

بررسی آزمایشگاهی عملکرد حرارتی یک لوله گرمایی نوسانی سه بعدی همراه با نانوسیال اکسید آهن در معرض میدان مغناطیسی و تبخیرکن شیاردار شده

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
 mohseni.6770@gmail.com

حسین محسنی فدردی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
 goshayeshi1655@mshdiau.ac.ir

حمید رضا گشایشی*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
 m_a_alavi2002@yahoo.com

سید محمود ابوالحسن علوی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
 alizadeh.azad@yahoo.com

علیرضا علیزاده جاجرمد

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران،
 masoudkhsh@gmail.com

مسعود خسروداد

چکیده

استفاده از لوله‌های گرمایی نوسانی به عنوان یک فناوری نوین در زمینه انتقال گرما در سال‌های اخیر مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته است. در این تحقیق آزمایشگاهی عملکرد حرارتی لوله گرمایی نوسانی سه بعدی با ساختاری جدید، با نانوسیال Fe_3O_4 و تحت تاثیر میدان مغناطیسی در توان‌های ورودی متفاوت (۴۵۰- وات) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشات نشان داد که دستگاه در نسبت پرشدگی ۵۰٪ عملکرد حرارتی بهتری دارد. اگرچه لوله گرمایی نوسانی در زمینه‌های بسیاری به کار رفته است اما لوله گرمایی نوسانی سه بعدی تاکنون به صورت گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است. استفاده از نانوسیال اکسید آهن به صورت چشمگیری عملکرد حرارتی لوله گرمایی نوسانی را به ویژه در نسبت پرشدگی ۵۰٪ در مقایسه با آب خالص بهبود می‌بخشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از تبخیرکن شیاردار شده باعث افزایش ضریب انتقال گرما خواهد شد. لوله‌های تبخیرکن شیاردار، عملکرد حرارتی بهتری نسبت به لوله ساده دارد. همچنین وقتی تبخیرکن در معرض میدان مغناطیسی ثابت قرار می‌گیرد، عملکرد حرارتی دستگاه به طرز چشمگیری بهبود می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: لوله گرمایی نوسانی سه بعدی، نانوسیال، اکسید آهن، میدان مغناطیسی، تبخیرکن شیاردار

Experimental study of thermal performance of a three-dimensional oscillating heat pipe with Fe_3O_4 Nanofluid exposed to magnetic field and corrugated evaporator

H. Mohseni Fardardi

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

H. R. Goshayeshi

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

S. M. A. Alavi

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

A. R. Alizadeh

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

M. Khosroddad

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

Abstract

Use of Oscillating Heat Pipes (OHPs) as a new technology in the heat transfer field has been of interest to different industries in recent years. In this experimental investigation, the thermal performance of a newly designed three-dimensional oscillating heat pipe with Fe_3O_4 nanofluid exposed to a magnetic field under different input power (0–450 W) is investigated. The results showed that the device had a better thermal performance at a filling ratio of 50%. Although the OHP has been applied in many fields, the three-dimensional OHP has not been investigated widely so far.

The use of iron oxide nanofluid (Fe_3O_4) significantly improves the thermal performance of the oscillating heat pipe especially in a filling ratio of 50% compared to pure water. Also, the results show that the use of a corrugated evaporator will increase the heat transfer coefficient. The corrugated evaporator pipes have better thermal performance compared to the simple pipes. Also, when the evaporator is exposed to a constant magnetic field, the thermal performance of the device improves significantly.

Keywords: 3-D oscillating heat pipe, Nanofluid, iron oxide, magnetic field, corrugated evaporator.

شوند. ساختمان آنها از یک لوله باریک با تعدادی خم U شکل تشکیل شده که به طور نسبی از سیال عامل پر شده و هوای باقیمانده توسط سیستم خلا تخلیه می‌گردد. گرما توسط تبخیرکن جذب و در چگالنده دفع می‌شود. یک بخش آدیاباتیک نیز می‌تواند به صورت اختیاری بین تبخیرکن و چگالنده در صورت زیاد بودن فاصله بین آنها قرار گیرد. به

۱- مقدمه

لوله‌های گرمایی نوسانی (OHP)^۱ یکی از بهترین گزینه‌ها برای انتقال گرما و وسایل موثری برای بازیافت گرمای اتلافی محسوب می‌-

¹ Oscillating Heat Pipe

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: goshayeshi1655@mshdiau.ac.ir

دلیل پرشدگی جزئی لوله‌ها با سیال عامل، فشار نسبی در داخل لوله پایین است و حالت اولیه به صورت مخلوطی دوفازی از مایع و بخار خواهد بود. قطرات مایع و حباب‌های بخار^۱ به دلیل نوسانات فشار داخل سیستم که ناشی از ساختار خود سیستم و عمدتاً اختلاف دمای بین تبخیرکن و چگالنده می‌باشد، با حرکت نوسانی^۲ و یا گردشی^۳ خود، گرما را از قسمت گرم به قسمت سرد منتقل می‌کنند.

