

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

کامبیز مهدی پور<sup>۱\*</sup> و محمد قلم باز<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: زمستان ۹۶ پذیرش: زمستان ۹۶

چکیده:

آنچه که در دنیا امروز سبب تشدید بحرانهای انرژی و معضلات محیط زیستی شده است، استفاده بدون آنالیز مهندسی از مصرف انرژیها خصوصاً 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 (انباست انرژی حرارتی با گرمای نهان) بعنوان بخشی از دانش مواد تغییر فاز دهنده (PCM) از منظر انتقال حرارت و ممتنم، همواره مدنظر بوده است. استفاده از لوله های گرمایی یا هیت پاپ نیز بعنوان یک تجهیز تبادل حرارت با بازده بالا از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از نانوذرات در سیالات بعنوان یک دانش روز نیز قابل بهره برداری است. خواص ترموفیزیکی و ترموشیمیایی سیالات بدین روش بنحو قابل ملاحظه ای ارتقاء می یابد.

\* عهدهدار مکاتبات: [kmehdipoor2004@yahoo.com](mailto:kmehdipoor2004@yahoo.com)

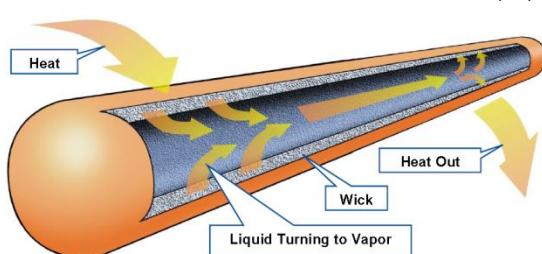
کلمات کلیدی: مدلسازی، لوله حرارتی، نانو سیال، مواد تغییر فاز دهنده

### -۱- مقدمه:

مواد تغییر فاز دهنده:

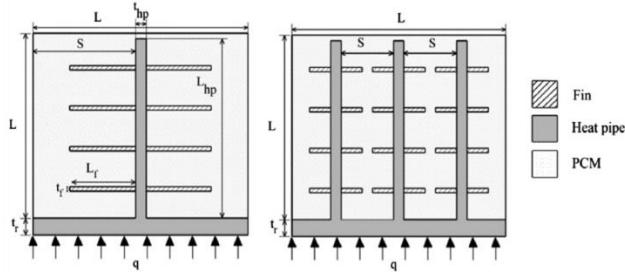
افزایش سطح گازهای گلخانه ای و بهای سوخت، انگیزه اصلی برای تلاشهای افزایش بازده در سیکل های انرژی بر می باشد. بطور مثال در بیشتر بخش های جهان که در معرض تابش مستقیم تشعشع نور خورشید هستند، یکی از مهمترین مراجع تجدید پذیر قابل بررسی و بهره برداری است. یکی از مهمترین انتخابها در این خصوص استفاده توسعه تجهیزات ذخیره انرژی است. ذخیره انرژی بشکل مناسب بعنوان یکی از موضوعات مورد بحث تکنولوژی در روزگار ماست. ذخیره انرژی نه تنها ناهمانگی 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 بشکل های زیر قابل بهره برداری است:

۱. انباست حرارت محسوس
۲. انباست حرارت نهان



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

روی پاسخ حرارتی واحد انباشت انرژی حرارتی مورد مطالعه قرار می گیرد. فقط قرائیند شارژ سیستم LHTES در این مطالعه بررسی می گردد. هندسه فیزیکی سیستم LHTES در شکل یک تشریح شده است.



شکل (۱-۲): 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 اوپریتور(گیرنده حرارت) و کندانسور (از دست دهنده حرارت) تشکیل می شود. فلاکس حرارتی یکنواخت به بخش اوپریتور 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  $L=24\text{ mm}$  و ضخامت اوپریتور هیت پایپ  $t_r=10\text{ mm}$  است. طول و ضخامت کندانسور هیت پایپ بترتیب  $t_{hp}=10\text{ mm}$  و  $L_{hp}=250\text{ mm}$  است. دیمانسیون هندسه هر چه مورد در جدول ۱ بیان شده است: فرضیات زیر در مدلسازی عددی بکار 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 تمامی حرارتی صرفنظر می گردد

