مدلسازی جذب حرارت با استفاده از لوله های حرارتی مغروق در مواد تغییر فاز دهنده بهبودیافته با نانوذرات

کامبیز مهدی پور[1]* و محمد قلم باز[2]

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک ، دانشکده فنی و مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[2] استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: زمستان۹۶ پذیرش: زمستان۹۶

چکیده :

آنچه که در دنیای امروز سبب تشدید بحرانهای انرژی و معضلات محیط زیستی شده است، استفاده بدون آنالیز مهندسی از مصرف انرژیها خصوصا سوختها است . لذا در راستای اهداف مدیریت انرژی در صنایع ، رسیدن به کارکرد بهینه در یک سیستم یا چرخه ، همواره توسط مدیران مهندسی هدف گذاری شده است. بررسی چرخه گرمایی در سیستم های LHTES (انباشت انرژی حرارتی با گرمای نهان) بعنوان بخشی از دانش مواد تغییر فاز دهنده (PCM) از منظر انتقال حرارت و ممنتم ، همواره مدنظر بوده است. استفاده از لوله های گرمایی یا هیت پایپ نیز بعنوان یک تجهیز تبادل حرارت با بازده بالا از اهمیت بالایی برخوردار است . استفاده از نانو ذرات در سیالات بعنوان یک دانش روز نیز قابل بهره برداری است . خواص ترمو فیزیکی و ترمو شیمیایی سیالات بدین روش بنحو قابل ملاحظه ای ارتقاء می یابد .

* **عهده‌دار مکاتبات:** kmehdipoor2004@yahoo.com

کلمات کلیدی *:* مدلسازی، لوله حرارتی،نانوسیال، مواد تغییر فاز دهنده

۱- مقدمه :

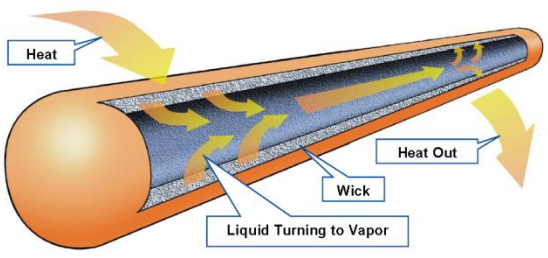
مواد تغییر فاز دهنده :

افزایش سطح گازهای گلخانه ای و بهای سوخت، انگیزه اصلی برای تلاشهای افزایش بازده در سیکل های انرژی بر می باشد. بطور مثال در بیشتر بخشهای جهان که در معرض تابش مستقیم تشعشع نور خورشید هستند، یکی از مهمترین مراجع تجدید پذیر قابل بررسی و بهره برداری است. یکی از مهمترین انتخابها در این خصوص استفاده توسعه تجهیزات ذخیره انرژی است. ذخیره انرژی بشکل مناسب بعنوان یکی از موضوعات مورد بحث تکنولوژی در روزگار ماست. ذخیره انرژی نه نتها ناهماهنگی مابین عرضه و تقاضای انرژی را کاهش می دهد، بلکه بهبود عملکرد و قابل اعتماد بودن سیستمهای انرژی باعث می شوند. موضوع مورد بحث ما انرژی حرارتی است و بشکلهای زیر قابل بهره برداری است :

۱. انباشت حرارت محسوس
۲. انباشت حرارت نهان

ذخیره حرارت نهان(LHS) که مبنای آن جذب یا آزاد سازی حرارت بهنگام گذار فازی از جامد به مایع و مایع به گاز و یا بالعکس است. انتقال انرژی گرمایی زمانی اتفاق می افتد که مواد از جامد به مایع و یا بالعکس تغییر فاز دهند. بدین حالت گذار فازی یا حالت می گویند. این مواد PCM جذب و دفع را در دمای نسبتا ثابت انجام می دهد و قادرند ۱۴-۵ برابر مواد حرارت محسوس گرما در واحد حجم ذخیره کنند.

هیت پایپ



شکل (۱-۴): ساختار یک نمونه هیت پایپ [۱]

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.4.6]

تجهیز انتقال حرارتی است که هدایت حرارتی بشدت بالایی دارد. این تجهیز یک ظرف خالی است که با مقدار اندکی سیال عامل پر شده است. طراحی آنها بایستی بگونه ای باشد که با حداقل گرادیان دما، گرما از جسم گرم به جسم سرد یا یک سطح ایزوترمال منتقل گردد .هیت پایپ ها شبیه مواد جامد هدایت حرارتی ثابت ناشی از دو فاز ندارند. در عوض هدایت حرارتی با طول افزایش می یابد. بر خلاف مواد جامد، هدایت حرارتی هیت پایپ با مقدار حرا ت منتقل شده و سایز کندانسور و اواپریتور متغیر است. ذکر همین نکته بس که در هیت پایپ ها با طراحی مناسب، بسته به طول هیت پایپ، هدایت حرارتی می تواند از ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ برابر هدایت حرارتی مس بیشتر باشد. چون قطعه در حال حرکت ندارند شدیدا قابل اعتماد بوده و در جاهایی که تعمیرات غیر ممکن است (فضا پیما) کابردهای فراوانی دارند. تنها اشکال آنها تولید گاز درون آنها است که با تمیز کاری قابل رفع است.

نانوسیالات

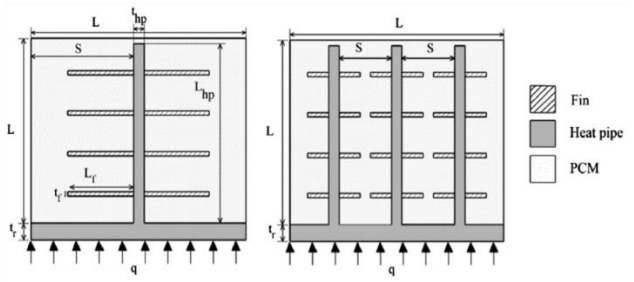
نانو سیالات نوع جدیدی از مدیوم های انتقال حرارتند که شامل نانوذرات هستند **(1-100 nm)** که به صورت کاملا یکنواخت و پایدار در سیال پایه توزیع می گردد. این نانوذرات توزیع شونده عموما فلزات یا اکسیدهای فلزی هستند که سبب ارتقاء هدایت حرارتی نانوسیالات می شوند و با افزایش ضرائب انتقال حرارتی هدایت و جابجایی سبب انتقال حرارت بیشتر می گردد. خواص ترمو فیزیکی نانو سیالات بجهت پیش بینی رفتار انتقال حرارتشان ضروری است. این موضوع شدیدا برای رویکرد های کنترل در صنایع و صرفه جویی انرژی مهم است. نانوذرات پتانسیل بسیار خوبی برای ارتقاء خواص انتقال حرارت در مقایسه با همان ذرات سوسپانسیون در ابعاد میلی و میکرو متر دارد.