لوله‌های گرمایی نوسانی امروزه کاربرد وسیعی در صنایع مختلف از قبیل سیستم‌های انرژی خورشیدی، مبادله کن گرمایی، بازیاب گرما، سیستم سرمایش تجهیزات الکترونیک، هوا فضا و سیستم‌های سرمایش کرایونیک پیدا کرده‌اند [۱]. از مزایای لوله‌های گرمایی نوسانی می‌توان به ساخت و طراحی آسان، افت دمای کم در طول لوله گرمایی، کاربرد در بازه وسیعی از دما، توانایی کنترل و انتقال آهنگ‌های بالای گرما در دماهای مختلف اشاره کرد.

پارامترهای اصلی موثر بر عملکرد لوله‌های گرمایی نوسانی عبارتند از: قطر داخلی، نسبت پرشدگی، شار گرمایی، تعداد دورهای لوله، زاویه قرار گرفتن لوله‌ها نسبت به افق و نوع سیال عامل [۲]. تحقیقات نشان داده که استفاده از نانوسیالات مختلف به عنوان سیال عامل در لوله‌های گرمایی نوسانی باعث بهبود عملکرد حرارتی آن می‌شود [۳، ۴]. از جمله می‌توان به نانوسیالات مغناطیسی (MNFs)^۴ که یک گروه جدید از نانوسیالات هستند، اشاره کرد. این نانوسیالات توسط انتشار و پراکندگی نانوذرات سوپر پارامگناطیس شامل مواد فلزی مانند آهن، نیکل، کبالت و اکسید آنها مانند مگنتیت (Fe_3O_4) در داخل سیال‌های پایه مانند آب، روغن، اتیلن گلیکول، و غیره تهیه می‌شوند. آهنگ انتقال گرما MNF ها می‌تواند توسط میدان مغناطیسی خارجی افزایش یافته و کنترل شود [۵]. سیالات مغناطیسی در سال‌های اخیر کاربردهای زیادی در زمینه انتقال گرما پیدا کرده‌اند لذا توجه محققین به سوی آنها جلب شده است [۶-۱۰]. به عنوان مثال می‌توان به سیستم‌های خنک‌کننده ترانسفورماتورهای الکتریکی با قدرت بالا [۱۱]، [۱۲] و یا ترموسیفون کنترل شده توسط یک میدان مغناطیسی [۱۳-۱۵] اشاره کرد. همچنین نانوسیالات مغناطیسی می‌توانند راه حل مناسبی برای افزایش انتقال گرما اجباری و ترکیب سیال‌ها باشند [۱۶]. رایج‌ترین سیال‌های پایه نیز روغن‌ها، نفت سفید و آب می‌باشد. میزان خاصیت مغناطیسی نانوسیالات مغناطیسی بستگی به میدان مغناطیسی، دما و چگالی دارد [۹، ۱۷]. یکی از پرکاربردترین نانوذرات مغناطیسی، نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) می‌باشد [۱۸] که در این تحقیق نیز از نانوذرات مگنتیت برای تهیه نانوسیال استفاده خواهد شد.

اگرچه تحقیقات متعددی درباره تاثیر پارامترهای فوق الذکر بر روی لوله گرمایی نوسانی مسطح یا تخت انجام شده ولی تاکنون OHP به صورت چند لایه و سه بعدی به طور گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است. اسموت و همکاران [۱۹] چندین لوله گرمایی چند لایه مسطح ML-FP-OHP^۵ با طرح‌های هندسی مختلف ساخته و عملکرد حرارتی آن را تحت شرایط مختلف آزمایش کردند. نتایج تجربی بیانگر آن بود که ML-FP-OHP عملکرد بهتری نسبت به FP-OHP دارد. در این بین