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

تجهیز انتقال حرارتی است که هدایت حرارتی بشدت بالای 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 ایزوتمال 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 حرارت منتقل شده و سایز کندانسور و اوپریتور متغیر است. ذکر همین نکته بس که در هیت پایپ ها با طراحی مناسب، بسته به طول هیت پایپ، هدایت حرارتی می تواند از  $10\text{ to }10000$  برابر هدایت حرارتی مس بیشتر باشد. چون قطعه در حال حرکت ندارند شدیداً قابل اعتماد بوده و در جاهایی که تعمرات غیر ممکن است (فضا پیما) کابرد های فراوانی دارند. تنها اشکال آنها تولید گاز درون آنها است که با تمیز کاری قابل رفع است.

## نانوسیالات

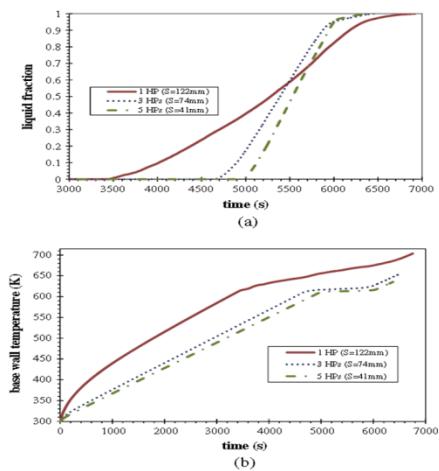
نانو سیالات نوع جدیدی از مدیوم های انتقال حرارتند که شامل نانوذرات هستند (1-100 nm) که به صورت کاملاً یکنواخت و پایدار در سیال پایه توزیع می گردد. این نانوذرات توزیع شونده عموماً فلزات یا اکسیدهای فلزی هستند که سبب ارتقاء هدایت حرارتی نانوسیالات می شوند و با افزایش ضرائب انتقال حرارتی هدایت و جابجایی سبب انتقال حرارت بیشتر می گردد. خواص ترمومیکی نانو سیالات بجهت پیش بینی رفتار انتقال حرارت شان ضروری است. این موضوع شدیداً 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 میکرومتر دارد.

## تلفیقی از هیت پایپ و نانوسیال در چرخه مواد تغییر فاز دهنده (PCM)

همانگونه که در مطالب قبل عنوان شد هیت پایپ و نانوسیالات بعنوان تکنولوژی های نسبتاً جدید می توانند تأثیر بسزایی در یک چرخه مواد تغییر فاز دهنده داشته باشند و هر کدام بشکلی سبب بالا رقتن راندمان سیستم گردد. 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 اوپریتور 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 دمایهای 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 محافظه 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



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

همانطور که مشاهده می شود در شکل (۷-۲)، ذوب PCM در LHTES 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، جاییکه بیشترین انرژی گرمایی انتقال می یابد و در PCM 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 ( $S = 74 \text{ & } 41 \text{ mm}$ ) و پیشرفت آن در مقایسه با فاصله بیشتر ( $S = 122 \text{ mm}$ ) 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٪. در زمان شارژ سیستم LHTES می گردد. اختلاف زیادی بین در ۳ و ۵ هیت پایپ وجود ندارد. از ذکر مزایای دیگر هیت پایپ ها صرفنظر شده است.

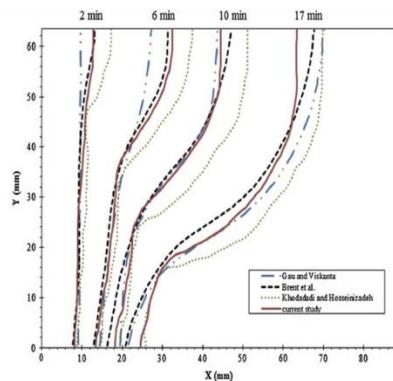
شکل (۷-۲).b. دمای دیواره پایه نسبت به زمان را در فواصل مختلف هیت پایپ نشان می دهد. بخار مقاومت گرمای بالاتر در فواصل بیشتر هیت پایپ، برای تمامی موارد در خلال فرآیند شارژ دمای بالاتر دیواره پایه بدست می آید. در تمامی موارد شبیب دمای دیواره پایه درست پس از شروع گذار فازی PCM کاهش می یابد، بدلیل اینکه مکانیسم 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. شبیب تغییر در شکل (۷-۲).b. برای هیت پایپ با فاصله کمتر

<sup>\*</sup> 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 ۲۰ المان در جهت x و ۱۴۰ المان در جهت y، برای تمام محاسبات و بعد فعلى 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 کامپیووتری با پردازنده ۸GB RAM ۳.4GHZ اینتل و CPU متوسط انجام شد.