تلفیقی ازهیت پایپ و نانوسیال در چرخه مواد تغییر فاز دهنده **(PCM)**

همانگونه که در مطالب قبل عنوان شد هیت پایپ و نانوسیالات بعنوان تکنولوژی های نسبتا جدید می توانند تاثیر بسزایی در یک چرخه مواد تغییر فاز دهنده داشته باشند و هر کدام بشکلی سبب بالا رفتن راندمان سیستم گردند. نانوسیالات سبب ارتقاء عملکرد حرارتی خواص ذاتی سیال چرخه PCM شده و هیت پایپ نیز به مانند یک مبدل حرارتی در بخش **کندانسور** و یا **اواپریتور** خود می تواند با بازده بالاتر و افت انرژی کمتر انتقال حرارت را انجام دهد.

۲- مطالعات پیشین:

مطالعه عددی روی هیت پایپ مجهز به فین در سیستمهای انباشت انرژی با مواد تغییر فاز دهنده برای دماهای بالادر این مطالعه مشخصه های حرارتی هیت پایپ مجهز به فین برای سیستمهای انباشت انرژی گرمای نهان بصورت عددی بررسی می گردد. یک حجم محدود دو بعدی بر مبنای تکنیک **آنتالپی – تخلخل** بمنظور آنالیز عملکرد واحد انباشت انرژی حرارتی با محفظه مربع شکل با مواد تغییر فاز دهنده با دمای بالای ذوب آنالیز می گردد. تاثیرات فاصله هیت پایپ ها ، طول و تعداد فین ها و تاثیر جابجایی روی پاسخ حرارتی واحد انباشت انرژی حرارتی مورد مطالعه قرار می گیرد . فقط قرآیند شارژ سیستم LHTES در این مطالعه بررسی می گردد. هندسه فیزیکی سیستم LHTES در شکل یک تشریح شده است.



شکل (۲-۱): شماتیک یک هیت پایپ (سمت چپ) و سه هیت پایپ (سمت راست)[۲]

سه بخش مدل بصورت هیت پایپ تکی و چندگانه مطالعه تحلیل می گردد. یک هیت پایپ از دو بخش اواپریتور(گیرنده حرارت) و کندانسور (از دست دهنده حرارت) تشکیل می شود. فلاکس حرارتی یکنواخت به بخش اواپیتور هیت پایپ که بخش تحتانی ظرف PCM را می پوشاند. بخش کندانسور هیت پایپ بمنظور پخش بهتر حرارت میان PCM به فین های از جنس نیکل متصل شده است.طول ظرف L=24 mm و ضخامت اواپریتور هیت پایپ t_f=10 mm است.طول و ضخامت کندانسور هیت پایپ بترتیب L_{hp}=250 mm و t_{hp} = 10 mm است. دیمانسیون هندسه هر چه مورد در جدول ۱ بیان شده است : فرضیات زیر در مدلسازی عددی بکار می رود :

- فرآیند ذوب با استفاده از تکنیک " آنتالپی – تخلخل" مدل می گردد
- خواص PCM ثابت فرض شده و معادل در هر دو فاز مایع و جامد است
- PCM مذاب ، سیال بوزینسک و نیوتونی فرض می گردد
- جریان درون PCM مذاب تراکم ناپذیر و آرام فرض می گردد
- از انتقال حرارت تشعشعی صرفنظر می گردد
- تغییر حجم در خلال فرآیند ذوب نادیده گرفته می شود
- در خلال گذار فازی از حرکت توده جامد PCM صرفنظر می گردد
- در سطح تماس از مقاومت تماسی حرارتی صرفنظر می گردد

پکیج تجاری CFD انسیس فلوئنت ۱۴، برای حل معادلات حاکم بکارگیری شده است. بخاطر تقارن میدان دما و جریان با محور y، نیمی از حوزه فیزیکی مدل می شود. بمنظور گسسته سازی حوزه محاسباتی، شبکه یکنواخت منظم بکار می رود. در فلوئنت ۱۴، از روش بر مبنای فشار برای حل معادلات ممنتم PCM و با کوپل کردن فشار – سرعت بکار می رود. روش تفاضلات مرتبه دوم رو به بالا برای گسسته سازی ترم های

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

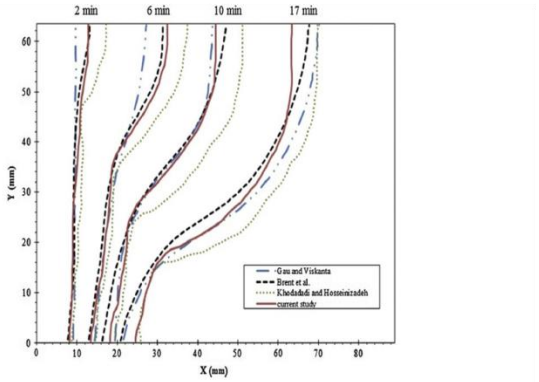
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.4.6]

convective* معادلات انرژی و ممنتم بکار می رود. از روش استاندارد برای میانیابی فشار در رویه تمام سلولها بکار می رود. می توان جزئیات بیشتر برای روشهای عددی را در این مراجع جستجو کرد[۳].پی از انجام این تست، شبکه یکنواخت با ۷۰ المان در جهت x و۱۴۰ المان در جهت y ، برای تمام محاسبات و ابعاد فعلی کافی دانسته شد. گام زمانی ۱ ثانیه برای حالت جامد استفاده شد و وقتی این مقدار به ۰.۰۱ ثانیه رسید گذار فازی شروع شد. تغییر بیشتر گام زمانی ، دقت محاسبات را ارتقاء نداد. محاسبات با کامپیوتری با پروسسور 3.4GHZ اینتل و 8 GB RAM انجام شد. زمان متوسط برای شارژ کامل، یک هفته با CPU متوسط انجام شد.