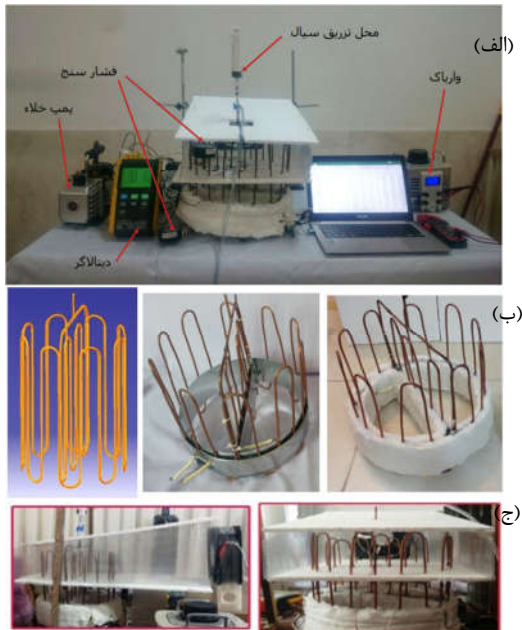
برخی محققین طرح‌های جدیدی از 3D-OHP^۶ ارائه کرده‌اند. کیو و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۷ در یک بررسی تجربی، تاثیر سرعت هوای سرد کننده، زاویه کارکرد و گرمای ورودی را بر 3D-OHP مورد آزمایش قرار دادند. این دستگاه دارای سه لایه در جهت عرضی و ۴ لایه در امتداد طولی می‌باشد. این طراحی سه بعدی چند لایه‌ای جدید، امکان شرایط کاری متفاوت در مدیریت حرارتی دستگاه از قبیل منابع گرمایی چندگانه و شارهای گرمایی بالاتر را فراهم می‌کند. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت هوای خنک‌کننده، دمای شروع به کار کاهش می‌یابد و مقاومت گرمایی دستگاه با افزایش توان گرمای ورودی، کاهش می‌یابد اما رابطه خطی آشکاری بین دمای شروع به کار و سرعت هوای خنک‌کننده کشف نشد. کیو و همکاران [۲۱] در مطالعه دیگری توان گرمایی، تعداد لایه‌ها، زاویه کارکرد و نسبت پرشدگی را بر عملکرد لوله گرمایی نوسانی سه بعدی بررسی کردند. آنها چندین لوله گرمایی نوسانی با تعداد لایه‌های دولایه، سه لایه، چهار لایه و پنج لایه که همگی دارای قطر داخلی ۲ میلی‌متر بودند را ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان دهنده این موضوع است که 3D-OHP با ۴ لایه و نسبت پرشدگی ۵۰٪، نیاز به کمترین دما و کمترین توان لازم برای استارت آپ (در شرایط توان ورودی یکسان) و بهترین عملکرد حرارتی را در بین تمام OHP ها در هر دو حالت افقی و عمودی دارد. کیو و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۹ عملکرد حرارتی مواد تغییر فاز دهنده (PCM) کوپل شده با 3D-OHP را بررسی کردند. آنها دو دستگاه 3D-OHP سه و چهار لایه را با یک دستگاه 2D-OHP آزمایش و با هم مقایسه کردند. بر اساس نتایج بدست آمده، هر دو نوع سیستم دارای تغییرات دمایی یکسان در طی فرایند ذوب بودند. سیستم پارافین/3D-OHP نسبت به سیستم پارافین/OHP نیاز به زمان بیشتری برای ذوب کامل در گرمای ورودی یکسان می‌باشد. همچنین این سیستم دارای عملکرد سرمایش بهتری است.

علاوه بر موارد فوق، اثر میدان مغناطیسی و شیاردار کردن لوله‌ها بر عملکرد لوله‌های گرمایی نوسانی نیز توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. جیان کو و همکاران [۲۳]، یک لوله گرمایی انعطاف‌پذیر هیبریدی طراحی کرده و ساخته‌اند که قسمت‌های تبخیرکن و چگالنده آن از لوله‌های مسی میکرو-شیاردار و قسمت آدیاباتیک آن از لوله‌های fluororubber تشکیل شده است. وانگ و همکاران [۲۴]، سه لوله گرمایی نوسانی تک حلقه‌ای با ساختار شیاردار به ترتیب در بخش تبخیرکن، آدیاباتیک و چگالنده را به طور عددی و تجربی بررسی کردند. آنها دریافتند لوله گرمایی نوسانی با تبخیرکن شیاردار دارای بهترین کارایی در زمان راه‌اندازی می‌باشد. به گونه‌ای که زمان راه‌اندازی ۲۷٪ و مقاومت گرمایی ۳۷/۵۷٪ کاهش داشته است. کنگ و همکاران [۲۵]، برای یک لوله گرمایی نوسانی (شیشه‌ای)، به طور همزمان اندازه‌گیری و تصویرسازی مقاومت گرمایی را در حین اعمال یک میدان مغناطیسی انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش گرما ورودی، مقاومت گرمایی کاهش می‌یابد. همچنین اعمال یک میدان مغناطیسی بر لوله گرمایی نوسانی که با نانوسیال Fe_3O_4 پر شده است، عملکرد حرارتی را افزایش می‌دهد خصوصاً در گرمای ورودی کمتر. گشایشی و همکاران [۲۶] اثر میدان مغناطیسی را بر آهنگ انتقال گرما

- 1 Vapor plugs & liquid slug
- 2 Oscillating motion
- 3 Circulation motion
- 4 Magnetic Nano Fluids (MNFs)
- 5 Multi-Layer Flat Plate OHP

