

## بررسی عددی رفتار انجماد درون مبدل حرارتی سه لوله‌ای حاوی مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از فین

ابوالفضل نعمت پور کشتلی<sup>۱</sup> و محسن شیخ الاسلامی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۹۷/۰۹/۱۸ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۱/۲۴	در این مقاله به بررسی عددی رفتار انجماد ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای دو بعدی پرداخته شده است. فضای بین پوسته و لوله‌ها با RT82 به عنوان ماده تغییر فاز دهنده پر شده است و آب به عنوان سیال گرم در لوله‌ی داخلی و خارجی جریان دارد. هدف اصلی در این مطالعه بررسی تاثیر چیدمان‌های فین و افزودن نانو ذره CuO با درصد وزنی مختلف روی فرآیند انجماد ماده تغییر فاز دهنده است. همچنین مقایسه‌ای بین مبدل حرارتی سه لوله‌ای با فین و نانو ذره و مبدل حرارتی بدون فین و بدون نانو ذره، صورت پذیرفته است. در ادامه برای بررسی اثر تغییرات دمای سیال ورودی به عنوان پارامتر جریانی، مقایسه‌ای بین مبدل در دمای مختلف صورت گرفته است. همچنین مقدار انرژی ذخیره شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده این واقعیت است با افزودن نانو ذره زمان انجماد برای تمامی مبدل‌های بررسی شده با فین نسبت به مبدل بدون فین کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد، کاهش زمان انجماد نسبت به حالت بدون فین برای چیدمان‌های لوله داخلی (Case B)، خارجی (Case C)، هر دو لوله جانبی (Case D)، هر دو لوله جانبی (Case E) به ترتیب، ۴۰٪، ۵۷٪، ۵۸٪ و ۵۶٪ می‌باشد. همچنین با تغییر دمای سیال از ۶۵ به ۶۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب زمان انجماد تا ۲۱٪ و ۳۴٪ کاهش یافته است.
<b>واژگان کلیدی:</b> فرآیند انجماد، مواد تغییر فاز دهنده، چیدمان فین، انتقال حرارت.	

### ۱-مقدمه

رو توجه دانشمندان به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر معطوف گردیده است. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشید از مهم‌ترین نوع انرژی‌ها می‌باشد، که در اکثر نقاط جهان در دسترس است. یکی از محدودیت‌های استفاده از انرژی خورشیدی این است که در شب نمی‌توان از آن استفاده کرد و مقدار نور خورشیدی که کره‌ی زمین دریافت می‌کند بستگی به عواملی مثل مکان، زمان روز، زمان سال و شرایط آب و هوایی دارد. به همین دلیل استفاده از ذخیره چنین انرژی امر موثری است. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، یکی از فناوری‌های مهم

امروزه استفاده از انرژی با افزایش جمعیت جوامع و با توجه توجه به نیاز به انرژی در بخش‌های مختلف، با مشکل بزرگی روبرو شده است. همچنین مصرف بیش از حد و روزافزون از انرژی، نیاز به تولید هر چه بیشتر آن را ضروری می‌سازد. که این امر موجب مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی که جز سوخت تجدید ناپذیرند می‌شود و از طرفی استفاده بیش از حد از این نوع سوخت در اکو سیستم مشکل ایجاد می‌کند و به دنبال آن افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای و بروز مشکلات زیست محیطی می‌شود. از این

\*پست الکترونیک نویسنده مسئول: mohsen.sheikholeslami@nit.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دهنده این واقعیت است که در طی فرآیند ذوب نرخ انتقال حرارت به علت اثر جابه‌جایی طبیعی نسبت به فرآیند انجماد بیشتر است.

اسماعیل و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۴ به بررسی عددی انجماد در یک سیلندر افقی حاوی مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش دمای سیال ورودی زمان انجماد مواد تغییر فاز دهنده بطور قابل توجهی کاهش یافته است بنابراین مواد تغییر فاز دهنده بیشتری منجمد شده است.

آگینیم و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۰ به بررسی عددی، تاثیر چهار لوله سیال انتقال دهنده (HTF) درون یک مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده بر نرخ انتقال حرارت پرداختند. و همچنین چیدمان‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد می‌توان از انتقال حرارت در راستای محوری چشم‌پوشی کرد.

کاستل و همکاران [۱۲] به بررسی اثر فین‌های عمودی بر رفتار انجماد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد اضافه کردن فین‌های عمودی در سمت لوله سیال انتقال دهنده (HTF) باعث افزایش کارایی سیستم در طول فرآیند انجماد شده است. علت آن بخاطر افزایش اثر جابه‌جایی طبیعی بوده است.

چوی و کیم [۱۳] به بررسی پارمترهای انتقال حرارت مواد تغییر فاز دهنده در طی فرآیند انجماد در یک محفظه استوانه‌ای با فین شعاعی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد قرار دادن فین یک بهبود در نرخ انتقال حرارت نسبت به حالت بدون فین می‌باشد.

عبدالجلیل و همکاران [۱۴] اثر افزایش انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای (TTHX) با بکارگیری فین داخلی و خارجی در طی فرآیند ذوب و انجماد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که تاثیر ضخامت فین در مقایسه با اثر تعداد فین و طول فین بر روی زمان ذوب و انجماد ناچیز است.

قاسمی و همکاران [۱۵] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی درون یک محفظه مربعی حاوی نانو سیال آب-آلومینا را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان دهنده این واقعیت است که با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

برای استفاده مجدد از انرژی در زمان کمبود انرژی می‌باشند. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به این صورت است که انرژی مازاد تولید شده در ساعات کم باری در سیستم ذخیره کننده انباشته شده و می‌تواند نیاز ساعت‌های کمبود انرژی را جبران کند. یکی از مهمترین روش‌ها ذخیره‌سازی، ذخیره سازی بصورت حرارتی است.

این روش ذخیره‌سازی قابلیت ترکیب شدن با سیستم‌های رایج تولیدگرما و همچنین سیستم‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی را دارا می‌باشد. یکی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمای، ذخیره‌سازی بصورت نهان<sup>۱</sup> است. از مزایای استفاده از روش نهان می‌توان به گرمای نهان ذوب بالا، محدوده وسیع دمای تغییر فاز و تغییر دمایی اندک به هنگام ذوب و انجماد نام برد. از طرفی به دلیل بالا بودن مقدار گرمای نهان در مواد تغییر فاز دهنده<sup>۲</sup>، این روش امکان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی را در حجم کم امکان پذیر می‌سازد. این خصوصیات اجازه می‌دهد که مواد تغییر فاز دهنده در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند ذخیره حرارتی انرژی خورشیدی [۱-۲]، مدیریت حرارتی دستگاه‌های الکترونیکی [۱-۳]، ذخیره حرارتی در ساختمان‌ها [۴]، خنک کننده موتورها [۵] استفاده شود.

