیری محیط متخلخل موجب بهبود عملکرد حرارتی می شود در حالی که زاویه قرارگیری دفع کننده گرم تاثیر قابل ملاحظه ای 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 می شود. خانا و همکاران [12] راندمان یک سیستم فتوولتائیک را به همراه ماده تغییر فاز دهنده تحت زوایای مختلف به صورت 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 می دهد. همچنین افزایش زاویه سیستم از 0 به 90 درجه با کاهش دمای سطح سلول از 43.4 به 35.4 درجه سانتی گراد موجب افزایش راندمان آن از 18.1% به 19% می شود.

با توجه به مطالب بیان شده، تاکنون تحقیق جامعی در رابطه با تاثیر زاویه مخزن با هندسه مکعب مستطیل شکل بر چگونگی تشکیل جریان های 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 به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار می گیرد. همچنین تلاش شده است با معرفی گروه اعداد بی بعد، رابطه ای جهت تعیین انرژی حرارتی ذخیره شده در مخازن تحت زوایای مختلف 0 الی 90° ارائه گردد.

در این تحقیق، ابتدا پیشرفت فرآیند ذوب به صورت تجربی با تصویربرداری از ماده تغییر فاز دهنده مطالعه می شود، سپس با استفاده از مدل سازی عددی، تغییرات کسر مایع با زمان، ضریب انتقال حرارت جابجایی و انرژی ذخیره شده در مخزن برای زوایای گوناگون به دست می آیند. همچنین تاثیر تغییرات دمای دیواره نیز بر نرخ ذوب مورد بررسی قرار می گیرد.

2- دستگاه آزمایشگاهی و روند انجام آزمایش ها

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 آزمایش ها آشکار سازی چگونگی پیشرفت سطح مشترک جامد-مایع می باشد، 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 می باشند. برای جلوگیری از اتلاف حرارت، سطوح خارجی محفظه با عایق حرارتی پوشانده شدند. برای اعمال شرط مرزی دما

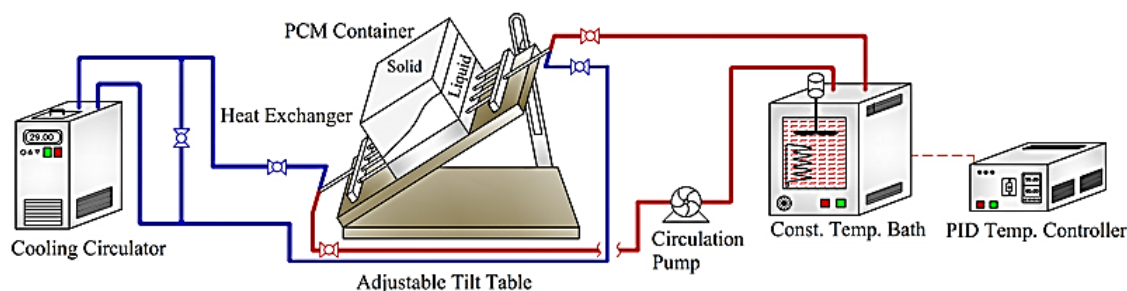


Fig. 1 A schematic view of the experimental setup

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 ³)

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

محاسبه کسر مایع در هر لحظه به کمک پردازش تصاویرهای گرفته شده در نرم افزار متلب³ انجام می گیرد. در ابتدا تصویر از حالت رنگی به سیاه-سفید تبدیل می شود به نحوی که فاز مایع به رنگ مشکی و فاز جامد سفید رنگ می شوند. این تصویر در حقیقت ماتریسی با اعضای صفر و یک است که مقادیر صفر مربوط به پیکسل های مشکی و مقادیر یک به پیکسل های سفید اختصاص می یابند. نسبت تعداد پیکسل های مشکی به کل پیکسل های تصویر مقدار کسر مایع در هر لحظه را بیان می کند.

3- معادلات ریاضی حاکم

در مطالعه حاضر جریان سیال و انتقال حرارت در داخل محفظه به صورت دو بعدی در نظر گرفته می شود. همچنین جریان آرام و تراکم ناپذیر فرض می شود. به منظور مدل سازی عددی فرآیند تغییر فاز جامد-مایع از روش انتالپی-تخلخل⁴ استفاده می شود [14]. در این روش تمامی ناحیه حل به صورت یک ناحیه متخلخل در نظر گرفته می شود به نحوی که مقدار ضریب تخلخل در فاز مایع برابر با یک و در فاز جامد برابر صفر محاسبه می شود. سطح مشترک جامد-مایع را ناحیه خمیری⁵ تشکیل می دهد که در این ناحیه ضریب تخلخل بین صفر تا یک تغییر می کند. در این روش از یک شبکه ثابت استفاده شده و مکان سطح مشترک جامد-مایع به صورت ضمنی در هر لحظه تعیین می شود. در ادامه معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی بیان می شوند:

معادله پیوستگی:

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

³ Matlab⁴ Enthalpy-Porosity⁵ 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 ترموکوپل ها در داخل محفظه جهت تعیین رفتار حرارتی ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است [3,4,13]. در این مطالعه به منظور حذف تاثیر ترموکوپل ها به عنوان جسم خارجی بر ساختار جریان های 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 لوریک¹ به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده می شود. اسید لوریک ماده ای سفید رنگ است که تحت عنوان روغن نارگیل نیز شناخته می شود و در دسته بندی مواد تغییر فاز دهنده در گروه مواد آلی غیر پارافینی (اسیدهای چرب²) قرار می گیرد. 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 می شود تا دمای ماده تغییر فاز دهنده به صورت یکنواخت به 26 °C برسد. سپس آب گرم در دمای 70 °C وارد مبدل حرارتی

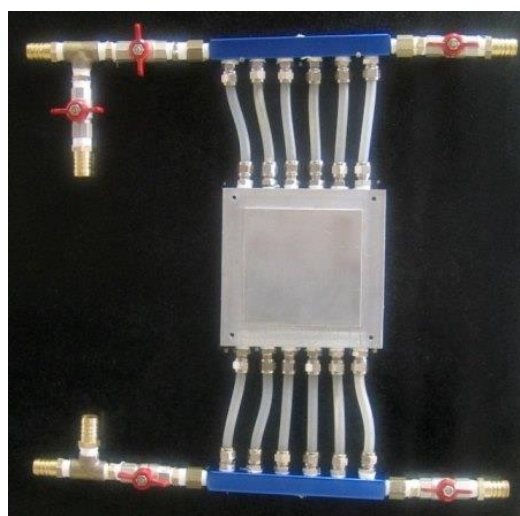


Fig. 2 Photograph of heat exchanger with constant wall temperature

شکل 2 نمایی از مبدل حرارتی با سطح دما ثابت

¹ Lauric acid² Fatty acids

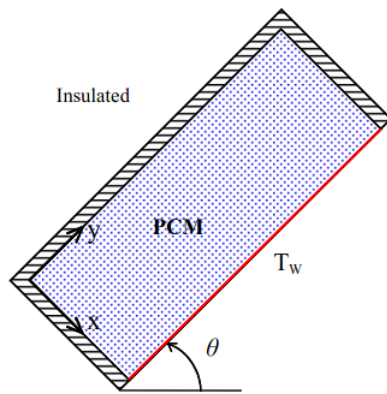


Fig.3 A schematic view of the phase change material enclosure

شکل 3 نمایی شماتیک از محفظه حاوی ماده تغییر فاز دهنده

به کار گرفته می شوند. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب برابر با 10^{-4} ، 10^{-5} و 10^{-6} در نظر گرفته می شوند. جهت بررسی استقلال نتایج از شبکه، سه شبکه با ابعاد 80×200 ، 100×250 و 120×300 مورد مطالعه قرار گرفتند. "شکل 4" تغییرات کسر مایع با زمان را برای سه شبکه محاسباتی مختلف نشان می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده حداکثر اختلاف کسر مایع بین شبکه 120×300 با شبکه های 80×200 و 100×250 به ترتیب برابر با 1.2% و 0.6% است. بنابراین به منظور حفظ دقت و کاهش زمان محاسباتی شبکه با ابعاد 100×250 مورد استفاده قرار گرفت. مطالعه ای مشابه جهت تعیین گام زمانی مناسب بین گام های 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 مدل سازی عددی حاضر نتایج عددی با نتایج به دست آمده از آزمایش مقایسه می شوند. "شکل 5" نتایج عددی و تجربی برای تغییرات کسر مایع با زمان را در سه زاویه 45، 90 و 0° مورد مقایسه قرار می دهد. حداکثر اختلاف بین نتایج حل عددی و نتایج تجربی برای زوایای 45، 90 و 0° به ترتیب برابر با 2.5%، 5% و 6.5% است. به منظور اطمینان بیشتر از صحت و عملکرد مناسب مدل سازی عددی، فرآیند ذوب فلز گالیوم مطابق شرایط اولیه و مرزی بیان شده در تحقیق

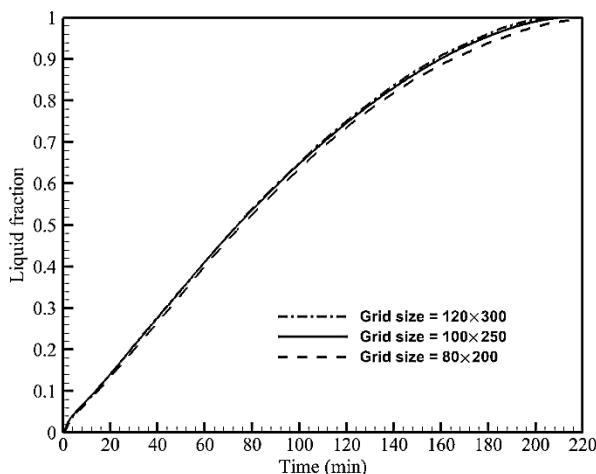


Fig.4 Liquid fraction versus time for three different grid sizes

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

معادله بقای مومنتوم 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 مومنتوم 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 مومنتوم عبارت A ، بیانگر تابع تخلخل است که توسط برنت و همکاران [15] با الهام از رابطه کوزنی-کارمن¹ 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 می شود [16]. همچنین ε ، 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 می شود:

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

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 می دهد. در این تحقیق دیواره سمت راست محفظه دما ثابت فرض می شود و سایر وجه ها عایق می باشند. مدل سازی عددی برای سه زاویه 45، 90 و 0° در دماهای دیواره 55، 60 و 70 °C انجام می شوند. دمای اولیه ماده تغییر فاز دهنده و کسر مایع به ترتیب برابر با 26 °C و 0 در نظر گرفته می شوند.