جدول (۲-۳) : نتایج استقلال گرید و بازه های زمانی[۲]

Time step(s)		Grid1(N_x*N_y) 50*100 Charging time(s)	Grid1(N_x *N_y) 70*140	Grid1(N_x*N_y) 100*200
$\Delta\tau_1$	$\Delta\tau_2$			
10	0.05	6774	-	-
5	0.02	6851	6887	-
1	0.01	6907	6920	6924
1	0.005	6929	6926	6921

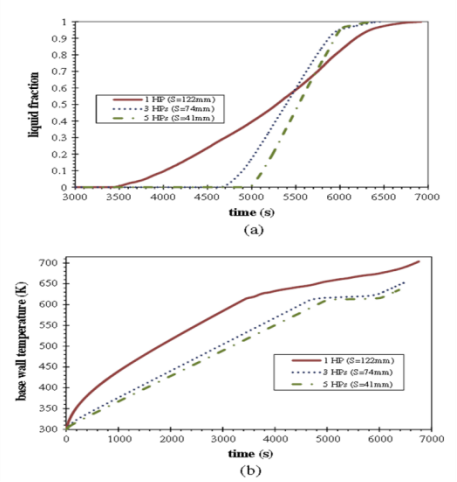
ارزیابی اعتبار مدل عددی نتایج بدست آمده از مدل جاری با سایر تجربیات و مطالعات عددی قبلی مقایسه شد. شکل ۲ موقعیت های ذوب جلو را زمانهای مختلف برای پژوهش حاضر و داده های تجربی توسط گو و ویسکانتا [۴] و نتایج عددی برنت و همکاران [۵] و خدابخشی و حسین زاده [۶] را نشان داد.



شکل (۲-۲) :موقعیت های کسرذوب در زمان های مختلف[۵،۴،۶]

تاثیر فاصله مابین هیت پایپ ها (تعداد هیت پایپ)

تغییرات کسر حجمی PCM مایع و تغییرات دمای دیواره پایه برای فواصل مختلف هیت پایپ در شکل 7.a و 7.b نمایش داده شده است



شکل (۲-۷) : کسر ذوب و دمای پایه برای تعداد مختلف هیت پایپ[۲]

همانطور که مشاهده می شود در شکل (۲-۷) .a، ذوب PCM درLHTES با فاصله هیت پایپ بیشتر زودتر شروع شده و این ناشی از مقاومت گرمای بالاتر در فاصله هیت پایپ بیشتر است. مقاومت گرمای بالاتر با یک فلاکس ورودی حرارتی باعث اختلاف بیشتر دما بین دیوار پایه و PCM و دمای بالاتر PCM در نزدیکی دیواره پایه مشود، جائیکه بیشترین انرژی گرمایی انتقال می یابد و درPCM نزدیک دیواره ذخیره می گردد. برای مواردی با فواصل کمتر هیت پایپ، دمای کمتری در مجاورت دیواره بدست می آید و بدلیل حرارت پخش شده بهتر از تعداد بیشتر هیت پایپ، توزیع دما در کل PCM یکنواخت تر می شود. برای هیت پایپ ها با فاصله کمتر، ذوب دیرتر شروع می شود(S= 74 & 41 mm) و پیشرفت آن در مقایسه با فاصله بیشتر (S = 122 mm) سریعتر است. با ادامه فرآیند شارژ، نرخ بالاتر ذوب با کسرهای بالاتر مایع در فاصله های کمتر نشان دهنده انرژی انباشت یکنواخت تر است. در نتیجه کاهش فاصله هیت پایپ باعث شارژ سریعتر می گردد. در حالت کلی افزایش تعداد هیت پایپ ها از ۱ به ۳ باعث کاهش ۱۰ ٪ زمان شارژ سیستم LHTES می گردد. اختلاف زیادی بین درLHTES با ۳ و ۵ هیت پایپ وجود ندارد. از ذکر مزایای دیگر هیت پایپ ها صرفنظر شده است.

شکل (۲-۷) .bدمای دیواره پایه نسبت به زمان را در فواصل مختلف هیت پایپ نشان می دهد. بخاطر مقاومت گرمای بالاتر در فواصل بیشتر هیت پایپ، برای تمامی موارد در خلال فرآیند شارژ دمای بالاتر دیواره پایه بدست می آید. در تمامی موارد شیب دمای دیواره پایه درست پس از شروع گذار فازی PCM کاهش می یابد، بدلیل اینکه مکانیسم انتقال حرارت از گرمای محسوس به گرمای نهان تغییر می کند. همچنین همانطور که فرآیند ذوب پیشرفت می کند،PCM مایع بیشتری در جوار دیوار پایه و سطح هیت پایپ تشکیل می شود و نیز جابجایی طبیعی شروع می گردد که سبب ارتقاء انتقال حرارت از دیواره های داغ به PCM و در نتیجه رشد آهسته تر دمای دیواره پایه می گردد. شیب تغییر در شکل (۲-۷) .bبرای هیت پایپ با فاصله کمتر

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.4.6]

شدید تر شده و دمای دیواره پایه در مرحله شروع ذوب نمک تقریبا ثابت است. این رفتار بدین شکل قابل تشریح است که تعداد بیشتر هیت پایپ، توزیع بهتر گرما را در پی دارد. در نتیجه انرژی گرمایی ورودی دور از دیوار پایه به PCM با بازده بالا به هیت پایپ ها انتقال می یابد. از این انرژی بجای تجمع در نزدیکی دیوار پایه برای حرارت و ذوب PCM استفاده می شود.

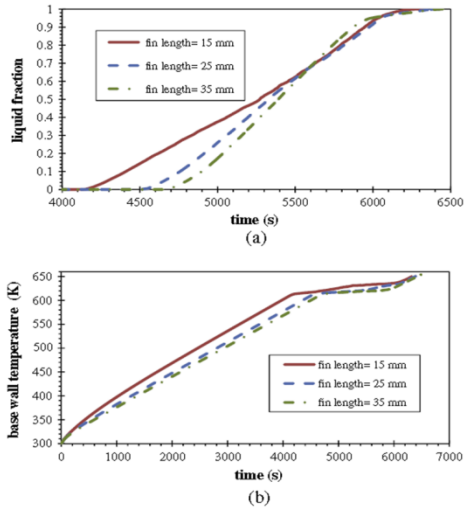
در مراحل نهایی فرآیند شارژ در شکل (۲-۷) a. و (۲-۷) b. سیستمهای LHTES با فاصله کمتر هیت پایپ باعث کسر مایع بیشتر و دمای دیواره پایه پایین تر می گردد. بنابراین نتیجه افزایش تعداد هیت پایپ ها ، ارتقاء انتقال حرارت به PCM با انتقال دمای کمتر بین دیواره پایه و بخش جامد PCM شدند. همچنین در مقایسه با کسر مایع PCM و دمای ثبت شده دیواره پایه برای فاصله مختلف هیت پایپ، دیده می شود که سیستمهای با ۳ تا ۵ هیت پایپ (S=74 & 41 mm) عملکرد بالاتری در مقایسه با یک هیت پایپ با (S = 122 mm) دارد. اختلاف زیادی مابین ۳ و ۵ هیت پایپ دیده نمی شود. بنابراین سیستم LHTES با ۳ هیت پایپ بعنوان ساختار بهینه برای هندسه ارائه شده، برگزیده می شود جائیکه هزینه های ساخت سیستم با بکارگیری تعداد کمتری هیت پایپ کاهش می یابد و ظرفیت انباشت حرارتی سیستم وقتی دو هیت پایپ حذف شوند، جرم بیشتر PCM افزایش می یابد.

