

## بررسی تاثیر انواع فینهای شعاعی در فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌های

معصومه رحیمی<sup>1\*</sup>، یونس پاهملی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گلستان، گرگان  
2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان  
\* گرگان، صندوق پستی 155، m.rahimi@gu.ac.ir

### چکیده

در این مطالعه شبیه‌سازی عددی فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده در یک مدل حرارتی پوسته و لوله‌های در حضور انواع مختلف فین‌های شعاعی بررسی شده است. ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این بررسی RT35 بوده و از آب به عنوان سیال انتقال دهنده حرارت استفاده شده است. انواع شکل‌های فین‌های شعاعی شامل فین حلقوی، بیضوی افقی و عمودی، لوزی افقی و عمودی، مربعی، مثلثی و چند ضلعی مورد بررسی قرار گرفته و فین بهینه از نظر کاهش زمان ذوب انتخاب شده است. نتایج نشان‌دهند این امر است که هر چه نفوذ فین در نیمه پایین پوسته بیشتر باشد ذوب در زمان‌های انتهایی بهبود پیدا کرده و زمان کامل ذوب کاهش می‌یابد. بنابراین فین بیضوی عمودی به علت در برگیری بیشتر ناحیه زیرین پوسته زمان ذوب کاهش بیشتری دارد. پس از انتخاب فین بهینه ارتفاع و تعداد فین تغییر پیدا کرده و نتیجه گردید که با افزایش هر چه بیشتر ارتفاع فین بیضوی و نیز افزایش تعداد آن زمان ذوب کاهش می‌یابد.

### کلیدواژگان

مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای، ماده تغییر فاز دهنده، ذوب، فین‌های شعاعی

## Studying the effect of radial fins on melting process of a phase change material in shell and tube heat exchanger

Masoumeh Rahimi<sup>1</sup>, Younes Pahamli<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran

2- Department of mechanical engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

\* P.O.B. 155, Gorgan, Iran, m.rahimi@gu.ac.ir

### Abstract

In this study, the numerical simulation of melting process of phase change material in a shell and tube heat exchanger in the presence of different radial fins has been investigated. The phase change material used in this study is RT35 and water is used as the heat transfer fluid. The types of radial fin shapes including circular, horizontal and vertical ellipse, horizontal and vertical rhombus, square, triangular and polygonal fin have been studied and the optimal fin has been selected in terms of reducing melting time. The results show that the greater the fin penetration in the lower half of the crust, the better the melting time at the end times and the lower the full melting time. Therefore, the vertical elliptical fin has a greater reduction in melting time due to the greater involvement of the lower crust. After selecting the optimal fin, the height and number of fins changed and it was concluded that with increasing the height of the elliptical fin and also increasing the number, the melting time decreases.

### Keywords

Shell and tube, PCM, Melting, Radial fins

حرارتی شناخته می‌شود بهترین گزینه برای کاربردهای گسترده در نظر گرفته شده است. یکی از روش‌های نوید بخش برای افزایش کارایی سیستم انرژی، اجرای سیستم ذخیره انرژی حرارتی است. از گروه‌های خاصی از مواد به دلیل داشتن خصوصیات مناسبی مانند گرمای نهان بالا، دمای تغییر فاز مناسب و تغییر حجم اندک حین تغییر فاز، به منظور مدیریت حرارتی در برخی از فرایندهای حرارتی استفاده می‌گردد. از این مواد اصطلاحاً به عنوان مواد تغییر فاز دهنده نام برده می‌شود.

در دو دهه اخیر استفاده از چنین موادی به منظور ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در نیروگاه‌های خورشیدی، ذخیره‌سازی انرژی حرارتی اتمی در تجهیزات حرارتی و بازیافت مجدد آن و یا کاربردهای مشابه دیگر، بسیار مورد توجه بوده است. دلیل این امر ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی در دمای ثابت و چگالی بالای انرژی ذخیره شده در این مورد می‌باشد.

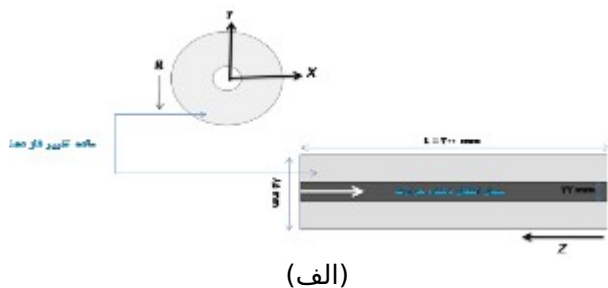
### 1- مقدمه

در حال حاضر جهان با توجه به کمبود انرژی با چالش جدی روبه رو است. با افزایش رشد اقتصادی، صنایع پرانرژی (به ویژه پتروشیمی‌ها و پالایشگاه‌ها) 78 درصد از مصرف انرژی را به خود اختصاص داده‌اند و از جهتی نیز نیاز به توسعه فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی انرژی مؤثر برای ایجاد ارتباط بین تأمین انرژی موجود و تقاضای انرژی می‌باشد. افزایش مصرف انرژی و کاهش منابع سوخت فسیلی از یک طرف و از طرفی دیگر افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای که سبب تأثیرات زیست محیطی شده است در سال‌های اخیر منجر به تحقیقات بسیاری در مورد یافتن منابع انرژی جدید و تجدیدپذیر شده است. از منابع انرژی تجدیدپذیر میتوان به خورشید، باد، زمین گرمایی، زباله، آب، امواج و... اشاره کرد. ذخیره‌سازی انرژی یکی از راه‌های استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است تا با سوخت‌های فسیلی معمولی از نظر اقتصادی قابل رقابت باشد. ذخیره انرژی به شکل حرارتی که به عنوان ذخیره انرژی

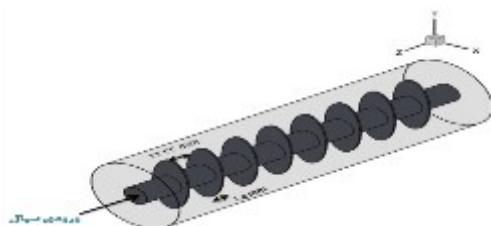
جورایبان و همکاران [9] به بررسی بهبود فرآیند ذوب آب- (یخ) به عنوان ماده تغییر فاز دهنده به کمک نانوذرات مس در یک سیلندر افقی به کمک روش لیتز-بولتزمن پرداختند. آنها همچنین به مطالعه اثر تغییر موقعیت سیلندر داخلی و تغییر کسر جرمی نانو بر کسر مایع و خطوط همدمای پرداختند. نتایج آنها نشان دهنده این است که افزودن نانو ذره باعث بهبود ضریب هدایت حرارتی و در نتیجه کاهش زمان ذوب در مقایسه با ماده تغییر فاز دهنده خالص میگردد.