5- نحوه انجام محاسبات

در مطالعه عددی حاضر، حل معادلات حاکم به کمک نرم افزار انسیس فلوئنت انجام می شود. از مدل جریان آرام برای ویسکوزیته و الگوریتم سیمپل² برای کوپل کردن میدان سرعت و فشار استفاده می شود. به منظور گسسته سازی عبارت های پخش و جابجایی به ترتیب روش های تفاضل مرکزی³ و کوئیک⁴

¹ Kozney -Carman

² SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)

³ Central difference

⁴ Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics

"شکل 7" فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده را در محفظه عمودی نشان می دهد. در شروع فرآیند ذوب پیشروی سطح جامد-مایع تقریباً به صورت یکنواخت و موازی دیواره گرم انجام می گیرد که این امر نشان دهنده وجود انتقال حرارت هدایتی به عنوان مکانیزم غالب انتقال حرارت در ابتدای فرآیند ذوب می باشد. با گذشت زمان، پیشروی سطح مشترک از حالت یکنواخت خارج شده و نرخ ذوب بالاتری در بالای محفظه دیده می شود. 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 می کند، پس از رسیدن به دیواره بالایی محفظه به سمت چپ منحرف شده و با برخورد به فاز جامد موجب ذوب آن می شود. سپس سرد شده و در امتداد سطح مشترک به سمت پایین حرکت می کند. بدین ترتیب یک جریان چرخشی در داخل فاز مایع شکل می گیرد. با گذشت حدود 60 دقیقه از شروع فرآیند ذوب، سطح مشترک جامد-مایع به دیواره مقابل محفظه می رسد و انحنا آن از محدب به مقعر تغییر می یابد. از این لحظه به بعد همان طور که خطوط جریان نیز نشان می دهند از سرعت جریان جابجایی آزاد در قسمت بالای محفظه کاسته می شود. 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 نشان دهنده تضعیف جریان سیال در این قسمت است. همچنین توزیع دما نیز به خوبی نشان می دهد که سیال از لحاظ دمایی به صورت لایه ای¹ درآمده به نحوی که لایه های گرمتر بر روی لایه های سردتر قرار می گیرند.

"شکل 8" فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده را در محفظه 45° نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در 10 دقیقه ابتدایی، فرآیند ذوب در محفظه 45° مشابه محفظه 90° است. با گذشت زمان (20 دقیقه) نرخ ذوب در پایین محفظه افزایش می یابد و سطح مشترک مقعر شکل می شود. همان طور که خطوط جریان نشان می دهند، 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 می دهد که مدل سازی انجام شده به خوبی موقعیت و شکل سطح مشترک را در 40 دقیقه ابتدایی ذوب پیش بینی می کند. با گذشت زمان و افزایش ضخامت مایع از دقت حل عددی در پیش بینی شکل سطح مشترک اندکی کاسته می شود که آن را می توان به تشکیل ساختارهای سه بعدی در فاز مایع نسبت داد. لازم به ذکر است که رفتاری مشابه در تشکیل ساختارهای سه بعدی 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 می دهد. در شروع فرآیند ذوب، لایه ای از مایع با ضخامت بسیار کم در مجاورت سطح گرم ایجاد می شود که یکنواختی آن بیانگر نقش غالب هدایت حرارتی در فاز مایع می باشد. پس از گذشت 10 دقیقه از شروع ذوب، سطح مشترک جامد-مایع مواج می گردد. خطوط جریان به خوبی نشان می دهند که موجی شدن سطح مشترک به دلیل تشکیل جریان های گردابه ای است. بدین ترتیب که جریان گرم در مرز مشترک هر دو سلول چرخشی که در خلاف جهت یکدیگر می چرخند به سمت بالا حرکت کرده و با برخورد به سطح

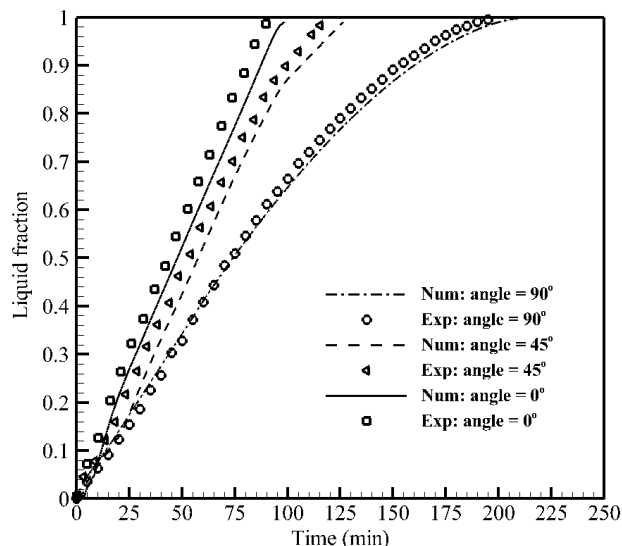


Fig.5 Comparison of melt fraction variation with time between experimental and numerical results for three different tilt angles of 90, 45 and 0°

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] مدل سازی شده و نتایج در "شکل 6" مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود مدل سازی عددی به خوبی موقعیت مکانی و شکل جبهه مذاب را پیش بینی می کند.