تاثیر طول فین

از شکل (۲-۱۰) a. دیده می شود در زمان $\tau = 5600\ s$ در تمامی موارد مقدار کسر مایع PCM تقریبا ثابت است. فین های بلندتر، نیازمند سطح رویه بیشتر بین فین وPCM و در نتیجه انتقال حرارت بیشتر از دیواره داغ به PCM که نتیجه آن توزیع یکنواخت دما در PCM و دمای دیواره پایه کمتر است. اختلاف دما بین PCM جامد و سطح هیت پایپ ها با افزایش طول هیت پایپ کاهش می یابد. زیرا با فین های بلندتر حرارت بهتر پخش می گردد.

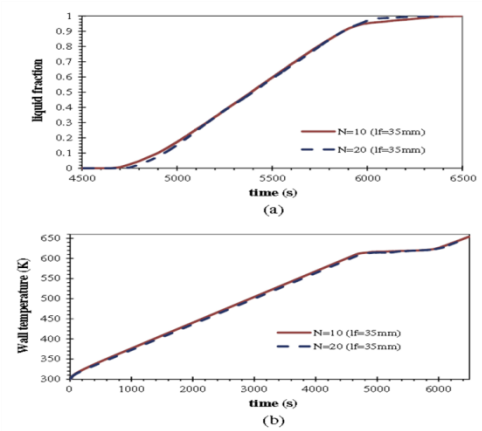
ذوب در فین های کوتاهتر شکل (۲-۱۰) a. زودتر شروع می شود، زیرا بخش عظیمی از انرژی گرمایی بجای گسترش به بیرون به PCM مجاور دیوار پایه منتقل می گردد. این موضوع ناشی از مقاومت حرارتی بالاتر در سیستمهای با فین های کوتاهتر است.

همانطور که در شکل شکل (۲-۱۰)b. نشان داده می شود این مقاومت حرارتی بالا می تواند به دمای بالاتر ویواره پایه در فرآیند شارژ نیز نسبت داده شود. اگر چه موارد با فین های بلندتر (L_f=25 ,35 mm) نشان دهنده نرخ ذوب بالاتر، پس از شروع به ذوب بوده و کل زمان شارژ در کوتاهترین فین ها کمترین است. این پدیده می تواند به انسداد جریان PCM مذاب بین فین ها و جابجایی طبیعی ضعیف در فین های بلند تر نسبت داده گردد.



شکل (۲-۱۰) : کسر ذوب و دمای پایه در سه هیت پایپ با طول فین متفاوت[۲]

تاثیرات تعداد فین ها



شکل (۲-۱۱): کسر ذوب و دمای پایه در سه هیت پایپ با تعداد فین متفاوت[۲]

فرآیند شارژ سیستم LHTES مجهز به هیت پایپ مجهز به فین با PCM دمای ذوب بالا در یک محفظه مربع شکل با استفاده از مدل دوبعدی گذرا مدلسازی شد. تاثیرات فاصله هیت پایپ ، طول و تعداد فین بعلاوه تاثیر جابجایی طبیعی روی عملکرد سیستم مطالعه شد. مشخص شد که فاصله بین هیت پایپ ها یک نقش کلیدی درارتقاء عملکرد سیستم LHTES دارد. افزایش تعداد هیت پایپ ها (کاهش فاصله بین آنها) باعث افزایش نرخ ذوب و کاهش دمای دیواره پایه در خلال فرآیند شارژ می شود. هندسه فین های متصل به هیت پایپ نقش مهمی در عملکرد سیستم دارد. افزایش طول فین ها باعث کاهش اختلاف دما داخل PCM شده و کاهش دمای دیواره پایه می گردد. همچنین نشان داده شد که تعداد فین ها تاثیر آنچنانی روی عملکرد سیستم ندارد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.4.6]

۳- معادلات حاکم :

کار جدیدی که در این مطالعه صورت گرفته، تلفیق مطالعه تیاری-مهدوی با مواد تغییر فاز دهنده ارتقاء یافته است که حاوی نانوذرات می باشند. توجه شود در پژوهش جاری به مطالعه نانو ذرات بشکل خاص پرداخته نمی شود و مقایسه بین انواع نانو ذرات صورت نمی گیرد. این مطالعه شکل بی بعد معادلات را بررسی نموده و نسبت بین نانو سیال و سیال پایه را در خواص ترموفیزیکی بررسی میکند

کنترل کسر ذوب در PCM مطابق مدل *آنتالپی-تخلخل* :

مدل کردن فرآیند ذوب در محاسبات جاری توسط تکنیک آنتالپی – تخلخل است. در این تکنیک، مشخصا لایه فصل مشترک ذوب دنبال نمی شود، بلکه بجای آن از کمیتی بنام کسر ذوب که نشان دهنده کسر واحد حجمی فرم مایع است استفاده میگردد. کسر مایع در هر تکرار بر مبنای بالانس آنتالپی محاسبه می شود.

منطقه مذاب ناحیه ای است که که کسر ذوب بین ۰ تا ۱ متغیر است. ناحیه مذاب بمانند یک توده متخلخل مدل می شود و میزان تخلخل بین ۰ تا ۱ متغیر است. وقتی که ماده کاملا جامد می گردد تخلخل صفر میگرددو بنابراین سرعت به صفر کاهش می یابد.