سوکولف و کیزمن [۶] کاربرد مواد تغییر فاز دهنده را در یک کالکتور خورشیدی برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ ارائه کردند. یک بررسی موثر از ذخیره انرژی حرارتی به وسیله مواد تغییر فاز دهنده توسط زالبا و همکاران [۷] ارائه شد. آن‌ها انواع مواد تغییر فاز دهنده را بر اساس انتقال حرارت، خصوصیات مواد و کاربردهای آن طبقه بندی کردند.

مدانو و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۹ به طور تجربی به بررسی خصوصیات انتقال حرارت مختلف سیستم‌های ذخیره‌سازی مواد تغییر فاز دهنده کوچک در طی فرایندهای ذوب و انجماد به منظور استفاده بالقوه آن‌ها در سیستم های کوچک اندازه‌گیری پرداختند. نتایج نشان داد که مبدل حرارتی دو لوله با مواد تغییر فاز دهنده که در یک ماتریس گرافیت تعبیه شده، دارای بالاترین مقدار ضریب انتقال حرارت بود.

ساری و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۹ بصورت آزمایشگاهی در یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی بصورت پوسته و لوله به بررسی فرآیند انجماد و ذوب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان

<sup>۲</sup> Latent Thermal Energy System

<sup>۱</sup> Phase change Material (PCM)

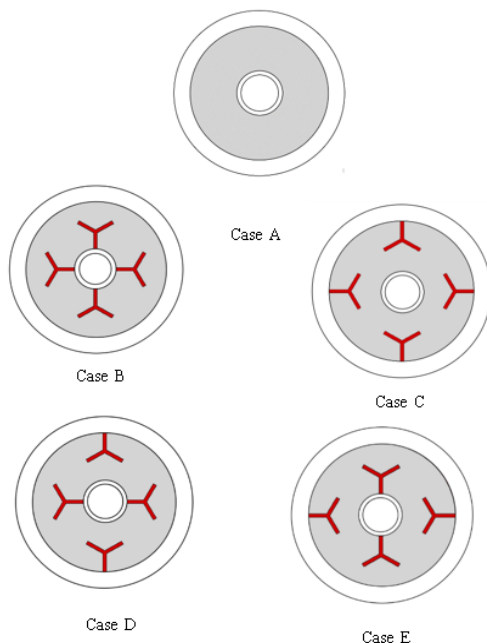
جدول ۱. خواص مواد تغییر فاز دهنده RT82 و نانو ذره CuO

خاصیت	تغییر فاز دهنده	نانو ذره
دمای ذوب	$-358/15$ (K) $350/15$	-
گرمای نهان	$176$ KJ/kg	-
چگالی	$770-950$ Kg.m <sup>-3</sup>	$6510$ Kg.m <sup>-3</sup>
ضریب انبساط حجمی	$0/001$ K <sup>-1</sup>	-
ظرفیت گرمایی ویژه	$2000$ J.kg <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup>	$540$ J.kg <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup>
ویسکوزیته دینامیکی	$0/3499$ kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	$5/12 \times 10^{-6}$ kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
رسانایی گرمایی	$0/2$ W/m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>	$18$ W/m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>

سعدالدین و همت اسفه [۱۶] برای تحلیل جابجایی ترکیبی جریان سیال و انتقال حرارت در نانوسیال درون یک محفظه ی مربعی شکل زاویه دار که دو مانع درون آن وجود دارد، را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش عدد رایلی و همچنین افزایش کسر حجمی نانو ذرات سبب افزایش انتقال حرارت درون محفظه می‌شود. کمانی و رفعی [۱۷] به بررسی تأثیر افزودن کسر حجمی نانوذرات بر عملکرد یک مبدل حرارتی جریان مخالف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد اگر کسر حجمی نانوذرات ۶ درصد باشد، ضریب انتقال حرارت کلی به طور متوسط ۱۵ درصد نسبت به حالتی که فقط از سیال پایه استفاده شود، افزایش می‌یابد.

## ۲- مدل فیزیکی و ترمو فیزیکی مسئله

هندسه مورد بررسی در این پژوهش در شکل (۱) و (۲) نشان نمایش داده شده است. شکلی از یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای (TTHX) است و سیال انتقال دهنده (HTF) در لوله داخلی و خارجی جریان دارد. از ماده RT82 به عنوان مواد تغییر فاز دهنده استفاده شده است. خواص ترمو فیزیکی این ماده در جدول ۱ آمده است. با توجه به شکل لوله داخلی با قطر ۳۰ میلی‌متر و لوله خارجی با قطر ۶۰ میلی‌متر لوله داخلی با ضخامت ۱ میلی‌متر و لوله خارجی با ضخامت ۲ میلی‌متر برای همه مدل‌ها در نظر گرفته شده است. طول فین ۸ میلی‌متر و ضخامت آن ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



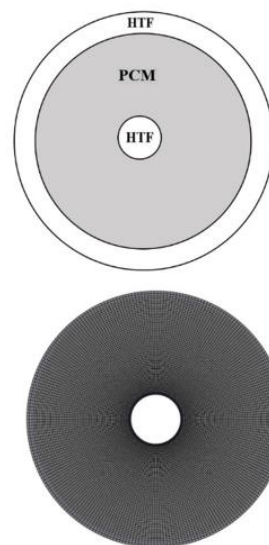
شکل ۲- سطح مقطع چیدمان‌ها

### ۲-۱- شرایط مرزی و شرایط اولیه

در این کار عددی حل بصورت دما ثابت در نظر گرفته شده است. برای شرایط اولیه نیز، دمای اولیه ماده تغییر فاز دهنده،  $363/15$  درجه کلونین، بالاتر از دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده و کسر مایع ۱ لحاظ شده است. سیال انتقال دهنده به عنوان شرایط مرزی در طول محاسبات  $338/15$  درجه کلونین درون لوله داخلی و خارجی ثابت فرض شده است.

### ۳- معادلات حاکم

به منظور مدلسازی فرآیند تغییر فاز در یک مبدل سه لوله‌ای از روش آنتالپی متخلخل استفاده می‌شود [۱۸]. در



شکل ۱- شکل فیزیکی محفظه پر شده از مواد تغییر فاز دهنده و نمایی از شبکه

محدوده ذوب ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد. همچنین در رابطه (۲)،  $S_i$  ترم چشمه است که به علت اثرات تغییر فاز در انتقال حرارت جابه‌جایی به رابطه مومنتوم اضافه می‌شود که در رابطه (۸) آورده شده است.

$$S_i = \frac{C(1-\beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} u_i \quad (۸)$$

$C$  ثابت ناحیه خمیری است [۱۸]. از  $C$  تا  $10^4$  تا  $10^7$  تغییر می‌کند. ثابت ناحیه خمیری، دامنه میرایی را مشخص می‌کند. مقادیر بزرگتر این ثابت بیانگر شیب سریع تر میرایی سرعت بوده و مقادیر خیلی بزرگ آن می‌تواند باعث ایجاد نوسان در حل گردد. در این پژوهش ثابت ناحیه خمیری  $10^5$  در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از صفر نشدن مخرج مقدار  $\varepsilon$  برابر  $0.001$  در نظر گرفته شده است [۲۰]. فرضیاتی که در شبیه سازی برای نانو ذره مواد تغییر فاز دهنده لحاظ شده است عبارتند از:

