# روش نوینی جهت بررسی آزمایشگاهی ذوب نامقید پارافین بر اساس تکنیک پردازش تصویر و مقایسه با نتایج مدلسازی عددی

اشكان بروجرديان	دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، ashkan.boroojerdian@gmail.com
حسين نعمتى*	دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، h.nemati@miau.ac.ir
احسان سلاحي	استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، selahi@miau.ac.ir

#### چکیدہ

بر اساس شواهد تجربی، وجود ترموکوپل در مواد تغییر فاز دهنده جامد بر نتایج تأثیر می گذارد و رژیم ذوب را از ذوب نامقید به ذوب مقید تغییر می دهد. در این مطالعه، روش جدیدی برای اندازه گیری مستقیم کسر جرمی مایع مواد تغییر فاز دهنده در طول ذوب بر اساس تکنیک پردازش تصویر پیشنهاد شد. در این روش در زمان های متوالی تصاویری از فرآیند ذوب در شرایط کنترل شده تهیه می شود. با انجام تکنیک های پردازش تصویر، مرز هسته جامد تعیین می شود و مساحت ناحیه محصور محاسبه و بر سطح اولیه فاز جامد تقسیم می شود. این روش برای ذوب نامقید در داخل یک سیلندر افقی اعمال شد. مساله نیز به صورت عددی با روش چند فازی (VOF) شبیه سازی شد و تغییر در حجم کل پارافین (مجموع حجم فازهای جامد و مایع) به دلیل تفاوت بین چگالی جامد و مایع لحاظ گردید. تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی مشاهده شد. شکل و اندازههای هسته جامد در تصاویر تحربی و نتایج عددی در زمانهای مختلف به خوبی مطابقت دارند.

**واژه های کلیدی:** مواد تغییر فاز دهنده، پردازش تصویر، جریان چند فازی، اندازه گیری بدون تماس، ذوب نامقید، ذوب مقید.

### A Novel Method for Experimental Investigation of the Paraffin Unconstrained Melting Based on Image Processing Technique and Comparison with Numerical Results

A. Brojerdian	Department of Mechanics, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran
H. Nemati	Department of Mechanics, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran
Ehsan Selahi	Department of Mechanics, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

#### Abstract

Based on experimental evidence, the presence of thermocouples in solid phase change materials affects the results and changes the melting regime from unconstrained melting to constrained melting. In this study, a new method for direct measurement of liquid mass fraction of phase change materials during melting was proposed based on the image processing technique. In this method, images of the melting process are prepared in controlled conditions at successive times. By performing image processing techniques, the boundary of the solid core is determined and the enclosed surface area is calculated and divided by the initial surface of the solid phase. This method was applied to unconfined paraffin melting inside a horizontal cylinder. The problem was also numerically simulated by the multi-phase method (VOF) and the change in the total volume of paraffin (total volume of solid and liquid phases) due to the difference between solid and liquid density was taken into account. A good agreement between numerical and experimental results was observed. The shape and sizes of the solid core in the experimental images and the numerical results at different times match well.

Keywords: Phase change materials, Image processing technique, Multiphase flow, Non-contact measurement, Unconstrained melting, Constrained melting.

#### ۱– مقدمه

می توان به رژیم های ذوب مقید و ذوب نامقید طبقه بندی کرد. در یک رژیم ذوب مقید که معمولاً در محیط های متخلخل [۱۳، ۱۳] یا بین پرهها [۱۴] رخ می دهد، ماده تغییر فاز دهنده جامد نمی تواند آزادانه حرکت کند زیرا در داخل منافذ یا حفرههای کوچک و یا فضای محدود بین دیواره پرههای، گیر می افتد. از سوی دیگر، در رژیم های ذوب نامقید [۱۵، ۱۶]، هسته جامد می تواند در فاز مایع غوطه ور باشد. به عنوان مثالی از ذوب مقید، مت و همکاران [۱۷، ۱۸] مجموعهای از آزمایش ها را روی مبادله کن گرمایی سه لوله ای انجام دادند. آب گرم در بیرونی ترین و درونی ترین لوله و پارافین 28 RT در لوله میانی قرار لوله بیرونی ۲۰۰ و طول آن ۵۰۰ میلی متر بود. با توجه به تعداد زیاد پرهها، فرآیند ذوب بیشتر شبیه رژیم ذوب مقید است. به عنوان مورد

مواد تغییر فاز دهنده بخش جدایی ناپذیر از ذخیر سازهای گرمایی هستند. آنها میتواند مقدار زیادی گرما را جذب کنند و عمده آن را به شکل گرمای نهان در محدوده باریکی از تغییر دما ذخیره نمایند. از آنجایی که مواد تغییر فاز دهنده به گرمای نهان متکی است، انرژی گرمایی را در دمای تقریباً ثابتی آزاد می کنند. از این رو آنها، در بسیاری از کاربردها مانند کاربرد انرژی خورشیدی [۱–۵]، تهویه مطبوع در ساختمان ها [۶–۸] و بسیاری از کاربردهای دیگر مورد استفاده قرار می گیرند.