7- نتایج و بحث

"شکل های 7 تا 9" توزیع دما، خطوط جریان و پیشروی سطح مشترک جامد-مایع را در زوایای مختلف 90، 45 و 0° برای حالتی که دمای دیواره برابر با 70 °C است را در زمان های مختلف نشان می دهند. همچنین در این شکل ها 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 می باشند.

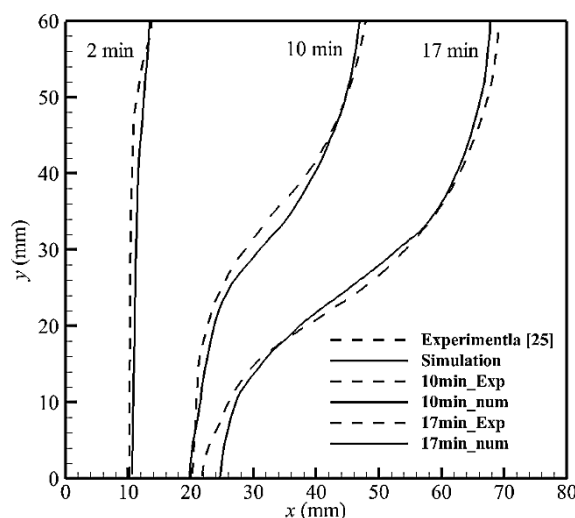


Fig. 6 Comparison between numerical and experimental results for melt front evolution

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

¹ Stratified

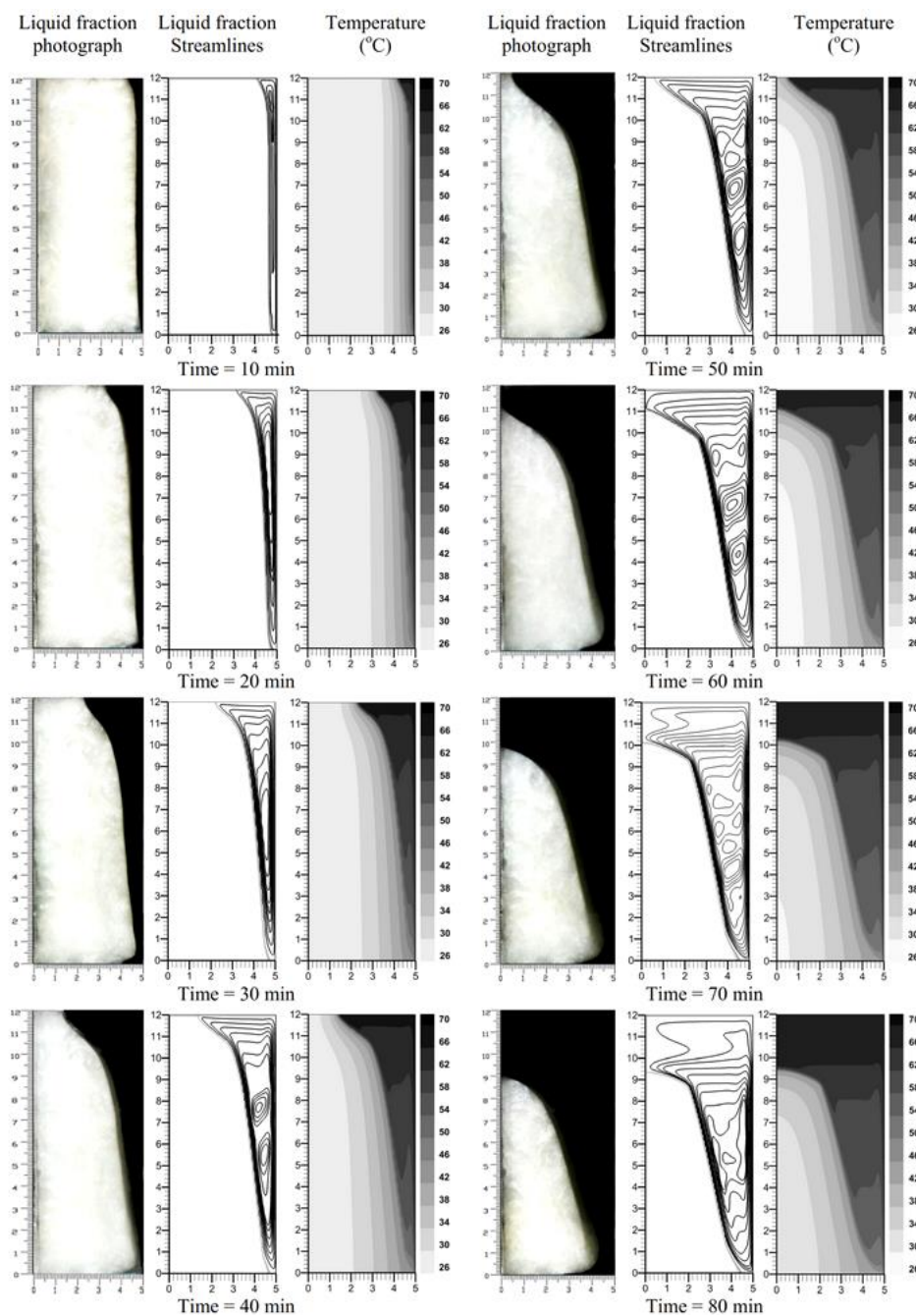


Fig. 7 Temperature contours, streamlines and solid-liquid interface evolution during melting in vertical enclosure