### ۳-۵- چگالی

چگالی نانوسیال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{pcm} + \phi\rho_s \quad (۹)$$

### ۳-۶- ضریب انبساط حجمی

ضریب انبساط حجمی برای نانوسیال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\beta\rho)_{pcm} + \phi(\beta\rho)_s \quad (۱۰)$$

### ۳-۷- ظرفیت گرمایی ویژه

$$(c_p\beta)_{nf} = (1-\phi)(c\rho)_{pcm} + \phi(c\rho)_s \quad (۱۱)$$

### ۳-۸- ویسکوزیته دینامیکی

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{pcm}}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (۱۲)$$

### ۳-۹- گرمای نهان

گرمای نهان برای نانوسیال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$(\rho L)_{nf} = (1-\phi)(L\rho)_{pcm} \quad (۱۳)$$

### ۳-۱۰- رسانایی گرمایی

$$K_{eff} = k_{nf_0} + k_d$$

$$\frac{k_{nf_0}}{k_{pcm}} = \frac{K_s + 2k_{pcm} - 2\phi(k_{pcm} - K_s)}{K_s + 2k_{pcm} - \phi(k_{pcm} - K_s)} \quad (۱۴)$$

$$k_d = b(\rho c_p)_{np} \sqrt{u^2 + v^2} \phi d_p$$

این روش کسر مایع ذوب در هر تکرار محاسبه می‌گردد. ناحیه خمیری ناحیه ای است که در آن تخلخل با ذوب ماده تغییر فاز دهنده از ۰ تا ۱ افزایش پیدا می‌کند. هنگامی که ناحیه‌ای به طور کامل منجمد گردد تخلخل صفر گشته و سرعت جریان در این ناحیه تا صفر کاهش پیدا می‌کند. در طی فرآیند تغییر فاز مواد تغییر فاز دهنده جامد ذوب شده و به مایع تبدیل خواهد شد و برعکس. زمانی که مواد تغییر فاز دهنده بطور کامل ذوب است، کسر مایع عدد ۱ و زمانی که این مواد کاملاً جامد است، کسر مایع ۰ است. در طول این زمان بازه کسر مایع بین ۰ و ۱ می‌باشد.

### ۳-۱- پیوستگی

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

### ۳-۲- مومنتوم

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

### ۳-۳- انرژی

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

آنتالپی کل مواد برابر است با مجموع آنتالپی محسوس ( $h$ ) و حرارت نهان ( $\Delta H$ ) در معادله (۴) و (۵) به ترتیب آورده شده است:

### ۳-۴- آنتالپی محسوس

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

$$H = h + \Delta H \quad (۵)$$

مقدار گرمایی نهان ( $L$ )، طبق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$\Delta H = \beta L \quad (۶)$$

که  $\Delta H$  می‌تواند از صفر (جامد) تا یک (مایع) تغییر کند. به همین منظور، کسر حجمی ذوب به صورت رابطه (۷) تعریف می‌گردد [۱۹]:

$$\beta = \frac{\Delta H}{l} = 0 \quad \text{if } T < T_s$$

$$\beta = \frac{\Delta H}{l} = 0 \quad \text{if } T > T_l \quad (۷)$$

$$\beta = \frac{\Delta H}{l} = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \quad \text{if } T_s < T < T_l$$

که  $T_s$  و  $T_l$  به ترتیب نشان دهنده دمای ابتدایی و انتهایی

را در همه معادلات ثابت در نظر می‌گیرد به جز نیروی شناوری در معادله مومنتوم که در این حالت چگالی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T) \quad (15)$$

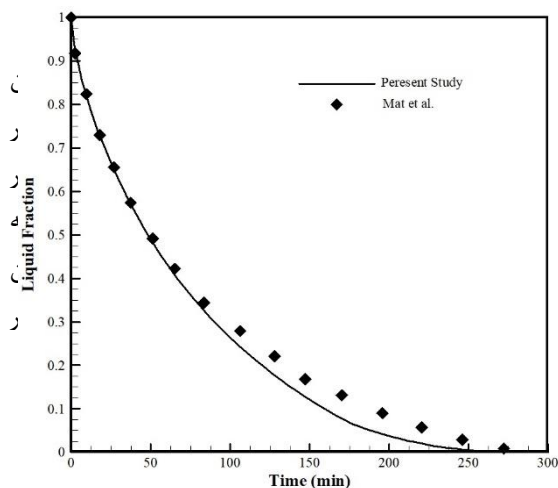
#### ۴- اعتبار سنجی و استقلال از شبکه

##### ۴-۱- استقلال از شبکه

در این پژوهش مطالعات مربوط به استقلال از مش و استقلال از گام زمانی در شکل (۳) نشان داده شده است. جهت بررسی تاثیر تعداد مش و گام زمانی بر حل عددی سه شبکه مختلف با ۲۰۰۰، ۴۵۰۰، ۷۸۰۰ و ۱۴۰۴۵ سلول مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت ۷۸۰۰ مش به عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. همچنین گام زمانی برای شبیه سازی ۰/۱ ثانیه انتخاب شده است.

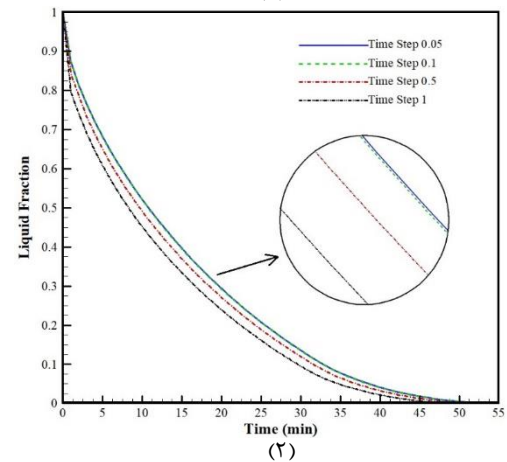
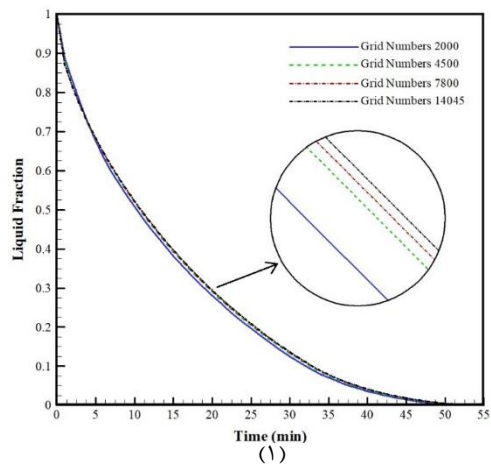
##### ۴-۲- اعتبار سنجی