به دلیل اهمیت مواد تغییر فاز دهنده، مطالعات تجربی زیادی بر روی ذوب انجام شده است [۹–۱۱] و این مطالعات تجربی، پایه اعتبارسنجی برای شبیه سازی عددی هستند. به طور معمول، ذوب را

<sup>&</sup>lt;sup>®</sup> نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: h.nemati@miau.ac.ir تاریخ دریافت: ۲۲/۰۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۲۲/۰۱/۲۰

دیگری برای رژیم ذوب مقید، میتوان به آزمایشات ژانو و همکاران اشاره کرد [۱۹، ۲۰]. آنها از یک فوم فلزی متخلخل به ابعاد ۲۵×۲۱×۲۰۰ میلی متر با تخلخل ۱۰ حفره در اینچ و ضریب تخلخل ۹۵٪ پر شده با پارافین استفاده کردند. فوم فلزی از جنس مس بود و از یک گرمکن الکتریکی برای اعمال شار گرمایی یکنواخت در پایین نمونه استفاده شد. از نه ترموکوپل در مکانهای مختلف برای ثبت تغییرات دما استفاده شد. آنها کاهش قابل توجهی در زمان ذوب مشاهده کردند.

از سوی دیگر، بیشتر آزمایشات انجام شده بر روی ذوب نامقید در درون کره بوده است [۲۱–۲۳]. اسیس و همکاران [۲۱] به بررسی آزمایشگاهی پارافین R27 در درون کره پرداختند و تطابق خوبی بین زمان ذوب در آزمایش با نتایج حل عددی مشاهده کردند. همچنین شکل هسته جامد نیز با نتایج حل عددی در طول زمان، مشابهت داشت. پس از اسیس آزمایشهای مشابهی جهت بررسی ذوب نامقید مواد مختلف در درن کره انجام شد که همگی نتایج مشابهی داشت [17، ۲۲]. به عنوان مثال، حسین زاده و همکاران [18] به بررسی آزمایشگاهی نامقىد ذوب n-octadecane در داخل یک ظرف کروی پرداختند. آنها آزمایش را برای سه دمای دیواره مختلف ظرف در ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه سلسیوس انجام دادند و نشان دادند که سرعت ذوب در ابتدای ذوب به دلیل تماس کامل بین پوسته داغ و هسته جامد بالا است. زمانی که لایهای از مذاب بین پوسته و هسته جامد تشکیل می شود، سرعت ذوب با افزایش زمان کاهش مییابد. پس از این مرحله، اثر انتقال گرمای رسانشی کاهش می یابد و انتقال گرمای جابجایی به حالت غالب برای ذوب تبدیل می شود.

ذوب نامقید کلسیم کلراید هگزا هیدرات در استوانه عمودی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳]. در این آزمایش، دو نمونه ۱۰ و ۲۰ گرمی در لوله های عمودی قرار داده شد و لوله ها در یک حمام آب داغ قرار گرفتند. به این ترتیب زمان لازم برای ذوب هر نمونه محاسبه گردید. آنها همچنان تاثیر اختلاف دمای آب داغ و نمونه ها را نیز مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که فرورفتن هسته جامد در مایع در طی فرآیند ذوب، موجب تسریع در روند ذوب می شود.

صرف نظر از انواع رژیمهای ذوب، تقریباً تمام اندازه گیریهای تجربی به اندازه گیری دما متکی هستند. در این آزمایشها، تعدادی ترموکوپل در داخل ماده تغییر فاز دهنده جامد برای اندازه گیری دما در طول آزمایش قرار میگیرد. با این حال، به خوبی میدانیم که سیمهای ترموکوپل و حسگرها، رژیم ذوب را از نامقید به مقید تغییر میدهد. شکل ۱ نشان میدهد که چگونه PCM جامد به یک لوله ترموکوپل میچسبد و در مایع غوطه ور نمیشود.

از طرف دیگر، پارافین جامد پروب ترموکوپل را میپوشاند و به عنوان عایق عمل میکند. بنابراین، دمای اندازهگیری شده میتواند با دمای متوسط متفاوت باشد. در نتیجه، اندازهگیری دما با ترموکوپل نمیتواند تصویر کامل و دقیقی از فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده ارائه دهد. هنگامی که از فوم فلزی یا پرههای متراکم برای تقویت ذوب ماده تغییر فاز دهنده استفاده میشود، هسته جامد به بدنه فلزی پره-های و یا فوم میچسبد و در نتیجه ثابت میماند و رژیم ذوب مقید می شود. اما، در غیاب فوم فلزی یا پرههای متراکم که از حرکت آزاد هسته جامد جلوگیری میکند، ذوب ماده تغییر فاز دهنده را میتوان به عنوان

ذوب بدون محدودیت در نظر گرفت. با این حال در محدوده اطلاعات نویسندگان، هیچ روشی برای اندازه گیری مستقیم کسر جرمی مایع ماده تغییر فاز دهنده در طول فرآیند ذوب وجود ندارد.