## 2- شرح مسأله

هندسه مورد مطالعه شامل یک مبدل پوسته و لوله به همراه فین-های شعاعی است که در شکل 1 نمایش داده شده است. فضای بین لوله-ها از ماده تغییر فاز دهنده RT35 پر شده و آب به عنوان سیال انتقال دهنده حرارت در لوله داخل جریان دارد. طول مبدل 300 mm بوده و تعداد 8 فین حلقوی با سطح مقطعهای مختلف به لوله داخل اتصال داده شده است. همچنین قطر لوله داخل و خارج به ترتیب 22 mm و 85 mm میباشند که مشخصات کلی هندسه در جدول 1 آورده شده است. حجم کلی فینها در تمامی کیسها ثابت میباشد؛ همچنین انواع فینهای به کار رفته در شکل 2 نمایش داده شده است.



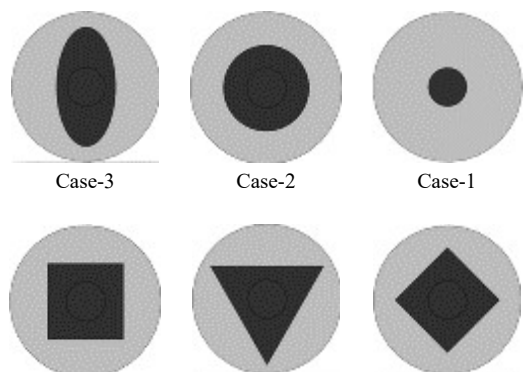
(الف)



(ب)

شکل 1 شماتیک هندسه مسئله (الف) نمای دوبعدی (ب) نمای سه بعدی

Fig 1. Schematic view of problem (a) 2-d (b) 3-d.



آگنیم و همکاران [1] در یک مطالعه مروری انتقال حرارت و فرمول بندی تغییر فاز در سیستمهای ذخیره ساز انرژی را مورد بررسی قرار دادند. زالبا و همکاران [2] در یک مطالعه مروری انتقال حرارت در سیستمهای ذخیره ساز انرژی و کاربردهای این نوع سیستمها را مورد مطالعه قرار دادند.

حسینی و همکاران [3] در یک کار آزمایشگاهی و عددی به بررسی رفتار گرمایی و خصوصیات انتقال حرارتی پارافین RT50 به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در حین فرآیند ذوب و انجماد در یک مبدل گرمایی پوسته و لولههای پرداختند. نتایج عددی آنها نشان داد که جبهه ذوب در زمانها و مکانهای مختلف در نزدیکی لوله سیال انتقال گرما پدیدار شده و به طرف خارج پیشروی میکند. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش دمای سیال از 70°C تا 80°C، بازده تئوری در فرآیند ذوب و انجماد به ترتیب تا 88.4% و 81.4% افزایش مییابد.

بررسی رفتار ذوب ماده تغییر فاز دهنده در مبدل حرارتی پوسته و لولههای در یک کار آزمایشگاهی و عددی توسط حسینی و همکاران [4] پرداخته شد. آنها دریافتند که افزایش دمای سیال انتقال دهنده حرارت (آب) از 70°C تا 80°C، زمان کلی ذوب را تا 37% کاهش میدهد.

همچنین میتوان به کار مشترک رنجبر و همکاران [5] در زمینه مواد تغییر فاز دهنده اشاره کرد. آنها در یک کار عددی به بررسی فرآیند انجماد مواد تغییر فاز دهنده تقویت شده با ذرات نانو در یک کویتی موجدار پرداختند. آنها دریافتند که افزایش غلظت نانو ذرات منجر به کاهش زمان انجماد میگردد. مطالعه آنها همچنین نشان داد که موج صفحه یک فاکتور کنترل کننده برای زمان انجماد است و در تمام اعداد گراشوف، افزایش موجیت صفحه سبب افزایش زمان انجماد خواهد بود.

اتوونی و همکاران [6] در یک کار آزمایشگاهی مطالعههای بر روی فرآیند ذوب و انجماد در پوسته و لولههای پرداختند. در مطالعه آنها سیال انتقال دهنده گرما در تیوب داخلی و پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در پوسته قرار دارد. نتایج نشان دهنده این بود که فرآیند ذوب و انجماد به ترتیب تحت تأثیر جابهجایی طبیعی و هدایت است.

سینراج و همکاران [7] به بررسی رفتار گرمایی ماده تغییر فاز دهنده های دما بالا ذخیره شده در مبدلهای گرمایی پوسته و لولههای پرداختند. آنها مشاهده کردند که در صورت استفاده از تیوب بدون فین، مقداری از ماده تغییر فاز دهنده در نزدیکی خروجی تیوب به صورت جامد باقی میماند. این پدیده به این علت است که در نزدیکی خروجی اختلاف بین دمای سیال ورودی و همچنین نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده بسیار اندک است. همچنین گزارش شده که در صورت حضور تعدادی فین شعاعی اختلاف دمایی بیشتری بین دمای سیال و همچنین نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده وجود داشته و به این ترتیب ذوب بیشتری را در راستای محوری میتوان مشاهده کرد. دایدان و همکاران [8] به بررسی آزمایشگاهی و عددی فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده به کمک ذرات نانو در یک مبدل حرارتی پوسته و لولههای تحت شار حرارتی ثابت و با شرط هندسی افزایش خروج از مرکزیت پرداختند. نتایج آنها نشان دهنده این است که افزایش درصد نانو ذره و افزایش خروج از مرکزیت تأثیر مستقیم بر کسر ذوب خواهد داشت.