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

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

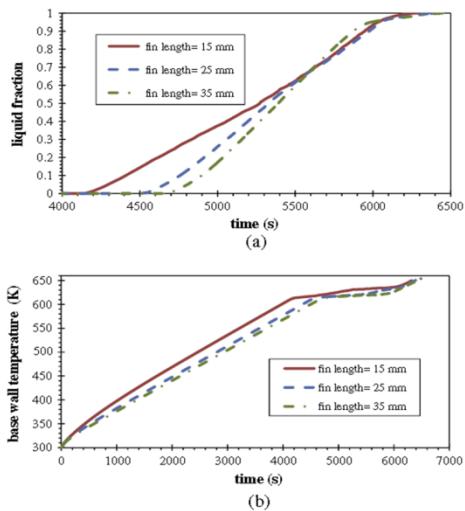
از زیبایی اعتبار مدل عددی نتایج بدست آمده از مدل جاری با سایر تجربیات و مطالعات عددی قبلی مقایسه شد. شکل ۲ موقعیت های ذوب جلو را زمانهای مختلف برای پژوهش حاضر و داده های تجربی توسط گو و ویسکانتا [۴] و نتایج عددی برنت و همکاران [۵] و خدابخشی و حسین زاده [۶] را نشان داد.



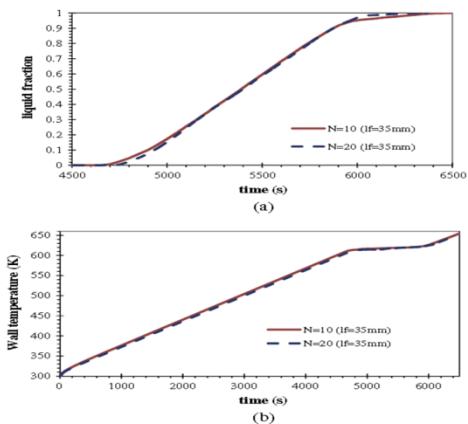
شکل (۲-۲): موقعیت های کسر ذوب در زمان های مختلف [۵,۴,۶]

تأثیر 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 ۷.a و ۷.b نمایش داده شده است



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



شکل (۱۱-۲): 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 مریع شکل با استفاده از مدل دو بعدی 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 در ارتقاء 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 تأثیر آنچنانی روی عملکرد سیستم ندارد.

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 (۷-۲) a. 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 که جاییکه هزینه های ساخت سیستم با بکارگیری تعداد کمتری هیت پایپ کاهش می یابد و ظرفیت انباستح حرارتی سیستم وقتی دو هیت پایپ حذف شوند، جرم بیشتر PCM افزایش می یابد.

#### تأثیر طول فین

از شکل (۱۰-۲) 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 و PCM و در نتیجه آن توزیع یکنواخت دما در PCM و دمای دیواره پایه به PCM که نتیجه آن توزیع یکنواخت دما در 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 (۱۰-۲) 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 (۱۰-۲)b. نشان داده می شود این مقاومت حرارتی بالا می تواند به دمای بالاتر دیواره پایه در فرآیند شارژ نسبت داده شود. اگر چه موارد با فین های بلندتر ( $L=25$ , $35$  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.

$$\left[ \frac{\partial}{\partial X} \left( \mu_r \frac{\partial V}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \mu_r \frac{\partial V}{\partial Y} \right) \right] + Pr * Ra \frac{\beta_{nf}}{\beta_{bf}} \theta + \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} VS^* \quad (4-3)$$

بشکل مشابهی ممتنم در جهت  $X$  بازنویسی می‌گردد :

$$\frac{\partial U}{\partial F} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial X} + Pr \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \quad (5-3)$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial X} \left( \mu_r \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \mu_r \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \right] + \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} US^* \quad (6-3)$$

۳-۳-۳ معادله انرژی :

