



بررسی عددی تأثیر مواد تغییر فاز دهنده حاوی نانو ذرات لوله کربنی چند جداره در بهبود عملکرد چاه حرارتی تجهیزات الکتریکی

احسان عبدی علمی^۱، آرش میرعبداله لواسانی^{۲*}، سعید دیناروند^۳، محمد نیماfar^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

^{۲*} دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴

چکیده

چاه‌های حرارتی همواره در خنک‌سازی تجهیزات الکتریکی نقش مهمی ایفا می‌کنند. در این پژوهش در یک رویکرد جدید از پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده با توجه به محدوده دمای تغییر فاز مناسب با نانوذرات لوله کربنی چند جداره به صورت همگن در یک چاه حرارتی استفاده شده است. برای مدل‌سازی و حل معادلات حاکم از نرم‌افزار آنسیس فلونت با روش حجم محدود و الگوریتم پیزو استفاده شده است. فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده به صورت عددی با اعمال سه شار حرارتی ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ وات بر مترمربع به کمک روش آنتالپی-تخلخل در فضای سه‌بعدی بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده در حین فرآیند تغییر فاز، اضافه نمودن نانوذرات با درصدهای حجمی ۴، ۶ و ۸ درصد، عملکرد بهتری در جهت کاهش دمای تغییر فاز داشته است. پس از اتمام فرآیند تغییر فاز تغییر فاز، افزایش درصد حجمی نانو ذرات همیشه تأثیر مثبتی نداشته و از میان گزینه‌های پیشنهادی نانوذره با کسر حجمی ۴ درصد بهترین عملکرد را داشته است. ایجاد این شرایط ناشی از افزایش انتقال حرارت هدایتی در ماده تغییر فاز دهنده بدلیل کاهش لزجت می‌باشد. به طور کلی افزودن ۸ درصد نانوذره، زمان ذوب کامل را ۱۵ درصد نسبت به ماده تغییر فاز دهنده خالص افزایش داده است.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت؛ فرآیند ذوب، شبیه‌سازی عددی؛ مواد تغییر فاز دهنده؛ نانو لوله کربنی چندجداره.

Numerical Investigation of the Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes Phase Change Materials on Enhancing Thermal Performance of Electrical Equipment Heat Sink

Ehsan abdi elmi¹, Arash Mirabdollah Lavasani^{2,*}, Saeed Dinarvand³, Mohammad Nimafar⁴

¹ PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^{3,4} Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Heat sinks have always played a crucial role in cooling electrical equipment. In this research, in a new approach, paraffin is used as a phase change material according to the suitable phase change temperature range with multi-wall carbon tube nanoparticles homogeneously in a heat sink. AnsysFluent software with finite volume method and PISO algorithm was used to model and solve the governing equations. The melting process of the PCM is numerically investigated in a three-dimensional space by applying three heat fluxes of 10,000, 20,000, and 30,000 watts per square meter, using the enthalpy-porosity method. According to the obtained results during the phase-change process, the addition of nanoparticles with volumetric percentages of 4, 6, and 8% leads to better performance in reducing the phase-change temperature. After the completion of the phase change process, increasing the volume percentage of nanoparticles does not always have a positive effect, and among the proposed options, nanoparticles with a volume fraction of 4% showed the best performance. This improvement is due to the increased conductive heat transfer in the PCM, resulting from reduced viscosity. Overall, adding 8% nanoparticles increases the total melting time by 15% compared to the pure PCM.

Keywords: Heat transfer; Melting process; Numerical simulation; Phase change materials; Multi-walled carbon nanotube.

۱- مقدمه

افزایش سرعت محاسبات و کاهش اندازه چاه حرارتی باعث به وجود آمدن بار حرارتی بیش از حد مجاز و کاهش طول عمر در این تجهیزات می‌شود؛ لذا مدیریت حرارت نقش مهمی در توسعه‌های آینده خواهد داشت. در سال‌های اخیر به دلیل گرمای نهان بالا و دمای تغییر فاز جامد به مایع تقریباً ثابت مواد تغییر فاز دهنده^۱، توجه ویژه محققان را در زمینه مدیریت حرارت در تجهیزات الکتریکی با استفاده از این مواد را جلب نموده است [۱]. مواد تغییر فاز دهنده به صورت کلی به دودسته آلی و غیر آلی تقسیم می‌شوند. این مواد دارای خواص مطلوبی مانند: خواص ذوب ثابت، پایداری شیمیایی، غیرخورنده بودن و قابلیت بازیافت را دارند. با این حال خواص نامطلوبی از جمله هدایت حرارتی پایین این مواد از دیگر خصوصیات این مواد است [۲]. از کاربردهای این مواد در سیستم‌های تبرید و تهویه، آسایش حرارتی ساختمان‌ها، مبدل‌های حرارتی، سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی، خنک‌کننده الکترونیکی و در فضاپیماها و ماهواره‌ها است [۳-۵]. روش‌های خنک‌کاری و مدیریت حرارت مورد استفاده در سیستم‌های الکتریکی با توان بالا، با توجه به کاربرد و ظرفیت خنک‌کاری موردنظر، بسیار متنوع هستند. استفاده از پره یکی از متداول‌ترین و ارزان‌ترین روش‌ها برای دفع حرارت از سیستم است و به‌طور گسترده در سیستم‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. چاه‌های حرارتی بیشتر در کاربردهای الکتریکی به کار می‌روند که نیاز به خنک‌کاری قطعات و کاهش دما در هنگام عملکرد وجود دارد. چاه‌های حرارتی به‌منظور نگه‌داشتن دمای قطعات الکتریکی در دمای کمتر از محدوده دمایی مجاز مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما در بعضی شرایط (مانند تغییر ناگهانی توان، ازکارافتادن فن)، چاه حرارتی ممکن است، نتواند به‌تنهایی دمای سیستم را در محدوده مجاز نگه دارد. با استفاده از چاه‌های حرارتی دارای ماده تغییر فاز دهنده می‌توان از قابلیت ذخیره‌سازی انرژی این مواد استفاده کرد و این مشکل را حل کرد. سیستم‌های خنک‌کاری بر پایه مواد تغییر فاز دهنده یک روش خنک‌کاری غیر فعال است و فرآیند خنک‌کاری با استفاده از آن‌ها می‌تواند به سه مرحله تقسیم بندی شود. در مرحله اول، حرارت از طریق وسیله‌ی الکترونیکی جذب می‌شود تا

دمای ماده جامد را به دمای ذوب آن برساند. در مرحله دوم، ماده تغییر فاز دهنده شروع به ذوب شدن در دمای ثابت می‌کند و هنگام فرآیند ذوب حرارت بدون افزایش دما جذب می‌شود. در این مرحله ممکن است، حجم به دلیل تغییر فاز کمی افزایش پیدا کند. در مرحله سوم که ماده تغییر فاز دهنده کاملاً ذوب شده است، اگر حرارت ورودی همچنان ادامه داشته باشد، دمای سیال افزایش می‌یابد. محققین زیادی عملکرد چاه‌های حرارتی پره‌دار با ماده تغییر فاز دهنده را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. محمد و همکاران [۷] یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی عملکرد حرارتی چاه حرارتی پر شده با مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. در این تحقیق عملکرد حرارتی چاه حرارتی را با ماده تغییر فاز دهنده و بدون آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد استفاده از ماده تغییر فاز دهنده باعث بهبود عملکرد چاه حرارتی در حدود ۳۰ درصد نسبت به بدون ماده تغییر فاز دهنده می‌شود. هانگ و همکاران [۸]، بهبود عملکرد یک چاه حرارتی را با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده آبشاری^۲ با نقطه ذوب پایین را به دو روش عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حرارتی را تا حد معقولی بهبود بخشید؛ همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۳ و روش عددی مقدار بهینه کسر حجمی مواد تغییر فاز دهنده در چاه حرارتی بهینه سازی شد. آقای درزی و همکاران [۹] به بررسی افزایش تعداد و چیدمان لوله‌ها بر رفتار ماده تغییر فاز دهنده در یک مبدل حرارتی سه لوله پرداختند. نتایج نشان داد، با افزایش تعداد لوله داخلی نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده به دلیل بالا رفتن جابجایی طبیعی در مبدل افزایش می‌یابد، به‌صورتی که زمان ذوب در مبدل حرارتی سه لوله در مقایسه با دو لوله در حدود هشتاد درصد کمتر است. پاتل و سینگ [۱۰] بر روی بهینه سازی یک چاه حرارتی پر شده با مواد تغییر فاز دهنده با تغییر در شکل و اندازه پره‌های آن پرداختند. نتایج نشان داد، استفاده از پره‌های مارپیچ و تغییر در طول و قطر پین‌های بکار رفته منجر به بهبود عملکرد چاه حرارتی پر شده از مواد تغییر فاز دهنده می‌شود. آخیلیش و همکاران [۱۱] عملکرد چاه حرارتی پره‌دار دارای مواد تغییر فاز دهنده را به صورت عددی بررسی کردند.