متغیرهای بی بعد :

$$X=\frac{x}{H}\ ,Y=\frac{y}{H}\ ,U=\frac{uH}{\alpha_{bf}}$$
$$,V=\frac{vH}{\alpha_{bf}}\ ,\quad \theta=\frac{T-T_f}{T_H-T_f},$$
$$P=\frac{pH^2}{\rho_{bf}\,\alpha^2{}_{bf}}\ ,\ \mu_r=\frac{\mu_{(nf)}}{\mu_{bf}}, \qquad (۱-۳)$$

$$\alpha_r=\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_{bf}}\ ,\ F=\frac{\tau\alpha_{bf}}{H^2}\ ,S^*=\frac{s^*H^2}{\rho_{bf}\,\alpha_{bf}}$$

۳-۳-۱ جایگذاری در پیوستگی

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \qquad (۲-۳)$$

۳-۳-۲- جایگذاری در y ممنتم :

پس معادله y ممنتم بشکل زیر بی بعد می گردد :

$$\frac{\partial V}{\partial F}+\ U\frac{\partial V}{\partial X}+\ V\frac{\partial V}{\partial Y}\ =-\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\frac{\partial P}{\partial Y}+Pr\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \qquad (۳-۳)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\mu_r\frac{\partial V}{\partial X}\right)+\ \frac{\partial}{\partial Y}\left(\mu_r\frac{\partial V}{\partial Y}\right)\right]+Pr$$
$$*\,Ra\frac{\beta_{nf}}{\beta_{bf}}\ \theta\ +\ \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}VS^* \qquad (۴-۳)$$

بشکل مشابهی ممنتم در جهت X بازنویسی می گردد :

$$\frac{\partial U}{\partial F}+\ U\frac{\partial U}{\partial X}+\ V\frac{\partial U}{\partial Y}$$
$$=-\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}\frac{\partial P}{\partial X}+Pr\frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \qquad (۵-۳)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\mu_r\frac{\partial U}{\partial X}\right)+\ \frac{\partial}{\partial Y}\left(\mu_r\frac{\partial U}{\partial Y}\right)\right]+\ \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}}US^* \qquad (۶-۳)$$

۳-۳-۳- معادله انرژی :

عدد استفان بشکل زیر تعریف میگردد :

$$ste=\frac{\left(C_p\right)_{bf}\left(T_H-T_f\right)}{L_{bf}} \qquad (۷-۳)$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial F}+\ U\frac{\partial\theta}{\partial X}+\ V\frac{\partial\theta}{\partial Y}$$
$$=\ \frac{\partial}{\partial X}\left[\ \alpha_r\frac{\partial\theta}{\partial X}\ \right]$$
$$+\frac{\partial}{\partial Y}\left[\ \alpha_r\frac{\partial\theta}{\partial Y}\ \right]$$
$$-\ \ \frac{1}{Ste}\frac{\left(C_p\right)_{bf}}{\left(C_p\right)_{nf}}\frac{\partial f_l(\theta\ )}{\partial F}$$

۳-۳-۴- معادله هیت پایپ :

$$\frac{\partial\theta}{\partial F}=\frac{k_{eff}}{k_{bf}}\frac{\rho_{bf}}{\rho_{eff}}\frac{C_{p_{bf}}}{C_{p_{eff}}}\left[\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}\right] \qquad (۹-۳)$$

هیت پایپ خود مبنای $3\alpha_{eff}$ همانگونه که اشاره شد مقدار محاسباتی دیگر است که در اینجا بعنوان یک تجهیز خریداری شده وبصورت بعنوان یک ضریب در معادله هیت پایپ $\frac{\alpha_{eff}}{\alpha_{bf}}$ثابت مطالعه می گردد و نسبت ایفای نقش می کند.

۳-۳-۵- معادله فین :

$$\frac{\partial\theta}{\partial F}=\frac{k_{\ f}}{k_{\ bf}}\frac{\rho_{bf}}{\rho_f}\frac{C_{p_{bf}}}{C_{p_f}}\left[\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}\right] \qquad (۱۰-۳)$$

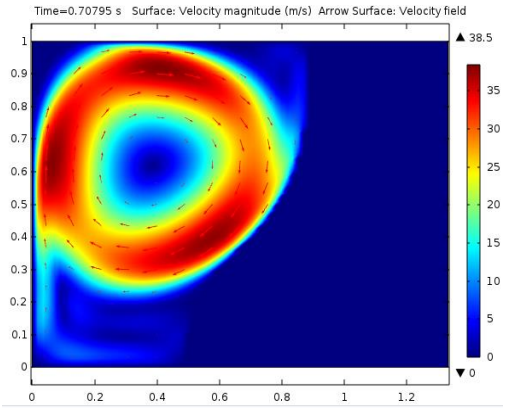
- X=0 , Y=0 ,U=0 ,V=0 , $\theta=0$
- X=0 , Y=0 , U=0, V=0 , $\frac{\partial\theta}{\partial Y}=0$
- X=1 , Y=0 , U=1 , V=0 , $\theta=0$
- X=0 , Y=1 , U=0, V=0 , $\frac{\partial\theta}{\partial Y}=0$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

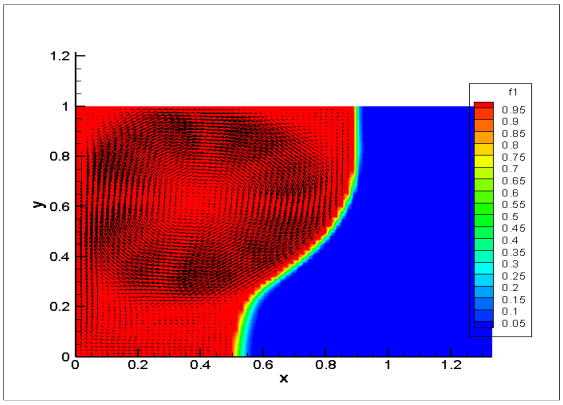
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.4.6]

۴- حل معادلات حاکم و اعتبار سنجی :

در مقاله تیاری-مهدوی از نرم افزار فلوئنت برای حل معادلات استفاده شده است. اما برای حل معادلات بی بعد ذکر شده از برنامه کامسول ۵.۱ استفاده می شود. برای این حل از سیستم با CPU 2.40 GHz و RAM:8.00 GHz استفاده می شود. در ابتدای اعتبار سنجی مطالعاتمان قصد داریم همانند مقاله تیاری-مهدوی گریزی به مطالعات پیشین بزنیم. بدین منظور در کامسول یک پدیده ذوب در محیط سیال تعریف و برای نانو ذرات تمام پارامترها و متغییرهای قبل را تعیین می کنیم. حل مسئله مارا بسمت شکل و کانتورهای زیر سوق می دهد :