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 تغییر فاز 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 می دهد. در تحقیق حاضر دمای اولیه ماده تغییر فاز دهنده 20°C پایین تر از دمای ذوب آن انتخاب شده است. بنابراین از عدد استفان¹ 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 می شود سپس با از دست دادن گرما مجدداً به سمت دیواره گرم باز می گردد. کانتورهای دما نیز مراکز تشکیل توده های حرارتی و جریان گرم بالارونده را نشان می دهند. با گذشت زمان گردابه های کوچک به یکدیگر می پیوندند و گردابه های بزرگتری تشکیل می شوند. مقایسه تصاویر ذوب و میدان فاز ناشی از حل عددی نشان می دهد که مدل سازی انجام شده به خوبی پیشروی و موقعیت مکانی سطح مشترک را پیش بینی می کند اگرچه در محل تشکیل برآمدگی های سطح مشترک از دقت کمتری برخوردار است. علت این امر را می توان به ایجاد سلول های جابجایی بنارد نسبت داد که رفتاری سه بعدی را از خود نشان می دهند. همچنین همان طور که در تصاویر مشاهده می شود، عدم تقارن در شکل سطح

¹ Stefan number

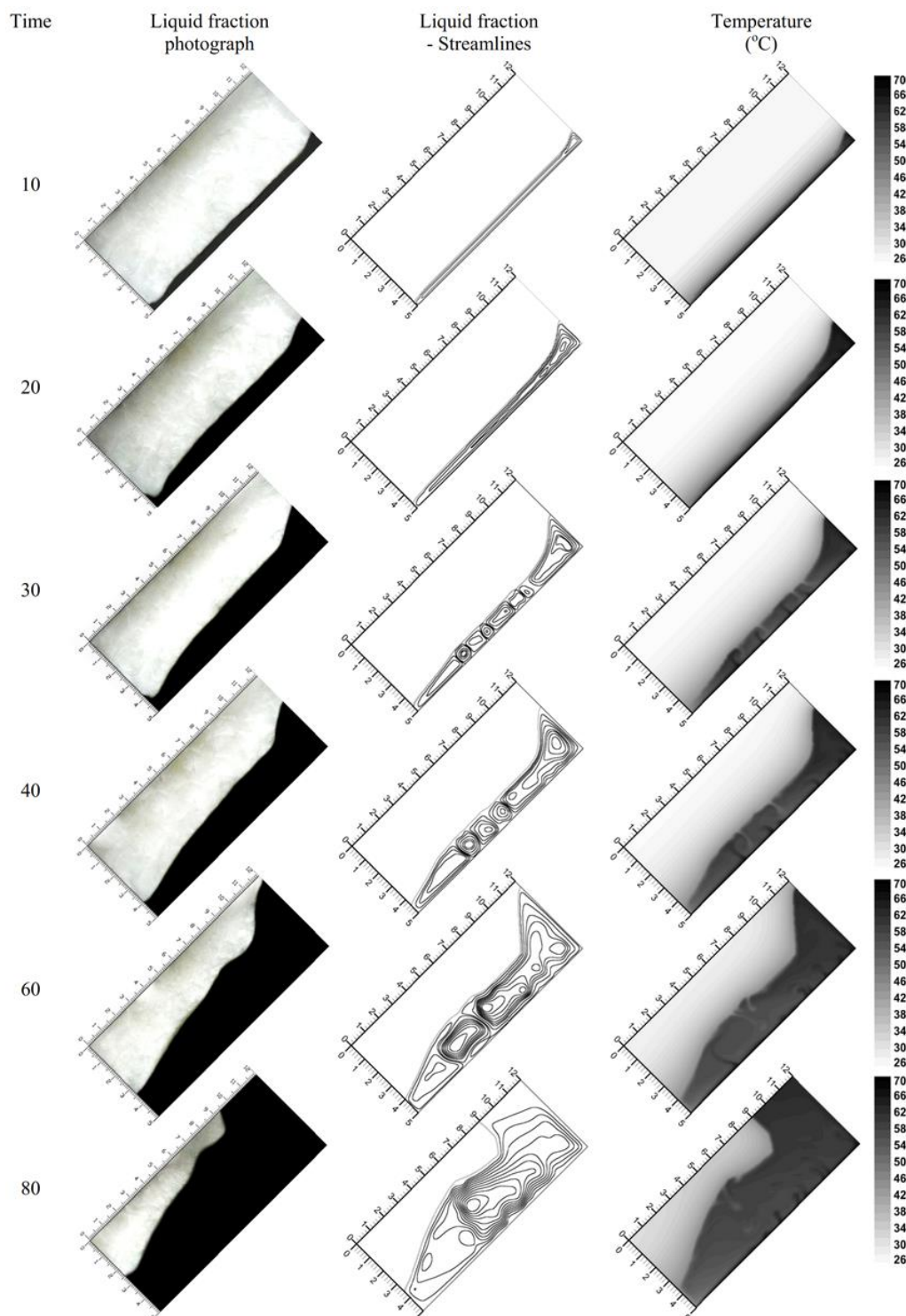


Fig. 8 Temperature contours, streamlines and solid-liquid interface evolution during melting in 45° inclined enclosure