³ Genetic algorithm¹ Phase Change Material (PCM)² Cascaded PCM

حرارتی پر شده با مواد تغییر فاز دهنده همراه با نانو ذرات اکسید سیلیس را بررسی کردند. از پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده به دلیل نقطه ذوب مناسب و نانوذره اکسید سیلیس با ۱ درصد وزنی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند عملکرد حرارتی چاه حرارتی را در شرایط خنک‌کننده غیرفعال تا حد زیادی بهبود ببخشد؛ همچنین استفاده از نانوذره اکسید سیلیس در ماده تغییر فاز دهنده می‌تواند تا حدود ۲۲۰ درصد از گرم شدن چاه حرارتی را بهبود ببخشد. جلال و همکاران [۱۶]، عملکرد حرارتی یک چاه حرارتی پر شده از مواد تغییر فاز دهنده به همراه نانو ذرات مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم در مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند باعث بهبود عملکرد حرارتی چاه حرارتی شود. راج و همکاران [۱۷] به بررسی عملکرد حرارتی چاه حرارتی، با پره-های پین دار پر شده با مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. در این تحقیق عملکرد ماده تغییر فاز دهنده پایدار شده هگزامتیلن دی ایزوسیانات سنتز شده با اتصال پلی اتیلن گلیکول-۶۰۰ با افزودن نانو ذرات لوله کربنی چند جداره و صفحات نانو گرافن با ۱ درصد وزنی به ترتیب ۶۱/۷۳ و ۸۴/۴۸ درصد هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این ماده تغییر فاز دهنده با ذخیره انرژی در خود می‌تواند دمای چاه حرارتی را تا حدود ۹،۷۷ درصد بهبود یابد. هو و همکاران [۱۸] یک مطالعه عددی بر روی انتقال حرارت اجباری از چاه حرارتی با کانال کوچک پر شده از ماده تغییر فاز-دهنده نانو کپسوله شده در سیال آب حاوی نانو ذرات اکسید آلومینیوم پرداختند. نتایج نشان داد، بیشترین کاهش مقاومت حرارتی در غلظت‌های ۲ و ۱۰ درصد از سوسپانسیون نانو کپسوله شده ماده تغییر فاز دهنده به ترتیب ۱،۲ و ۶،۹ درصد است؛ همچنین استفاده از اکسید آلومینیوم در ماده تغییر فاز دهنده عملکرد خنک‌کنندگی ماده تغییر فاز دهنده را بهبود می‌بخشد. آقای ارشد و همکاران [۱۹]، به بررسی یک چاه حرارتی پره دار پر شده با ماده تغییر فاز دهنده جهت خنک‌کنندگی تجهیزات الکتریکی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد، ماده تغییر فاز دهنده بکار رفته در چاه حرارتی در دمای پایین موجب پایین نگه داشتن دمای پایه چاه حرارتی و ذوب یکنواخت آن می‌شود.

در این مطالعه هندسه پره‌ها به گونه‌ای طراحی شده است که برای شار حرارتی مشخص، زمان عملکرد چاه حرارتی تا رسیدن به دمای مجاز افزایش یابد. نتایج نشان دادند که فاصله بین پره‌ها و ضخامت آن‌ها تأثیر زیادی در عملکرد چاه حرارتی دارد. وانگ و یانگ [۱۲] عملکرد چاه حرارتی دارای ماده تغییر فاز دهنده ایکوزان^۱ را برای حالت‌های پره‌دار و بدون پره بررسی کردند. نتایج برای تعداد مختلف پره، جهت چاه حرارتی (افقی، عمودی و مایل) و توان‌های ورودی مختلف، به صورت عددی بررسی شده است. با افزایش تعداد پره‌ها، می‌توان زمان ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده را افزایش داد. حسین‌زاده و همکاران [۱۳] عملکرد چاه حرارتی دارای ماده تغییر فاز دهنده را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع و تعداد پره تأثیر زیادی در بهبود عملکرد چاه حرارتی دارد، اما با افزایش ضخامت پره‌ها تنها کمی بهبود در عملکرد ایجاد می‌شود؛ همچنین، با افزایش شار حرارتی ورودی، دمای پایه چاه و همچنین نرخ ذوب افزایش می‌یابد. تأثیر استفاده از نانو ذرات در حضور میدان مغناطیسی و محیط متخلخل امروزه مورد توجه محققان قرار گرفته شده است. شیخ‌الاسلامی و همکاران [۱۴] تأثیر انتقال حرارت ذوب در حضور میدان مغناطیسی را بررسی کردند. در این مطالعه پارامترهای دیگر از جمله کسر حجمی نانو ذرات، شکل نانو ذرات، عدد هارتمن^۲، عدد اکرت^۳ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش پارامتر ذوب، دما کاهش و سرعت سیال افزایش پیدا می‌کند. با افزایش عدد ناسلت نیروی مغناطیسی افزایش پیدا کرده است، در حالی که با افزایش پارامتر تخلخل و پارامتر ذوب عدد ناسلت کاهش پیدا می‌کند. اگرچه چاه‌های حرارتی با پره‌های داخلی انتقال حرارت را بهبود می‌بخشند، اما به افزایش وزن سیستم منجر می‌شوند. محققان راه‌های گوناگون دیگری برای افزایش ضریب هدایت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده ارائه کرده‌اند. محققان دریافته‌اند که اگر نانو ذرات با ضریب هدایت گرمایی بالا به عنوان افزایش‌دهنده ضریب هدایت گرمایی به ماده تغییر فاز دهنده افزوده شوند، حجم کمی از نانو ذرات شرایط مناسبی را برای استفاده از چاه حرارتی در تجهیزات الکتریکی فراهم می‌آورد. کومار و همکاران [۱۵] یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی چاه

³ Eckert number¹ N-eicosane² Hartmann number

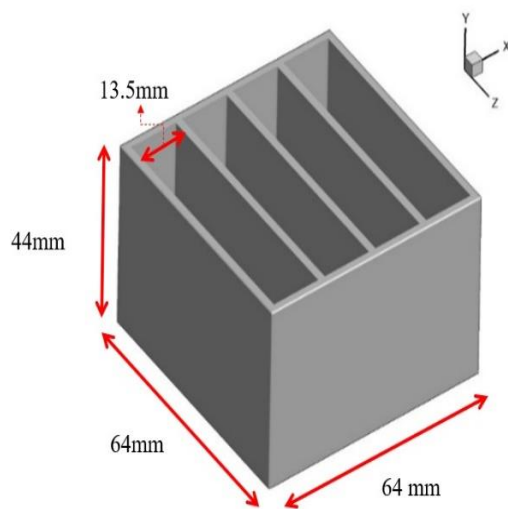
خانم فراهانی و همکاران [۲۰] به بررسی تأثیر ماده تغییر فاز دهنده و محیط متخلخل و نانو سیال بر عملکرد حرارتی یک چاه حرارتی با کانال کوچک پرداختند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد دارسی، ضریب تخلخل، قطر نانو ذرات و ضخامت ماده تغییر فاز دهنده عملکرد چاه حرارتی با کانال کوچک کاهش می‌یابد؛ همچنین عملکرد حرارتی یک چاه حرارتی با کانال کوچک پر شده از ماده تغییر فاز دهنده ۴۷ درصد بالاتر از کانال کوچک دارای تخلخل و ۱۷ درصد بالاتر از کانال کوچک دارای لایه متخلخل و نانو سیال است. وانگ و همکاران [۲۱] به بررسی تجربی عملکرد چاه حرارتی پر شده از ماده تغییر فاز دهنده با الکل‌های بالاتر (تعداد کربن بیشتر از دو) و گرافیت پرداختند. نتایج نشان داد که ترکیب گرافیت و الکل عملکرد بهتری نسبت به الکل به تنهایی داشته است. سبتی و همکاران [۲۲]، فرآیند ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده دارای نانو ذرات در یک حفره مربعی را به صورت عددی بررسی کردند. در این مطالعه نانو ذرات مس با کسرهای حجمی مختلف به ماده تغییر فاز دهنده پارافین افزوده شده است. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش کسر حجمی نانو ذرات، ضریب هدایت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده دارای نانو ذرات افزایش می‌یابد که منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. ابراهیمی و دادوند [۲۳] ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده دارای نانو ذرات در یک حفره مربعی با دو منبع حرارتی را شبیه‌سازی کردند. با افزایش درصد حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم از صفر به ۲ درصد، نرخ ذوب افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر آن به ۵ درصد نرخ ذوب مانند پارافین خالص است. مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های مدیریت حرارت باید دارای ویژگی‌هایی از قبیل دمای تغییر فاز^۱ مناسب با نوع کاربرد، گرمای نهان بالا، انبساط کم حجم، غیر سمی، غیر خورنده، غیر قابل اشتعال، غیر انفجار و از نظر شیمیایی پایدار، کم هزینه بودن باشند. اکثر مواد تغییر فاز دهنده از ضعف جدی هدایت حرارتی پایین رنج می‌برند که مانعی برای استفاده از این مواد در سیستم‌های مدیریت حرارتی است. تحقیقات مهمی که برای بهبود ضریب هدایت حرارتی این مواد از جمله، افزودن مواد با رسانای حرارتی بالا، استفاده از محیط متخلخل در بستر مواد تغییر فاز دهنده، افزودن صفحات / کره‌های فلزی یا استفاده از پره‌های فلزی تاکنون بررسی شده است. افزودن نانو ذرات به ماده تغییر فاز