عدد استفان بشکل زیر تعریف می‌گردد :

$$ste = \frac{(C_p)_{bf}(T_H - T_f)}{L_{bf}} \quad (7-3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial F} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} &= \frac{\partial}{\partial X} \left[ \alpha_r \frac{\partial \theta}{\partial X} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial Y} \left[ \alpha_r \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right] \\ &- \frac{1}{Ste} \frac{(C_p)_{bf}}{(C_p)_{nf}} \frac{\partial f_i(\theta)}{\partial F} \end{aligned} \quad \text{معادله هیبت پایپ :} \quad -4-3-3$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial F} = \frac{k_{eff}}{k_{bf}} \frac{\rho_{bf}}{\rho_{eff}} \frac{C_{p_{bf}}}{C_{p_{eff}}} \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right] \quad (9-3)$$

هیبت 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 هیبت پایپ  $\frac{\alpha_{eff}}{\alpha_{bf}}$  ثابت مطالعه می‌گردد و نسبت ایفای نقش می‌کند.

معادله فین : -5-3-3

$$\frac{\partial \theta}{\partial F} = \frac{k_f}{k_{bf}} \frac{\rho_{bf}}{\rho_f} \frac{C_{p_{bf}}}{C_{p_f}} \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right] \quad (10-3)$$

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

•

### -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 می‌باشد. توجه شود در پژوهش جاری به مطالعه نانو ذرات بشکل خاص پرداخته نمی‌شود و مقایسه بین انواع نانو ذرات صورت نمی‌گیرد. این مطالعه شکل بی‌بعد معادلات را بررسی تموده 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، مشخصاً لایه فصل مشترک ذوب دنبال نمی‌شود، 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 بالанс آنتالپی محاسبه می‌شود.

منطقه مذاب ناحیه‌ای است که کسر ذوب بین  $0$  تا  $1$  متغیر است. ناحیه مذاب بمانند یک توده متخالخ مدل می‌شود و میزان تخلخل بین  $0$  تا  $1$  متغیر است. وقتی که ماده کاملاً جامد می‌گردد تخلخل صفر می‌گردد و بنابراین سرعت به صفر کاهش می‌یابد.

متغیرهای بی بعد :

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{uH}{\alpha_{bf}}, \\ V &= \frac{vH}{\alpha_{bf}}, \theta = \frac{T - T_f}{T_H - T_f}, \\ P &= \frac{pH^2}{\rho_{bf} \alpha_{bf}^2}, \mu_r = \frac{\mu_{(nf)}}{\mu_{bf}}, \end{aligned} \quad (1-3)$$

$$\alpha_r = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_{bf}}, F = \frac{\tau \alpha_{bf}}{H^2}, S^* = \frac{S^* H^2}{\rho_{bf} \alpha_{bf}} \quad (2-3)$$

### ۱-۳-۳ جایگذاری در پیوستگی

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (2-3)$$

۲-۳-۳-۳ جایگذاری در  $y$  ممتنم :

پس معادله  $y$  ممتنم بشکل زیر بی بعد می‌گردد :

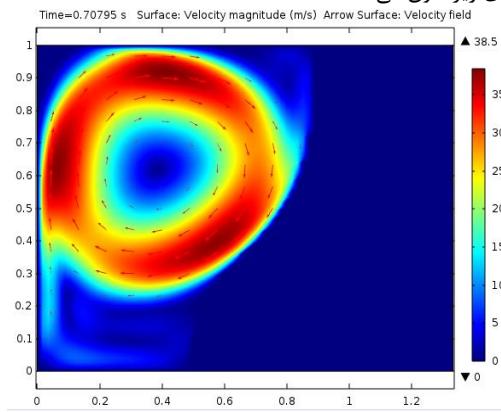
$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial F} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} &= - \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial Y} \\ &+ Pr \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \end{aligned} \quad (3-3)$$