هدف این مطالعه معرفی روشی برای یافتن کسر جرمی مایع ماده تغییر فاز دهنده در طول زمان، به طور مستقیم و بدون ایجاد اختلال در فرآیند ذوب است. این روش مبتنی بر پردازش تصویر است که در آن تصاویر متوالی از هسته جامد تهیه و پردازش میشوند. حجم ماده تغییر فاز دهنده جامد محاسبه شده و بر حجم جامد اولیه تقسیم میشود تا کسر جامد و در نتیجه کسر مایع پیدا شود. برای نشان دادن عملی بودن این روش، از آن برای ذوب نامقید پارافین در داخل یک استوانه استفاده شد. شبیه سازی عددی نیز انجام شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شد و تطابق بسیار خوبی مشاهده شد.



شکل ۱- لوله ترموکوپل می تواند رژیم ذوب PCM را از نامقید (سمت چپ) به مقید (سمت راست) تغییر دهد [۲۴].

# ۲- روش آزمایش ۲- تجهیزات آزمایش

برای انجام آزمایش، یک حمام آب دما ثابت از جنس فولاد کربنی با روکش گالوانیزه تهیه شد. دمای داخل حمام با یک دماسنج ثابت و همچنین یک دماسنج دیجیتال قابل حمل اندازه گیری میشد. شکل ۲ شماتیکی از تجهیزات آزمایش را نشان میدهد.

از سه گرمکن برقی با توان کل ۶۰۰۰ وات برای گرم کردن آب در طول آزمایش استفاده شد. ظرفی استوانهای شکل حاوی نمونه آزمایش در وسط حمام آب تعبیه گردید. این استوانه در دو انتها مجهز به دو پنجره دید دو لایه بود که پنجره ها در خارج از آب قرار داشتند. ساختار پنجره های دید بعداً مورد بحث قرار می گیرد. شکل ۳ تصویری از ظرف آزمایش را نشان می دهد. این آزمایش در یک اتاق تاریک با دمای ثابت برای کاهش تغییرات شرایط محیطی و نور انجام شد. یک دوربین عمود بر پنجره دید ثابت شد و از یک نور حلقهای برای نوردهی استفاده شد.

نمونه مورد آزمایش، یک پارافین جامد استوانهای با طول ۲۱ میلیمتر و قطر داخلی ۶۳ میلی متر بود. برای تهیه نمونه، ظرف استوانهای با پارافین مذاب پر شد و سپس به تدریج سرد شد تا نمونه جامد به دست آید (شکل ۴ الف). برای ایجاد فضای کافی برای افزایش حجم در حین ذوب، قطعهای به ارتفاع ۱۳ میلی متر از بالای استوانه افقی پارافین با استفاده از شابلون کاغذی بریده شد. یک طرح دقیق در نرم افزار Autocad تهیه شد و برای ساخت شابلون کاغذی پرینت گرفته شد (شکل ۴ ب). در نهایت نمونه آماده شده در داخل ظرف فلزی قرار

گرفت (شکل ۴ ج).



شکل ۲- طرحوارهای از تجهیزات آزمایش



شکل ۳- تصویری از ظرف آزمایش

#### ۲-۲- ظرف فلزی نمونه

ظرف، یک استوانه مسی نازک به ضخامت ۱/۹ میلی متر بود. رسانایی بالای مس و ضخامت کم آن مقاومت گرمایی ظرف را به حداقل میرساند. در هر سمت ظرف، یک پنجره دید در نظر گرفته شده بود. شکل ۵ ساختار هر پنجره دید را نشان میدهد. کل پنجره دید از یک ورق پلکسی گلاس اکریلیک شفاف ساخته شده است. دو شیشه دید با فاصله ۴۰ میلی متر از یکدیگر در نظر گرفته شد. هوای محبوس شده بین این دو لایه میزان انتقال گرما از دو سر ظرف را به حداقل مىرساند. علاوه بر اين، فاصله گذار (نگاه كنيد به شكل ۵) نيز در خارج از دیواره ظرف قرار داده شد. بنابراین، فاصله گذار، شیشه دید بیرونی و همچنین هوای محبوس شده بین دو شیشه دید، با هوای خنک محیط در تماس بودند. با این تکنیک، فرآیند ذوب تنها از پیرامون فاز جامد و در راستای شعاع و نه از انتهای آن انجام می شد. بنابراین، عملاً فرآیند ذوب دو بعدی بود. ذوب از هر دو انتها نیز در طول آزمایش تحت نظارت قرار گرفت و مشخص شد که شکل هسته جامد در هر دو انتها و نیز در وسط استوانه بسیار مشابه است که فرض ذوب دو بعدی را تایید میکند. شکل ۶ یکنواختی ذوب را در امتداد محور ظرف نشان میدهد. از کلروفرم مایع برای ذوب و جوش ورقهای پلکسی گلاس به جهت آب بندی درزها استفاده شد. همچنین برای چسباندن پلکسی گلاس به دیواره فلزی ظرف و حمام، از چسب سیلیکونی RTV استفاده شد. این چسب دارای مقاومت شیمیایی عالی و مقاوم در برابر دمای بالا (۲۵۰ درجه سلسیوس و بالاتر) است. یک لوله هواکش به قطر mm در بالای ظرف تعبیه شد تا هوا در طول فرآیند ذوب بتواند به دلیل انبساط گرمایی PCM خارج شود و فشار ظرف نمونه ثابت بماند.