دهنده به دلیل داشتن خواص ترموفیزیکی بالا باعث بالا رفتن خواص ترموفیزیکی این مواد نیز می‌شود. ارشد و همکاران [۲۴] عملکرد یک چاه حرارتی را با اضافه کردن نانو ذرات مس و فوم فلزی از جنس مس، آلومینیوم و نیکل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، اضافه کردن نانو ذرات به ماده تغییر فاز دهنده به علت بالا بردن خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده، موجب کاهش زمان ذوب و افزایش انتقال حرارت در این ماده شده است. حسنین و همکاران [۲۵]، بهبود روند ذوب شدن یک ماده تغییر فاز دهنده با اضافه کردن پره و نانوذره اکسید آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی صورت گرفته در حالت گذرا و به صورت دوبعدی انجام شده است. بر اساس نتایج بدست آمده استفاده از پره‌های دوشاخه و نانوذرات اکسید آلومینیوم با ۱۰ درصد حجمی می‌تواند به ترتیب نرخ ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده در صرفه‌جویی در زمان ۴۵/۹ و ۲۶/۸ افزایش دهد. نیتساس و کروناکی [۲۶] عملکرد ماده تغییر فاز دهنده پارافین را با اضافه کردن نانوذره مورد مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند. از نانوذره اکسید مس و نانوذره هیبریدی متشکل از دو نانوذره اکسید مس و آلومینیوم استفاده شده است. نتایج نشان داد، استفاده از نانوذره اکسید مس و نانوذره هیبریدی در ۰/۱۶۵ درصد وزنی به ترتیب ۲۵/۳ و ۱۰/۸ زمان ذوب شدن را کاهش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده شد، استفاده از نانوذره موجب افزایش هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده می‌شود. به همین دلیل در مطالعه حاضر عملکرد حرارتی یک چاه حرارتی پر کاربرد در تجهیزات الکتریکی را با نانو ذرات کربنی چند جداره به عنوان یک رویکرد جدید استفاده از این نانوذره استفاده شده است. در مطالعات دیگر، محققان عملکرد چاه حرارتی پره‌دار را با ماده تغییر فاز دهنده بررسی کردند؛ همچنین مطالعات زیادی در زمینه افزایش رسانایی حرارتی ماده تغییر فاز دهنده با افزودن ذرات نانو انجام شده است، اما این مطالعات برای هندسه ساده بوده و عملکرد ماده تغییر فاز دهنده با نانو ذرات لوله‌های کربنی چند جداره^۲ در یک چاه حرارتی پره دار بررسی نشده است؛ بنابراین، در این مطالعه عملکرد یک چاه حرارتی پره دار با نانو ذرات لوله‌های کربنی چند جداره به صورت عددی بررسی شده است. در حوزه‌ی طراحی قطعات الکترونیکی به علت نبود روش تحلیل معین و دقیق، طراحی عمده بیشتر محققان از روش‌های

² Multi-wall carbon nanotube (MWCNT)

¹ Phase change temperature (PCT)

حرارتی با پره نشان داده شده است. چاه حرارتی از جنس آلومینیوم و دارای پره‌های مستطیلی است. ضخامت کف آن ۴ میلی‌متر و ضخامت و ارتفاع پره‌ها به ترتیب ۲ و ۴۰ میلی‌متر است. شار حرارتی به صورت یکنواخت از یک سطح مستطیلی به ابعاد ۶۴×۶۴ میلی‌متر مربع از کف به آن وارد شده و حرارت از طریق پایه و پره‌ها به ماده تغییر فاز دهنده منتقل می‌شود. این ماده با جذب حرارت ذوب شده و باعث می‌شود که دمای چاه حرارتی بیش از حد مجاز نشود. به دلیل افزایش حجم ماده تغییر فاز دهنده بعد از ذوب شدن یک فضای خالی در بالای همه‌ی پره‌ها در نظر گرفته می‌شود. فضای بالای ماده تغییر فاز دهنده، هوا در نظر گرفته شده است. با ذوب ماده تغییر فاز دهنده و افزایش حجم آن، مرز آن با هوا جایگزین می‌شود. با توجه به تقارنی که در هندسه مساله وجود دارد می‌توان هندسه مساله را به جهت کم شدن محاسبات عددی به چهار قسمت تقسیم نمود. در شکل ۲ نمای برش خورده هندسه چاه حرارتی به همراه شرایط مرزی نشان داده شده و مشاهده می‌شود که ماده تغییر فاز دهنده در بین پره‌های چاه حرارتی قرار داده شده است. لازم به ذکر است، با توجه به وجود ۲ صفحه تقارن در هندسه، تنها یک‌چهارم از آن شبیه‌سازی شده است.

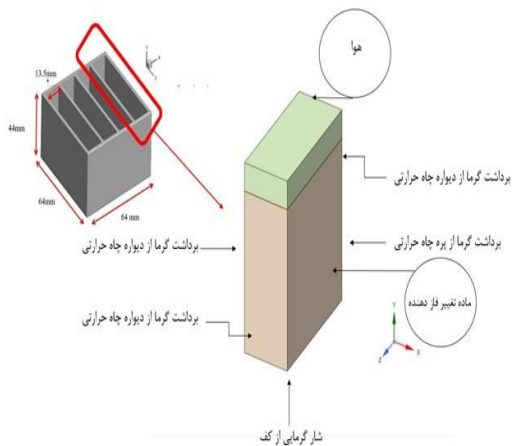


شکل ۱- هندسه چاه حرارتی

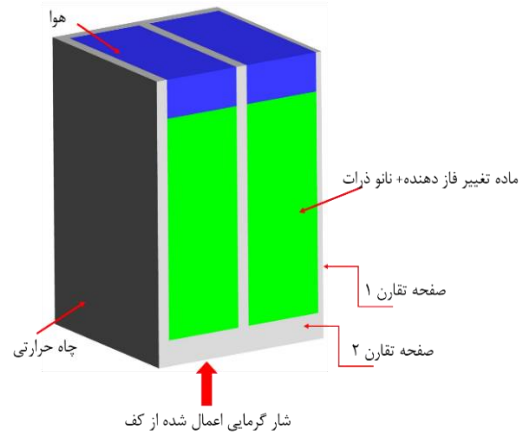
عددی و آزمایشگاهی است. با این وجود روش‌های آزمایشگاهی نیز بسیار هزینه‌بر هستند. ایجاد یک شرایط معین پایدار برای اندازه‌گیری و بررسی رفتار مواد تغییر فاز دهنده در هندسه مطرح شده نیازمند تجهیزات اندازه‌گیری بسیار دقیق است؛ اما در روش‌های عددی با افزایش تعداد شبیه‌سازی و ساخت نمونه‌های اولیه دقیق، قابلیت به تصویر کشیدن رفتار مواد تغییر فاز دهنده در موقعیت مختلف هندسه مورد مطالعه را فراهم می‌کند و به خوبی می‌توان هندسه مورد نظر را با توجه به توزیع جریان بهینه‌سازی کرد. طبق مطالعات صورت گرفته با توجه به هندسه انتخابی و دمای عملکرد مناسب جهت خنک کاری تجهیزات الکتریکی انتخاب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذره‌ای که بهترین عملکرد را داشته باشد، در یک رویکرد جدید به بررسی تاثیر اضافه نمودن نانوذرات لوله کربنی چندجداره در پارافین در یک چاه حرارتی پر کاربرد بررسی شده است. در این تحقیق محدوده دمایی و تغییر فاز پارافین از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲- بیان مساله

تاکنون استفاده از نانو ذرات لوله کربنی چند جداره در چاه حرارتی برای خنک کاری تجهیزات الکتریکی استفاده نشده است. مطالعه حاضر برای غلبه بر این ویژگی نامطلوب و تسریع در فرآیند ذوب- انجماد، استفاده از نانولوله‌های کربنی چند جداره جهت بالا بردن هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته از لحاظ در دسترس بودن، کم خطر بودن، کم هزینه بودن و دمای کاری مناسب، از یک چاه حرارتی بر مبنای واکس پارافین به- عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. استفاده از پارافین در دماهای بین ۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس بسیار مناسب است. جهت بالا بردن هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده، از نانو ذرات لوله کربنی چند جداره با استفاده از روش حل عددی مورد مطالعه قرار گرفته شده است. نانو لوله‌ها به موادی گفته می‌شود که قطر آن‌ها تا حدود ۱۰۰ نانومتر است. نانو لوله‌های کربنی ساختاری استوانه‌ای شکل دارند، یعنی لوله‌ای توخالی که جنس دیواره‌های آن اتم کربن است. چنانچه نانو لوله کربنی فقط شامل یک لوله از گرافیت باشد، نانو لوله تک دیواره و اگر شامل تعدادی از لوله‌های متحد المركز باشد، نانو لوله چند دیواره نامیده می‌شود. در شکل ۱ هندسه چاه

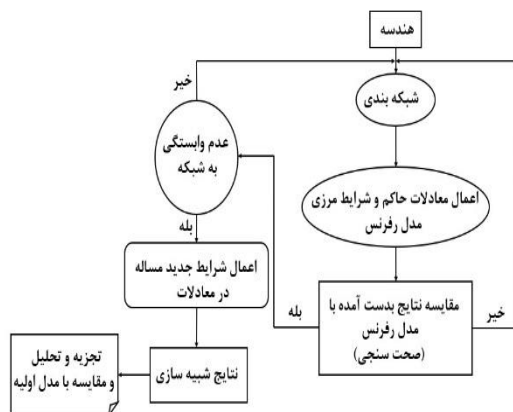


شکل ۳- حجم کنترل



شکل ۲- هندسه چاه حرارتی دارای ماده تغییر فاز دهنده

روند شبیه‌سازی مدل مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- فلوچارت روند شبیه‌سازی

۳- معادلات حاکم و روش شبیه‌سازی عددی

۳-۱- شبیه‌سازی مواد تغییر فاز دهنده

با ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده حجم آن افزایش یافته و حجم هوای بالای آن کم خواهد شد. برای سیستم ترکیبی ماده تغییر فاز دهنده و هوا که شامل مرز داخلی متحرک اما بدون نفوذ دو سیال در یکدیگر است، مدل کسر حجمی سیال^۱ مورد استفاده قرار گرفته است [۲۷]. در این مدل اگر کسر حجمی n

فرضیات در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی:

(الف) ماده تغییر فاز دهنده خالص است.

