



# بررسی فرآیند ذوب شدن مواد تغییر فاز در داخل یک نیم استوانه با محیط متخلخل غیر تعادلی

محمد قولی: دکتر اباذر وحدت آزاد

<sup>1</sup>دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب: دانشکده فنی: گروه مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

استاد یار گروه مکانیک: دانشکده فنی و مهندسی: دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب: تهران -

ایران abazar.vahdat@gmail.com

چکیده:

هدف از این پایان نامه، بررسی اثرات محیط متخلخل غیرتعادلی گرمایی محلی بر فرآیند ذوب پارافین با دمای ذوب ۳۳ درجه سانتی گراد با استفاده از روشهای حل عددی است. هندسه مساله شامل یک نیم سیلندر حاوی پارافین با دمای ثابت یکنواخت و یک دیواره عایق است. همچنین مدل داری و نیروی شناوری بویانت ناشی از تغییرات چگالی در این شبیه سازی در نظر گرفته شده اند. اثرات حضور فوم آلومینیومی با تخلخل ۰.۸ و ۰.۹۵ و ۵ و ۱۰ و ۱۵ بر روی کسر ذوب ، دما و خطوط جریان و شار حرارتی سطح استوانه مورد مطالعه قرار گرفته است. مشاهدات PCM را ۱۱.۷٪ افزایش می دهد و زمان PCM نشان می دهند که افزایش تخلخل از ۰.۸ تا ۰.۹، حجم

فرآیند ذوب را ۳۰.۸٪ برای برابر با ۱۵ کاهش می‌دهد. علاوه بر این، افزایش از ۵ تا ۱۵ منجر به کاهش زمان فرآیند ذوب به میزان ۷۱.۸٪ در تخلخل ۰.۹۵ می‌شود.

### کلمات کلیدی:

فرآیند ذوب شدن، مواد تغییر فاز، نیم استوانه متخلخل غیرتعادلی

### ۱- مقدمه

ذخیره انرژی با استفاده از مواد تغییر فازدهنده<sup>۱</sup> (PCM) یک نوآوری بزرگ در ذخیره‌سازی انرژی است. این مواد به دلیل دریافت و ذخیره‌سازی گرما به عنوان گرمای نهان در دمای ثابت به شدت مورد توجه محققان قرار گرفته‌است [۱]. ذخیره‌سازی انرژی به شکل گرما در دماهای مختلف منجر به داشتن کاربردهای قابل توجهی با استفاده از PCM ها در صنایع مختلف مانند صنعت پخت‌وپز، پوشاک [۲]، نساجی [۳]، ساختمان [۴]، سیستم‌های گرمایش و سرمایش [۵]، سیستم‌های نمک‌زدایی و پزشکی [۶] شده‌است.

گرمای نهان PCM در فاز جامد تا بخار بیشتر از فاز جامد تا مایع است، اما تغییر فاز جامد - مایع به دلیل حجم تغییر کم به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو پارامتر مهم در PCM ها، گرمای نهان و دمای گذار فاز جامد به مایع هستند. PCM ها می‌توانند به سه نوع مخلوط زیر طبقه‌بندی شوند [۷]:

انواع PCM ها
ارگانیک (organic) یا آلی
غیر ارگانیک (inorganic) یا معدنی
یوتکتیک (eutectic)

<sup>۱</sup> phase change materials

PCM در این پایان نامه، هر سه نوع مخلوط آلی، معدنی و یوتکتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، ( به شرح زیر طبقه‌بندی شوند [۷]: hsl) و گرمای نهان جامد - مایع<sup>۳</sup> (Tm)ها می‌توانند بر اساس دمای ذوب<sup>۲</sup> )

جدول ۱-۱: طبقه‌بندی PCM ها بر اساس Tm و hsl [۷]

طبقه‌بندی PCM ها بر اساس Tm و hsl	
محلول نمک	
$-70 < Tm < 0^0$	$220 < hsl < 320 \text{ kJ/kg}$
پارافین	
$0 < Tm < 130^0$	$180 < hsl < 220 \text{ kJ/kg}$
الکل شکر	
$60 < Tm < 210^0$	$210 < hsl < 430 \text{ kJ/kg}$