#### ۲-۳- روش آزمایش

ظرف فلزی در حمام آب گرم با دمای ثابت، با استفاده از تراز ثابت

شد. کل سیستم در ابتدا در دمای  $^{\circ}$  ۲۴ بود. سپس حمام با آب در دمای  $^{\circ}$  ۲۴ پر شد. حمام مجهز به دماسنج و سه گرمکن برقی هر کدام با توان ۲۰۰۰ وات بود. هر گرمکن می تواند به طور جداگانه روشن یا خاموش شود، بنابراین دمای آب در حمام در  $^{\circ} \pm ^{1}$  ثابت میماند.



از دوربین NIKON D7100 برای گرفتن عکس در هر دقیقه استفاده شد. عکسهای حاصل ۶۰۰۰ × ۴۰۰۰ پیکسل با وضوح ۳۰۰ نقطه در اینچ و عمق ۲۴ بیت هستند. از یک نور حلقهای برای ایجاد روشنایی همگن در اطراف لنز تصویربرداری استفاده شد. چند نمونه از عکسهای آماده شده در شکل ۶ نشان داده شده است. عکسهای شروع ذوب (s 0 = t) و پایان ذوب (s 0 = t) در یک ردیف قرار داده شدهاند تا افزایش حجم پارافین را نشان دهند. مقایسه این دو تصویر افزایش قابل توجهی را در حجم پارافین در طی فرآیند ذوب نشان می دهد.

#### ۳- پردازش تصاویر

برای یافتن کسر جرمی مایع در هر مرحله زمانی، عکسها به نرمافزار MATLAB R2021 منقل شدند. عکسها در نرم افزار MATLAB، در یک ماتریس با دقت مضاعف ذخیره میشود. سپس با حفظ روشنایی تصویر، تصویر خاکستری عکس ایجاد شد (شکل ۷ الف). بعد از آن از یک ماسک سیاه برای سیاه کردن محیط اطراف نمای دایرهای نمونه استفاده شد (شکل ۷ ب). برای یافتن مرز هسته جامد، نسخههای باینری عکسها (نسخه سیاه و سفید) با استفاده از مقدار میانگین شدت خاکستری ۲۰±/ به عنوان مقادیر آستانه (شکل ۷ ج تا م) تهیه شد. دو نمونه در شکل ۷ (پیش از شروع ذوب) و شکل ۸ (دردقیقه هشتم) نشان داده شده است.

در طول آزمایش، چگالی مایع به دلیل انبساط گرمایی مایع متفاوت است، در حالی که چگالی جامد ثابت است. بنابراین، کسر جرمی مایع برابر است با:

$$\gamma = \frac{m_{liq}}{m_{total}} = 1 - \frac{m_{solid}}{m_{total}} = 1 - \frac{\rho_{PCM,Solid} \nabla \rho_{PCM,Solid}}{\rho_{PCM,Solid} \nabla \rho_{PCM,Solid}} = 1 - \frac{\nabla \rho_{PCM,Solid}}{\nabla \rho_{PCM,Solid}}$$
(1)

در معادله بالا، PCM,Solid حجم پارافین جامد در هر زمان و کر معادله بالا، PCM,Solid حجم جامد اولیه است. از آنجایی که ابعاد عکس ثابت است (۶۰۰۰ × ۴۰۰۰ پیکسل) برای محاسبه آخرین کسر در معادله (۱)، فقط کافی است تعداد پیکسلهای سفید (ناحیه جامد) را شمرده و بر تعداد پیکسلهای سفید در عکس اول (قبل از شروع ذوب) تقسیم کرد.

نشريه مهندسي مكانيک دانشگاه تبريز، شماره پياپي ٤٠١، جلد ٥له. شماره ١، بهار، ٢٠٩٢، صفحه ١٦٢١–١٢٩ – پژوهشي كامل – اشكان بروجرديان و همكاران



شکل ۵- الف) نمونه کامل استوانهای، ب) قطعه ای بر اساس شابلون کاغذی بریده شد، ج) نمونه در داخل ظرف قرار داده شد.



شکل ۶- نمونه هایی از تصاویر پارافین جامد در هنگام ذوب

(۲)

به این ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر ممکن برای کسر جرمی مایع برای هر عکس محاسبه می شود.