(ب) ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده تراکم ناپذیر و نیوتونی است.

(ج) دیواره‌های بیرونی چاه حرارتی آدیاباتیک است.

(د) ویژگی‌های ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده وابسته به دما است.

(ه) نانوذرات لوله‌های کربنی چند جداره در ماده تغییر فاز دهنده به صورت همگن است.

(و) فرآیند ذوب ناپایدار و جریان سیال آرام و سه‌بعدی است.

بر اساس شرایط هندسه چاه حرارتی پره‌ها به پایه چاه حرارتی متصل بوده و از طریق آن‌ها حرارت بیشتری به ماده تغییر فاز دهنده‌ای منتقل می‌شود. در واقع، ماده تغییر فاز دهنده به‌کاررفته دارای ضریب هدایت حرارتی 0.2 و پره‌های آلومینیومی نیز دارای ضریب هدایت حرارتی 180 وات بر متر کلین می‌باشند. بدین ترتیب پره‌ها انتقال حرارت به ماده تغییر فاز دهنده را افزایش داده و در نتیجه با جذب حرارت بیشتر، ماده تغییر فاز دهنده در مدت‌زمان کوتاه‌تری ذوب خواهد شد. در شکل ۳ یک نمونه از حجم کنترل مواد تغییر فاز دهنده درون چاه حرارتی نشان داده شده است.

^۱ Volume of Fluid (VOF)

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_{\text{solidus}} \\ \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} & \text{if } T_{\text{liquidus}} < T < T_{\text{solidus}} \\ 1 & \text{if } T > T_{\text{liquidus}} \end{cases} \quad (\Delta)$$

ظرفیت حرارت نهان می‌تواند صفر (برای جامد) و L برای مایع باشد. برای مساله ذوب یا انجماد معادله انرژی (۶) به صورت زیر است:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (۶)$$

در این رابطه \vec{v} سرعت سیال و S عبارت چشمه است. معادله ممنتموم:

در روش آنتالپی-تخلخل، ناحیه‌ای که در حال ذوب شدن است به صورت محیط متخلخل فرض شده و تخلخل در هر سلول برابر کسر مایع در آن سلول در نظر گرفته می‌شود. در ناحیه کاملاً جامد، تخلخل برابر صفر بوده که باعث صفر شدن سرعت در این ناحیه می‌شود. معادله ممنتموم برای جریان آرام و نا پایا (۷) به صورت کلی زیر است:

$$\frac{\partial(\rho_n u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_n u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_n \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \rho_n g_i + S \quad (۷)$$

در این رابطه عبارت چاه ممنتموم، S ، گرفته از کاهش تخلخل در ناحیه در حال ذوب بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \frac{(1 - \gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} A_{\text{mush}} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (۸)$$

که γ کسر حجمی مایع، ε یک عدد کوچک (۰/۰۰۱) برای جلوگیری از تقسیم‌بهر صفر، A_{mush} ثابت و \vec{v}_p سرعت جامد به دلیل راندن ماده منجمد شده به خارج از دامنه، است [۲۹]. معادلات حاکم بر جریان که در بخش قبل به آن‌ها اشاره شد، تشکیل یک دستگاه معادلات را می‌دهند. این معادلات همراه

امین سیال در سلول محاسباتی α_n باشد، در این صورت سه شرط زیر را خواهیم داشت:

(الف) $\alpha_n = 0$ ، سلول خالی از n امین سیال است.

(ب) $\alpha_n = 1$ ، کل سلول پر از n امین سیال است.

(ج) $0 < \alpha_n < 1$ ، بخشی از سلول شامل n امین سیال است.

بنابراین معادله بقای جرم حاکم (۱) برای n امین سیال عبارت است از:

$$\frac{\partial \alpha_n}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_n}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

به منظور شبیه‌سازی فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده از روش آنتالپی-تخلخل^۱ استفاده شده است [۲۸]. در این روش سطح ذوب دنبال نمی‌شود و به جای آن کمیتی به نام کسر مایع که نشان‌دهنده‌ی حجمی از سلول است که در حالت مایع است، تعریف می‌شود. کسر مایع در هر تکرار بر مبنای موازنه آنتالپی تعیین می‌شود.

معادله انرژی

H آنتالپی ماده تغییر فاز دهنده دارای نانو ذرات بوده (۲) و برابر با مجموع آنتالپی محسوس (h) و حرارت نهان (ΔH) است:

$$H = h + \Delta H \quad (۲)$$

آنتالپی محسوس (۳) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT \quad (۳)$$

در این رابطه h_{ref} آنتالپی مرجع، T_{ref} دمای مرجع و C_p ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت هستند.

ظرفیت حرارت نهان نیز با توجه به حرارت نهان ماده به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\Delta H = \gamma L \quad (۴)$$

در این رابطه L حرارت نهان و γ کسر مایع است

^۱ Enthalpy-porosity

$$K_{nPCM} = \frac{K_{np} + \gamma K_{PCM} - \gamma (K_{PCM} - K_{np}) \varphi}{K_{np} + \gamma K_{PCM} + (K_{PCM} - K_{np}) \varphi} K_{PCM} \quad (۱۳)$$

$$+ \Delta \times 10^{-4} \beta_k S \varphi \rho_{PCM} C_{p,PCM} \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \varphi)$$

که β_k برای نانولوله کربنی از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\beta_k = 44.08 / (1.0 \cdot \varphi)^{-0.73 \cdot 0.4/1} \quad (۱۴)$$

δ نیز ضریب اصلاح در حرکت براونی بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$s = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & \text{if } T_{solidus} < T < T_{liquidus} \\ 1 & \text{if } T > T_{liquidus} \end{cases} \quad (۱۵)$$

κ ثابت بولتزمن و برابر $3.81/1 \times 10^{-23}$ و $f(T, \varphi)$ از روابط تجربی به دست آمده و بدین صورت تعریف می‌شود:

$$f(T, \varphi) = \left(1.217/2 \times 10^{-2} \varphi + 9.17/3 \times 10^{-3} \right) \frac{T}{T_0} \quad (۱۶)$$

$$+ \left(-0.669/3 \times 10^{-2} \varphi - 9.1123/3 \times 10^{-3} \right)$$

که T_0 دمای مرجع و برابر ۳۰۰ کلوین است.

همان‌گونه که اشاره شد با ذوب ماده تغییر فاز دهنده چگالی (۱۷) آن کاهش و در نتیجه حجم آن افزایش می‌یابد. بدین ترتیب چگالی ماده جامد ثابت در نظر گرفته شده و چگالی آن در هنگام ذوب شدن از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\rho = \frac{\rho_l}{[\beta(T - T_l) + 1]} \quad (۱۷)$$

که در این رابطه ρ_l چگالی ماده تغییر فاز دهنده در هنگام ذوب شدن و β ضریب انبساط حرارتی است.

خواص ترموفیزیکی پارافین و نانولوله کربنی [۳۴] در جدول ۱ ارائه شده است.

با شرایط مرزی مشخص شده با روش حجم محدود^۱ گسسته شده و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، حل شده‌اند.

۳-۲- خواص ترموفیزیکی مواد

در این مطالعه عملکرد چاه حرارتی بر مبنای مواد تغییر فاز دهنده دارای نانو ذرات بررسی شده است. اگرچه مقادیر کمی از نانو ذرات به ماده تغییر فاز دهنده اضافه می‌شود، اما همین مقادیر کم نیز در خواص تأثیر خواهند گذاشت. خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده دارای نانو ذرات از روابط زیر تعیین می‌شوند که اندیس NP و PCM نشان‌دهنده‌ی نانو ذرات و ماده تغییر فاز دهنده‌ی خالص و اندیس nPCM نشان‌دهنده‌ی ماده تغییر فاز دهنده‌ی دارای نانو ذرات است: چگالی [۳۰]:

$$\rho_{nPCM} = \varphi \rho_{np} + (1 - \varphi) \rho_{PCM} \quad (۹)$$

ظرفیت حرارتی ویژه:

$$C_{p,nPCM} = \frac{\varphi (\rho C_p)_{np} + (1 - \varphi) (\rho C_p)_{PCM}}{\rho_{nPCM}} \quad (۱۰)$$

حرارت نهان [۳۰]:

$$L_{nPCM} = \frac{(1 - \varphi) (\rho L)_{PCM}}{\rho_{nPCM}} \quad (۱۱)$$

لزجت دینامیکی [۳۱ و ۳۲ و ۳۳]:

$$\mu_{nPCM} = A e^{(B\varphi)} \mu_{PCM} \quad (۱۲)$$

که در این رابطه ضریب A برای سیال با نانو ذرات نانولوله کربنی برابر ۰/۹۸۳ است. مقدار ضریب B برای سیال با نانو ذرات نانولوله کربنی ۱۲/۹۵۹ است.