6 Three Dimensional Oscillating Heat Pipe

بعدی با ۱۴ خم در قسمت تبخیرکن می‌باشد. ارتفاع دستگاه برابر با ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع هر کدام از قسمت‌های تبخیرکن، آدیاباتیک و چگالنده ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. قطر دایره سه بعدی مورد نظر ۳۰ سانتی‌متر و قطر داخلی هر خم نیز ۴ سانتی‌متر است. شکل ۲ طرحواره دستگاه مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۲- دستگاه آزمایش و تجهیزات وابسته آن

به منظور تخلیه کامل دستگاه قبل از تزریق سیال، لوله گرمایی نوسانی توسط یک پمپ خلا با توان 1.6 Hp و خلا نهایی ۱۰ پاسکال به مدت ۲۰ دقیقه برای هر آزمایش تحت مکش قرار گرفته است. فشار خلا اندازه‌گیری شده در پایان مکش حدود ۰/۹ بار بود.

به منظور اعمال بار گرمایی مورد نظر به تبخیرکن، از یک گرمکن الکتریکی تمام استیل صفحه‌ای که دارای حداکثر توان ۱۴۰۰ وات در ۲۲۰ ولت می‌باشد استفاده شده است به منظور به حداقل رساندن اتلاف گرما به محیط بیرون، تبخیرکن از سمت خارج و داخل مطابق شکل ۲-ب به طور کامل توسط پنبه نسوز عایق بندی شده است.

اعمال بارهای گرمایی مختلف به بخش تبخیرکن لوله گرمایی نوسانی، با تغییر ولتاژ توسط دستگاه واریاک انجام می‌گردد. محدوده تغییرات ولتاژ این دستگاه از صفر تا ۲۵۰ ولت می‌باشد. توان گرمایی اعمال شده به بخش تبخیرکن که به صورت گرمای تولید شده در هیتر به لوله گرمایی نوسانی منتقل می‌شود، از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$q = V I \quad (1)$$

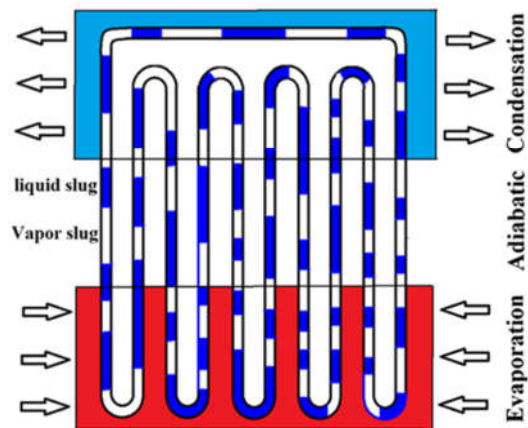
در رابطه فوق، V ولتاژ اعمالی به گرمکن و I شدت جریان می‌باشد. برای خنک نمودن سیال درون لوله‌های چگالنده، از یک فن که لوله‌ها را در معرض جریان هوا قرار داده استفاده شده است. برای جلوگیری از اتلاف جریان هوای اجباری، قسمت چگالنده مطابق شکل ۲-ج به صورت کامل در داخل یک کانال عایق قرار داده شده است. به منظور ثبت دما در بخش‌های تبخیرکن و چگالنده، از شش

یک لوله گرمایی نوسانی از جنس مس با نانوسیال نفت/ Fe_2O_3 با تعداد ۵ دور و قطر داخلی ۱/۷۵ میلی‌متر را با نسبت پرشدگی ۵۰٪ آزمایش کردند. نتایج بیانگر این بود که افزودن نانوذرات باعث بهبود عملکرد حرارتی دستگاه بوژه تحت اثر میدان مغناطیسی می‌گردد. همچنین دمای تبخیرکن در حضور میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. گشایشی و همکاران [۲۷] الگوهای مختلف جریان را در یک OHP در حضور میدان مغناطیسی و نانوذرات بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که قطرات مایع و حباب‌های بخار رفتار بسیار پیچیده‌ای دارند و تحت تاثیر پارامترهای مختلفی از قبیل آهنگ حرارت ورودی، نسبت پرشدگی و قطر لوله قرار دارند. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که حباب‌هایی که قطری در حدود قطر لوله دارند، هنگامی تولید می‌شوند که سرعت قطرات مایع کمتر یا مساوی با 0.15 m/s باشد.