-۴

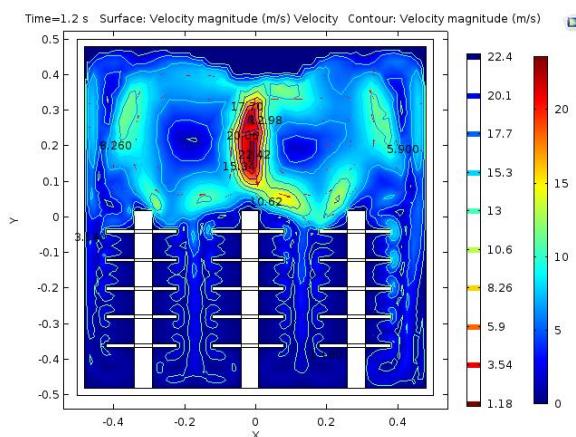
## حل معادلات حاکم و اعتبار سنجی :

در مقاله تیاری-مهدوی از نرم افزار فلوبت 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 RAM:8.00 و CPU 2.40 GHz 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 متغیرهای قبل را تعیین می کنیم. حل مسئله مارا بسمت شکل و

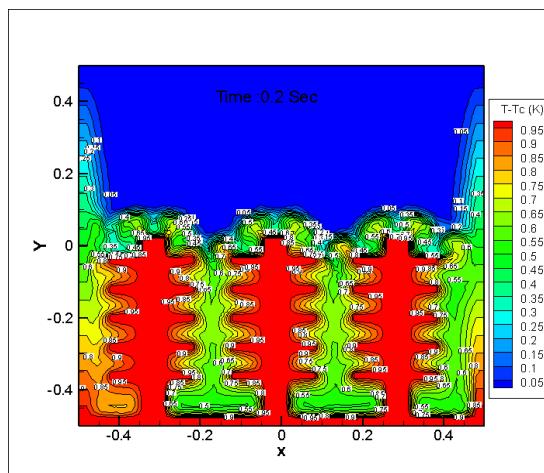
کانتورهای زیر سوق می دهد :



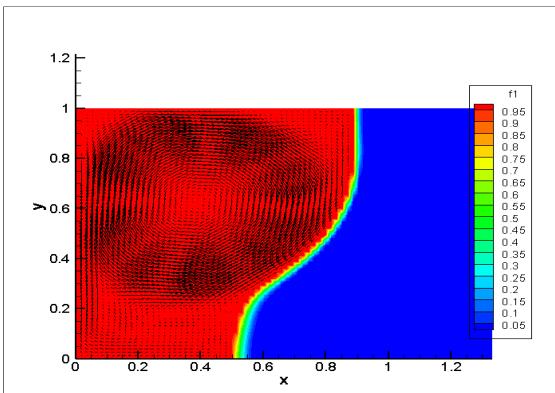
شکل (۸-۴): کانتورهای سرعت برای محیط نانو سیال



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



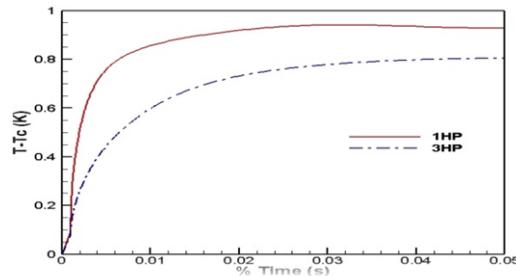
شکل (۱۰-۴) کانتور دما برای سه هیت پایپ بصورت بی بعد



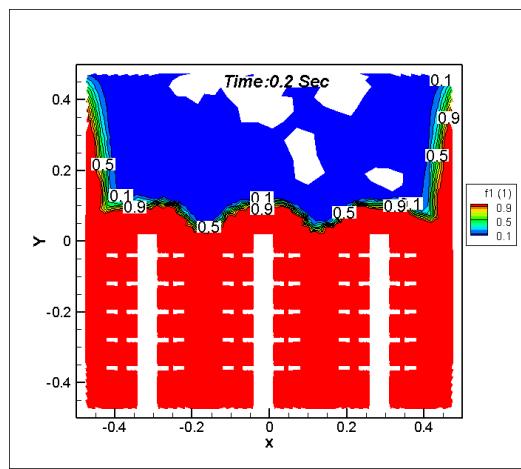
شکل (۷-۴): کانتور کسر ذوب برای محیط نانوسیال در پژوهش حاضر

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.