ضریب هدایت گرمایی مؤثر (۱۳) از رابطه زیر محاسبه شده است که ترکیبی از تئوری ماکسول و حرکت براونی است [۱۷ و ۱۸ و ۱۹]:

^۱ Finite Volume Method

برابر فشار محیط استفاده شده است. به منظور شبیه سازی فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده، در لحظه اولیه دمای چاه حرارتی و ماده تغییر فاز دهنده برابر ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود دو صفحه تقارن در هندسه، تنها یک چهارم از آن شبیه سازی شده و شرایط مرزی تقارن ۵ مورد استفاده قرار گرفته شده است. جهت بررسی انتقال گرما از پره ها به ماده تغییر فاز دهنده از شرایط اتصال ۶ (چسبیدگی) استفاده شده است.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = const = \begin{cases} q'' = 10 \text{ kw/m}^2 \\ q'' = 20 \text{ kw/m}^2 \\ q'' = 30 \text{ kw/m}^2 \end{cases}$$

$$P_{air} = P_{outlet} = P_{atm}$$

$$t=0 \begin{cases} T_0 = 300k \\ T_{PCM} = 300k \end{cases}$$

۳-۵- استقلال از شبکه بندی

به منظور شبکه بندی دامنه محاسباتی و انتخاب گام زمانی مناسب، از محیط شبکه بندی و حل از نرم افزار انسیس استفاده شده است. برای شبکه بندی دامنه محاسباتی، دامنه حل به چند زیرمجموعه شامل ناحیه جامد پره ها، ناحیه ماده تغییر فاز دهنده و هوا تقسیم بندی شده است. سپس یک شبکه سازمان یافته روی این نواحی ایجاد شده است. به منظور مستقل بودن نتایج از تعداد سلول های شبکه محاسباتی، نتایج برای چهار شبکه مختلف جهت بررسی استقلال از شبکه با تعداد سلول های ۱۵۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰۰، ۴۵۰۰۰۰ و ۶۰۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۵ تغییرات کسر مایع در طول زمان ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده برای تعداد سلول ها و گام زمانی مختلف نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش سلول های شبکه به بیش از ۳۰۰۰۰۰ سلول، تغییری در نتایج ایجاد نشده است. به همین دلیل در ادامه از همین تعداد سلول در شبیه سازی ها استفاده شده است. همچنین گام زمانی مناسب برای شبیه سازی با توجه به فرآیند تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده ۰/۰۱ ثانیه انتخاب شده است. تصویر شبکه بندی ایجاد شده در شکل ۶ ارائه شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی پارافین و نانولوله کربنی

ویژگی	واکس پارافین	نانولوله کربنی
ضریب هدایت گرمایی (W/m.K)	۰/۱۲ if $T < T_{solidus}$ ۰/۱۲ if $T > T_{liquidus}$	۳۰۰۰
دمای انجماد (K)	۳۱۴	-
دمای ذوب (K)	۳۱۸	-
بیشینه دمای کاری (K)	۳۵۳	-
ظرفیت حرارتی ویژه (J/kg.K)	۲۰۰۰	۷۹۶
حرارت نهان فیوزن (j/kg)	۲۵۵۰۰۰	-
لزجت دینامیکی (N s/m ²)	$0.01 \cdot \exp\left(-\frac{25}{4} + \frac{1790}{T}\right)$	-
چگالی (kg/m ³)	$\frac{750}{0.01 \cdot (T - 319/15)}$	۱۶۰۰

۳-۳- روش شبیه سازی عددی

جهت ایجاد هندسه^۱ و شبکه بندی^۲ از نرم افزار تجاری انسیس-فلوئنت در محیط انسیس ورک بنچ^۳ استفاده شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود و به کمک نرم افزار انسیس-فلوئنت حل شده اند. به منظور کوپل معادلات فشار و سرعت از روش ضمنی فشار همراه با جداسازی عملگرها^۴ استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات ممنتوم و انرژی از روش مرتبه اول استفاده شده است. گام زمانی در تکرارهای اول ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده و سپس به ۰/۰۱ افزایش یافته است. تکرارها در هر گام زمانی تا ارضا شدن همگرایی^۴ ۱۰^{-۴} برای معادلات پیوستگی و ممنتوم و ۱۰^{-۶} برای معادله انرژی، ادامه پیدا کرده است.

۳-۴- شرایط مرزی

در شبیه سازی های انجام شده، شار حرارتی ثابت از قسمتی از کف چاه حرارتی به آن وارد شده و بقیه دیواره های خارجی چاه حرارتی عایق در نظر گرفته شده اند. در قسمت بالای چاه حرارتی که هوا قرار دارد نیز از شرط مرزی فشار خروجی و

^۴Pressure Implicit with Splitting of Operators (PISO)

^۵Symmetry Boundary Condition

^۶coupled

^۱ ANSYS Design Modeler

^۲ Ansys Meshing

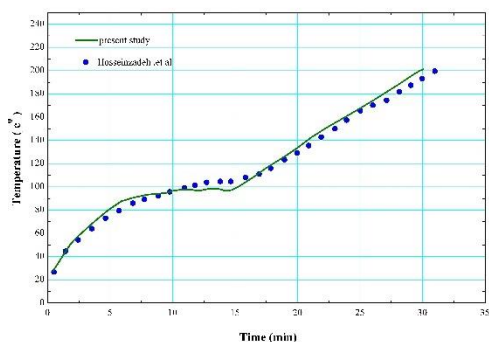
^۳ Ansys Workbench

چاه حرارتی حاصل از مطالعه حاضر با نتایج با داده‌های تجربی حسین‌زاده [۱۳] مقایسه شده‌است. در مقاله مذکور یک چاه حرارتی با تعداد پره‌های مختلف با پارافین مورد مطالعه قرار گرفته شده‌است. نمودار شکل ۷ تغییرات دمایی چاه حرارتی نسبت به زمان مقاله مذکور و مقادیر بدست آمده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، روش حل عددی مورد استفاده دارای دقت مناسبی در پیش‌بینی دمای چاه حرارتی در هنگام ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده دارد. به همین دلیل در ادامه از این روش برای شبیه‌سازی استفاده شده‌است. مقدار خطای مطالعه حاضر با آقای حسین‌زاده در جدول ۲ نشان داده شده‌است.

جدول ۲- مقدار خطای کار حاضر با حسین‌زاده

مقدار خطای حداکثر	مقدار خطای متوسط	مقدار خطای حداقل
٪ ۶٫۸۷	٪ ۲٫۸۵	٪ ۰

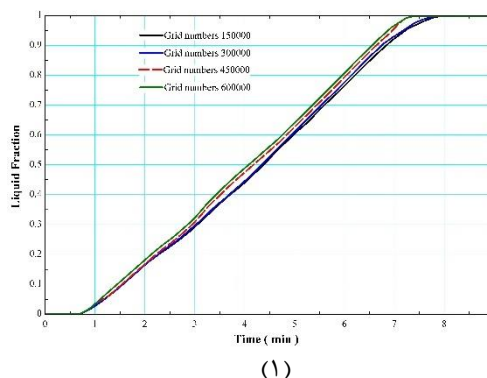
در مقاله مذکور یک چاه حرارتی پر شده با پارافین را بر اساس تعداد، ارتفاع و ضخامت پره‌ها مورد مطالعه قرار می‌دهد. مطالعه حاضر در تکمیل کار انجام شده با انتخاب مدل مناسب، سه پره با ارتفاع چهار میلی‌متر با اضافه کردن نانوذرات به عنوان یک رویکرد جدید در این هندسه پر کاربرد صورت گرفته است.



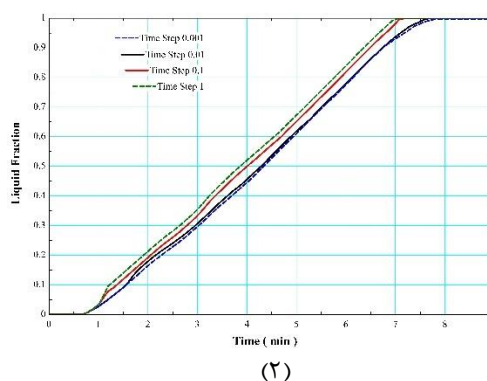
شکل ۷- اعتبار سنجی حل عددی مطالعه حاضر با حسین‌زاده [۱۳]

۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج شبیه‌سازی عددی ذوب ماده تغییر فاز دهنده در چاه حرارتی ارائه شده و تأثیر افزودن نانو ذرات به ماده تغییر فاز دهنده نیز بررسی شده‌است.



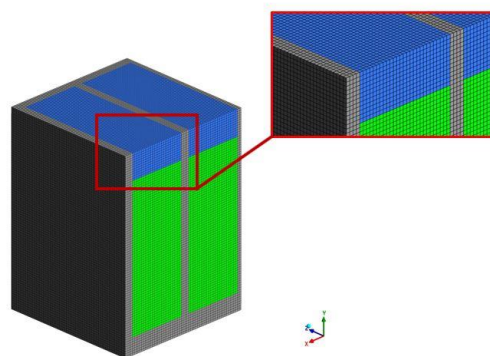
(۱)



(۲)

شکل ۵- استقلال از شبکه

(۱) استقلال از حل مش (۲) استقلال از گام زمانی

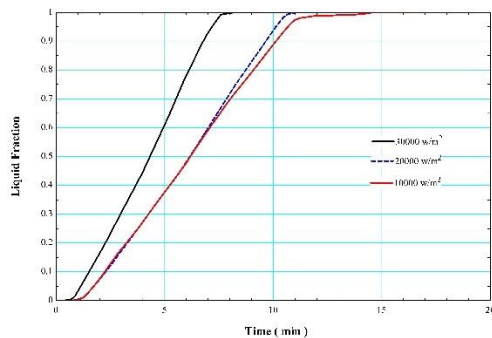


شکل ۶- شبکه‌بندی

۴- اعتبار سنجی حل عددی

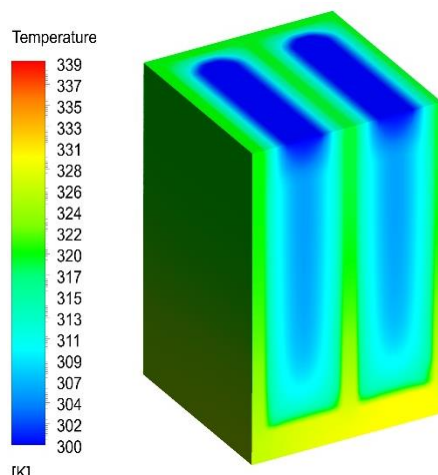
به منظور بررسی صحت روش حل عددی مورد استفاده در شبیه‌سازی فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده، تغییرات دمایی

و ۱۱ به ترتیب کانتورهای دما و کسر مایع ذوب شده در زمان-های مختلف نشان داده شده است. در این شکل افزایش دمای تدریجی ماده تغییر فاز دهنده و ذوب شدن آن مشهود است.