اگرچه بررسی‌های مختلفی در خصوص تاثیر میدان مغناطیسی بر روی OHP انجام شده اما صرفاً تعداد محدودی پژوهش بر روی 3D- OHP صورت گرفته است. لذا در این تحقیق آزمایشگاهی، شکل جدید و سه بعدی از لوله گرمایی نوسانی توسط لوله مسی ساخته شده و سپس آزمایشات مورد نظر با سیال عامل آب و همچنین نانوسیال اکسید آهن انجام شده و نتایج بدست آمده بررسی شدند. در ادامه سیال عامل داخل لوله گرمایی نوسانی، در حین آزمایش تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت قرار داده شد. همچنین اثر شیاردار کردن لوله مسی در قسمت تبخیرکن نیز مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این کارها در ادامه شرح داده شده است.

۲- ساخت دستگاه

در این بخش مراحل و روش ساخت دستگاه لوله گرمایی نوسانی سه بعدی شرح داده می‌شود. در شکل ۱ طرحواره دستگاه مورد آزمایش و نحوه عملکرد آن نشان داده شده است.



شکل ۱- طرحواره لوله گرمایی نوسانی [۲۸]

۱-۲- طراحی و ساخت دستگاه

برای ساخت لوله گرمایی نوسانی استفاده شده در این آزمایش، از لوله مسی با قطرهای داخلی و خارجی به ترتیب ۳/۴ و ۴/۸ میلی‌متر استفاده شده است. این لوله گرمایی نوسانی از نوع بسته و به صورت سه

عدد حسگر دما از نوع K استفاده شده است که سه عدد آن در سه قسمت مختلف تبخیرکن و سه عدد دیگر نیز در سه قسمت متفاوت چگالنده به صورت تماسی به لوله گرمایی نوسانی سه بعدی متصل شده است.

جهت نمایش و ثبت دماهای تبخیرکن و چگالنده، از دستگاه دیتالاگر مدل BTM-4208SD استفاده شده که حسگرهای دما، به این دستگاه وصل می‌شود. یک عدد کارت حافظه در داخل این دستگاه قرار داده می‌شود که قابلیت ثبت داده‌های دمایی را دارد. در این آزمایش، دیتالاگر طوری تنظیم شد تا مقادیر دما را هر ۵ ثانیه یکبار در حافظه ثبت نماید.

برای این آزمایشات از ترکیب آب مقطر (سیال پایه) و نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) برای تهیه نانوسیال استفاده شده است. خواص ترموفیزیکی نانوذرات مگنتیت در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی نانوذرات مگنتیت در دمای ۲۹۸ کلوین

ماده	چگالی (kg/m^3)	گرمای ویژه ($J/kg.K$)	رسانایی گرمایی ($W/m.K$)
Fe_3O_4	۵۱۸۰	۶۷۰	۸۰

نانوذرات مورد استفاده در این کار آزمایشگاهی، از شرکت VCN material تهیه شده و مشخصات آن در جدول ۲ و تصویر نانوسیال تهیه شده نیز در شکل ۳ آمده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی نانوذرات Fe_3O_4

خلوص	۹۹/۸٪
قطر نانوذرات	۱۳ نانومتر
رنگ	سیاه



شکل ۳- نانوسیال و تغییرات آن پس از ۴ ساعت

به منظور پایدارسازی و همگن کردن نانوسیال از حمام التراسونیک مدل ۵۵۱۰ ساخت شرکت BRANSON استفاده شده است.

۲-۲- روش انجام آزمایش

پس از اینکه دستگاه 3D-OHP مورد نظر ساخته و تجهیزات جانبی نیز به آن متصل شد، نوبت به شروع آزمایش می‌رسد. یک شیر سه راهه در ورودی دستگاه قرار داده شد که به یک ورودی آن پمپ خلا و به ورودی دیگر آن سرنگ حاوی سیال عامل وصل شد. ابتدا

دستگاه به مدت ۲۰ دقیقه توسط پمپ خلا با فشار ۰/۸۵ bar تحت مکش قرار گرفت. پس از انجام خلا، مسیر ورودی پمپ خلا به دستگاه بسته شده و مسیر ورودی سیال به لوله گرمایی نوسانی باز می‌شود و چون دستگاه خلا شده، سیال به راحتی به داخل دستگاه مکش و تزریق می‌گردد. آزمایشات مورد نظر با سیال‌های عامل آب و همچنین نانوسیال اکسید آهن (با غلظت ۱٪ حجمی) و با نسبت‌های پرشدگی ۵۰ و ۶۰٪ انجام شد. در ادامه نیز دستگاه حاوی نانوسیال اکسید آهن، تحت میدان مغناطیسی قرار گرفت. نهایتاً بر روی لوله گرمایی نوسانی در قسمت تبخیرکن خم‌هایی زده شد که لوله انحنادار شود (شکل ۴) و اثر وجود انحنا در قسمت تبخیرکن دستگاه بررسی شود. در طول تمام آزمایشات، ولتاژهای مورد نظر توسط واریاک به دستگاه داده شده و جریان‌های متناظر آن نیز توسط مولتی‌متر ثبت شد. میزان توان گرمایی داده شده به دستگاه از ۳۰ وات آغاز شده و تا ۴۸۰ وات با میزان افزایش ۳۰ وات در هر ۱۵ دقیقه ادامه پیدا کرد. دماهای تبخیرکن و چگالنده توسط دیتالاگر و حسگرهای دمای متصل به لوله گرمایی نوسانی ثبت گردید. دمای تبخیرکن و چگالنده برای استفاده در محاسبات مربوطه، به ترتیب از رابطه‌های (۲) و (۳) به دست می‌آیند.