0.66	0.2	ضریب هدایت حرارتی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
	170000	گرمای نهان ( $Jkg^{-1}$ )
	0.0006	ضریب انبساط حرارتی ( $K^{-1}$ )

با توجه به فرضیات انجام شده می توان معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی را به شرح زیر ارائه داد. برای سیال انتقال دهنده حرارت: معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot \vec{V}_f = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم

$$\frac{\partial \vec{V}_f}{\partial t} + \vec{V}_f (\nabla \cdot \vec{V}_f) = \frac{1}{\rho_f} (-\nabla p_f + \mu_f \nabla^2 \vec{V}_f + \dots) \quad (2)$$

معادله انرژی

$$\frac{\partial H_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}_f H_f) = \nabla \cdot \left( \frac{K_f}{\rho_f C_{p,f}} \nabla h_f \right) \quad (3)$$

برای ماده تغییر فاز دهنده:

$$\nabla \cdot \vec{V}_{pcm} = 0 \quad (4)$$

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \vec{V}_{pcm}}{\partial t} + \vec{V}_{pcm} (\nabla \cdot \vec{V}_{pcm}) = \frac{1}{\rho_{pcm}} (-\nabla P_{pcm} + \dots) \quad (5)$$

معادله مومنتوم

$$\frac{\partial H_{pcm}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}_{pcm} H_{pcm}) = \nabla \cdot \left( \frac{K_{pcm}}{\rho_{pcm} C_{p,pcm}} \nabla h \right) \quad (6)$$

آنتالپی ماده تغییر فاز دهنده به صورت مجموع آنتالپی محسوس و آنتالپی نهان به ترتیب در روابط 7 و 8 آورده شده است:

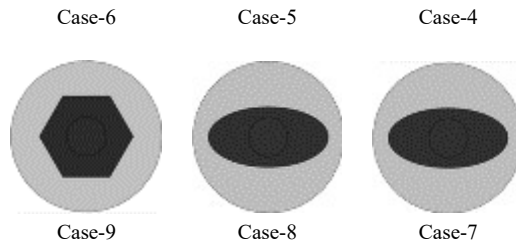
$$H_{pcm} = h_{pcm} + \Delta H \quad (7)$$

و

$$h_{pcm} = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_{p,pcm} dT \quad (8)$$

در رابطه 8 ظرفیت حرارتی مقدار ثابتی است که می تواند از انتگرال خارج گردد. مقدار گرمای نهان به صورت گرمای نهان ماده تغییر فاز دهنده،  $\Delta L$ ، در رابطه 9 محاسبه می گردد:

$$\Delta H = \lambda L \quad (9)$$



شکل 2 انواع سطح مقطعیهای فیلهای بکار رفته  
Table 2. Different cross-sections of studied cases

### جدول 1 مشخصات هندسی

واحد	اندازه	پارامتر
mm	300	طول لوله
mm	85	قطر پوسته
mm	22	قطر لوله
mm	1.5	ضخامت فین
mm	8	تعداد
mm	33.33	فاصله بین فین ها
mm <sup>3</sup>	1808.64	حجم

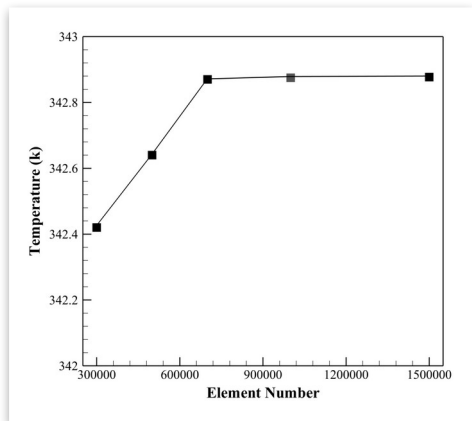
### 1-2 معادلات حاکم و شرایط مرزی

به منظور شبیه سازی فرآیند ذوب در سیستم ذخیره سازی گرمای نهان از روش آنتالپی-متخلخل [10-11] استفاده شده است. برای به دست آوردن معادلات فیزیکی و ریاضی حاکم و ساده سازی معادلات فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

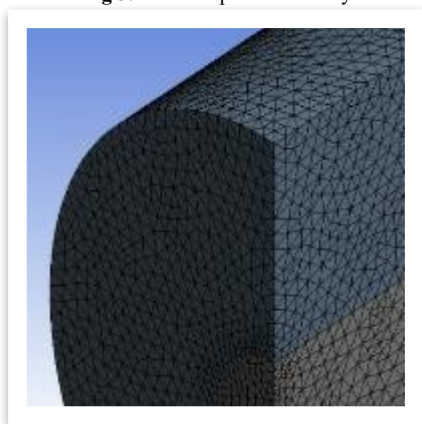
- انتقال حرارت از پوسته به محیط اطراف صرف نظر شده است. (دیوار خارجی عایق است)
- از مقاومت حرارتی دیواره لوله سیال انتقال دهنده حرارت صرف نظر میگردد.
- جریان سیال به صورت ناپایا، آرام و تراکمناپذیر است.
- خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده و آب ثابت در نظر گرفته شده است.
- انتقال حرارت در ماده تغییر فاز دهنده به کمک مکانیزمهای هدایت و جابجایی صورت میگیرد.
- سیال ورودی به لوله دارای سرعت ثابت 0.033 m/s است.
- دمای سیال ورودی برابر 343 K می باشد.

### جدول 2 خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده و آب [12]

مقدار	خاصیت
آب	RT35
302	دمای ابتدایی محدوده ذوب (K)
308	دمای انتهایی محدوده ذوب (K)
978	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
4191	گرمای ویژه ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )



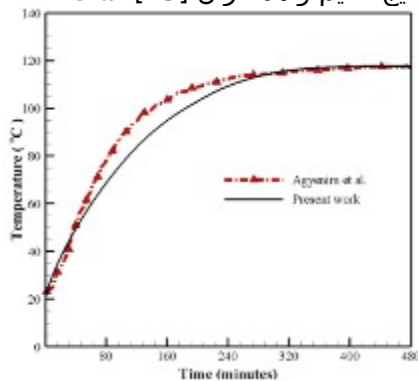
شکل 3 نتایج استقلال از شبکه  
Fig 3. Grid independence study



شکل 4 نمونه شبکه بندی مورد استفاده  
Fig 4. View of created mesh

#### 4-2 اعتبارسنجی

نتایج آگنیم و همکاران [13] برای صحت سنجی کار انجام شده در این مقاله استفاده شده است. یک پوسته ذخیره ساز استوانه ای که به صورت افقی ساخته شده است و ماده تغییر فاز دهنده درون آن قرار گرفته است. یک لوله مسی هم مرکز با آن قرار گرفته است که به عنوان لوله انتقال حرارت در این سیستم عمل می کند. شکل 5 نشان دهنده مقایسه بین نتایج کار شبیه سازی حاضر و نتایج آگنیم و همکاران [13] است.