پارافین‌ها نوعی PCM آلی هستند که نسبتاً مزایای بیشتری دارند از جمله: در دسترس بودن<sup>۴</sup>، گرمای نهان بالا در انتقال جامد - مایع، خواص خود - هسته‌ای<sup>۵</sup>، سرعت هسته بندی<sup>۶</sup> بالا، پایداری شیمیایی<sup>۷</sup> و هزینه پایین. یکی از مزایای مهم پارافین محدوده دمای ذوب ۰ - ۱۳۰ است که محدوده دمایی بسیار خوبی برای اکثر کاربردهای

<sup>2</sup> melting temperature

<sup>3</sup> latent heat solid-liquid

<sup>4</sup> availability

<sup>5</sup> autonucleation

<sup>6</sup> nucleation rate

<sup>7</sup> chemical stability

صنعتی دارد. اما یکی از معایب پارافین‌ها هدایت حرارتی کم است، که [۸]، [۹] برای سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی، پانل‌های فتوولتائیک خنک‌کننده، کنترل دمای دارو در فرایندهای تحویل<sup>۸</sup> استفاده کرده‌اند.

ساختمان‌های مسکونی، اداری و صنعتی برای گرمایش و سرمایش به انرژی زیادی نیاز دارند. می‌توان گفت که سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها، انرژی بین ۱۸ تا ۷۳ درصد از کل انرژی را مصرف می‌کنند. این محدوده از

## -۱-۲- سوال اصلی تحقیق

❖ چگونه می‌توان دقت شبیه‌سازی‌های عددی را در فرآیند ذوب شدن PCM ها افزایش داد؟

### ۱-۲-۱- فرضیه‌های تحقیق

✓ می‌توان فرآیند ذوب PCM را در حضور محیط متخلخل غیرتعادلی حرارتی محلی با استفاده از روشهای

عددی شبیه‌سازی کرد

✓ می‌توان PCM ها را به عنوان تخلخل در فرآیند ذوب با دماهای متفاوت در نظر گرفت.

✓ می‌توان محیط متخلخل را به عنوان عدم تعادل حرارتی موضعی<sup>۹</sup> در نظر گرفت و اثرات همرفت

طبیعی<sup>۱۰</sup> PCM مایع در معادله حاکم را به منظور افزایش دقت در نتایج شبیه‌سازی با نتایج

آزمایشگاهی و فیزیکی استفاده کرد.