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 و

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

در "شکل 10" اعداد استفان 0.36، 0.43 و 0.55 به ترتیب متناظر با دماهای دیواره 55، 60 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

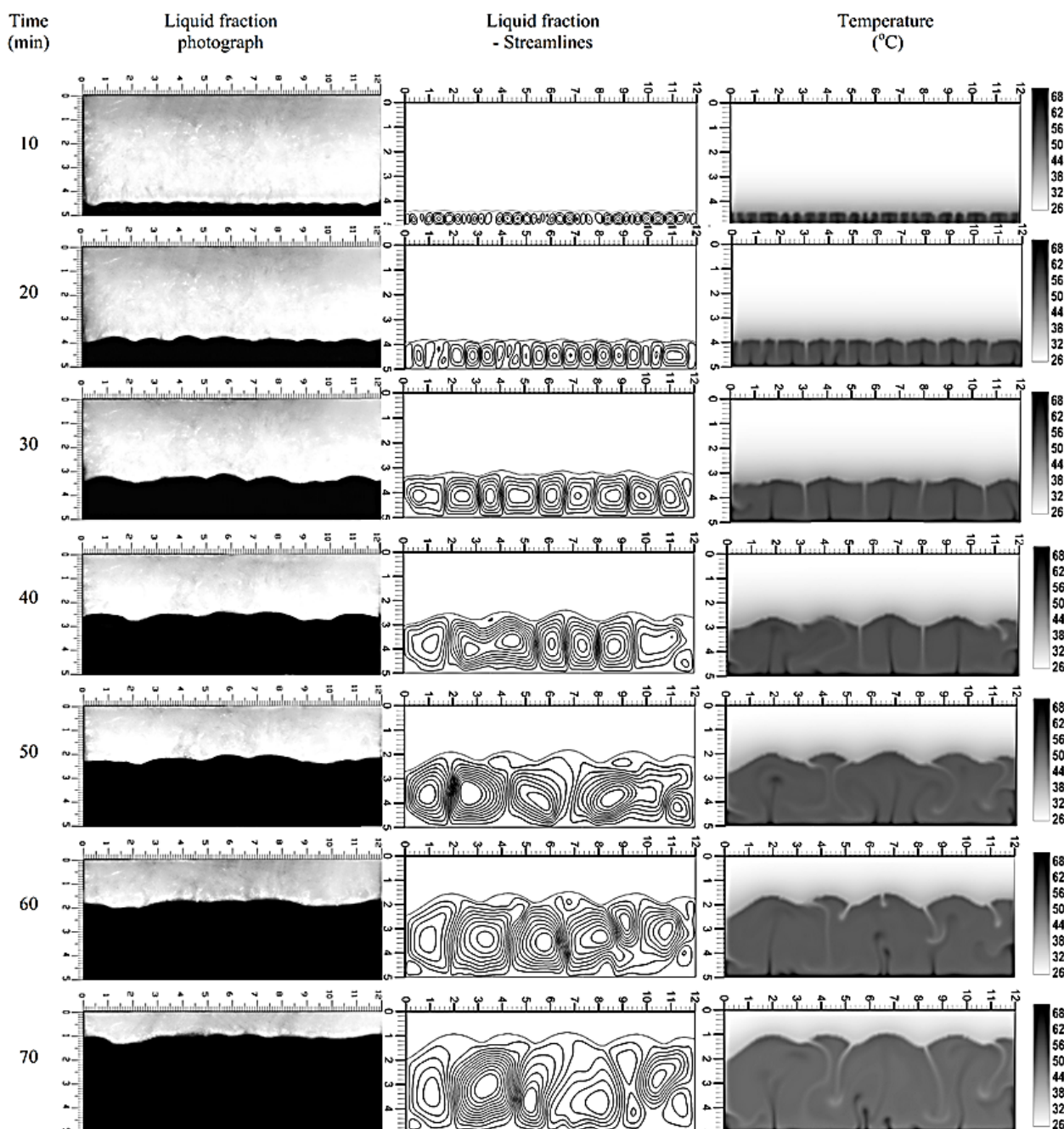


Fig. 9 Temperature contours, streamlines and solid-liquid interface evolution during melting in horizontal enclosure

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 می گیرد. این پدیده را ذوب تماسی¹ 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 می کند و نرخ انتقال حرارت افزایش می یابد. 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 محفظه های مایل و افقی نسبت به محفظه عمودی را می توان به تقویت شدت جریان جابجایی آزاد در محفظه و تشکیل توده های حرارتی نسبت داد.