شکل 5 نتایج اعتبارسنجی کار حاضر با مقاله آگنیم و همکاران [13]

Fig 5. Validation between present study and those of Agyenim et al. [13].

که  $\Delta H$  می تواند در محدوده صفر (جامد) تا یک (مایع) متغیر باشد. برای این منظور کسر حجمی ذوب از رابطه 10 بدست می آید [11].

$$\lambda = \begin{cases} \frac{\Delta H}{L} = 0 & \text{اگر } T < T_s \\ \frac{\Delta H}{L} = 1 & \text{اگر } T > T_{liq} \\ \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_s}{T_{liq} - T_s} & \text{اگر } T_s < T < T_{liq} \end{cases} \quad (10)$$

که  $T_L$  و  $T_{Liq}$  دو انتهای محدوده ذوب ماده تغییر فاز دهنده می باشند. همچنین در معادله 5، اصطلاح میرایی قانون دارسی است که به معادله حرکت اضافه می شود تا انتقال حرارت همرفت را در معادله قرار دهد.

$$\vec{S} = \frac{-(1-\lambda)^2}{\lambda^3 + \varepsilon} A_{mush} \vec{V} \quad (11)$$

$A_{mush}$  ثابت ناحیه خمیری است که در محدوده  $10^4$  تا  $10^7$  تغییر می کند. پارامتر  $\varepsilon$  مقدار بسیار اندکی است که برای جلوگیری از تقسیم به صفر شدن کسر معادله 11 تعیین شده است.

#### 2-2 روش محاسباتی

در این مطالعه از نرم افزار 15 Ansys Fluent برای شبیه سازی سه بعدی موضوع مورد نظر استفاده شده است. برای کوپلینگ فشار-سرعت از روش سیمپل<sup>1</sup> [1] و برای فشار از روش پرستو<sup>2</sup> و برای مومنتوم و انرژی از روش کوئیک<sup>3</sup> استفاده شده است. همگرایی معادلات بقای جرم و آشفستگی و سرعت در راستاهای مختصات کارتزین  $10 \times 5$  و برای معادله انرژی  $10^6$  تعیین شده است.

#### 3-2 استقلال از شبکه

شکل 3 نشان دهنده نتایج حاصل از استقلال از شبکه برای هندسه مورد استفاده می باشد. همانگونه که مشاهده می گردد از تعداد مش 700000 به بعد نتایج خروجی تغییرات چندانی نداشته و تعداد مش 700000 به عنوان معیار برای ادامه محاسبات در نظر گرفته شده است. همچنین برای شبکه بندی از مش غیریکنواخت استفاده شده است. شکل 4 نشان دهنده شبکه بندی روی سطح مبدل و فین در نمونه Case-5 می باشد که به صورت غیریکنواخت شبکه بندی شده است.

<sup>1</sup> SIMPLE

<sup>2</sup> PRESTO

<sup>3</sup> QUICK

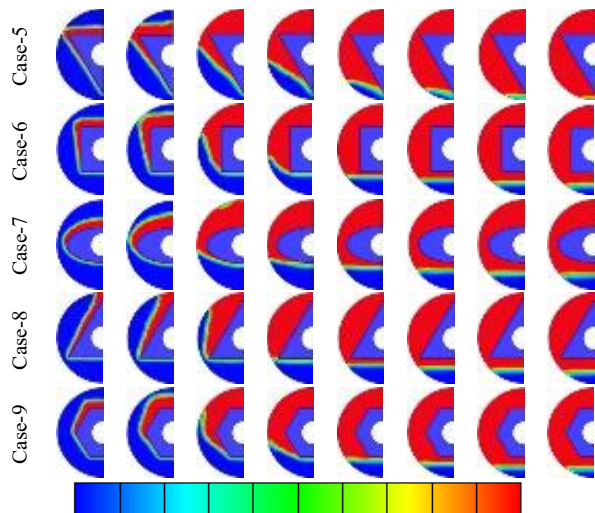
### 3- نتایج و بحث

#### 1-3 تغییرات هندسه فین بر روی روند ذوب ماده تغییر فاز دهنده

شکل 6 نشان‌دهنده کانتور کسر مایع نسبت به زمان برای کیسهای مختلف است. مقدار 1 برای کسر مایع نشان‌دهنده حالت مایع کامل و مقدار صفر نشان‌دهنده فاز جامد کامل است. همانگونه که مشاهده می‌گردد در تمامی کیسها در ابتدای فرآیند ذوب لایه نازکی از مایع اطراف فینها تشکیل شده و هدایت حرارتی مکانیزم عمده انتقال حرارت در این زمانها میباشد. با گذشت زمان به علت اثرات جابجایی حرارتی لایه مذاب به سمت نواحی بالایی پوسته گسترش یافته و نیمه بالایی مبدل ذوب بیشتری می‌افتد. با ادامه روند این لایه به سمت نیمه پایین پوسته گسترش می‌یابد. اما به علت اثرات ضعیف جابجایی حرارتی و نیز فاصله گرفتن از لوله انتقال حرارت، روند ذوب کند شده و لایه ماده جامد در نواحی پایین پوسته باقی میماند. در نهایت به علت غالب شدن هدایت حرارتی در زمانهای انتهایی ماده جامد باقی مانده به صورت لایهای ذوب خواهد شد.

همانگونه که در شکل 6 مشاهده می‌گردد تاثیر حضور فین بیشتر در نیمه پایینی پوسته است به گونه‌ای که هر چه نفوذ فین در نیمه پایین پوسته بیشتر باشد ذوب ماده در آن ناحیه بیشتر گشته و سرعت ذوب افزایش پیدا می‌کند. با توجه به فینهای بکار رفته مشاهده می‌گردد که فین بیضوی عمودی به علت تحت تاثیر قرار دادن همزمان نواحی بالا و پایین پوسته اثر بیشتری بر تسرع فرآیند ذوب و بهبود آن دارد.