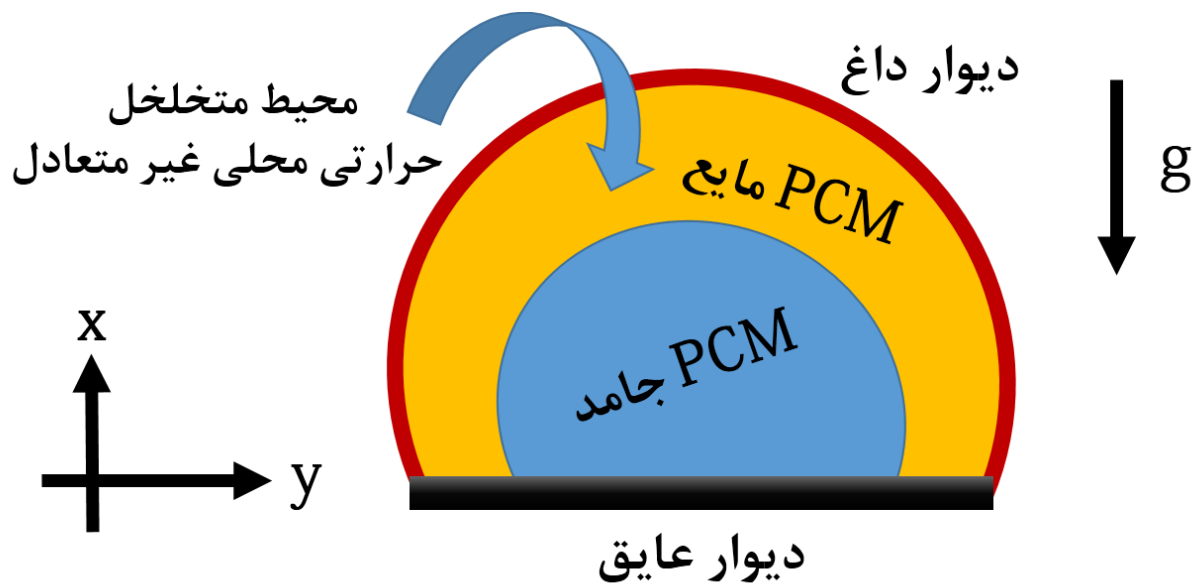
<sup>8</sup> delivery processes

<sup>9</sup> local thermal non-equilibrium

<sup>10</sup> natural convection

## روش پیشنهادی:

هندسه‌ی استفاده شده در این پایان‌نامه شامل نیم استوانه متخلخل با شعاع ۵ cm پر شده با پارافین به عنوان ماده تغییر فاز با دمای ذوب می‌باشد که در شکل زیر ملاحظه می‌شود



شکل ۳-۱: هندسه‌ی استفاده شده در این پایان‌نامه شامل نیم استوانه متخلخل با شعاع ۵ cm پر شده با

پارافین به عنوان ماده تغییر فاز

ماده محیط متخلخل فوم آلومینیومی است که در شبیه‌سازی‌ها به عنوان عدم تعادل حرارتی محلی مورد بررسی قرار گرفته‌است. همچنین باید توجه داشت که دیوار بالایی هندسه در معرض دمای ثابت یکنواخت قرار دارد و دیوار پایینی عایق است. بنابراین دیواره داغ باعث ذوب پارافین می‌شود که یک جریان همرفت طبیعی در داخل محفظه ایجاد می‌کند و به پارافین برای ذوب بیشتر کمک می‌کند.

معادله ممنتوم:

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (V \cdot \nabla) V = -\nabla P + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \nabla \cdot (\nabla V) - \frac{\mu_f}{K} V + (\rho\beta)_f (T - T_{ref}) g - 10^5 \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + 0.001} V \quad (1-3)$$

که آخرین جمله معادله اندازه حرکت در سمت راست معادله، عبارت پیچیده‌ی منبع است که به عنوان یک محیط متخلخل در فرآیندهای ذوب و انجماد عمل می‌کند. این عبارت نشان می‌دهد که در حالتی که PCM در فاز جامد (که تابعی از  $\lambda$  می‌باشد) است، مقدار سرعت باید صفر باشد.

معادله انرژی سیال:

$$\varepsilon \rho_f \left( C_f + L \frac{d\lambda}{dT_f} \right) \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f (V \cdot \nabla T_f) = \varepsilon k_f \nabla \cdot (\nabla T_f) - h_{sf} A_{sf} (T_f - T_s) \quad (2-3)$$