"شکل 11" تغییرات عدد ناسلت دیواره گرم را برای زوایای مختلف در عدد استفاد 0.55 نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود برای تمامی زوایا مقدار عدد ناسلت از یک مقدار ماکزیمم شروع شده و کاهش می یابد. سپس افزایش یافته و پس از گذراندن یک دوره نسبت ثابت مجدداً کاهش می یابد. دلیل افت ناگهانی عدد ناسلت در لحظات ابتدایی ذوب را که برای تمامی زوایا قابل مشاهده است را می توان با توجه به مکانیزم انتقال حرارت

¹ Close contact melting

"شکل 12" تغییرات انرژی ذخیره شده در محفظه با زمان را برای زوایا و اعداد استفان مختلف نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش عدد استفان میزان انرژی ذخیره شده در محفظه نیز افزایش می یابد. 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 176، 190 و 190 kJ است. همچنین به ازای یک عدد استفان ثابت با کاهش زاویه مخزن از میزان انرژی ذخیره شده در مخزن کاسته می شود. 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 190، 184 و 171 kJ است.

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

"شکل 13" تغییرات انرژی ذخیره شده در محفظه را برحسب گروه اعداد بی بعد $Ste^{*2} Fo Ra^2$ نشان می دهد. آنالیز نتایج به دست آمده نشان داد در صورتیکه به جای زمان برحسب ثانیه از ترکیب گروه اعداد بی بعد $Ste^{*2} Fo Ra^{0.25}$ استفاده شود داده های مربوط به هر زاویه در مقایسه با "شکل 12" به خوبی به یکدیگر نزدیک می شوند [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 می کند.

جهت دستیابی به تابعی که بتواند علاوه بر تاثیر عدد استفان، نقش زاویه محفظه را در ذخیره سازی انرژی بیان کند لازم است تاثیر زاویه نیز به گروه اعداد بی بعد اضافه شود. تحلیل داده ها نشان داد در صورتی که که عبارت

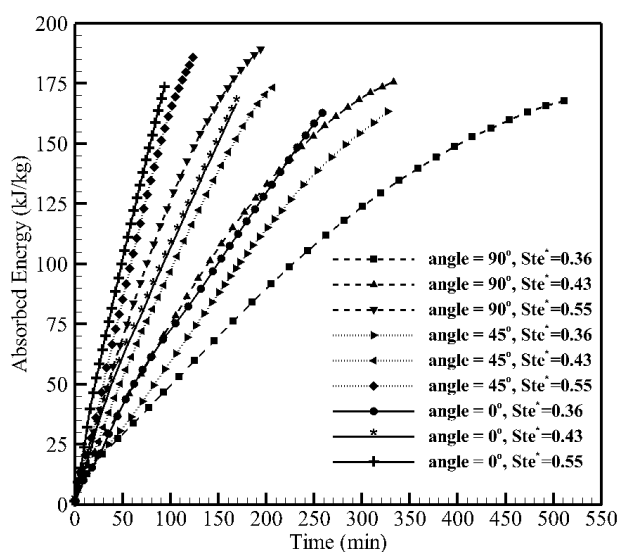


Fig. 12 Variation of absorbed energy with time for different tilt angles and Stefan numbers

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 می یابند. تغییرات عدد ناسلت در محفظه 45° مشابه محفظه عمودی می باشد. 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 می دهد. علت بالاتر بودن نرخ انتقال حرارت در این محفظه وجود جریان های گردابه ای متعدد و تشکیل توده های حرارتی می باشد. همچنین بر خلاف محفظه عمودی که مساحت سطح مشترک جامد-مایع با زمان کاهش می یابد، در این محفظه مساحت سطح مشترک از ابتدا تا پایان فرآیند تقریباً ثابت است که این امر موجب پایداری بیشتر در نرخ انتقال حرارت می شود.

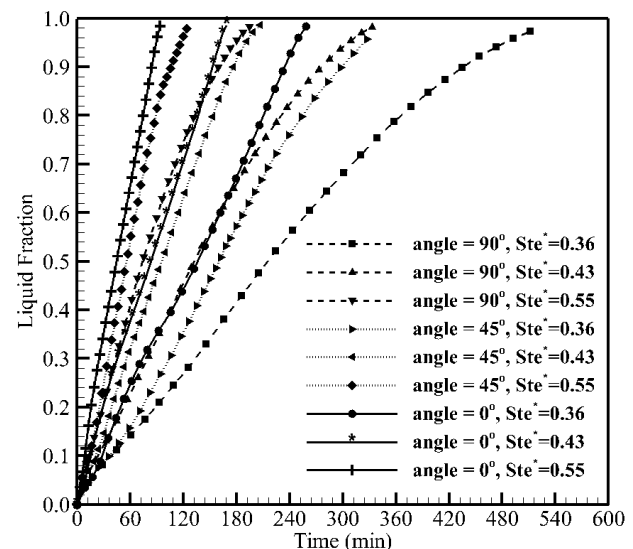


Fig. 10 Variation of liquid fraction with time for different tilt angles and Stefan numbers