### ۴- شبیه سازی عددی

قبل از شروع محاسبات عددی، یک نمونه پارافین برای آزمایشگاه پژوهشکده شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران تهیه شد تا خواص ترموفیزیکی اندازه گیری شود. نتایج در جدول ۱ رائه شده است. دمای انجماد و ذوب به ترتیب ۲۳۴/۶ ۲ و ۳۳۲/۲ است. یک مدل دو بعدی بر اساس هندسه استوانه نظیر شکل ۹ تهیه شد. جهت شبیه سازی عددی، به دلیل تقارن مساله فقط نیمی از استوانه در نظر گرفته شد. برای فاز مایع، چگالی متغیر با ضریب انبساط گرمایی حجمی (β) در نظر گرفته شد. علاوه بر این، وابستگی چگالی هوا به دما به صورت زیر در نظر گرفته شد. [10]:

 $\rho_{\rm air} = 3.4978 - 0.01134T + 1.2 \times 10^{-5}T^2$ 

مقدار (مايع-جامد)	ويژگى
191.01	گرمای نهان ذوب [kJ/kg] (L)
2.4-3.2	گرمای ویژہ [kJ/kg K] (cp)
0.24 - 0.15	رسانایی گرمایی[W/m K] (k)
0.00342	لزجت دینامیکی [Pa.s] ) (µ
824-742.4	جگالی [kg/m <sup>3</sup> ] (ρ)
5 x 10 <sup>-4</sup>	ضریب انبساط گرمایی [K <sup>-1</sup> ] (β)

جدول ۱- خواص ترومو-فيزيكي پارافين



شکل ۷- الف) عکس در مقیاس خاکستری، ب) عکس با ماسک سیاه ج) عکس سیاه و سفید (آستانه بالا) د) عکس سیاه و سفید (آستانه میانگین) ه) عکس سیاه و سفید (آستانه پایین) برای *t*= 0s





شکل ۸- الف) عکس در مقیاس خاکستری، ب) عکس با ماسک سیاه ج) عکس سیاه و سفید (آستانه بالا) د) عکس سیاه و سفید (آستانه میانگین) ه) عکس سیاه و سفید (آستانه پایین) برای 480s *=t* 

#### ۵- معادلات حاکم و شرایط مرزی

بر اساس نتایج حاصله از شکل ۶، تغییر حجم قابل توجهی در طول فرآیند ذوب وجود دارد. برای در نظر گرفتن این تغییر حجم، از روش (VOF) به عنوان مدل چند فازی استفاده شد. در این روش پارافین به عنوان فاز اولیه و هوا به عنوان فاز ثانویه در نظر گرفته شد. در نتیجه، سه معادله اصلی حاکم یعنی معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی عبارتند از:

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla(\rho) = 0$	(٣)
$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \mu (\nabla\vec{v}) + \rho\vec{g} + \vec{S}$	(۴)
$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla . \left(\rho \vec{v} h\right) = \nabla . \left(k \nabla T\right)$	(۵)
بردار گرانش است. بر اساس روش $ec{g} = [0, -9.8, 0]$	در معادلات بالا،
	:VOF
$\alpha_{\rm PCM} + \alpha_{\rm air} = 1$	(۶)
$ ho =  ho_{ m PCM} lpha_{ m PCM} +  ho_{ m air} lpha_{ m air}$	(Y)

که  $\alpha$  کسر حجمی هر گونه از سیال است. برای شبیه سازی ذوب از روش انتالپی-تخلخل [۱۲] استفاده شد. بر این اساس جمله  $\overline{S}$  در معادله تکانه به صورت زیر تعریف می شود:

$$\vec{S} = \frac{\mathcal{C}(1-\gamma)^2}{(\gamma^3+\epsilon)}\vec{v} \tag{(A)}$$

که در آن 0.001 = e و 10<sup>6</sup> C میباشد. کسر جرمی مایع ذوب شده، γ، و نیز انتالپی به صورت زیر تعریف میشوند:

$$= \begin{cases} 0 & \text{for } T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{for } T_s \le T \le T_l \end{cases}$$
(9)

$$\int_{T_{ref}}^{T} for \quad T > T_{l}$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T} c_{p} dT + \gamma L$$

$$(1.1)$$

که  $T_s \ e \ I_s$  نقطه انجماد و ذوب میباشد و K آ.  $T_{ref} = 298.15$  ست. دمای اولیه کل سیستم مطابق با شرایط آزمایش  $T_{ini} = 297$  است. شرط مرزی عدم لغزش برای داخل دیواره سیلندر انتخاب شد. برای قسمت بیرونی سیلندر، انتقال گرمای همرفتی با آب اطراف در نظر گرفته شد. ضریب انتقال گرمای همرفتی برابر با ۱۴۲۲ W/m2.K تنظیم شد و از معادله (۱۱) استخراج شد. این معادله برای $10^{12} \ge Ra$ معتبر است [۲۵].

$$Nu_{D} = \left[0.6 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right]^{2}$$
(11)