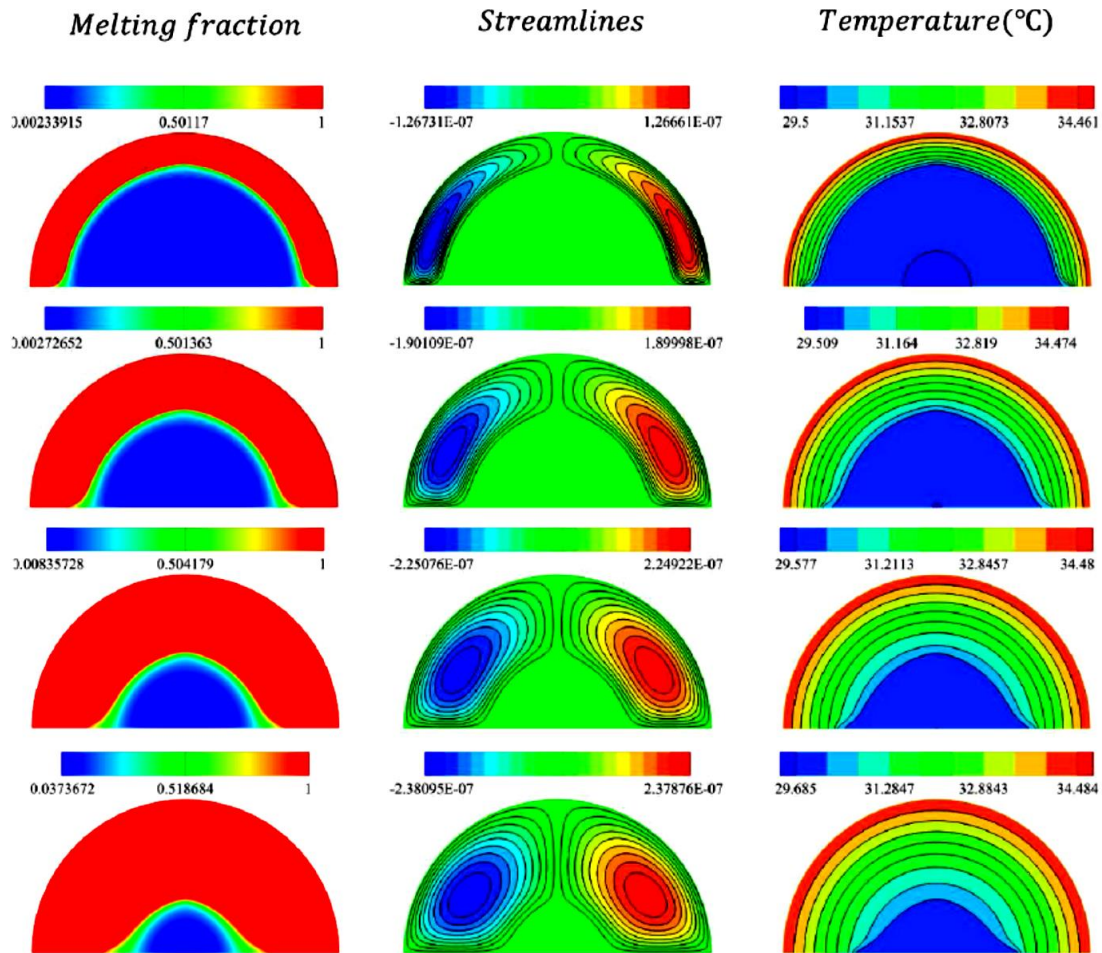
معادله انرژی محیط متخلخل:

$$(1-\varepsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\varepsilon) k_s \nabla \cdot (\nabla T_s) + h_{sf} A_{sf} (T_f - T_s) \quad (3-3)$$

## نتایج شبیه سازی:

این بخش به بررسی فرآیند ذوب پارافین با دمای ذوب ۳۰ درجه سانتیگراد درون نیم استوانه در حضور محیط متخلخل غیرتعادلی گرمایی می‌پردازد. دمای PCM، الگوی جریان، کانتورهای کسر ذوب، نمودار کسر ذوب و نرخ انتقال حرارت ورودی در مقابل زمان برای دو مقدار تخلخل ۰.۸ و ۰.۹۵ و سه دمای متفاوت بین دیواره بالایی و دمای ذوب یعنی  $\Delta T=5, 10, 15$