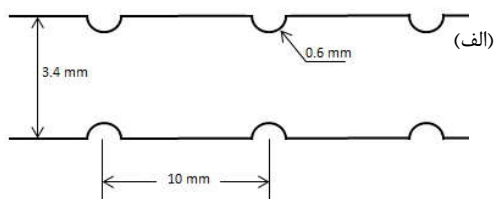
$$T_e = \frac{T_{e1} + T_{e2} + T_{e3}}{3} \quad (2)$$

$$T_c = \frac{T_{c1} + T_{c2} + T_{c3}}{3} \quad (3)$$

توان گرمایی داده شده به دستگاه نیز از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. سپس مقاومت گرمایی دستگاه از رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$R = \frac{T_e - T_c}{q} \quad (4)$$

به منظور بررسی اثر انحنا بر عملکرد حرارتی دستگاه 3D-OHP بر روی ۱۴ شاخه لوله در قسمت تبخیرکن تعداد ۵ شیر به فواصل ۱ سانتیمتر از یکدیگر بر روی هر لوله مطابق شکل ۴ ایجاد شد تا لوله شیاردار شود.



شکل ۴- انحناهای ایجاد شده در لوله‌های تبخیرکن (الف) تصویر داخلی لوله (ب) مقطع بریده شده لوله

به منظور بررسی اثر میدان مغناطیسی ثابت بر عملکرد

۴- نتایج

۴-۱- تحلیل دماهای ثبت شده

برای هر آزمایش، دماهای قسمت تبخیرکن و چگالنده توسط دیتالاگر ثبت گردیده و پس از میانگین گیری T_c و T_e برحسب زمان در شکل ۶ رسم گردیده است. مطابق این شکل؛ (الف) با آغاز گرمادهی، دماها افزایش می‌یابند و پس از گذشت حدود ۱۸۰ دقیقه از شروع آزمایش در توان ورودی ۱۸۰ وات، نوسانات بطور محسوس ایجاد شده است. (ب) با آغاز گرمادهی، دماها رو به افزایش رفته و پس از گذشت حدود ۸۰ دقیقه از شروع آزمایش در توان ورودی حدود ۱۵۰ وات، نوسانات بطور محسوس ایجاد شده است. (ج) همانند دو نمودار قبلی، دماها ابتدا افزایش یافته و پس از گذشت حدود ۹۰ دقیقه از شروع آزمایش در توان ورودی ۱۸۰ وات، نوسانات بطور محسوس ایجاد شده است. (د) با آغاز گرمادهی، دماها رو به افزایش رفته و پس از گذشت حدود ۸۰ دقیقه از شروع آزمایش در توان ورودی حدود ۱۵۰ وات، نوسانات بطور محسوس ایجاد شده است. (ه) با آغاز گرمادهی، دماها رو به افزایش رفته و پس از گذشت حدود ۶۰ دقیقه از شروع آزمایش در توان ورودی حدود ۱۲۰ وات، نوسانات بطور محسوس ایجاد شده است. این نتایج به صورت خلاصه در جدول ۳ آورده شده است.

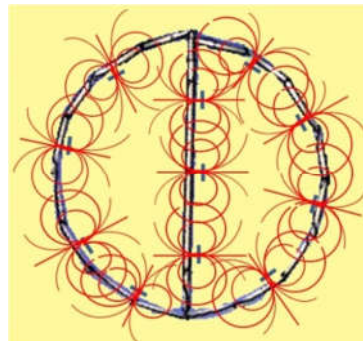
جدول ۳- مقایسه حالت‌های مختلف آزمایش بر حسب زمان و توان

ورودی هیتر در شروع نوسانات

حالت آزمایش و سیال عامل	زمان (دقیقه)	توان ورودی گرمکن در شروع نوسانات (وات)	دمای تبخیرکن در شروع نوسانات ($^{\circ}C$)
آب با نسبت پرشدگی ۵۰٪	۱۸۰	۱۸۰	۶۶
نانوسیال نسبت پرشدگی ۵۰٪	۸۰	۱۵۰	۶۰
نانوسیال نسبت پرشدگی ۶۰٪	۹۰	۱۸۰	۶۷
نانوسیال نسبت پرشدگی ۵۰٪ و تبخیرکن شیاردار	۸۰	۱۵۰	۵۹
نانوسیال نسبت پرشدگی ۵۰٪ و میدان مغناطیسی	۶۰	۱۲۰	۵۴