جهت اعتبار سنجی این پژوهش از مقاله مت و همکاران [۲۲] استفاده شده است. در مقاله مذکور یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای مدل شده است. که سیال عامل از لوله داخلی و خارجی در جریان دارد و مواد تغییر فاز دهنده فضای بین دو سیال عامل را شامل شده است. نمودار شکل (۴) تغییرات کسر مایع نسبت به زمان در مقاله مذکور و مقادیر بدست آمده، در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه تغییرات کسر مایع بر حسب زمان، محاسبه شده در مقاله مت و همکاران [۲۲] و این پژوهش

تغییرات کسر مایع نسبت به زمان بدست آمده در این چیدمان فین برای پژوهش انجام شده نسبت به مقاله مذکور از دقت خوبی برخوردار است. دلیل اختلاف این دو نمودار در ناحیه انتهایی می‌تواند انتخاب ثابت ناحیه آمیخته متفاوت در حل مسئله باشد. اما نتایج نشان دهنده این



شکل ۳- استقلال از شبکه (۱) استقلال حل از مش (۲) استقلال حل از گام زمانی

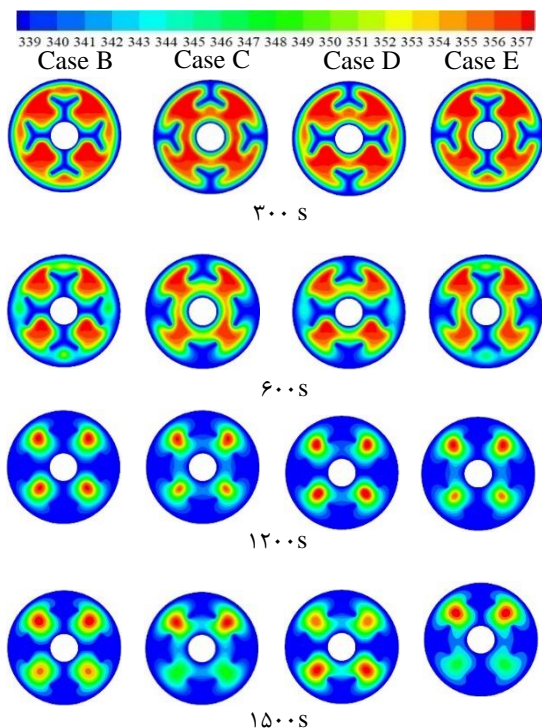
ثابت بالا تعیین شده به صورت تجربی پس از کار واکاوی و کواژی ارزیابی می‌شود [۲۱]. در این مطالعه از راستای طولی صرف نظر شده است و مسئله مورد نظر بصورت دو بعدی و ناپایا بررسی شده است. حجم ماده تغییر فاز دهنده در همه نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. مدل آرام برای ویسکوزیته و الگوریتم سیمپل برای کوپل کردن سرعت و فشار انتخاب شده است. تلفات ویسکوزیته در سیال انتقال حرارت ناچیز در نظر گرفته شده است. از مقاومت حرارتی پوسته داخلی صرف نظر می‌گردد. برای اجزای سرعت، اصلاح فشار، انرژی حرارتی و کسر مایع به ترتیب ۰/۴، ۰/۳، ۱ و ۰/۹ انتخاب شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنتوم  $10^{-3}$  و معادله انرژی  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. جهت اعمال تاثیر جابه‌جایی طبیعی می‌توان برای محاسبه چگالی ماده، از مدل تقریب بوزینسک استفاده کرد که بتوان سریع‌تر همگرا بشود. در تقریب بوزینسک، چگالی

پایین، نسبت به نواحی بالا با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد. این حالت بخاطر ماهیت جابه‌جایی می‌باشد که باعث می‌شود فرآیند ذوب در قسمت پایین سریع‌تر رخ بدهد. همچنین ماده تغییر فاز دهنده جامد به علت وزن بیشتر به سمت پایین حرکت می‌کند.

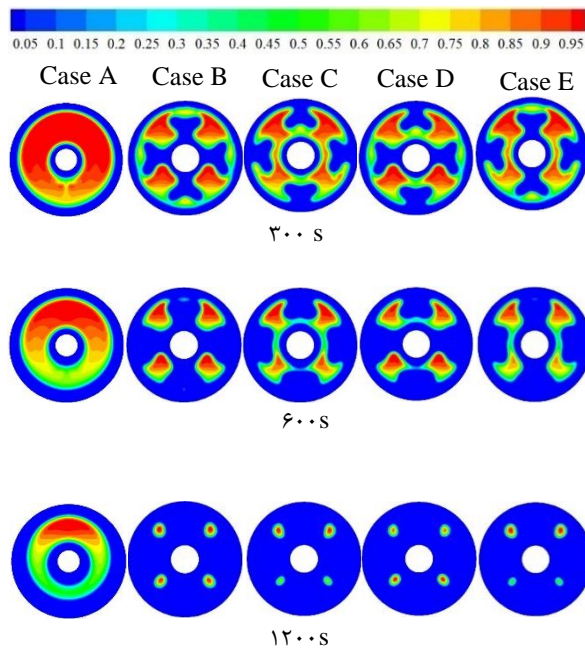
در نمونه بدون فین بعد از گذشت ۲۰ دقیقه، مقادیری زیادی از مواد تغییر فاز دهنده مذاب باقی مانده و بصورت مایع است. به همین دلیل نیاز به زمان بیشتری برای تکمیل فرآیند نسبت به دیگر نمونه‌ها دارد.

نتایج حاصل از شکل نشان می‌دهد با قرار دادن فین نرخ انتقال حرارت افزایش یافته است و زمان انجماد به نسبت قابل توجهی کاهش یافته است.

شکل (۶) نشان دهنده کانتور توزیع دما نمونه‌ها با فین در یک مبدل حرارتی سه لوله‌ای حاوی مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند انجماد از اطراف دیواره لوله داخلی و خارجی و همچنین فین شروع شده و به داخل مواد تغییر فاز دهنده نفوذ می‌کند. در نتیجه یه لایه نازک جامد در تماس با لوله‌ها و پوسته در اثر جابه‌جایی طبیعی به وجود می‌آید. نتایج نشان می‌دهد خطوط هم‌دمای انجماد تقریباً موازی با سطح انتقال حرارت و لایه‌های انجماد قرار می‌گیرد.



شکل ۶- کانتور توزیع دما در زمان‌های مختلف



شکل ۵- کانتور توزیع کسر حجمی در زمان‌های مختلف

واقعیت است که رفتار کلی نمودار و زمان انجماد مواد تغییر فاز دهنده در نمودار مشابه است.

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- تاثیر چیدمان فین‌ها بر زمان انجماد

چیدمان‌های مختلف فین در یک مبدل سه لوله‌ای (TTHX) در شکل (۵) نشان داده شده است. در همه چیدمان‌ها، حجمی که در آن مواد تغییر فاز دهنده حضور دارد یکسان در نظر گرفته شده است. از این رو مساحت انتقال حرارت تمام چیدمان‌ها شکل‌ها با هم برابر است. کانتور مربوط به کسر مایع، جهت مقایسه رفتار جریان‌های ایجاد شده در زمان‌های مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است.