شکل ۹- تغییرات کسر مایع بازمان برای شارهای حرارتی مختلف

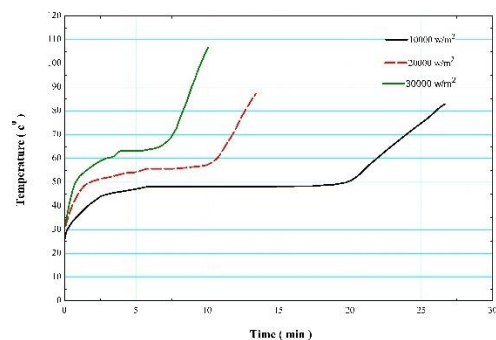
به منظور نشان دادن دمای چاه حرارتی و تغییرات کسر مایع ماده تغییر فاز دهنده برای نمونه کانتورهای مورد نیاز در شار حرارتی ۳۰۰۰۰ وات بر مترمربع در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، به دلیل هدایت حرارتی خوب پره‌های چاه حرارتی که از آلومینیوم است، ماده تغییر فاز دهنده ابتدا از محل تماس با پره‌ها شروع به ذوب شدن می‌کند؛ همچنین مشاهده می‌شود، با افزایش زمان، کسر بیشتری از ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده است.



الف: زمان ۱۰۰ ثانیه

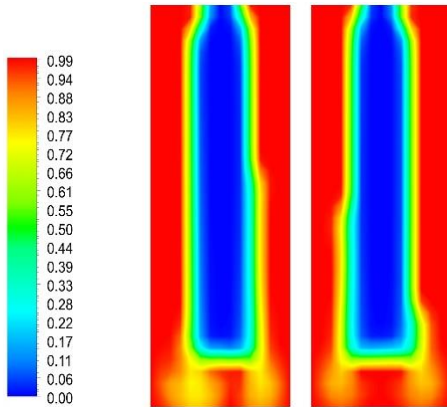
۵-۱- بررسی تأثیر شار حرارتی بر عملکرد چاه حرارتی دارای ماده تغییر فاز دهنده

در این بخش عملکرد چاه حرارتی دارای ماده تغییر فاز دهنده به ازای شارهای حرارتی ورودی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلووات بر مترمربع مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۸ تغییرات دمای چاه حرارتی بازمان و برای شارهای حرارتی مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با کاهش شار حرارتی دمای چاه حرارتی نیز کاهش یافته است، به گونه‌ای که در زمان ۵ دقیقه پس از اعمال شار حرارتی، دمای چاه حرارتی به ازای شارهای ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ وات بر مترمربع، به ترتیب برابر ۴۸، ۵۶ و ۶۴ درجه سلسیوس است. با کاهش شار حرارتی زمان ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده نیز افزایش می‌یابد؛ در نتیجه با افزایش شار حرارتی اعمال شده بر روی چاه حرارتی، ماده تغییر فاز دهنده نیز گرمای بیشتری را دریافت کرده و سریع‌تر ذوب شده است. تا قبل از ذوب شدن کامل ماده تغییر فاز دهنده دمای چاه حرارتی ثابت بوده، اما پس از ذوب کامل آن دما افزایش یافته است.

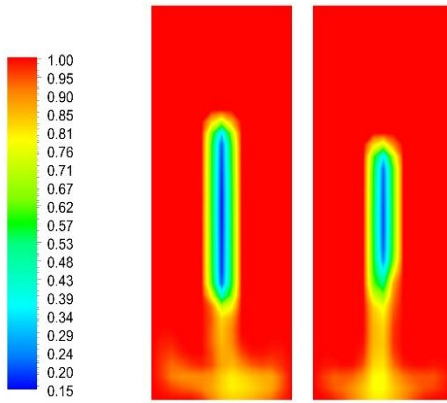


شکل ۸- تغییرات دمای چاه حرارتی بر حسب زمان به ازای شارهای مختلف

در شکل ۹ تغییرات کسر ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده بازمان برای شارهای مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که طبق انتظار، با افزایش شار حرارتی، ماده تغییر فاز دهنده سریع‌تر ذوب شده است. پس از گذر ۸ دقیقه، با وارد شدن شار ۳۰ کیلووات بر مترمربعی به چاه حرارتی، تمام ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده است. در حالیکه با وارد شدن شارهای ۲۰ و ۱۰ کیلووات بر مترمربع در همین زمان، به ترتیب ۷۰ و ۳۰ درصد ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده است. در شکل‌های ۱۰

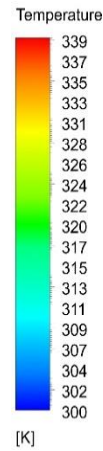


ب: زمان ۳۰۰ ثانیه

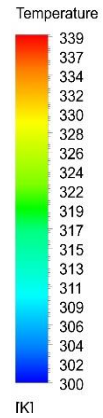


ج: زمان ۴۰۰ ثانیه

شکل ۱۱ - تغییرات کسر مایع در چاه حرارتی در شار ۳۰ کیلو وات بر مترمربع



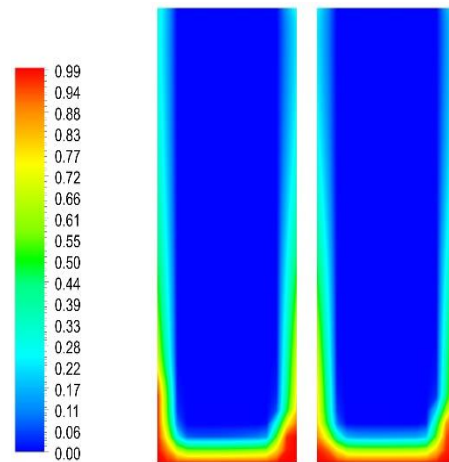
ب: زمان ۳۰۰ ثانیه



ج: زمان ۴۰۰ ثانیه

شکل ۱۰ - تغییرات دمای چاه حرارتی در شار ۳۰ کیلو وات بر مترمربع

در شکل ۱۲ نیز تغییرات سرعت و خطوط جریان درون ماده تغییر فاز دهنده نشان داده شده است. مشاهده می شود که در نواحی ذوب شده ماده تغییر فاز دهنده میدان جریانی با سرعت بسیار کم ایجاد شده است. در نواحی مجاور دیواره ها، با توجه به افزایش دمای بیشتر و در نتیجه کاهش بیشتر در چگالی، جریان به سمت بالا حرکت کرده است و نواحی در حال ذوب با چگالی بیشتر به سمت پایین چاه حرارتی حرکت داشته اند.

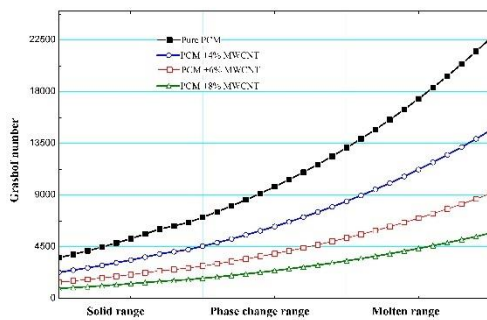


الف: زمان ۱۰۰ ثانیه

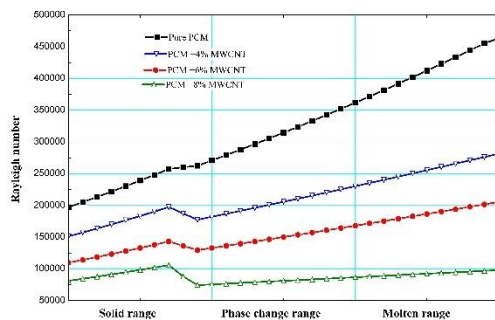
که در شکل ۱۳ نشان داده شده است با افزایش اعداد ریلی و گراشف میزان انتقال حرارت در هندسه مورد نظر افزایش یافته است. با افزایش انتقال حرارت پارافین شروع به ذوب شدن می نماید و از حالت جامد به مایع تغییر فاز می دهد.

$$Gr = \frac{g\beta(T_2 - T_1)l^3}{\nu^2} \quad (18)$$

$$Ra = \frac{g\beta}{\alpha\nu} (T_2 - T_1)l^3 \quad (19)$$



(۱)