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



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

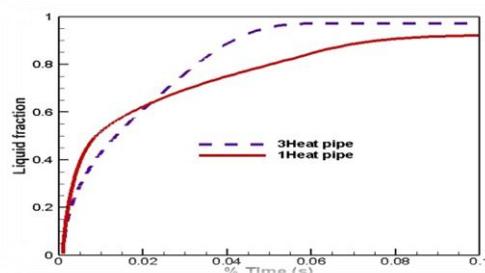
## ۶- نتایج و بحث:

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 گیرند:

- 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.

**کسر ذوب :**  
در مقایسه کسر ذوب در مطالعه تیاری-مهدوی با همان تحلیل قبلی و مقایسه گرمایی نهان و محسوس قابل بررسی است. کسر ذوب برای یک پایپ در ابتداء افزایش نیافته و با گذر زمان و افزایش گرمایی 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 شبیب تند تری بسته 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 دو همگرا شده و عملکرد سیستم تک هیت پایپ و ۳ هیت پایپ یکسان می شود در ادامه عملکرد سیستم سه هیت پایپ افزایش یافته، کسر ذوب با شبیب 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 ابتداء با شبیب 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.

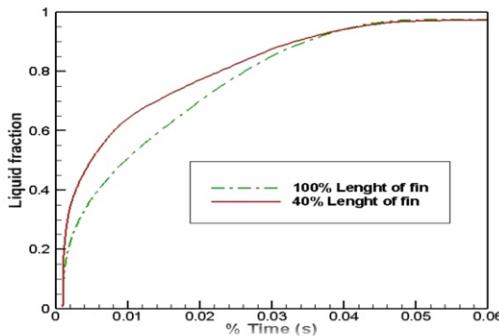


شکل (۲-۵): کسر ذوب جاری برای تعداد مختلف هیت پایپ

### تاثیر تعداد هیت پایپ

#### الف : روند دمای پایه

در سیستم با یک هیت پایپ بدلیل کم بودن سطح دما از همان ابتداء با شبیب 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 ابتداء با شبیب 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



شکل (۴-۵): 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  $\frac{1}{40}$  با بازده بالاتر توده را ذوب می کند و درنهایت عملکرد هر دو تقریباً یکسان می شود.

### ۳-۵. تاثیر تعداد فین ها :

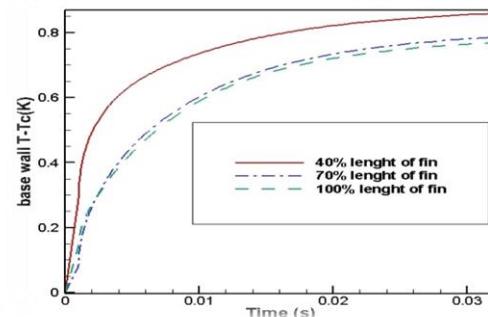
#### الف : روی دمای پایه

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 کاملاً تند تا دمای حدود ۹۰٪ رنج حداکثر با لارفته و ثابت می شود. در واقع تاثیر تعداد فین ها در پژوهش حاضر تقریباً نا محسوس است.

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

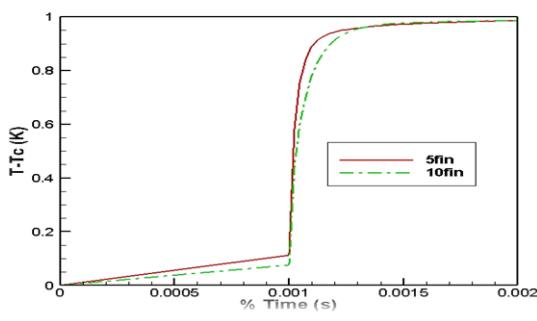
همانگونه که در شکل مشاهده میشود در مطالعه تیاری-مهدوی دمای پایه از همان ابتدا با گذر زمان اوج گرفته و در سیستم با کمترین طول فین بیشترین مقدار را دارد که بواسطه انتقال حرارت کمتر قابل پیش بینی بود و در حدود ۸۰٪ رنج دمایی تقریباً ثابت می شوند. این موضوع مقدار بهینه حرارت را در فین بطول ۲۵ میلی متر نشان 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 نهایتاً در حدود ۸۰٪ تقریباً 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 (۳-۵): 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 نهایتاً در حدود کسر ذوب واحد همگرا می شوند.