تغییرات کسر مایع با توجه به زمان را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد. در مرحله 1 از 0 ثانیه تا 600 ثانیه، کسرهای مایع برای موارد فین‌دار به طور خطی افزایش می‌یابد و تقریباً با هم همپوشانی دارند. این نتیجه نشان می‌دهد که هندسه فین عامل اصلی موثر در روند ذوب در مرحله اولیه است در مرحله 2 (بعد از 600 ثانیه)، سرعت افزایش کسر مایع به تدریج کاهش می‌یابد و تاثیر نفوذ فین بر تغییرات کسر مایع به ویژه برای Case-1 به طور قابل توجهی مشاهده می‌شود. در ابتدای فرآیند، نواحی اطراف لوله سیال انتقال دهنده حرارت به دلیل انتقال حرارت هدایت به طور یکنواخت ذوب می‌شوند. با پیشرفت روند، مکانیزم انتقال حرارت همرفتی تقویت می‌شود که یکنواختی را از بین می‌برد. در جدول 3 مشاهده می‌شود Case-3 بیشترین درصد کاهش در زمان ذوب با توجه به حالت بدون فین را از خود نشان می‌دهد.



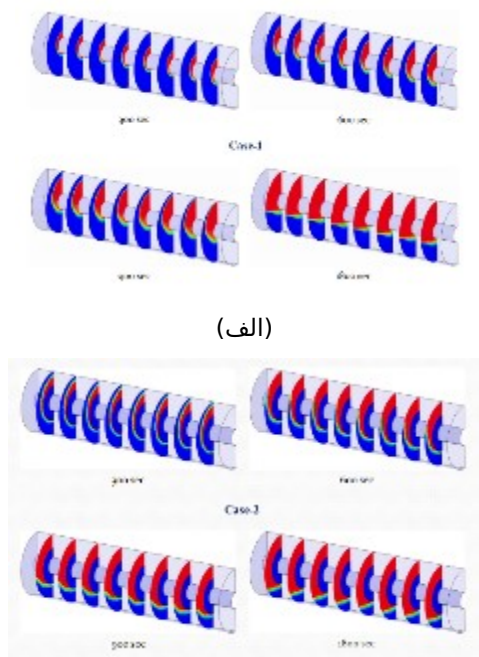
شکل 6 کانتور کسر مایع در زمانهای مختلف برای کیسهای 1-9

Fig 6. 2-D liquid fraction contour for different cases

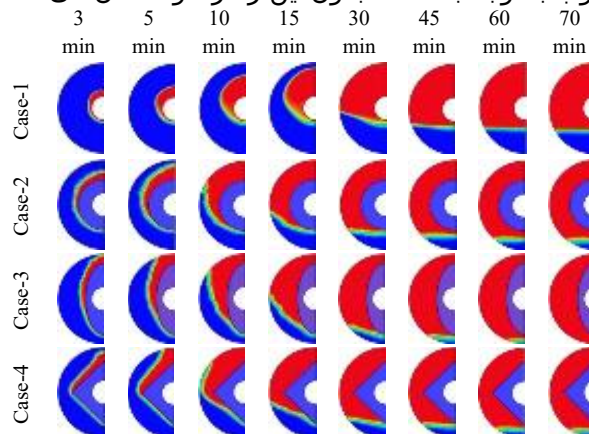
#### جدول 3 درصد کاهش زمان ذوب نسبت به Case-1

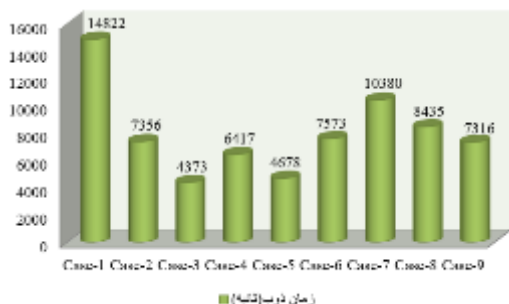
نمونه	درصد حفظ	نمونه	درصد حفظ
Case-1	-	Case-6	48.9
Case-2	50.37	Case-7	29.9
Case-3	70.5	Case-8	43.1
Case-4	56.7	Case-9	49.35
Case-5	68.4		

وجود فینها به گونهای مؤثر است که پس از 15 دقیقه از آغاز فرآیند، قسمت بالایی پوسته در موارد افزایش یافته کاملاً ذوب می‌شود. که این قضیه برای مورد بدون فین در 30 دقیقه از ابتدای ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده رخ می‌دهد شکل 7.



(الف)



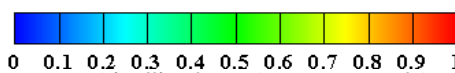
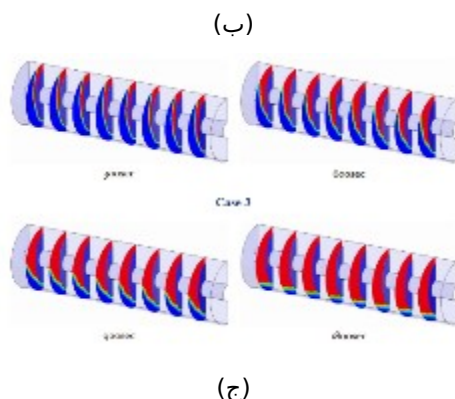
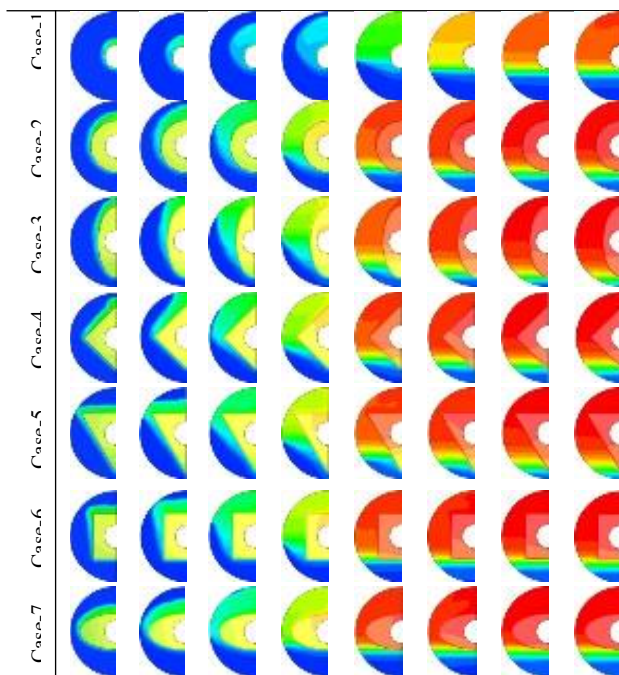