با مقایسه حالت‌های مختلف آزمایشات و نمودارهای مربوطه، مشاهده می‌شود که زمان آغاز اولین نوسانات، در حالت استفاده از اعمال میدان مغناطیسی از تمامی حالات دیگر به طور بسیار محسوس کمتر می‌باشد و این نشان از بهبود قابل توجه عملکرد دستگاه در زمان قرار گرفتن تحت تاثیر میدان مغناطیسی دارد. زیرا تحت میدان مغناطیسی، ذرات نانو در داخل سیال به دیواره لوله در تبخیرکن چسبیده و شکل راستای میدان را به خود می‌گیرند و در داخل لوله همانند زبری سطح لوله عمل کرده و نقطه جوش سیال را کاهش داده و نیز با افزایش آشفتگی داخل سیال، ضریب انتقال گرمای

حرارتی لوله گرمایی نوسانی، در مجاورت لوله‌های تبخیرکن تعداد ۱۱ عدد آهنربای کوچک نئودیموم سکه‌ای قرار داده شد. این آهنرباها هر کدام دارای قدرت میدان مغناطیسی ۵۰۰ گاوس، قطر ۱۲ میلی‌متر و ضخامت ۱/۲ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۵ طرحواره قرارگیری آهنرباها را نشان می‌دهد.



شکل ۵- طرحواره نحوه قرارگیری آهنرباها و خطوط میدان مغناطیسی ثابت اطراف لوله‌های تبخیرکن

۳- صحت داده ها و عدم قطعیت

مطالعات تجربی بدون خطا نیستند. به طور کلی، این خطاها باعث ایجاد تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر مشاهده شده می‌گردد. بنابراین ارزیابی خطاهای اصلی مهم است. براساس روش هولمن، توان ورودی از اختلاف ولتاژ بدست آمد. همچنین شار گرمایی و جریان بر مبنای مساحت تبخیرکن و توان ورودی محاسبه شد [۳۰]. ضریب انتقال گرمای متوسط به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h = \frac{q}{\Delta T} = \frac{Q}{A \Delta T} \quad (5)$$

عدم قطعیت ضریب انتقال گرما و شار گرمایی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{\Delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2} \quad (6)$$

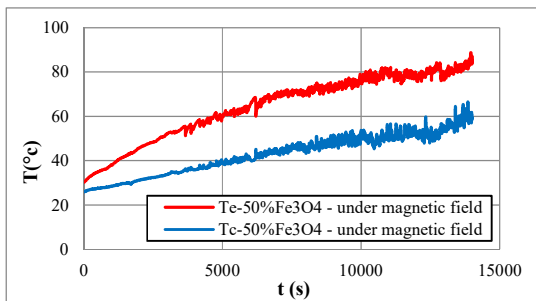
$$\frac{\Delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2} \quad (7)$$

معادله زیر نیز برای محاسبه حداکثر عدم قطعیت مقاومت گرمایی استفاده شده است:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2} \quad (8)$$

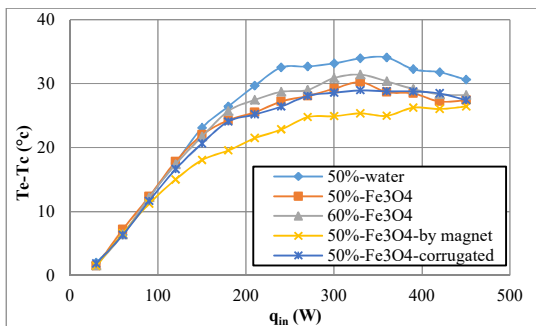
در شارهای گرمایی کم، بیشترین خطا در اندازه‌گیری شار گرمایی ورودی کمتر از ۵/۷٪ است. با افزایش شار گرمایی ورودی، میزان خطا تا ۲/۴٪ کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار اندازه‌گیری شده قابل اطمینان می‌باشد. همچنین عدم قطعیت در ضریب انتقال گرما و مقاومت گرمایی به ترتیب ۴/۱٪ و ۳/۲۹٪ می‌باشند.