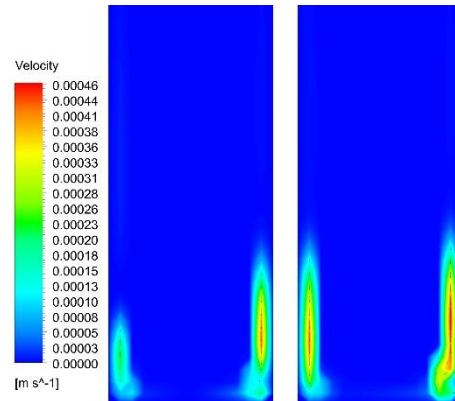


(۲)

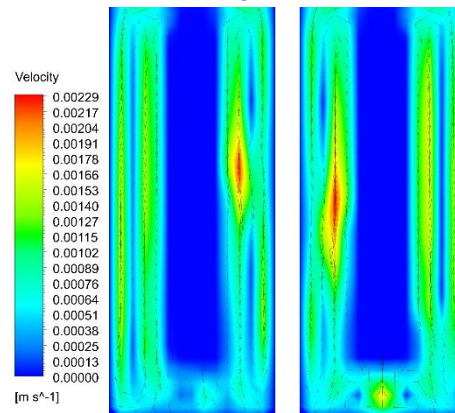
شکل ۱۳- نمودار تغییر فاز پارافین بر اساس

اعداد گراشف (۱) ریلی (۲)

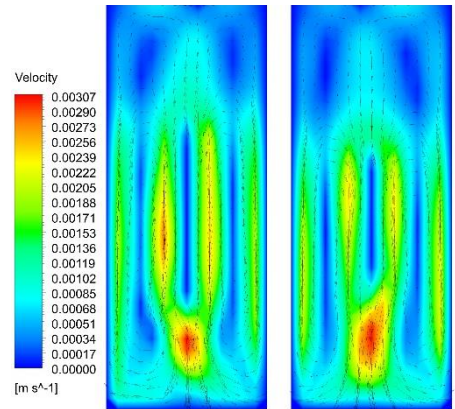
۵-۳- اثر افزودن نانو ذرات به ماده تغییر فاز دهنده یکی از راه کارهای افزایش ضریب هدایت گرمایی مواد تغییر فاز دهنده، افزودن نانو ذرات به آنها است. به همین دلیل در این بخش عملکرد چاه حرارتی دارای ماده تغییر فاز دهنده با نانو ذرات مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور عملکرد چاه حرارتی با نانولوله کربنی چند جداره مورد ارزیابی قرار گرفته است. شار حرارتی وارد شده به کف چاه حرارتی ۳۰ کیلووات بر



الف: زمان ۱۰۰ ثانیه



ب: زمان ۳۰۰ ثانیه

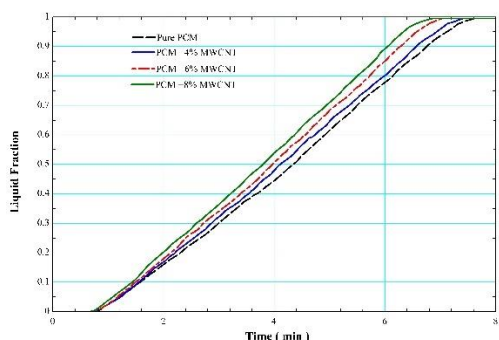


ج: زمان ۴۰۰ ثانیه

شکل ۱۲- میدان سرعت و خطوط جریان در چاه حرارتی در شار ۳۰ کیلووات بر مترمربع

۵-۲- اثر اعداد گراشف و ریلی در انتقال حرارت

همانطور که در روابط ۱۸ و ۱۹ زیر نشان داده شده است اعداد گراشف [۳۵] و ریلی [۳۶] در بررسی انتقال حرارت جابجایی طبیعی نقش مهمی را ایفا می کنند. بر اساس نتایج بدست آمده



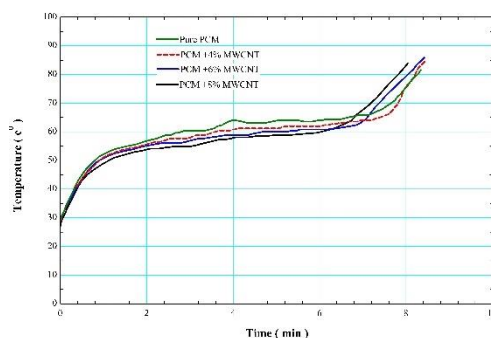
شکل ۱۵- تأثیر درصد‌های مختلف حجمی نانوذرات بر کسر مایع ذوب‌شده در شار ۳۰ کیلو وات بر مترمربع

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مطالعه عددی جهت بهینه‌سازی عملکرد یک چاه حرارتی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به همراه ذرات نانولوله کربنی چند جداره انجام شده است. از روش آنتالپی - تخلخل جهت بررسی روند ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. مطالعه حاضر به بررسی هدایت حرارتی، گرمای نهان و درصد پراکندگی نانوذرات در ماده تغییر فاز دهنده در دمای کاری بین ۵۰ تا ۶۵ درجه سلسیوس تمرکز دارد. نتایج نشان داد، بهینه‌سازی اضافه کردن مقدار نانوذرات در عملکرد حرارتی چاه حرارتی با توجه به ویژگی‌های ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده نقش بسیار مهمی دارد. افزودن بیش حد نانوذرات به دلیل کاهش گرمای نهان و ذوب شدن سریع‌تر ماده تغییر فاز دهنده نتیجه معکوس گذاشته و دمای چاه حرارتی را بجای کاهش، افزایش می‌دهد؛ بنابراین یک درصد مناسب از نانوذرات بر اساس نوع کاربرد سیستم خنک کاری باید تعیین شود. بر اساس شبیه‌سازی انجام شده نتایج ذیل استخراج شده است:

۱. پره‌های موجود در چاه حرارتی باعث افزایش انتقال حرارت از پایه چاه حرارتی و انتقال آن به ماده تغییر فاز دهنده می‌شوند.
۲. با افزایش شار حرارتی نرخ ذوب افزایش یافته و دمای چاه حرارتی نیز افزایش می‌یابد.
۳. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، ماده تغییر فاز دهنده تا زمان حدوداً ۷ دقیقه در یک خط افقی بدون

مترمربع در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۴ تغییرات دما چاه حرارتی به ازای درصدهای مختلف حجمی نانوذرات نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در مرحله افزایش دمای ماده تغییر فاز دهنده و جامد بودن آن (تا زمان ۴۰ ثانیه) دمای چاه حرارتی با افزودن نانوذرات تغییر چندانی نیافته است؛ اما با شروع ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده، تأثیر نانوذرات مشهود است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تغییرات دمای چاه حرارتی به ازای درصدهای مختلف حجمی نانوذرات، رفتار متفاوتی از خود نشان داده است. در هنگام ذوب در دماهای کمتر از ۶۰ درجه سلسیوس، دمای چاه حرارتی به ازای کسر حجمی‌های صفر، ۴، ۶ و ۸ درصد نانوذرات کاهش یافته است؛ اما در دماهای بالاتر (از ۶۰ تا ۶۵ درجه سلسیوس) دمای چاه حرارتی با افزودن نانوذرات با کسر حجمی ۴ درصد دمای چاه کاهش یافته، اما با افزایش درصد حجمی به ۶ و ۸ درصد، دما افزایش یافته است که دلیل آن کاهش لزجت سیال است که منجر به کاهش انتقال حرارت جابجایی گشته است. در شکل ۱۵ تغییرات کسر مایع ذوب‌شده برای درصدهای مختلف حجمی نانوذرات نشان داده شده و مشاهده می‌شود به ازای همه درصدهای بررسی شده برای نانوذرات، کسر مایع ذوب‌شده افزایش یافته است. همان‌گونه که بیان شد با افزودن نانوذرات حرارت نهان کاهش یافته است به همین دلیل ماده تغییر فاز دهنده سریع‌تر ذوب شده که این امر موجب افزایش دمای چاه پس از ذوب شدن کامل می‌شود.



شکل ۱۴- تغییرات دمای چاه حرارتی به ازای درصدهای مختلف حجمی نانوذرات در شار ۳۰ کیلو وات بر مترمربع

(W/m.K)	ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات	K_{np}
(-)	کسر حجمی نانو ذرات	ϕ
(kg/m ³)	چگالی	ρ
(K)	دمای مرجع	T_0
(K)	دمای ذوب	T_{liquid}
(K)	دمای انجماد	T_{solid}
$1/k$	ضریب انبساط حرارتی	β
$9,81 (m s^{-2})$	شتاب گرانشی	g
m	طول	l

مراجع

- [1]. Ling, Z., Zhang, Z., Shi, G., Fang, X., Wang, L., Gao, X., ... & Liu, X. (2014). Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 31, 427-438.
- [2]. Kardam, A., Narayanan, S. S., Bhardwaj, N., Madhwal, D., Shukla, P., Verma, A., & Jain, V. K. (2015). Ultrafast thermal charging of inorganic nano-phase change material composites for solar thermal energy storage. *RSC Adv*, 5(70), 56541-56548.
- [3]. Elarem, R., Mellouli, S., Abhilash, E., & Jemni, A. (2017). Performance analysis of a household refrigerator integrating a PCM heat exchanger. *Appl. Therm. Eng*, 125, 1320-1333.
- [4]. Khanna, S., Reddy, K. S., & Mallick, T. K. (2018). Optimization of solar photovoltaic system integrated with phase change material. *Sol Energy*, 163, 591-599.
- [5]. Desai, A., Singh, V. K., & Bhavsar, R. R. (2017). Numerical investigation of pcm based thermal control module for space applications. (IHMTTC-2017). Begel House Inc.
- [6]. Chu, R. C., & Simons, R. E. (1993). Recent development of computer cooling technology. In *Transport Phenomena in Thermal Engineering*. Volume 2. Begell House.
- [7]. Tharwan, M. Y., & Hadidi, H. M. (2022). Experimental investigation on the thermal performance of a heat sink filled with PCM. *Alex. Eng. J*, 61(9), 7045-7054.
- [8]. Huang, P., Wei, G., Cui, L., Xu, C., & Du, X. (2022). Experimental and numerical optimization of cascaded PCM heat sink by using low melting point alloys. *Energy Convers. Manag*, 269, 116149.