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

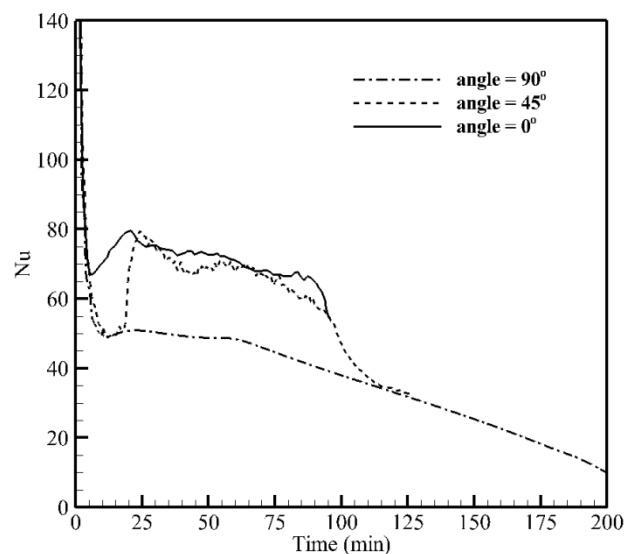


Fig. 11 Variation of Nusselt number with time for different tilt angles at $Ste^* = 0.55$

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 محفظه 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 علائم

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 (Jkg^{-1})
$\text{Fo} = \frac{\alpha t}{H^2}$	عدد فوریه
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
H	ارتفاع محفظه (m)
h_{sl}	گرمای نهان تغییر فاز (Jkg^{-1})
K	ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
Nu	عدد ناسلت
p	فشار (Pa)
Ra	عدد رایلی
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 (ms^{-1})
v	مولفه سرعت در راستای محور y (ms^{-1})
x, y	مختصات دکارتی (m)
علائم یونانی	
α	ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})

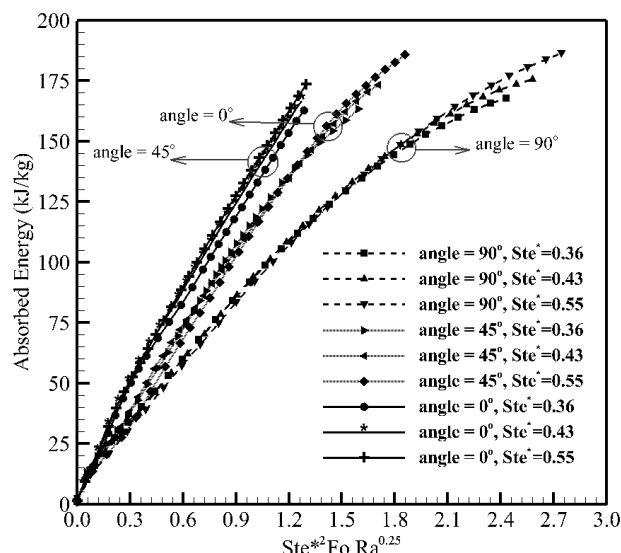


Fig.13 Variation of absorbed energy with $\text{Ste}^*\text{FoRa}^{0.25}$ for different tilt angles and Stefan numbers

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

به گروه اعداد بی بعد اضافه شود 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 محفظه 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 $X = \text{Ste}^*\text{FoRa}^{0.25}\chi$ 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.

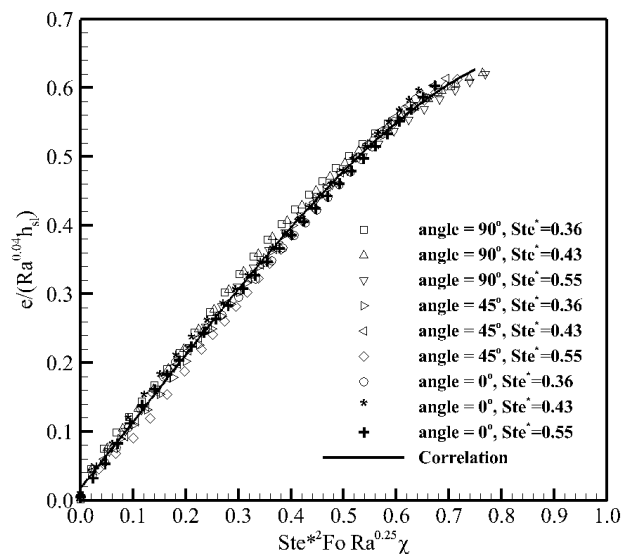


Fig.14 Variation of absorbed energy with $\text{Ste}^*\text{FoRa}^{0.25}\chi$ for different tilt angles and Stefan numbers

شکل 14 تغییرات انرژی ذخیره شده در مخزن بر حسب $\text{Ste}^*\text{FoRa}^{0.25}\chi$ 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.

β ضریب انبساط حجمی (K^{-1})

γ کسر مایع

μ لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)

ρ چگالی (kgm^{-3})

θ زاویه محفظه

ΔH محتوای گرمای نهان ماده (Jkg^{-1})

ε 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 (شبیه سازی عددی بهبود فرآیند ذخیره سازی انرژی حرارتی نهان با افزودن پره تحت زوایای قرارگیری مختلف مخزن) می باشد 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 می آید.

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. Amirabdoalian, H. Jannesari, Enhancement of latent heat thermal storage performance by changing the direction of natural convection flow, *Modares 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. Bahrampoury, Effect of inclination angle on the performance of a shell and tube heat