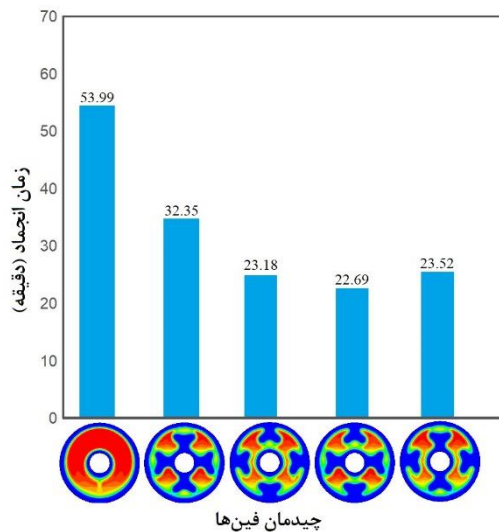
کانتورهای کسر مایع در شکل نشان دهنده این واقعیت است در لحظات ابتدایی با گسترش ناحیه انجماد از دیواره‌ها، انرژی هدایت گرمایی مکانیزم غالب است. در طی فرآیند انجماد، جابه‌جایی طبیعی تنها در شروع فرآیند تاثیرگذار بوده و هر چه از زمان انجماد می‌گذرد، اثر جابه‌جایی طبیعی به سمت صفر میل می‌کند. همانطور که در شکل مشخص است در طی فرآیند انجماد در زمان اولیه فرآیند حرارت از ماده تغییر فاز دهنده مذاب به فین و لوله و پوسته انتقال پیدا می‌کند.

در شکل (۵) در نمونه بدون فین نشان می‌دهد نیمه قسمت



نتایج حاصل از شکل نشان می‌دهد چیدمان‌های لوله داخلی (Case B)، خارجی (Case C)، هر دو لوله جانبی (Case D)، هر دو لوله جانبی (Case E) نسبت به حالت بدون فین، زمان انجماد به ترتیب تا ۴۰٪، ۵۷٪، ۵۸٪ و ۵۶٪ کاهش می‌یابد.

همچنین قرار دادن فین در هر دو لوله جانبی (Case D) و هر دو لوله جانبی (Case E) نسبت به حالت خارجی (Case C) تغییرات کمی در زمان انجماد مواد تغییر فاز دهنده را نشان می‌دهد. بیشترین کاهش زمان انجماد در مبدل سه لوله‌ای با فین در هر دو لوله جانبی (Case D) می‌باشد.



شکل ۸- نمودار میله‌ای اثر چیدمان مختلف فین بر مقدار زمان انجماد

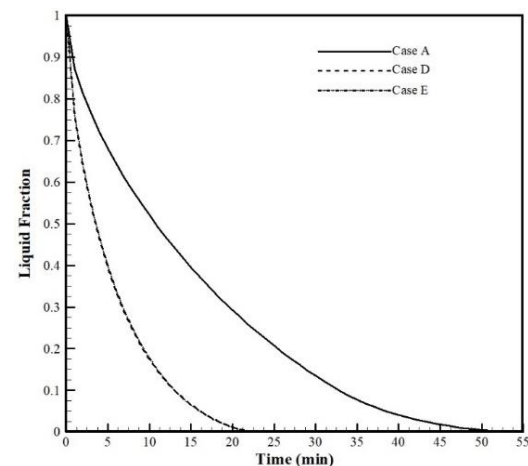
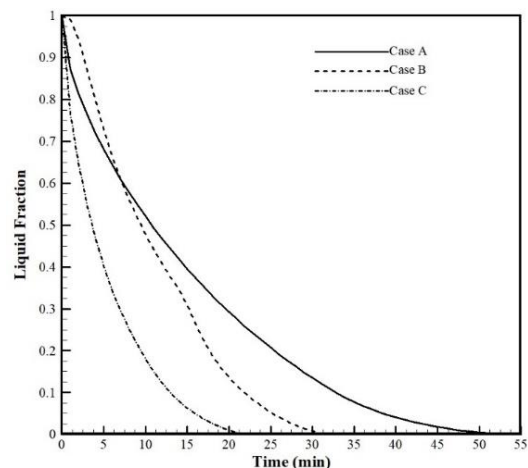
### ۲-۵- تاثیر دمای سیال بر زمان انجماد

شکل (۹) نمودار میله‌ای اثر افزایش عدد استفان بر مقدار زمان انجماد نشان برای سه دمای ورودی ۶۵، ۶۰، ۵۵ درجه سانتی گراد مطابق با اعداد استفان ۱/۸، ۰/۲۳ و ۰/۳۱ برای حالت خارجی (Case C) نشان داده شده است. عدد استفان شرایط کارکرد مبدل حرارتی تحت انجماد را توصیف می‌کند. عدد استفان طبق رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد:

$$Ste = \frac{c_p (T_m - T_{HTF})}{L} \quad (16)$$

گرمای محسوس ( $c_p$ )، گرمای نهان ( $L$ ) و دمای میانگین انجماد مواد تغییر فاز دهنده ( $T_m = \frac{T_s + T_l}{2}$ ) و دمای سیال ورودی به لوله ( $T_{HTF}$ ) پارامترهای برای تعیین عدد استفان هستند. عدد استفان نشان دهنده اختلاف بین دمای ورودی سیال عامل و دمای میانگین انجماد مواد تغییر فاز دهنده به دمای نهان انجماد می‌باشد. با افزایش اختلاف

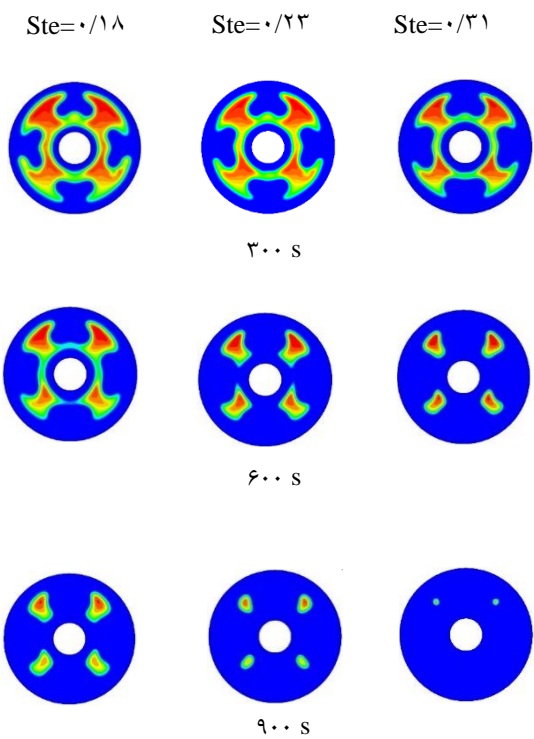
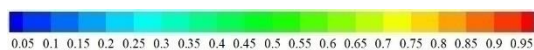
نمودار تغییرات توزیع کسر مایع برای چیدمان‌های فین‌های مختلف که به عنوان کمیتی برای نرخ انتقال حرارت فرآیند انجماد در نظر گرفته شده، در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به نمودار می‌توان نتیجه گرفت به دلیل وجود فین در مبدل حرارتی شیب ناحیه خطی نمودار توزیع کسر مایع نسبت به مبدل حرارتی بدون فین داخلی بهبود یافته است. از طرفی نتایج نشان می‌دهد قرار دادن فین در لوله خارجی (Case C) نسبت به لوله داخلی (Case C) عملکرد خوبی برخوردار است و زمان انجماد را نسبت قابل توجهی کاهش داده است. نمودار کسر مایع برای نمونه‌های هر دو لوله جانبی (Case D) و هر دو لوله جانبی (Case E) در مقایسه با حالت بدون فین (Case A) زمان انجماد را به نسبت قابل توجهی کاهش داده است.