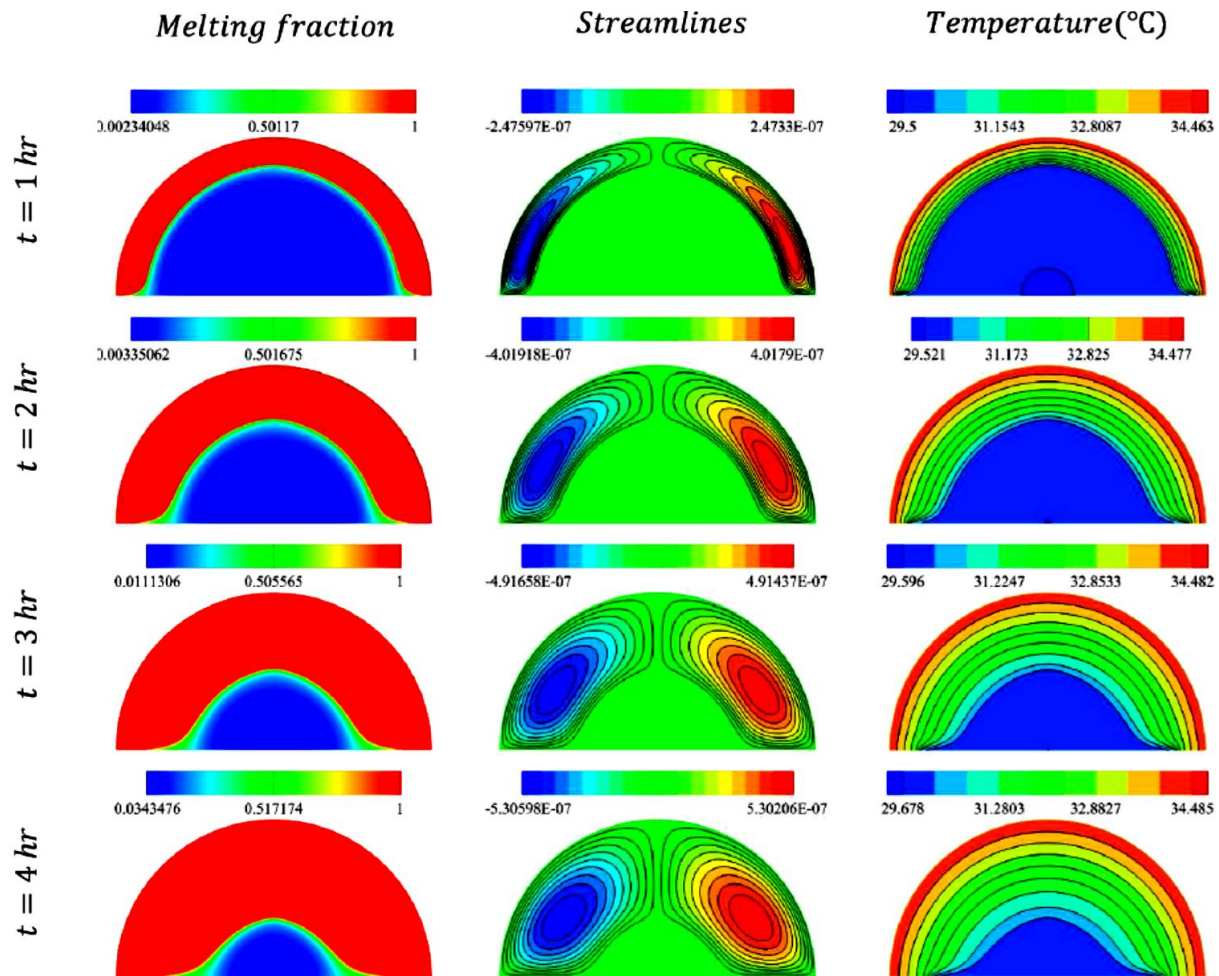
شکل‌های زیر (۲-۴) و (۳-۴) کسر ذوب، خطوط جریان و کانتورهای دما را برای  $\Delta T=5$  در زمان  $t=0.8$ ، ۰.۹۵ نشان می‌دهند.