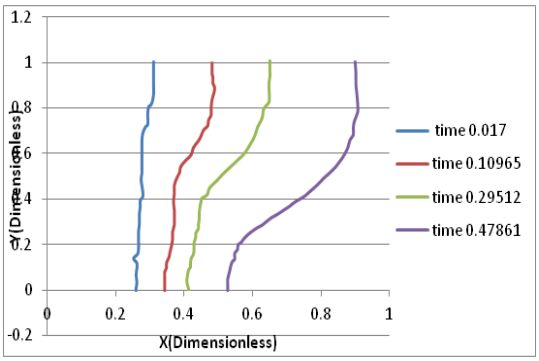


شکل (۴-۶): کانتورهای سرعت برای محیط نانو سیال

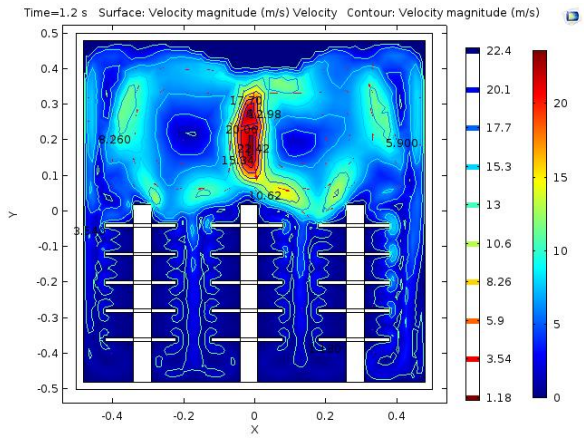


شکل (۴-۷):کانتور کسر ذوب برای محیط نانوسیال در پژوهش حاضر

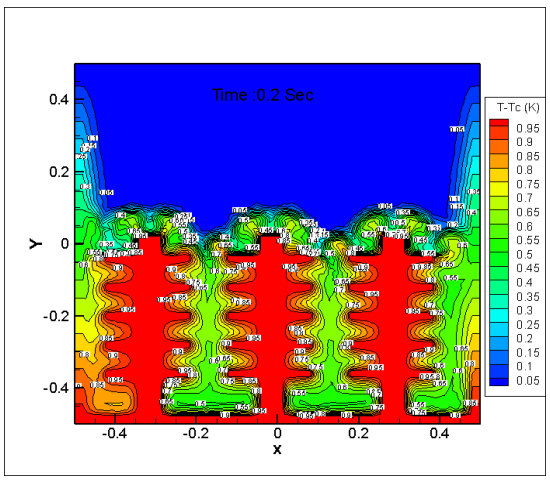
در ادامه پژوهش حاضر کسر ذوب از نرم افزار خروجی گرفته شده و در ۴ زمان بی بعد در مستطیل به طول و عرض واحد رسم شده است . شکل زیر نشان دهنده شباهت پژوهش حاضر با تمامی مطالعات قبلی علی الخصوص مطالعه تیاری-مهدوی(قرمز رنگ) است.



شکل (۴-۸):کسر ذوب در پژوهش جاری



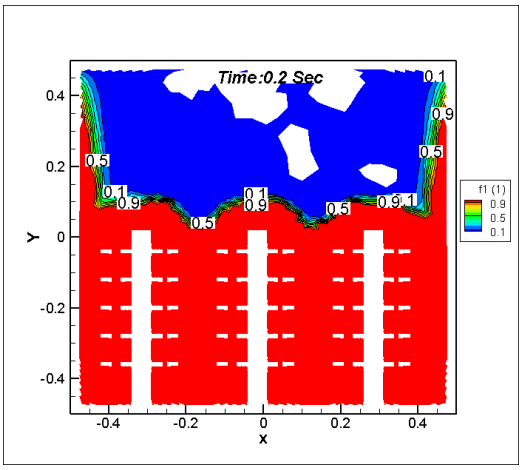
شکل (۴-۹) : کانتور سرعت برای سه هیت پایپ با نانو سیال



شکل (۴-۱۰) کانتور دما برای سه هیت پایپ بصورت بی بعد

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.4.6]



شکل (۴-۱۱) : کانتور کسرذوب برای سه هیت پایپ با نانو سیال

۶- نتایج و بحث:

هدف این بخش بررسی پارامترهای هندسی در محیط شبیه سازی شده هیت پایپ و نانوسیال بوده که در این راستا مقایسه مستقیمی بین مطالعه تیاری-مهدوی و پژوهش حاضر می گردد. دو پارامتر مورد بررسی دمای سطح پایه و کسر ذوب هستند که در سه حالت زیر مورد بررسی قرار می گیرد:

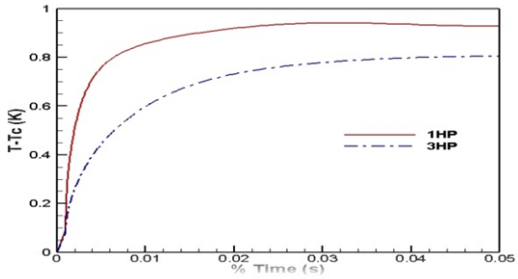
- تاثیر تعداد هیت پایپ
- تاثیر طول پره ها
- تاثیر تعداد فین ها

در این بخش مطالعات خود را برای یک و سه هیت پایپ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر برای دما، عبارت $T-T_c$ (K) در یک واحد تغییرات برحسب زمان بررسی می شود. همچنین کسر ذوب (Liquid fraction) در یک واحد تغییرات بر حسب زمان بررسی می گردد.

تاثیر تعداد هیت پایپ

الف : روی دمای پایه

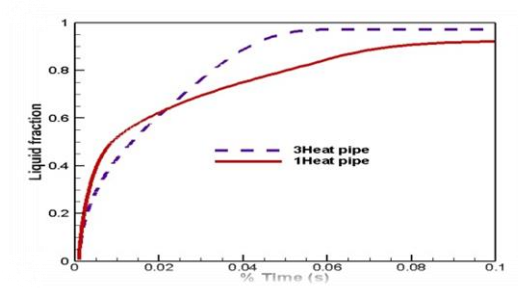
در سیستم با یک هیت پایپ بدلیل کم بودن سطح دما از همان ابتدا با شیبی ملایم شروع به افزایش کرده و در حدود ۸۰ ٪ رنج دمای کل نرخ انتقال حرارت افزایش پیدا کرده و سبب کاهش نرخ افزایش دمای سطح می گردد. این موضوع در پژوهش حاضر بگونه ای اتفاق می افتد که در ابتدا با شیب فوق العاده ای در زمان خیلی اندکی افزایش یافته و به همان ۸۰ ٪ رنج دمای ذوب می رسد و در ادامه بدلیل خواص حرارتی فوق العاده بالای نانو سیال با افزایش زمان دمای سطح ثابت مانده و حرارت بصورت هدایتی کاملا منتقل می گردد. این موضوع برای سیستم با سه هیت پایپ در دمای پایین تر از یک هیت پایپ اتفاق می افتد که نشان از انتقال حرارت بیشتر بواسطه افزایش سطح است.