شکل ۷- مقایسه کانتور کسر مایع نسبت به زمان با آرایش چیدمان‌های مختلف

شکل (۸) نمودار میله‌ای اثر چیدمان مختلف فین را بر مقدار زمان انجماد نسبت به مبدل حرارتی بدون فین نشان می‌دهد.

می‌یابد. بنابراین با افزایش عدد استفان زمان انجماد مواد تغییر فاز دهنده کاهش می‌یابد.

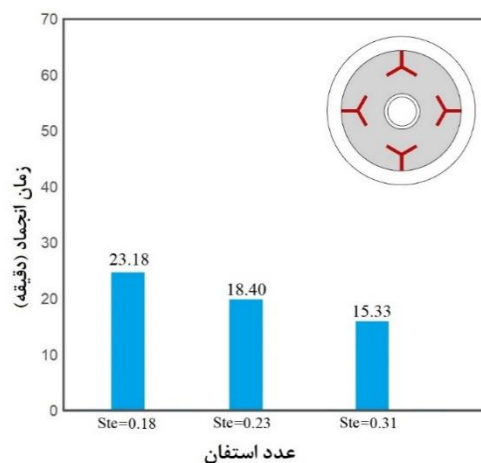


شکل ۱۰- کانتور توزیع کسر حجمی در زمان‌های مختلف نمودار زمان انجماد مواد تغییر فاز دهنده در راستای محوری مبدل حرارتی برای درصد وزنی‌های ۰، ۲/۵ و ۵ در شکل (۱۲) نشان داده شده است. نتایج مربوط به درصد وزنی مختلف نشان دهنده این واقعیت است که با افزایش درصد وزنی، زمان فرآیند انجماد بطور قابل توجهی کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد با افزودن درصد وزنی ۲/۵ و ۵ زمان انجماد برای تمامی حالت‌ها نسبت به درصد وزنی ۰ کاهش یافته است.

کانتورهای لحظه‌ای کسر مایع در زمان ۱۰ دقیقه برای مبدل حرارتی سه لوله‌ای با فین و بدون فین و همچنین با افزودن نانوذره و حالت بدون نانوذره با درصد وزنی ۰، ۲/۵ و ۵ در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در ابتدای فرآیند، گردابه‌ها منطقه کوچکی از انجماد را در اطراف لوله‌های سیال انتقال دهنده تشکیل می‌دهند، بنابراین در ابتدا جابه‌جایی طبیعی مکانیزم غالب بوده است. با گذشت زمان و افزودن نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده ناحیه گرم به سمت نیمه بالایی محفظه حرکت

دمای بین سیال ورودی و دمای میانگین متناسب با آن عدد استفان افزایش می‌یابد. از طرفی این امر باعث بیشتر شدن نرخ انتقال حرارت می‌شود.

نتایج حاصل از شکل (۹) نشان می‌دهد که با تغییرات دمای سیال ورودی زمان انجماد بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین با تغییر دمای سیال از ۶۵ به ۶۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب زمان انجماد تا ۲۱٪ و ۳۴٪ کاهش یافته است.



شکل ۹- نمودار میله‌ای اثر افزایش استفان بر مقدار زمان انجماد

شکل (۱۰) نشان دهنده کانتور کسر مایع برای نمونه خارجی (Case C) در زمان‌های مختلف برای اعداد استفان متفاوت می‌باشد. با مقایسه کانتورها در اعداد استفان مختلف مشاهده می‌گردد که با افزایش عدد استفان انجماد مواد تغییر فاز دهنده با نرخ بیشتری همراه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در زمان  $t=900s$  در عدد استفان ۰/۱۸ مواد تغییر فاز دهنده برای تکمیل فرآیند انجماد به زمان بیشتر نیاز دارد.

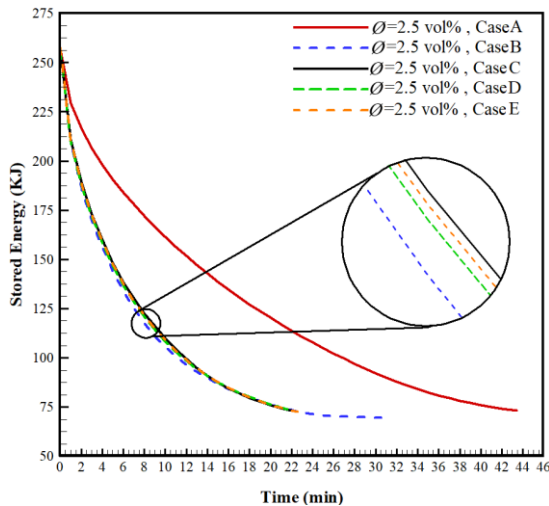
همچنین به دلیل تغییر دمای سیال ورودی ( $Ste=0.31$ ) در زمان  $t=900s$  تقریباً فرآیند انجماد تکمیل شده است.

شکل (۱۱) نشان دهنده نمودار دما بر حسب تابعی از زمان برای سه دمای ورودی ۶۵، ۶۰، ۵۵ درجه سانتی‌گراد مطابق با اعداد استفان ۰/۱۸، ۰/۲۳ و ۰/۳۱ برای نمونه خارجی (Case C) می‌باشد.

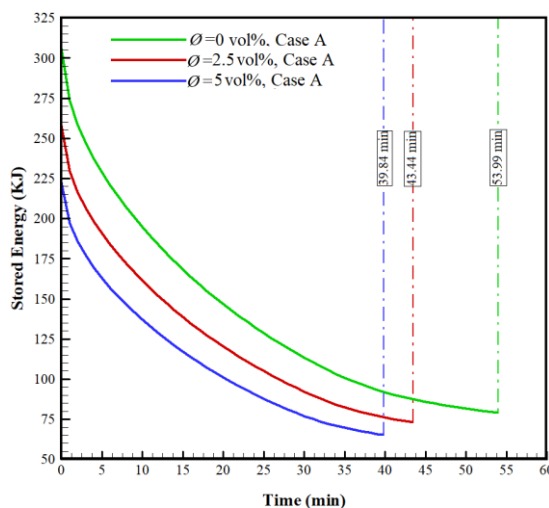
دمای نهایی فرآیند انجماد نشان دهنده این واقعیت است که، با افزایش عدد استفان که نشان دهنده اختلاف در دمای بین دمای ورودی سیال عامل و دمای میانگین انجماد مواد تغییر فاز دهنده، انتقال حرارت به همان نسبت افزایش



افزایش انتقال حرارت بالا به دلیل نوع فین‌های که در این موارد استفاده می‌شود، واضح‌تر است. بنابراین، هر دو فین و نانوذرات در تسریع انجماد مواد تغییر فاز دهنده کمک می‌کنند. اما نرخ انجماد سریعتر برای فین با Case D و بیشترین مقدار کسر حجم نانو ذرات یعنی درصد وزنی ۵ است.