شکل 9 زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده (RT35) برای همه کیس‌ها

Fig 9. Melting time for different cases

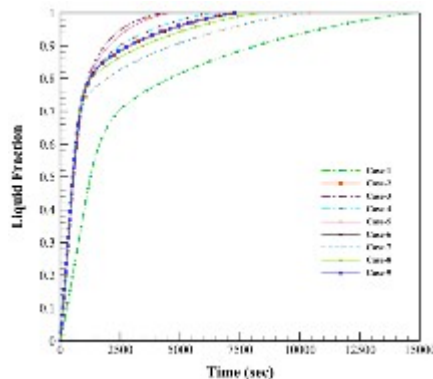
شکل 10 مقدار افزایش گرما نسبت به زمان برای تمام لوله‌های فین دار و بدون فین نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد در ابتدای فرآیند در تمامی کیس‌ها دما اطراف فین‌ها در حال افزایش می‌باشد و این افزایش در قسمت بالایی فین‌ها مشهودتر است. با گذشت زمان لایه مذاب طبق گفته‌های قبل به سمت ناحیه بالای پوسته گسترش می‌یابد که افزایش دما ذوب بیشتر ماده تغییر فاز دهنده می‌شود با ادامه این روند بعد از ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده در نیمه بالایی، گرما به سمت پایین گسترش می‌یابد. همانگونه که در شکل 7 مشاهده گردید تاثیر حضور فین بیشتر در نیمه پایینی پوسته است به گونه‌ای که هر چه نفوذ فین در نیمه پایین پوسته بیشتر باشد دمای ماده در آن ناحیه بیشتر است. با توجه به فین‌های بکار رفته مشاهده می‌گردد که فین بیضوی عمودی به علت تحت تاثیر قرار دادن همزمان نواحی بالا و پایین پوسته اثر بیشتری بر سرعت افزایش دمای ماده تغییر فاز دهنده داشته است.

3 min	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	60 min	70 min
-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------



شکل 7 کانتور سه بعدی کسرهای (الف) کیس بدون فین (ب) کیس دایره (ج) کیس بیضی عمودی  
Fig 7. Liquid fraction contour for three different cases (a) without fin (b) circle (c) vertical elliptic.

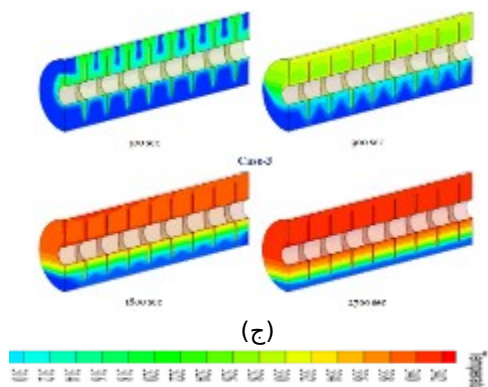
شکل 8 نشان‌دهنده نمودار کسر ذوب برای کیس‌های مختلف در طول فرآیند ذوب است. همانگونه که مشاهده می‌گردد با نفوذ بیشتر فین به ناحیه تحتانی پوسته روند ذوب تسریع پیدا کرده و کیس‌های شماره 3 و 5 کمترین زمان ذوب را دارند. مطابق توضیحات ارائه شده در شکل 7 هر چه فین بکار رفته در نیمه پایین پوسته بیشتر باشد در زمانهای انتهایی فرآیند که اثر جابجایی طبیعی کاهش پیدا میکند حضور فین در این ناحیه مکانیزم جابجایی طبیعی را تقویت کرده و همزمان با اثر هدایت حرارتی موجب تسریع فرآیند ذوب در زمانهای انتهایی می‌گردد.



شکل 8 نمودار کسرهای ذوب برای کیس‌های مختلف

Fig 8. Liquid fraction plot for different cases

با مقایسه منحنی کسرهای ذوب برای مبدل حرارتی بدون فین و مواردی که با فین تقویت می‌شود می‌توان دریافت در اوایل فرآیند ذوب که مربوط به تغییر فاز ذوب برای مورد بدون فین و موارد با فین یکسان نیست. با این وجود وقتی روند پیشرفت می‌کند سرعت ذوب بهبود بخشیده می‌شود. همانطور که در شکل 9 مشاهده می‌شود روند ذوب پس از لحظه‌ای نسبت به مورد بدون فین سرعت بخشیده می‌شود.

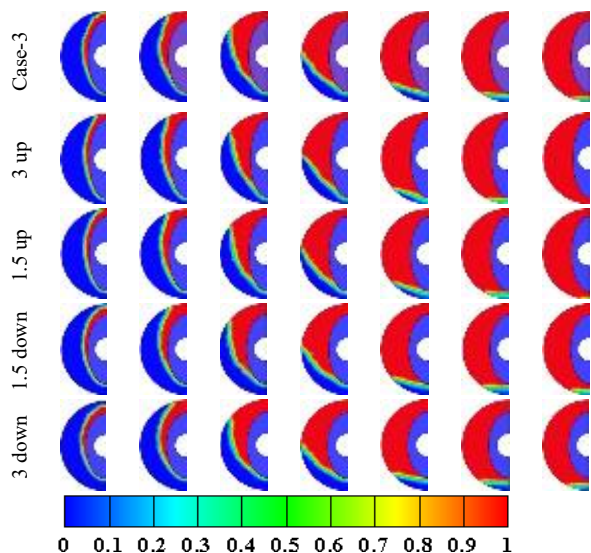


شکل 11 کانتور دما در حالت سه بعدی (الف) بدون فین (ب) دایره (ج) بیضی عمودی  
Fig 11. Temperature contour for three different cases (a) without fin (b) circle (c) vertical elliptic.