شکل (۲-۴). کسر ذوب، خطوط جریان، کانتورهای دما در مقابل زمان برای

$$\Delta T=5, \varepsilon=0.8$$



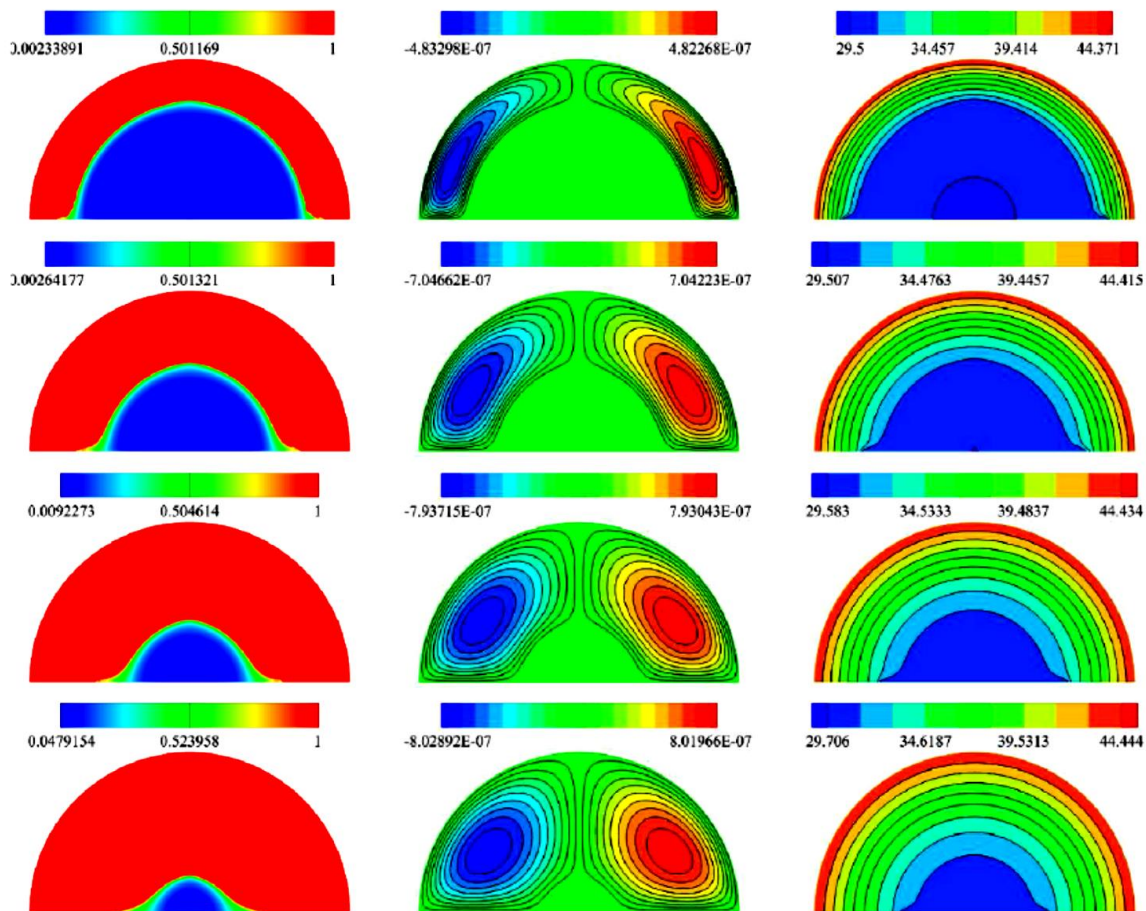


شکل (۳-۴). کسر ذوب، خطوط جریان، کانتورهای دما در مقابل زمان برای

$$\Delta T=5, \varepsilon=0.95$$

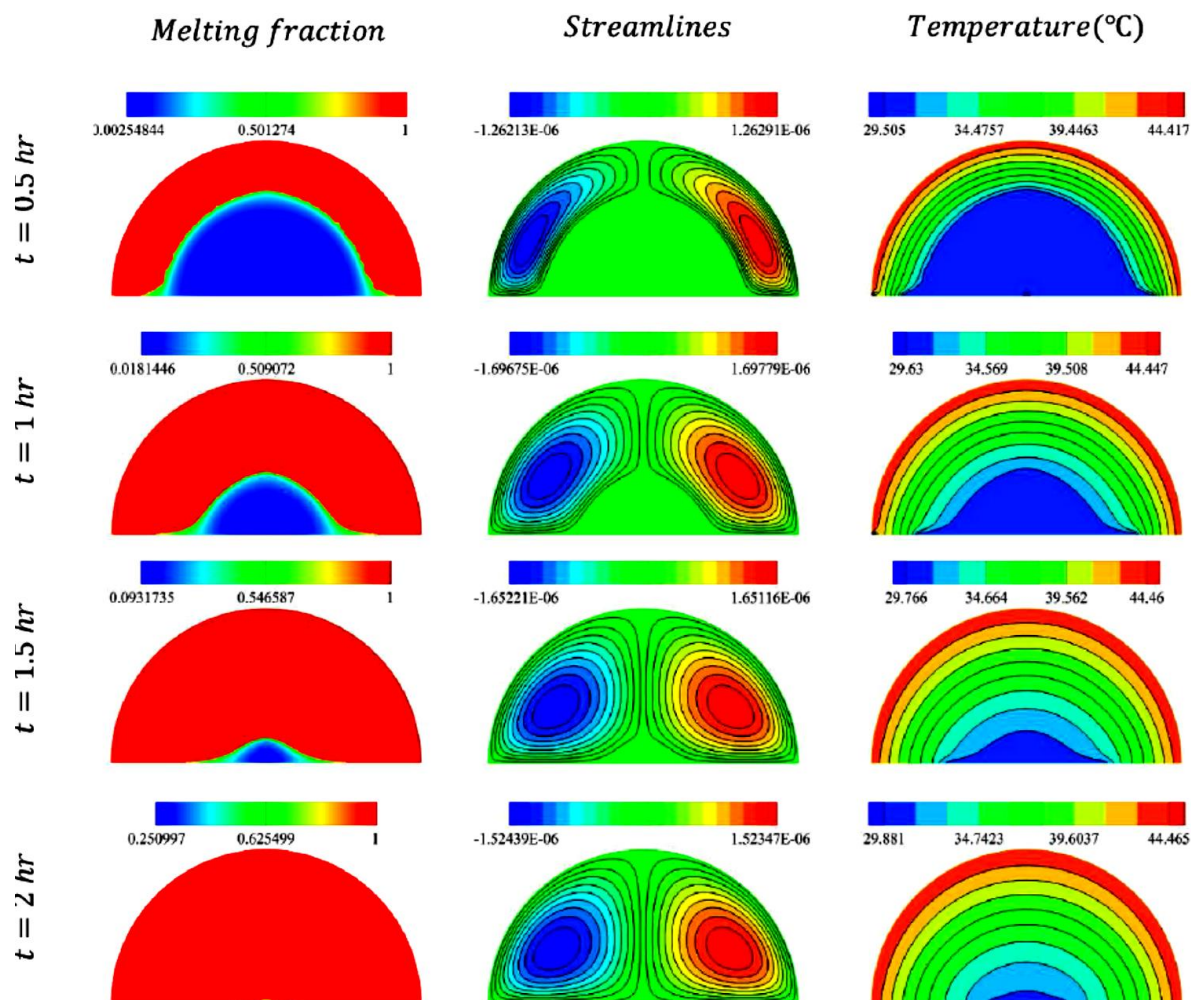
برای هر دو تخلخل، پس از ۱ ساعت از آغاز فرآیند ذوب، PCM مذاب به دلیل نیروی شناوری حرکت می‌کند که منجر به تشکیل دو گردابه ساعتگرد و پادساعتگرد در هر دو طرف هندسه می‌شود. از سوی دیگر، بیشتر خطوط هم دما در ناحیه فاز مایع مشاهده می‌شوند، زیرا گرمای ورودی از دیواره بالایی منجر به گرمای محسوس فاز مایع (افزایش دمای فاز مایع) و فاز جامد ذوب گشته و حجم بیشتری از PCM ذوب می‌شود، که گردابه‌ها

بزرگ‌تر و قوی‌تر می‌شوند. همچنین مرکز گردابه‌ها در مقابل جهت گرانش حرکت می‌کنند. علاوه بر این، ایزوترم‌ها به منظور افزایش فاصله بین دیواره بالایی و سطح فاز جامد در اختلاف دمای ثابت، از هم فاصله گرفته‌اند. در شکل‌های (۴-۴) و (۵-۴) شبیه‌سازی‌ها برای  $\Delta T=15$  ,  $\varepsilon=0.8$  و  $\Delta T=15$  ,  $\varepsilon=0.95$  نشان داده شده است.