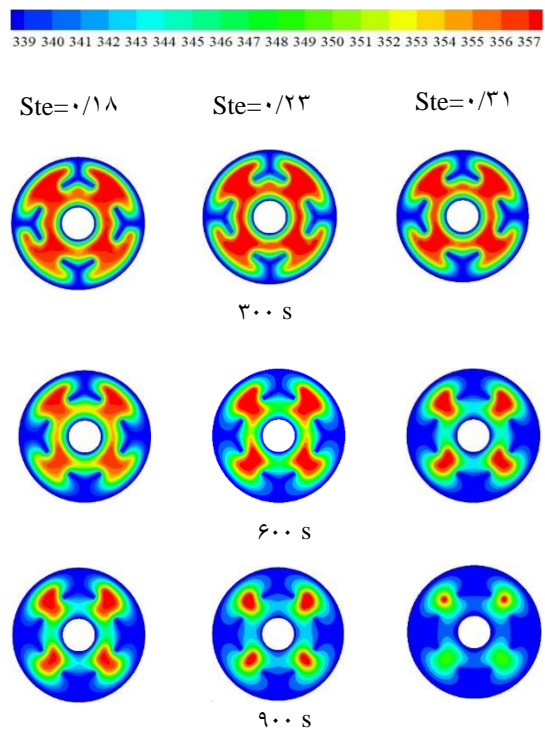
شکل ۱۴- نمودار مقایسه انرژی ذخیره شده نسبت به زمان برای مواد تغییر فاز دهنده خالص و مواد تغییر فاز دهنده با نانو ذره برای حالت‌های مختلف



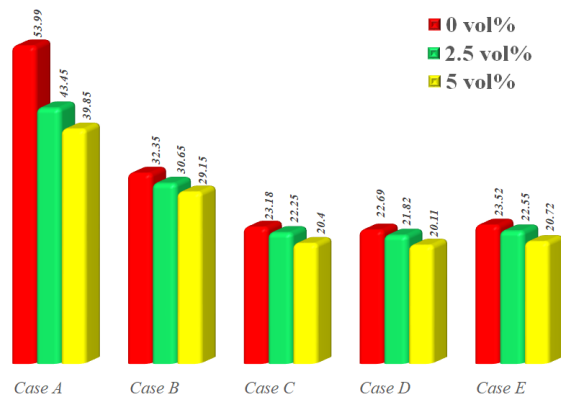
شکل ۱۵- نمودار نمودار مقایسه انرژی ذخیره شده نسبت به زمان برای مواد تغییر فاز دهنده خالص و مواد تغییر فاز دهنده با نانو ذره

نمودار مقایسه انرژی ذخیره شده نسبت به زمان طی فرآیند انجماد برای مواد تغییر فاز دهنده خالص و مواد تغییر فاز دهنده با نانو ذرات برای حالت‌های مختلف در شکل (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. نتایج حاصل از شکل (۱۴)

کرده و گردابه گرمایی کوچکی را تشکیل می‌دهد.



شکل ۱۱- کانتور توزیع دما در زمان‌های مختلف



شکل ۱۲- نمودار میله‌ای اثر افزایش استفا بر مقدار زمان انجماد

هرچه از زمان فرآیند می‌گذرد اثر هدایت حرارتی مکانیزم غالب می‌شود. همچنین نرخ انجماد در لحظات اولیه سریعتر بدست می‌آید. همانطور که قبلاً توضیح داده شد، سهم انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در فرآیند انتقال حرارت بیشتر در طی لحظه‌های اول عملیات بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بهبود در پیشرفت انجماد قبل از جابه‌جایی طبیعی در تمام حالت‌های مورد مطالعه، قابل مشاهده است. در مورد Case D و Case C به علت

۵. معرفی نانوذرات به تنهایی و یا ترکیبی از نانوذرات با فین به طور قابل توجهی فرآیند انجماد را بهبود می‌بخشد. با این حال، می‌توان با استفاده از فین‌ها به تنهایی برای استفاده از همان حجم، ارتقاء بسیار بهتر را به دست آورد.

۶. برای استفاده از همان حجم، استفاده از ترکیبات نانوذره با فین، اثر بهتر انجماد را نسبت به استفاده از نانوذرات به تنهایی نشان داد. همچنین، افزایش مقدار درصد حجمی در هنگام استفاده از این ترکیب‌ها عملکرد بهتر را نشان می‌دهد.

۷. نتیجه گیری می‌شود که انرژی گرمایی که توسط مواد تغییر فاز دهنده ذخیره می‌شود، می‌تواند با پراکنده شدن نانوذرات یا استفاده هم‌زمان با فین‌ها تغییر یابد.

#### فهرست علائم

##### علائم انگلیسی

$Ste$	عدد استفان
$C$	ناحیه خمیری ثابت، $Kgm^{-3}s^{-1}$
$C_p$	ظرفیت گرمایی، $JKg^{-1}$
$g$	ثابت گرانشی، $ms^{-2}$
$H$	آنتالپی کل، $JKg^{-1}$
$h$	آنتالپی محسوس، $J/Kg$
$K$	ضریب هدایت حرارتی، $Wm^{-1}K^{-1}$
$L$	گرما نهان، $J/Kg$
$S$	ترم چشمه
$T$	دما، $K$
$T_s$	دما سطح، $K$
$v$	سرعت سیال، $ms^{-1}$

##### علائم یونانی

$\beta$	ضریب انبساط گرمایی، $k^{-1}$
$\mu$	لزجت دینامیکی، $kgm^{-1}s^{-1}$
$\lambda$	کسر مایع
$\rho$	چگالی، $kgm^{-3}$
$\mu$	ویسکوزیته سیال، $Nsm^{-2}$

##### زیرنویس

$l$	فاز مایع
$nf$	نانوسیال
$pcm$	مواد تغییر فاز دهنده
$s$	نانو ذره
$s$	فاز جامد

#### تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/۳۹۰۰۵۱/۹۸ اعلام می‌دارند.

نشان می‌دهد با وجود فین و افزودن نانو ذره شیب نمودار بیشترین مقدار را برخوردار است. تمام حالت‌ها برای درصد وزنی ۲/۵ بوده و در ابتدای فرآیند مقادیر انرژی ذخیره شده برابر می‌باشد.