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

همانگونه که در شکل ۵-۱۱ (ب) نشان داده شده و عملکرد تعداد ۵ و ۱۰ فین مقایسه شده است، می‌توان گفت عملکرد هر دو سیستم کاملاً برهم منطبق بوده و تفاوتی نمی‌کند و بنابراین حتماً می‌باشد از تعداد کمتر استفاده کرد.

#### فهرست علامتها:

##### علامت انگلیسی:

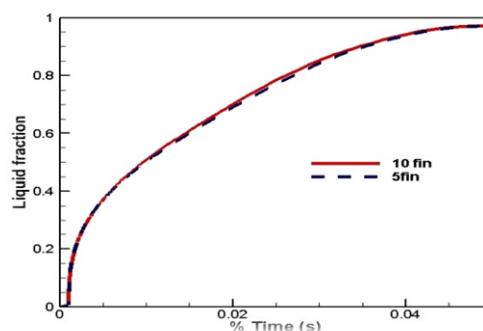
- U,V سرعت بترتیب در جهت x و y
- Cp: ظرفیت گرمای ویژه
- H: آنتالپی
- K: ضریب انتقال حرارت فوریه
- x,y : جهت های مختصاتی در دستگاه کارترین
- S : ترم source در معادله ذوب به معنی اثرات جانبی
- P: فشار
- f<sub>i</sub>: کسر جرمی نانو سیال در فاز مایع
- f<sub>s</sub>: کسر جرمی نانو سیال در فاز جامد
- A: سطح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

##### علامت یونانی:

- : حجم
- $\rho$ : چگالی
- $\alpha$ : ظریب نفوذ حرارتی
- $\beta$ : ظریب انبساط حرارتی
- $\varphi$ : کسر حجمی
- $\mu$ : ویسکوزیته
- $\epsilon$ : ضریب برهمنکنش داخلی
- $\emptyset_{ls}$ : نیروهای بر همکنش در فصل مشترک
- $\theta$ : دمای بی بعد
- $\tau$ : زمان بی بعد

#### 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 می‌گردد. سپس هر دو سیستم با اندکی تفاوت با هم اوج می‌گیرند و حدود ۰.۹۵ کسر ذوب ثابت می‌شود. در حالیکه در پژوهش حاضر هر دو سیستم تقریباً منطبق بر هم در ابتدا اوج گرفته و سپس با شبیه ملائم در همان ۰.۹۵ ثابت می‌شود. علی القاعده این بررسی در هر دو مطالعه نشان می‌دهد تغییر تعداد فین‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای 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:

تأثیر تعداد هیت پایپ

همانگونه که در شکل ۵-۷ (ب) نشان داده شده است در ابتدای عملیات ذوب عملکرد یک هیت پایپ باعث کسر ذوب بیشتری از سه هیت پایپ می‌باشد. در حالیکه پس از کسر ذوب حدود ۰.۶ عملکرد درست بر عکس می‌شود. بطوریکه در زمان حدود ۰.۰۵ ثانیه به کسر ذوب ۹۷٪ می‌رسد، در حالیکه یک هیت پایپ در حدود ۰.۱ ثانیه به کسر ذوب حدود ۹٪ می‌رسد. بنابراین در کل می‌توان گفت: این مطالعه نشان می‌دهد نه تنها ۵۰٪ بازده زمانی را افزایش داده، بلکه باعث ۷٪ کسر ذوب بالاتر می‌شود که بی تردید باید گفت افزایش تعداد هیت پایپ از یک به سه قطعاً باستی صورت بگیرد.

#### ۶-۲- تاثیر طول پره ها

آنچه در شکل ۵-۹ (ب) بر می‌آید عملکرد فین کوتاهتر در طول کل عملیات ذوب دارای کسر ذوب بالاتری است و نهایتاً با فین با طول حدود سه برابر همگرا می‌شود. بنابراین یقیناً باستی از فین با طول ۴۰٪ طول در مقایسه با طول کامل استفاده کرد.

#### ۶-۱- تاثیر تعداد فین ها

مراجع:

[1] THERMACORE, technical datasheet,  
[www.thermacore.com](http://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, Hosseini zadeh SF.  
Nanoparticle-enhanced phase change materials  
(NEPCM) with great potential for improved  
thermal energy storage. Int Commun Heat Mass  
Transfer 2007;34:34–43.