شکل (۴-۴). کسر ذوب، خطوط جریان، کانتورهای دما در مقابل زمان برای

$$\Delta T=15, \varepsilon=0.8$$



شکل (۴-۵). کسر ذوب، خطوط جریان، کانتورهای دما در مقابل زمان برای

$$\Delta T=15, \varepsilon=0.95$$

با مقایسه این دو شکل در یک زمان ثابت، می‌توان گفت که افزایش تخلخل منجر به کاهش کسر ذوب شده‌است. از آنجا که حجم PCM برای تخلخل ۰.۹۵ بیشتر از تخلخل ۰.۸ است. از سوی دیگر، استحکام خطوط جریان

با افزایش تخلخل افزایش یافته است، زیرا مقاومت محیط متخلخل در مقابل حرکت جریان سیال کاهش یافته است. علاوه بر این، خطوط هم دما برای هر دو تخلخل‌ها به جز در کف اتاقی که در آن چگالی خطوط هم دما بالا است، مشابه می‌باشند.

### ۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، فرآیند ذوب پارافین درون یک نیم‌استوانه با محیط متخلخل با استفاده از روش FVM، الگوریتم PIMPLE و با توجه به اثرات همرفت آزاد برای سه اختلاف دمایی مختلف ( $5 < \Delta T < 15$ ) و دو تخلخل (۴ برابر با: ۰.۸ و ۰.۹۵) شبیه‌سازی شده‌است. علاوه بر این، محیط متخلخل به عنوان عدم تعادل حرارتی محلی در نظر گرفته می‌شود و مدل داری در معادله ممنتوم اعمال گردیده است. PCM استفاده شده نوعی پارافین با دمای ذوب ۳۰ درجه سانتیگراد است و محیط متخلخل از فلز آلومینیوم با چگالی حفره ۱۰ ساخته شده‌است. مشاهدات مهم را می‌توان در زیر فهرست کرد:

در  $\Delta T$  ۵، ۱۵، افزایش تخلخل ۰.۸ تا ۰.۹۵ به ترتیب استحکام خطوط جریان را ۱۲۳.۶٪ و ۱۶۱.۵۴٪ در یک زمان ثابت افزایش می‌دهد.

در تمام  $\Delta T$  ها، افزایش تخلخل، انتقال حرارت همرفتی را نسبت به مکانیزم رسانا به منظور افزایش نفوذپذیری محیط متخلخل در مقابل حرکت جریان سیال افزایش می‌دهد.

در  $\Delta T$  برابر با ۵، افزایش تخلخل ۰.۸ تا ۰.۹ حجم PCM را ۱۱.۷٪ افزایش می‌دهد، اما بر زمان فرآیند ذوب تاثیر نمی‌گذارد.

افزایش تخلخل از ۰.۸ تا ۰.۹، حجم PCM را ۱۱.۷٪ افزایش می‌دهد و در عین حال، زمان فرآیند ذوب را به ترتیب به اندازه ۳۱.۷ و ۳۰.۸ درصد برای  $T\Delta$  های ۱۰ و ۱۵ کاهش می‌دهد.

## مراجع

- [1] S. Ali and S. P. Deshmukh, "An overview: Applications of thermal energy storage using phase change materials," *Mater. Today Proc.*, vol. 26, pp. 1231–1237, 2020.
- [2] H. Zhang, X. Liu, G. Song, and H. Yang, "Effects of microencapsulated phase change materials on the thermal behavior of multilayer thermal protective clothing," *J. Text. Inst.*, vol. 112, no. 6, pp. 1004–1013, 2021.
- [3] S. Mondal, "Phase change materials for smart textiles—An overview," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 11–12, pp. 1536–1550, 2008.
- [4] Q. Al-Yasiri and M. Szabó, "Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis," *J. Build. Eng.*, vol. 36, p. 102122, 2021.
- [5] S.-R. Yan *et al.*, "A critique of effectiveness concept for heat exchangers; theoretical-experimental study," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 159, p. 120160, 2020.
- [6] J. Qiu, D. Huo, and Y. Xia, "Phase-change materials for controlled release and related applications," *Adv. Mater.*, vol. 32, no. 25, p. 2000660, 2020.
- [7] Z. Liu and C. Ma, "Numerical analysis of melting with constant heat flux heating in a thermal energy storage system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 18, pp. 2521–2538, 2002.
- [8] X. Li *et al.*, "Multifunctional HDPE/CNTs/PW composite phase change

materials with excellent thermal and electrical conductivities,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 86, pp. 171–179, 2021.

- [9] S. Rostami *et al.*, “A review of melting and freezing processes