افزایش دما در حال جذب گرما از پایه چاه حرارتی با توجه به خاصیت گرمای نهان بالای این مواد باعث ثابت ماندن دمای چاه حرارتی می‌شود.

۴. افزودن نانو ذرات می‌توان عملکرد چاه حرارتی را تا قبل از زمان ذوب شدن کامل ماده تغییر فاز دهنده بهبود بخشید؛ اما با ذوب کامل ماده تغییر فاز دهنده و مایع شدن آن دما نسبت به حالت بدون نانو ذرات افزایش یافته‌است.

۵. در این مطالعه از سه درصد حجمی نانوذرات ۴، ۶ و ۸ درصد در ماده تغییر فاز دهنده استفاده شد. بیشترین انتقال حرارت از چاه حرارتی به ازای ۸ درصد نانوذرات در دمای پایین‌تر از ۶۰ درجه سلسیوس مشاهده گردید.

۶. افزودن نانوذرات به مواد تغییر فاز دهنده در دامنه دمای کمتر از ۶۰ درجه بهترین عملکرد را نسبت به دامنه دمایی ۶۰ تا ۶۵ درجه و بالاتر دارا است.

۷. به دلیل کاهش لزجت ماده تغییر فاز دهنده در دمای بالاتر از ۶۵ درجه سلسیوس بهترین عملکرد حرارتی برای ۴ درصد نانو ذرات مشاهده شده‌است.

۷- علائم، نشانه‌ها و ارقام

(J / kg)	آنتالپی ماده تغییر فاز دهنده	H
(J / kg)	آنتالپی محسوس	h
(J / kg)	آنتالپی مرجع	h_{ref}
$(jkg^{-1}k^{-1})$	ظرفیت حرارتی ویژه	C_p
$(\frac{kJ}{kg})$	گرمای نهان	L
$(m s^{-1})$	سرعت جامد	\vec{v}_p
$(m s^{-1})$	سرعت سیال	\vec{v}
$(m^2 kgs^{-2}k^{-1})$	ثابت بولتزمن	κ
(N s/m ²)	لزجت دینامیکی	μ
(W/m.K)	ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده	K_{pcm}
(W/m.K)	ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده همراه با نانو ذرات	K_{npPCM}

- on the thermal efficiency of microchannel heat sinks. *ICHMT*, 127, 105546.
- [21] Wang, S., Xing, Y., Hao, Z., Yin, J., Hou, X., & Wang, Z. (2021). Experimental study on the thermal performance of PCMs based heat sink using higher alcohol/graphite foam. *Appl. Therm. Eng.*, 198, 117452.
- [22] Sebti, S. S., Mastiani, M., Mirzaei, H., Dadvand, A., Kashani, S., & Hosseini, S. A. (2013). Numerical study of the melting of nano-enhanced phase change material in a square cavity. *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, 14(5), 307-316.
- [23] Ebrahimi, A., & Dadvand, A. (2015). Simulation of melting of a nano-enhanced phase change material (NePCM) in a square cavity with two heat source-sink pairs. *Alex. Eng. J.*, 54(4), 1003-1017.
- [24] Arshad, A., Jabbal, M., Faraji, H., Talebizadehsardari, P., Bashir, M. A., & Yan, Y. (2022). Thermal performance of a phase change material-based heat sink in presence of nanoparticles and metal-foam to enhance cooling performance of electronics. *J. Energy Storage*, 48, 103882.
- [25] ul Hasnain, F., Irfan, M., Khan, M. M., Khan, L. A., & Ahmed, H. F. (2021). Melting performance enhancement of a phase change material using branched fins and nanoparticles for energy storage applications. *J. Energy Storage*, 38, 102513.
- [26] Nitsas, M., & Koronaki, I. P. (2021). Performance analysis of nanoparticles-enhanced PCM: An experimental approach. *TSEP*, 25, 100963.
- [27] Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, 39(1), 201-225.
- [28] Brent, A. D., Voller, V. R., & Reid, K. T. J. (1988). Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal. *Numer. Heat Transf., Part A Applications*, 13(3), 297-318.
- [29] Humphries, W. R., & Griggs, E. I. (1977). A design handbook for phase change thermal control and energy storage devices (No. NASA-TP-1074).
- [30] Chow, L. C., Zhong, J. K., & Beam, J. E. (1996). Thermal conductivity enhancement for phase change storage media. *ICHMT*, 23(1), 91-100.
- [31] Valan, A. A., Sasmito, A. P., & Mujumdar, A. S. (2013). Numerical performance study of paraffin wax dispersed with alumina in a concentric pipe latent heat storage system. *Therm. Sci.*, 17(2), 419-430.
- [32] Vajjha, R. S., Das, D. K., & Namburu, P. K. (2010). Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al₂O₃ and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *Int J Heat Fluid Flow*, 31(4), 613-621.
- [۹] عیسی پور درزی، م.، حسینی کهساری، س. م.، ج.، رنجبر، ع. ا. و پهم لی، ی. (۲۰۱۶). اثر افزایش تعداد و چیدمان لوله‌های سیال گرم بر رفتار ذوب ماده تغییر فاز دهنده در مبدل حرارتی سه لوله‌ای، مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها. ۶(۴)، ۲۴۹-۲۶۲.
- [10] Patel, A., & Singh, V. K. (2022). Numerical investigation of a novel phase change material based heat sink with double sided spiral fins. *ICHMT*, 138, 106342.
- [11] Akhilesh, R., Narasimhan, A., & Balaji, C. (2005). Method to improve geometry for heat transfer enhancement in PCM composite heat sinks. *ICHMT*, 48(13), 2759-2770.
- [12] Wang, Y. H., & Yang, Y. T. (2011). Three-dimensional transient cooling simulations of a portable electronic device using PCM (phase change materials) in multi-fin heat sink. *NRG*, 36(8), 5214-5224.
- [13] Hosseinizadeh, S. F., Tan, F. L., & Moosania, S. M. (2011). Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins. *Appl. Therm. Eng.*, 31(17-18), 3827-3838.
- [14] Sheikholeslami, M., Nimafar, M., & Ganji, D. D. (2017). Analytical approach for the effect of melting heat transfer on nanofluid heat transfer. *EPJ Plus*, 132(9), 1-12.
- [15] Kumar, P. M., Saminathan, R., Sumayli, A., Mittal, M., Abishek, A. S., Kumar, A. A., ... & Rinawa, M. L. (2022). Experimental analysis of a heat sink for electronic chipset cooling using a nano improved PCM (NIPCM). *Mater Today: Proceedings*, 56, 1527-1531.
- [16] Jalil, J. M., Mahdi, H. S., & Allawy, A. S. (2022). Cooling performance investigation of PCM integrated into heat sink with nano particles addition. *J. Energy Storage*, 55, 105466.
- [17] Raj, C. R., Suresh, S., Vasudevan, S., Chandrasekar, M., Singh, V. K., & Bhavsar, R. R. (2020). Thermal performance of nano-enriched form-stable PCM implanted in a pin finned wall-less heat sink for thermal management. *Energy Convers. Manag.*, 226, 113466.
- [18] Ho, C. J., Guo, Y. W., Yang, T. F., Rashidi, S., & Yan, W. M. (2020). Numerical study on forced convection of water-based suspensions of nanoencapsulated PCM particles/Al₂O₃ nanoparticles in a mini-channel heat sink. *ICHMT*, 157, 119965.
- [19] Arshad, A., Jabbal, M., Sardari, P. T., Bashir, M. A., Faraji, H., & Yan, Y. (2020). Transient simulation of finned heat sinks embedded with PCM for electronics cooling. *TSEP*, 18, 100520.
- [20] Farahani, S. D., Farahani, A. D., & Hajian, E. (2021). Effect of PCM and porous media/nanofluid

- storage of phase change materials. *J. Appl. Phys.*, 103(9), 094302.
- [35]. Shatikian, V., Ziskind, G., & Letan, R. (2008). Numerical investigation of a PCM-based heat sink with internal fins: constant heat flux. *ICHMT*, 51(5-6), 1488-1493.
- [36]. Sourtiji, E., Ganji, D. D., & Seyyedi, S. M. (2015). Free convection heat transfer and fluid flow of Cu-water nanofluids inside a triangular-cylindrical annulus. *Powder Technol*, 277, 1-10.
- [33] Shirasu, K., Yamamoto, G., Tamaki, I., Ogasawara, T., Shimamura, Y., Inoue, Y., & Hashida, T. (2015). Negative axial thermal expansion coefficient of carbon nanotubes: Experimental determination based on measurements of coefficient of thermal expansion for aligned carbon nanotube reinforced epoxy composites. *Carbon*, 95, 904-909.
- [34]. Shaikh, S., Lafdi, K., & Hallinan, K. (2008). Carbon nanoadditives to enhance latent energy