معادلات فوق به صورت عددی توسط نرم افزار ANSYS-Fluent حل شد. از روش نسخه Ansys 2020 R2 با استفاده از روش SIMPLE حل شد. از روش مرتبه دوم پادسو جهت گسسته سازی معادلات تکانه و انرژی و روش PRESTO برای کسر حجمی استفاده شد. حداکثر باقیمانده قابل قبول برای هر دو معادله تکانه و پیوستگی <sup>۴-۱</sup> و برای معادله انرژی <sup>۶-۱</sup> تنظیم شد. برای گسسته سازی زمان از روش ضمنی مرتبه اول استفاده شد. جهت شبکه بندی، دامنه استوانهای به صورت شعاعی به دو ناحیه تقسیم شد. در ناحیه بیرونی، از یک شبکه ساختاریافته با تراکم بالا در نزدیک دیواره استفاده شد. ناحیه داخلی توسط مش چهار وجهی نامنظم گسسته شد. مش بکار رفته و بزرگنمایی مش در شکل ۹ نشان داده شده است.

معادلات برای سه اندازه مش مختلف و سه گام زمانی مختلف حل شد تا از صحت نتایج اطمینان حاصل شود. نتایج مطالعه شبکه در شکل ۱۰ ارائه شده است. برای ۳۸۱۳ سلول و ۲۱۰۳ سلول میانگین تفاوت کمتر از ۲٪ بود. بنابراین، تعداد ۳۸۱۳ سلول انتخاب شد. همچنین گام زمانی ۲۰/۰۰، ۲۰۰۰۵ و ۲۰/۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت و تفاوت تفاوت قابل توجهی مشاهده نشد. با این حال، برای تثبیت حل، ۲۰۵۵ به عنوان گام زمانی انتخاب شد. با تنظیمات فوق، شبیه سازی حدود دو هفته طول کشید.



شکل ۹- شبکه مورد استفاده در حل عددی



### ۶- بررسی نتایج عددی

شکل ۱۱ بردارهای جریان را در اطراف هسته جامد نشان میدهد. همانطور که مشخص است، جریان اطراف هسته جامد را میتوان به سه بخش اصلی دسته بندی کرد که در شکل ۱۱ نمای بزرگ شده هر سه جریان نیز نشان داده شده است.

جریان ۱: این جریان یک مسیر طولانی محیطی بین دیواره گرم و مرز سرد هسته جامد را طی میکند. سیال مجاور دیواره با دمای بالاتر، به دلیل اثر شناوری به سمت بالا جریان مییابد و سپس در تماس با هسته سرد قرار میگیرد. این جریان موجب ذوب پیرامونی پارافین میشود.

جریان ۲: شامل حرکت جریان بر روی سطح نسبتاً افقی در بالای پارافین جامد میباشد که به دلیل انتقال گرمای همرفتی طبیعی بین هوای گرم محبوس در بالای ظرف و سطح سرد جامد است. این جریان به ذوب پارافین از بالا کمک میکند و آن را به تدریج ذوب میکند. در نتیجه، شکل سطح بالایی را از یک صفحه مسطح به یک سطح منحنی تغییر می دهد. مقایسه سطح بالایی جامد در دو شکل ۲ و ۸، این مطلب را به خوبی نشان می دهد.



شکل ۱۱– بردارهای جریان فاز مایع در اطراف هسته جامد و بزرگنمایی آنها برای *14=*5 ثانیه

جریان ۳: این جریان مجموعه ای از گردابههای کوچک در زیر هسته جامد است. این گردابهها پارافین را از پایین ذوب میکنند و موجب دندانهای شدن شکل هسته جامد در پایین میشوند.

# ۷- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

مقایسه نتایج عددی و مقادیر تجربی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، نتایج عددی و تجربی با یکدیگر سازگار هستند و RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) ۱۸/۸٪ است. همچنین، مقایسه مرزهای جامد در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل قسمت سمت راست مربوط به تصاویر آزمایشگاهی و قسمت سمت چپ که مشخص است اندازه و شکل هسته جامد در هر دو روش عددی و مر شکل مربوط به تصاویر بدست آمده از حل عددی میاشد. همانطور که مشخص است اندازه و شکل هسته جامد در هر دو روش عددی و حالت دندانهای شدن مرزهای جامد را نیز پیشبینی نماید. همانگونه که حالت دندانهای شدن مرزهای جامد را نیز پیشبینی نماید. همانگونه که گردید، حالت دندانهای شدن مزرهای جامد را نیز پیشبینی نماید. همانگونه که گردید، حالت دندانهای شدن مازهای جامد را نیز چیشبینی انحنای مرز جامد کوچک در زیر هسته جامد پارافین) است. همچنین انحنای مرز جامد در نتایج آزمایشگاهی و عددی نیز مشابهت نزدیکی دارد که نشان می دهد که جریان ۲ به خوبی شبیه سازی شده است.