### 2-3 تغییرات ارتفاع فین بر روی روند ذوب ماده دهنده فاز دهنده

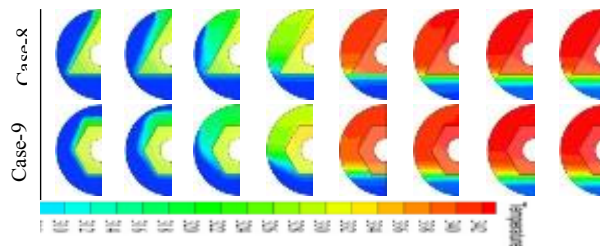
ارتفاع فین‌ها به عنوان یک تکنیک مؤثر در جستجوی تقویت عملکرد حرارتی سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. به دلایل اقتصادی و همچنین در مورد ساخت و ساز، ارتفاع فین‌ها باید با دقت ارزیابی شود. شکل 12 مقایسه کسر مایع PCM را برای موارد مختلف ارتفاع فین نشان می‌دهد که در این بررسی طول فین به عنوان پارامتر هندسی در تعداد 8 فین و ضخامت mm 1.5 مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اما زمان مورد استفاده در فین‌های با طول بیشتر به طور قابل توجهی کمتر است. این امر عمدتاً به این دلیل است که با افزایش طول فین عمق نفوذ فین به مناطق تحتانی پوسته بیشتر بوده و انتقال حرارت از لوله حامل سیال گرم که توسط فین به اعماق پوسته منتقل می‌شود، افزایش یافته است.

3 min 5 min 10 min 15 min 30 min 45 min 60 min



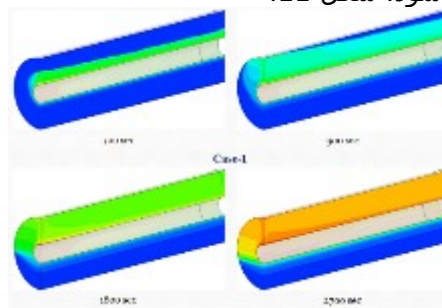
شکل 12 کانتور کسر مایع برای تاثیر ارتفاع فین  
Fig 12. Liquid fraction contour for the effect of fin height

شکل 13 نشان‌دهنده این است که افزایش طول فین باعث کاهش زمان انجماد ذوب در کلیه تغییرات فین‌ها

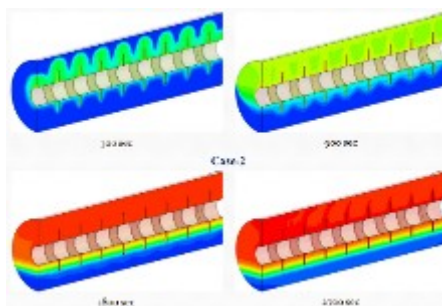


شکل 10 کانتور دما برای کیسهای مختلف  
Fig 10. Temperature contour for different cases

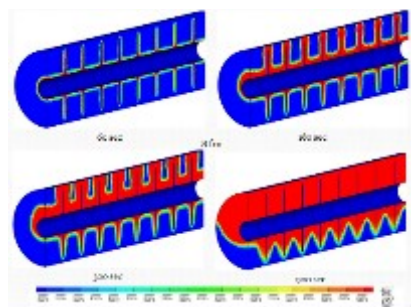
گرمایی که توسط سیال انتقال دهنده حرارت به لوله داده شده در ابتدای فرآیند بیشتر بوده است و سبب ذوب بیشتر ماده تغییر فاز دهنده در قسمت‌های ابتدایی مبدل پوسته و لوله شده است. با گذشت زمان انتقال حرارت بیشتر از سیال به لوله منتقل می‌گردد و سبب ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده در ناحیه بالایی پوسته می‌گردد. همانگونه که مشاهده می‌گردد برای موارد فین‌دار، هر چه فین نفوذ بیشتری در پوسته داشته باشد سبب افزایش انتقال حرارت بیشتر به آن ناحیه می‌گردد. در مواردی که فین در بالا و پایین به صورت متقارن قرار دارد افزایش دمای بیشتری را نسبت به مواردی که فین متقارن نیست شاهد هستیم. در فین‌های متقارن اگر فین به اعماق بیشتری از ماده تغییر فاز دهنده نفوذ کرده باشد نسبت به زمانی که نفوذ در اعماق ماده تغییر فاز دهنده صورت نگرفته سبب افزایش دمای بیشتر می‌شود، شکل 11.



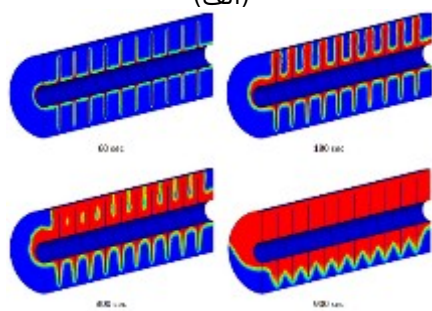
(الف)



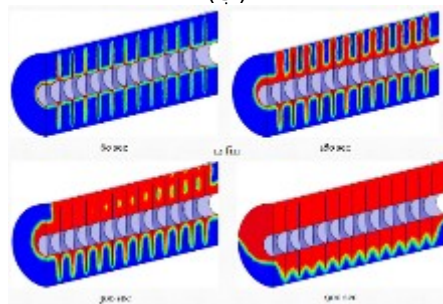
(ب)



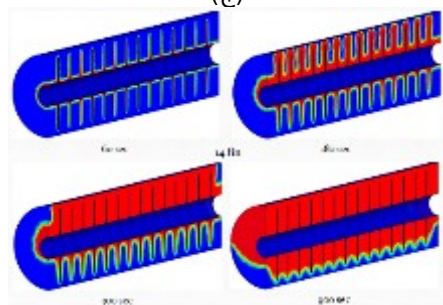
(الف)



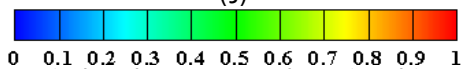
(ب)



(ج)

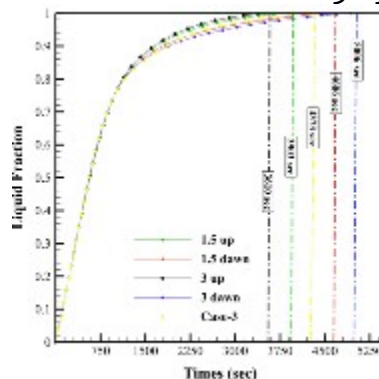


(د)



شکل 14 کانتور کسرهای نسبت به زمان برای کیس (الف) 8 فین (ب) 10 فین (ج) 12 فین (د) 14 فین  
Fig 14. Liquid fraction contour for (a) 8 fins (b) 10 fins (c) 12 fins (d) 14 fins

می شود که این امر به دلیل افزایش عمق نفوذ حرارتی به ماده تغییر فاز دهنده است.