شکل (۵-۱): دمای پایه در پژوهش حاضر (برای تعداد مختلف هیت پایپ

کسر ذوب :

در مقایسه کسر ذوب در مطالعه تیاری-مهدوی با همان تحلیل قبلی و مقایسه گرمای نهان و محسوس قابل بررسی است. کسر ذوب برای یک پایپ در ابتدا افزایش نیافته و با گذر زمان و افزایش گرمای نهان شروع به افزایش می یابد. این اتفاق برای سه هیت پایپ نیز می افتد و کسر ذوب در سیستم با سه هیت پایپ با شیب تند تری بسمت یک همگرا می شود. علت دیرتر آغاز شدن ذوب در سیستم با سه هیت پایپ در مطالعه تیاری-مهدوی برای نگارنده روشن نیست. هر دو سیستم در حدود ۰.۶ هر دوهمگرا شده و عملکرد سیستم تک هیت پایپ و ۳ هیت پایپ یکسان می شود در ادامه عملکرد سیستم سه هیت پایپه افزایش یافته، کسر ذوب با شیب بیشتری نسبت به تک هیت پایپ افزایش یافته و سریعتر به کسر ذوب کامل می رسد. همین اتفاق در پژوهش حاضر می افتد ، با این تفاوت که بدلیل وجود نانوسیال از همان ابتدا با شیبی تند هم تک هیت پایپ و هم سه هیت پایپ افزایش دما پیدا کرده و در حدود ۰.۶ هر دو سیستم عملکرد برابری داشته و در ادامه بازده سیستم سه هیت پایپ پیشی می گیرد.



شکل (۵-۲): کسرذوب جاری برای تعداد مختلف هیت پایپ

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

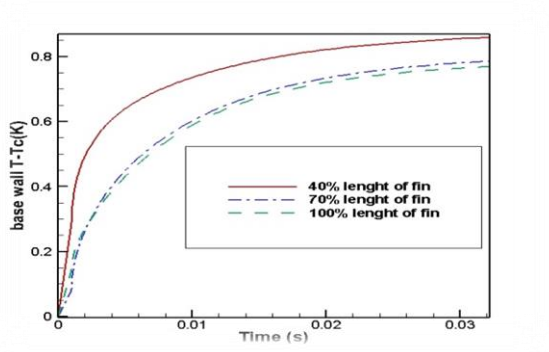
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.4.6]

تاثیر طول پره ها :

در این بخش در مقاله تیاری-مهدوی در سه طول فین شامل ۱۵ و ۲۵ و ۳۵ میلی متر طول فین ها، مطالعه صورت گرفته است، حال آنکه در پژوهش حاضر اگر ۳۵ را طول مبنای بی بعد L در نظر بگیریم، دو طول دیگر 0.4L و 0.7L را جهت انجام مقایسه در نظر می گیریم.

الف : روی دمای پایه

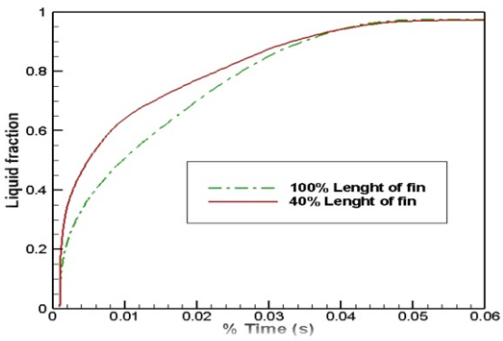
همانگونه که در شکل مشاهده میشود در مطالعه تیاری-مهدوی دمای پایه از همان ابتدا با گذر زمان اوج گرفته و در سیستم با کمترین طول فین بیشترین مقدار را دارد که بواسطه انتقال حرارت کمتر قابل پیش بینی بود و در حدود ۸۰ ٪ رنج دمایی تقریبا ثابت می شوند. این موضوع مقدار بهینه حرارت را در فین بطول ۲۵ میلی متر نشان می دهد. در پژوهش حاضر، در ابتدا دما در سیستم با فین کوتاه تر بشدت اوج گرفته و سپس در حدود ۶۰ درصد رنج دمایی باشیب کمتری اوج گرفته و نهایتا در حدود ۸۰٪ تقریبا ثابت می شود. این موضوع برای دو طول بلند تر با شیب و دمای سطح کمتری اتفاق می افتد که نشانگر تاثیر اختلاف سطح با کوتاهترین طول است.



شکل (۵-۳): تاثیر طول فین بر عملکرد هیت پایپ در مطالعه جاری روی دمای پایه

ب : کسر ذوب :

پس از گذر از حدود ۴۰۰۰ ثانیه در مطالعه تیاری-مهدوی ، کسر ذوب بواسطه غلبه بر گرمای محسوس و قوت گرفتن گرمای نهان ، با شیب ملایمی افزایش یافته و این موضوع در فین های با طول های بلند تر با تاخیر بیشتری آغاز می شود. عملکرد تمامی فین ها در حدود ۰.۶ همگرا شده و پس از آن عملکرد فین های با طول بلندتر پیشی گرفته و نهایتا در حدود کسر ذوب واحد همگرا می شوند.



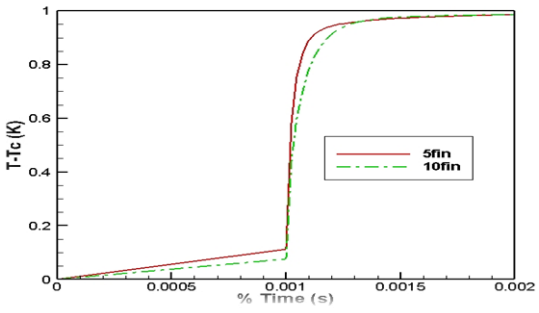
شکل (۵-۴): تاثیر طول فین بر عملکرد هیت پایپ در مطالعه وجاری بر کسر ذوب

این موضوع در پژوهش حاضر بهمان شکل وجود دارد بگونه ای که در ابتدا بواسطه وجود نانو ذرات توده بسرعت ذوب شده و در ابتدا فین با طول ۴۰٪ با بازده بالاتی توده را ذوب می کند و درنهایت عملکرد هر دو تقریبا یکسان می شود.