شکل ۱۲- نتایج عددی و آزمایشگاهی



شکل ۱۳- شکل و اندازه هسته جامد از نتایج آزمایشگاهی (سمت راست) و نتایج عددی (سمت چپ)

# ۸- نتیجه گیری

اپی ا

10,

شمار

- پژوهشی

کامل

- اشکان بروجردیان و همکاراز

در مطالعات مربوط به ذوب مواد تغییر فاز دهنده، حضور ترموکوپل موجب تغییر رژیم ذوب از نامقید به مقید می شود که این امر ممکن است باعث اختلاف در شرایط مساله نسبت به شرایط واقعی گردد. در این مطالعه، روشی مبتنی بر تکنیک پردازش تصویر برای اندازه گیری کسر جرمی مواد تغییر فاز دهنده جامد در طول فرآیند ذوب پیشنهاد شد. این روش در دسته روشهای اندازه گیری غیر تماسی طبقه بندی می شود و رژیم ذوب را تغییر نمی دهد. این روش برای ذوب نامقید پارافین در داخل یک استوانه، که توسط آب داغ ذوب می شود، اعمال شد. در این روش فرآیند ذوب در طول زمان و در شرایط کنترل شده تصویربرداری شد. بعداً مرزهای هسته جامد استخراج و مساحت محصور محاسبه و بر مساحت اولیه تقسیم شد. علاوه بر روش تجربی، مسئله به صورت عددی با روش چند فازی (VOF) شبیهسازی شد. روش چند فازی برای مدلسازی افزایش سطح آزاد مایع، در طول فرآیند ذوب، به دلیل تفاوت بین چگالی جامد و مایع انتخاب شد. نتایج عددی و تجربی با یکدیگر مقایسه شد و تطابق خوبی مشاهده شد و RMSE برابر 1.8% بود. در نهایت، مرزهای جامد برای نتایج عددی و تجربی در زمانهای مختلف مقایسه شد و مشاهده شد که شکل و اندازه هسته جامد در هر دو روش با هم تطابق خوبی دارند. این روش می تواند جایگزین مناسبی برای روشهای آزمایشگاهی مرسوم در بررسی ذوب مواد تغییر فاز دهنده باشد.

(J.kg

ت علائم	۹- فهرس
گرمای ویژه در فشار ثابت ( <sup>۱</sup> K-۱	$c_p$
بردار گرانش (m.s <sup>-2</sup> )	$ec{g}$
انتالپی (J/kg)	h
رسانایی گرمایی (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	k
گرمای نهان ذوب (J.kg <sup>-1</sup> )	L
جرم (kg)	m
عدد نوسلت	Nu
فشار (Pa)	р
عدد رایلی	Ra
دما (K)	Т
زمان (s)	t
بردار سرعت (m.s <sup>-1</sup> )	$\vec{v}$
حجم (m <sup>3</sup> )	А
مختصات دکارتی	x, y, z
	علائم لاتين
کسر حجمی هر نمونه	α
ضریب انبساط گرمایی (K <sup>-1</sup> )	β
کسر جرمی مایع	γ
لزجت دینامیکی (Pa.s)	μ
چگالی (kg.m <sup>-3</sup> )	ρ
_	زيرنويس
درزمان آغازين	0
بر اساس قطر	D
اوليه	ini