شکل 13 کسرهای در برابر زمان برای Case-3 و کیس های با ارتفاع متفاوت

Fig 13. Effect of fin height on liquid fraction for case-3

بنابراین، برای ارتفاعات فین در نظر گرفته شده، مشاهده می گردد که زمان ذوب با افزایش ارتفاع فین به صورت یکنواخت کاهش می یابد. افزایش ارتفاع فین منجر به افزایش انتقال حرارت شده و از این رو سبب افزایش در سرعت گرمایش ماده تغییر فاز دهنده می گردد.

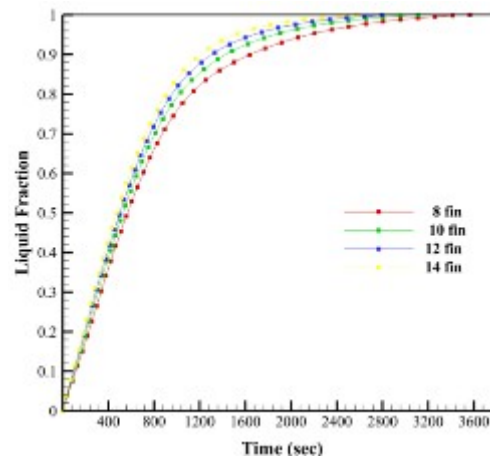
### 3-3 تغییرات تعداد فین بر روی روند ذوب ماده تغییر فاز دهنده

مطالعات قبلی نشان داده اند که می توان با افزودن فین ها فرآیند ذوب را به طور قابل ملاحظه ای افزایش داد و با درگیر شدن فین های بیشتر روند ذوب را افزایش داد. به منظور بهینه سازی فرآیند ذوب انرژی، یعنی به حداکثر رساندن انتقال حرارت، باید به تعداد فین های اضافه شده به یک لوله انتقال حرارت واحد پاسخ داده شود. از نظر مهندسی افزایش فین برای صرفه جویی در انرژی اهمیت دارد. در این بخش، عملکرد ذوب واحدهای مبدل با آرایش های مختلف براساس تعداد مختلف فین (8,10,12,14) مقایسه می گردد.

شکل 14 پیشرفت زمانی کسرهای را در تعداد فین های مختلف نشان می دهد. مشاهده می گردد که با افزایش تعداد فین، زمان ذوب در کلیه آرایش های فین رو به کاهش است. این امر به این دلیل است که تعداد فین های بیشتر باعث انتقال حرارت ناحیه بزرگتر بین فین ها و ماده تغییر فاز دهنده می شود. وقتی تعداد فین ها از 8 به 14 افزایش می یابد، مدت زمان ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده برای موارد با فین های به تعداد 10 فین، 12 فین و 14 فین به ترتیب 11.1% و 18.6% و 24.9% نسبت به حالت اولیه کاهش می یابد. نتیجه به این معنی است که افزایش ذوب با افزایش تعداد فین ها رابطه مستقیم دارد.



6. Ettouney HM, Alatiqi I, Al-Sahali M, Al-Ali SA. Heat transfer enhancement by metal screens and metal spheres in phase change energy storage systems. *Renewable Energy*. 2004;29(6):841-60.
7. Seeniraj R, Velraj R, Narasimhan NL. Thermal analysis of a finned-tube LHTS module for a solar dynamic power system. *Heat and mass transfer*. 2002;38(4):409-17.
8. Dhaidan NS, Khodadadi J, Al-Hattab TA, Al-Mashat SM. Experimental and numerical investigation of melting of NePCM inside an annular container under a constant heat flux including the effect of eccentricity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013;67:455-68.
9. Jourabian M, Farhadi M, Darzi AAR. Outward melting of ice enhanced by Cu nanoparticles inside cylindrical horizontal annulus: Lattice Boltzmann approach. *Applied Mathematical Modelling*. 2013;37(20-21):8813-25.
10. Patankar S. *Numerical heat transfer and fluid flow*: Taylor & Francis; 2018.
11. Voller VR, Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International journal of heat and mass transfer*. 1987;30(8):1709-19.
12. Rahimi M, Ranjbar A, Ganji D, Sedighi K, Hosseini M, Bahrampoury R. Analysis of geometrical and operational parameters of PCM in a fin and tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014;53:109-15.
13. Agyenim F, Eames P, Smyth M. A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins. *Solar Energy*. 2009;83(9):1509-20.



شکل 15 نمودار کسر ذوب برای تاثیر تعداد فین  
Fig 15. Effect of fin number on liquid fraction

#### 4- نتیجه‌گیری

- بهبود عملکرد حرارتی سیستم ذخیره انرژی گرمایی نهان پوسته و لوله‌های به کمک فین‌های حلقوی با سطح مقطعهای مختلف به صورت عددی بررسی شده است. پارامترهای فین نظیر سطح مقطع، ارتفاع و تعداد به عنوان متغیرهای طراحی برای بهبود عملکرد حرارتی واحد مورد مطالعه قرار گرفتند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی میتوان دریافت:
- هر چه نفوذ فین به نیمه پایین مبدل بیشتر باشد جابجایی طبیعی که مکانیزم غالب انتقال حرارت است تقویت شده و زمان ذوب بهبود پیدا خواهد کرد.
- در بین سطح مقطعهای مختلف فین، بیضی عمودی به واسطه تقویت ذوب در نیمه پایینی مبدل زمان ذوب به طور قابل توجهی کاهش پیدا میکند.
- افزایش ارتفاع فین باعث کاهش زمان ذوب در حدود 23% میگردد.
- همچنین افزایش تعداد فین به واسطه افزایش ناحیه ذوب باعث کاهش 25% زمان ذوب میگردد.

1. Agyenim F, Hewitt N, Eames P, Smyth M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and sustainable energy reviews*. 2010;14(2):615-28.
2. Zalba B, Marin JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied thermal engineering*. 2003;23(3):251-83.
3. Hosseini M, Rahimi M, Bahrampoury R. Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014;50:128-36.
4. Hosseini M, Ranjbar A, Sedighi K, Rahimi M. A combined experimental and computational study on the melting behavior of a medium temperature phase change storage material inside shell and tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2012;39(9):1416-24.
5. Ranjbar AA, Kashani S, Hosseinizadeh SF, Ghanbarpour M. Numerical heat transfer studies of a latent heat storage system containing nano-enhanced phase change material. *Thermal Science*. 2011;15(1):169-81.