انجماد و انرژی ذخیره شده توسط مواد تغییر فاز دهنده با نانو، به‌ویژه برای محفظه‌ای که از دو طرف انتقال حرارت انجام می‌شود، تغییر می‌کند.

همچنین نتایج حاصل از شکل (۱۵) نشان می‌دهد که در ابتدای فرآیند برای (Case A) با درصد وزنی ۰ مقدار انرژی ذخیره شده بیشتر است. در حالیکه شیب نمودار انرژی ذخیره شده نسبت به زمان برای تمامی درصد وزنی یکی می‌باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی انجماد پارافین RT82 در یک مبدل سه لوله برای چیدمان هندسی مختلف فین در مقایسه با مبدل بدون فین و دمای مختلف سیال ورودی مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از این پژوهش شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. در طی فرآیند انجماد، جابه‌جایی طبیعی تنها در شروع فرآیند تاثیرگذار بوده و هر چه از زمان انجماد می‌گذرد اثر جابه‌جایی طبیعی کمتر می‌شود و مکانیزم غالب انرژی هدایت گرمایی می‌باشد. به نظر می‌رسد این به دلیل نیروهای مقاوم در برابر جریان ایجاد شده توسط ساختار فین و اثرات ویسکوزیته اضافه شده توسط حضور نانوذرات است.

۳. همچنین نتایج نشان می‌دهد کاهش زمان انجماد نسبت به حالت بدون فین برای چیدمان‌های لوله داخلی (Case B)، خارجی (Case C)، هر دو لوله جانبی (Case D)، هر دو لوله جانبی (Case E) به ترتیب، ۴۰٪، ۵۷٪، ۵۸٪ و ۵۶٪ می‌باشد. همچنین بیشترین کاهش زمان انجماد در مبدل سه لوله‌ای با فین مربوط به نمونه در هر دو لوله جانبی (Case D) می‌باشد.

۴. افزایش عدد استفان باعث اختلاف دمای سیال ورودی در لوله داخلی و خارجی و دمای متوسط مواد تغییر فاز دهنده می‌گردد. این امر باعث افزایش نرخ انجماد بیشتری می‌شود. بنابراین با افزایش عدد استفان از ۰/۱۸ به ۰/۲۳ و ۰/۳۱ زمان انجماد به ترتیب تا ۲۱٪ و ۳۴٪ کاهش یافته است.

## مراجع

- [1] M.A. Cuevas-Diarte, T. Calvet-Pallas, J.L. Tamarit, H.A.J. Oonk, D. Mondieig, and Y. Haget, "Nuevos materiales termo ajustable", Mundo Cientifico, 2000.
- [2] D. Pal, and Y. Joshi, "Application of phase change materials for passive thermal control of plastic quad flat packages, a computational study", Numerical Heat Transfer, Part A Applications, Vol. 30, Jan 1996, pp. 19-34.
- [3] L.F. Cabeza, J. Roca, M. Nogues, B. Zalba, and J.M. Marin, "Transportation and Conservation of Temperature Sensitive Materials with Phase Change Materials", State of the Art. IEA ECES IA Annex 17 2nd Workshop, Ljubljana (Slovenia), 2002.
- [4] M. Koschenz, and B. Lehmann, "Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings", Energy and buildings, Vol. 36, June 2004, pp. 567-578.
- [5] L.L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A. Mishkinis, and P.V. Bohan, "Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines, application to a bus petrol engine", Applied Thermal Engineering, Vol. 20, July 2000, pp. 913-923.
- [6] M. Sokolov, and Y. Keizman, "Performance indicators for solar pipes with phase change storage", Solar Energy, Vol. 47, 1991, pp. 339-346.
- [7] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications", Applied Thermal Engineering, Vol. 23, February 2003, pp. 251-283.
- [8] M. Medrano, M.O. Yilmaz, M. Nogues, I. Martorell, J. Roca, and L.F. Cabeza, "Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems", Applied Energy, Vol. 86, October 2009, pp. 2047-2055.
- [9] A. Sari, and K. Kaygusuz, "Thermal and heat transfer characteristics in latent heat storage system using lauric acid", Energy Conversion and Management. Vol. 43, December 2002, pp. 2493-2507.
- [10] K.A.R. Ismail, F.A.M. Lino, R.C.R. da Silva, A.B. de Jesus, and L.C. Paixao, "Experimentally validated two-dimensional numerical model for the solidification of PCM along a horizontal long tube", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 75, January 2014, pp. 184-193.
- [11] F. Agyenim, P.Eames, and M. Smyth, "Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array", Renewable Energy, Vol. 35, January 2010, pp. 198-207.
- [12] A. Castell, C. Sole, M. Medrano, J. Roca, L.F. Cabeza, and D. Garcia, "Natural convection heat transfer coefficients in phase change material (PCM) modules with external vertical fins", Applied Thermal Engineering, Vol. 28, September 2008, pp. 1676-1686.
- [13] J.C. Choi, and S.D. Kim, "Heat-transfer characteristics of a latent heat storage system using  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ", Energy, Vol.17, December 1992, pp. 1153-1164.
- [14] A.A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, and M.Y. Sulaiman, A.T. Mohammad, "Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins", International Journal Heat Mass Transfer, Vol.61, June 2013, pp. 684-695.
- [ ۱۵ ] مسلم قاسمی، بهزاد قاسمی و افراسیاب رئیسی، "جایابی آزاد نانوسیال آب-آلومینا در یک محفظه مربعی حاوی دو جفت چشمه و چاه"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۸۸-۷۷.
- [ ۱۶ ] سیف الله سعدالدین و محمد همت اسفه، "ارزیابی و تخمین انتقال حرارت و مشخصه های جریان جایابی ترکیبی پیرامون موانع داغ تعبیه شده در محفظه مربعی شیب دار پر شده از نانوسیال"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۲۸، بهار ۱۳۹۱، صفحه ۴۲-۳۱.
- [ ۱۷ ] کامیار کمانی و روح اله رفعی، "بررسی انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک در یک مبدل حرارتی جریان مخالف"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۵۷-۴۷.
- [18] A.D. Brent, V.R. Voller, and K.J. Reid, "Enthalpy-porosity technique for modeling convection diffusion phase change application to the melting of pure metal", Numerical Heat Transfer, Vol. 13, 1988, pp. 297-318.

- [19] V.R. Voller, and C. Prakash, "Fixed grid numerical modeling methodology for convection-diffusion mush region phase change problems", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, August 1987, pp. 1709–1719.
- [20] W.B. Ye, D.S. Zhu, and N. Wang, "Numerical simulation on phase-change thermal storage/release in a plate-fin unit", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, December 2011, P.P. 3871–84.
- [21] N. Wakao, and S. Kaguei, "Heat and mass transfer in packed beds", New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1982, p.p. 175–205.
- [22] S. Mat, A. A. Al-Abidi, K. Sopian, Sulaiman, M. Y., and A.Th. Mohammad, "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins", *Energy Conversion and Management*, Vol. 74, October 2013, pp. 223-236.