l	مايع با ذوب
ref	نقطه مرجع
s	جامد يا انجماد

## 14- مراجع

- [1] اشرفی م، محمدیون ح، دیبایی م.ح، محمدیون م. بهبود عملکرد گردآور خورشیدی و افزایش بهره وری انرژی خورشید با بکارگیری مواد تغییر فازی. مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۹۴، ص ۲۹–۲۹.
- [۲] گشایشی حر، ادیبی طوسی س.س. رستمی م، جعفری ا. تحقیق آزمایشگاهی جهت بهبود بازدهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی با استفاده از پارافین/اکسید گرافن. مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش ۲، ص. ۲۶۹–۲۷۲.
- [۳] گچکاران آ، جدا ف طراحی و بهینهسازی یکپارچه آبشیرین کن خورشیدی با ذخیره سازی انرژی گرمایی به کمک مواد تغییر فاز دهنده. مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۸، د. ۴۹، ش. ۱، ص. ۳۵۵-۲۴۴.
- [۴] حسین زاده م، علیزاده مؤمن ص، میرزابابائی س، ، زمانی ج، کیانی فرع. بررسی تجربی پخت ویز در داخل ساختمان با استفاده از یک اجاق خورشیدی غیرمستقیم همراه با مواد ذخیره کننده حرارت مجلهٔ علمی پژوهشی مکانیک سازه ها و شاره ها. ۱۴۰۰، د. ۱۱، ش. ۳، ص. ۲۰۹– ۲۱۹.
- [۵] عبدی علمی ۱، میر عبداله لواسانی آ، نیمافر س، م. بررسی عددی تأثیر مواد تغییر فاز دهنده حاوی نانو ذرات لوله کربنی چند جداره در بهبود عملکرد چاه حرارتی تجهیزات الکتریکی. مجلهٔ علمی پژوهشی مکانیک سازه ها و شاره ها. ۱۴۰۲، د. ۱۳، ش. ۱، ص. ۲۵-۴۱.
- [۶] میراحمد ع، صدرعاملی س.م. مطالعه عـددی و شبیهسازی عملکرد یک مبدل حرارتی پر شده با ماده تغییرفاز بـرای سـامانه تهویه مطبـوع یـک منزل مسکونی در مناطق گرم و خشک ایران. مجلـهٔ مهندسـی و مدیریت انرژی. ۱۳۹۴، د. ۵، ش. ۲، ص. ۴۲–۵۱.
- [Y] عصارزاده نوش آبادی ج.ر، مدح خوان م. مطالعۀ عـددی گرادیان حرارتی و انـرژی عبوری از دیوارهای پیرامونی ساختمان دارای مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در شرایط دمایی گرم کاشان. مجلۀ مهندسی و مدیریت انرژی. ۱۴۰۰، د. ۱۱، ش. ۲، ص. ۸۲-۹۱.
- [۸] حجت محمدی س.م. امکان سنجی فنی و اقتصادی بکار گیری مواد تغییر فاز دهنده در ترکیب سیستم های سرمایش تراکمی و سرمایش آزاد، مطالعه موردی: یک ساختمان مسکونی در شهر کرمان. *مجلهٔ علمی* پژوهشی مکانیک سازه ها و شاره ها. ۱۴۰۱، د. ۱۲، ش. ۱، ص. ۵۱ – ۶۶.
- [٩] رستمیان ف، اعتصامی ن، حقگو م. کنترل دمای برد الکترونیکی با بکار گیری چاه گرمایی حاوی ماده تغییر فاز دهنده استئاریک اسید. مجلۀ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۴، ص. ۴۳۳-۴۴۱.
- [۱۰] براری ب، رنجبر ع.ا. شبیه سازی عددی ذخیره کننده های حرارتی با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده. مجلهٔ علمی پژوهشی مکانیک سازه ها و شاره ها. ۱۳۹۶، د. ۷، ش. ۲، ص. ۱۸۹–۲۱۳.
- [۱۱] عیسی پور درزی م، حسینی کهساری س.م.ج، رنجبر ع.ا، پهم لی ی. اثر افزایش تعداد و چیدمان لوله های سیال گرم بر رفتار ذوب ماده تغییر فـاز دهنده در مبدل حرارتی سه لوله ای. *مجلهٔ علمی پژوهشی مکانیک سازه ها و شاره ها*. ۱۳۹۵، د. ۶۰ ش. ۴۰ ص. ۲۴۹–۲۶۲.
- [12] Nemati H, Souriaee V, Habibi M, Vafai K. Pore-scale and volume-averaged simulations of phase change material melting: A comparison between local and nonlocal thermal

equilibrium. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2023 Dec;84(11):1323-37.

- [13] Nemati H, Souriaee V, Habibi M, Vafai K. Design and Taguchi-based optimization of the latent heat thermal storage in the form of structured porous-coated pipe. Energy. 2023 Jan;263:125947.
- [14] Nicholls RA, Moghimi MA, Griffiths AL. Impact of fin type and orientation on performance of phase change materialbased double pipe thermal energy storage. Journal of Energy Storage. 2022 Jun;50:104671.
- [15] Nemati H, Habibi M. Analytical and numerical analysis of phase change material solidification in partially filled capsules considering breathing vent. Journal of Energy Storage. 2021 Aug;40:102725.
- [16] Hosseinizadeh SF, Darzi AR, Tan FL, Khodadai JM. Unconstrained melting inside a sphere. International Journal of Thermal Sciences. 2013 Jan;63:55-64.
- [17] Al-Abidi AA, Mat S, Sopian K, Sulaiman MY, 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 Apr;53(1):147-56.
- [18] Abdulateef AM, Mat S, Sopian K, Abdulateef J, Gitan AA. Experimental and computational study of melting phasechange material in a triplex tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins. Solar Energy. 2017 Oct;155:142-53.
- [19] Zhao CY, Lu W, Tian Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs). Solar energy. 2010 Aug;84(8):1402-12.
- [20] Tian Y, Zhao CY. A numerical investigation of heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous metals. Energy. 2011 Sep;36(9):5539-46.
- [21] Assis E, Katsman L, Ziskind G, Letan R. Numerical and experimental study of melting in a spherical shell. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007 May;50(9-10):1790-804.
- [22] Archibold AR, Rahman MM, Goswami DY, Stefanakos EK. Analysis of heat transfer and fluid flow during melting inside a spherical container for thermal energy storage. Applied Thermal Engineering. 2014 Mar;64(1-2):396-407.
- [23] Pan C, Charles J, Vermaak N, Romero C, Neti S, Zheng Y, Chen CH, Bonner III R. Experimental, numerical and analytic study of unconstrained melting in a vertical cylinder with a focus on mushy region effects. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018 Sep;124:1015-24.
- [24] Tan FL. Constrained and unconstrained melting inside a sphere. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2008 Apr;35(4):466-75.
- [25] Churchill SW, Chu HH. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. International journal of heat and mass transfer. 1975 Sep;18(9):1049-53.