۵-۳- .تاثیر تعداد فین ها :

الف : روی دمای پایه

در مطالعه تیاری-مهدوی تغییر تعداد فین ها باعث افزایش تدریجی دمای دیواره شده و در حدود ۹۰ ٪ رنج دمای حداکثر ثابت می شود همانگونه که در آ تغییر تعداد فین ها تاثیر محسوسی ندارد. در پژوهش حاضر که در بازه های زمانی بسیار کوچک بررسی شده ، تغییر دمای پایه در تعداد فین بیشتر اندکی کمتر است و سپس با شیب کاملا تند تا دمای حدود ۹۰ ٪ رنج حداکثر با لا رفته و ثابت می شود. در واقع تاثیر تعداد فین ها در پژوهش حاضر تقریبا نا محسوس است.



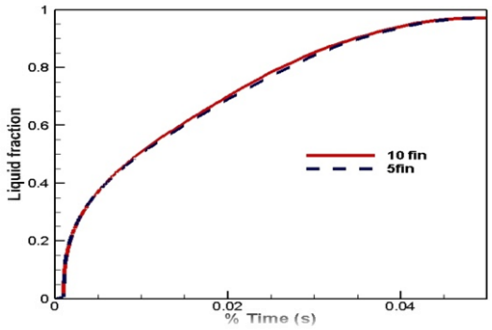
شکل (۵-۵): تغییرات دما برای تعداد متفاوت فین در جاری

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.4.6]

ب: کسر ذوب :

کسر ذوب در مطالعه تیاری-مهدوی برای تعداد متفاوت هیت پایپ تفاوت بسیار اندکی دارد. در ابتدا انرژی صرف غلبه بر گرمای محسوس شده و پس از زمانی بالغ بر ۳۰۰ ثانیه کسر ذوب تشکیل می گردد. سپس هر دو سیستم با اندکی تفاوت با هم اوج می گیرند و حدود ۰.۹۵ کسر ذوب ثابت می شود. در حالیکه در پژوهش حاضر هر دو سیستم تقریبا منطبق بر هم در ابتدا اوج گرفته و سپس با شیبی ملایم در همان ۰.۹۵ ثابت می شود. علی القاعده این بررسی در هر دو مطالعه نشان می دهد تغییر تعداد فین ها تاثیر قابل ملاحظه ای چه مطالعه تیاری-مهدوی و چه در پژوهش حاضر ندارد.



شکل (۵-۶): کسر ذوب برای تعداد متفاوت فین در مطالعه جاری

۷- نتیجه گیری:

تاثیر تعداد هیت پایپ

همانگونه که در شکل ۷-۵ (ب) نشان داده شده است در ابتدای عملیات ذوب عملکرد یک هیت پایپ باعث کسر ذوب بیشتری از سه هیت پایپ می باشد. در حالیکه پس از کسر ذوب حدود ۰.۶ عملکرد درست برعکس می شود. بطوریکه در زمان حدود ۰.۰۵ ثانیه به کسر ذوب ۹۷٪ می رسد، در حالیکه یک هیت پایپ در حدود ۰.۱ ثانیه به کسر ذوب حدود ۰.۹ می رسد. بنابراین در کل می توان گفت : این مطالعه نشان می دهد نه تنها ۵۰ ٪ بازده زمانی را افزایش داده، بلکه باعث ۷ ٪ کسر ذوب بالاتر می شود که بی تردید باید گفت افزایش تعداد هیت پایپ از یک به سه قطعا بایستی صورت بگیرد.

۶-۱-۲- تاثیر طول پره ها

آنچه در شکل ۹-۵ (ب) برمی آید عملکرد فین کوتاهتر در طول کل عملیات ذوب دارای کسر ذوب بالاتری است و نهایتا با فین با طول حدود سه برابر همگرا می شود. بنابراین یقینا بایستی ازفین با طول ۴۰٪ طول در مقایسه با طول کامل استفاده کرد.

۶-۱-۳- تاثیر تعداد فین ها

همانگونه که در شکل ۱۱-۵ (ب) نشان داده شده و عملکرد تعداد ۵ و ۱۰ فین مقایسه شده است، می توان گفت عملکرد هر دو سیستم کاملا برهم منطبق بوده و تفاوتی نمی کند و بنابراین حتما می بایستی از تعداد کمتر استفاده کرد.

فهرست علامتها:

علائم انگلیسی :

- U,V سرعت بترتیب در جهت x و y
- Cp :ظرفیت گرمای ویژه
- H : آنتالپی
- K : ضریب انتقال حرارت فوریه
- x,y : جهت های مختصاتی در دستگاه کارتزین
- S : ترم source در معادله ذوب به معنی اثرات جانبی
- P : فشار
- f_l: کسر جرمی نانو سیال در فاز مایع
- f_s:کسر جرمی نانو سیال در فاز جامد
- A : سطح
- T دما
- t: زمان
- Ste : عدد بی بعد استفان
- v_p,u_p: سرعت هل دادن توده مذاب
- l : گرمای نهان ذوب
- Pr : عدد بی بعد پرانتل
- Re : عدد بی بعد رینولدز
- Ra : عدد بی بعد رایلی

علائم یونانی :

- : حجم
- ρ : چگالی
- α : ظریب نفوذ حرارتی
- β : ظریب انبساط حرارتی
- φ : کسر حجمی
- μ : ویسکوزیته
- ε :ضریب برهمکنش داخلی
- $\emptyset_{sl}$: نیروهای بر همکنش در فصل مشترک
- θ : دمای بی بعد
- τ : زمان بی بعد

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.4.6]

مراجع:

[1] THERMACORE, technical datasheet, www.thermacore.com , Lancaster, PA 17601-4794 USA

[2] S. Tiari, S. Qiu, M. Mahdavi, Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material, Energy Conversion and Management, 89 (2015) 833-842

[3] Patankar SV. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: McGraw-Hill; 1980

[4] Gau C, Viskanta R. Melting and solidification of a pure metal on a vertical wall. J Heat Transfer 1986;108:174–81.

[5] Brent AD, Voller VR, Reid KJ. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal. Numer Heat Transf 1988;13:297–318.

[6] Khodadadi JM, Hosseinizadeh SF. Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage. Int Commun Heat Mass Transfer 2007;34:34–43.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.4.6]