(ه)



شکل ۶- دماهای تبخیرکن و چگالنده بر حسب زمان برای سیال عامل (الف) آب با نسبت پرشودگی ۵۰٪، (ب) نانوسیال با نسبت پرشودگی ۵۰٪، (ج) نانوسیال با نسبت پرشودگی ۶۰٪، (د) نانوسیال و نسبت پرشودگی ۵۰٪ با لوله‌های تبخیرکن انحنادار، (ه) نانوسیال با نسبت پرشودگی ۵۰٪ و تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت

شکل ۷، اختلاف دمای تبخیرکن و چگالنده دستگاه 3D-OHP را در حالت‌های مختلف آزمایش بر حسب گرمای ورودی به دستگاه نشان می‌دهد. از حدود توان ورودی ۱۵۰ وات، روند افزایشی اختلاف دماها در آزمایشات مختلف کند شده و به تدریج به سمت برابری و نهایتاً کاهش پیش رفته است. گستره عددی اختلاف دماها در آزمایش با نانوسیال Fe_3O_4 با نسبت پرشودگی ۵۰٪ تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت، از گستره عددی سایر آزمایشات کمتر است و این نشان دهنده مقاومت گرمایی کمتر و در نتیجه انتقال گرمای بهتر و بیشتر در این حالت نسبت به بقیه حالت‌ها می‌باشد. بزرگترین رنج عددی داده‌های اختلاف دما مربوط به مورد سیال عامل آب می‌باشد که بدترین حالت از نظر انتقال حرارت در مقایسه با سایر حالت‌ها است. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در توان‌های ورودی حدود ۳۳۰ وات و بالاتر، اختلاف دما ثابت مانده و یا شروع به کاهش می‌کند که در نتیجه عملکرد حرارتی دستگاه نیز کمتر خواهد شد. برای مشاهده دقیق‌تر و اثبات موضوع، توان ورودی تا ۴۵۰ وات نیز افزایش داده شد که آهنگ کاهش اختلاف دما همچنان ادامه داشت و افزایش بیشتر توان ورودی منجر به خشک شدن تبخیرکن می‌گردید.

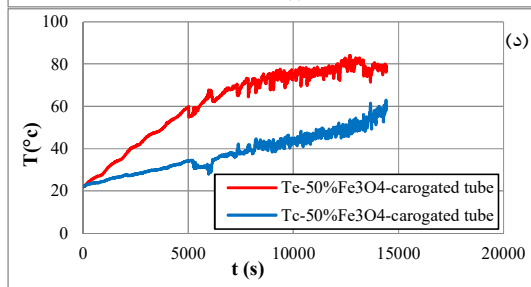
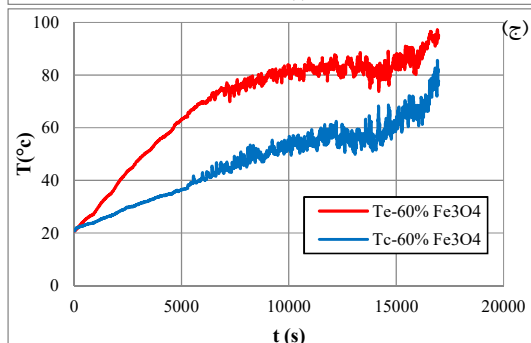
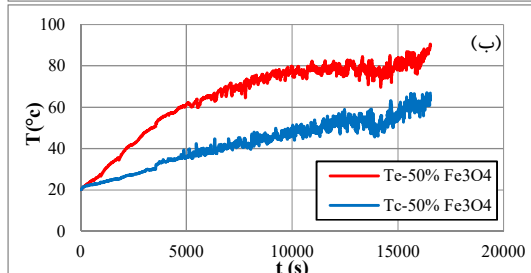
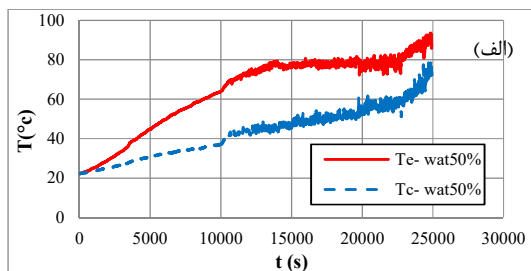


شکل ۷- اختلاف دمای تبخیرکن و چگالنده برای حالت‌های مختلف بر حسب توان ورودی

۴-۲- مقاومت گرمایی

مقاومت گرمایی دستگاه طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود. در شکل ۸ مقاومت گرمایی متوسط بر حسب بار گرمایی ورودی برای سیال

جایجایی را افزایش می‌دهد. به همین ترتیب زمان آغاز نوسانات در حالت استفاده از نانوسیال اکسید آهن با نسبت پرشودگی ۵۰٪ و نیز نانوسیال اکسید آهن با لوله تبخیرکن انحنادار، تقریباً یکسان و با اختلاف اندک بود و این دو در مقایسه با نانوسیال اکسید آهن با نسبت پرشودگی ۶۰٪ عملکرد بهتری دارند و نهایتاً همه حالات فوق عملکرد بسیار بهتری نسبت به استفاده از آب به عنوان سیال عامل دارند.



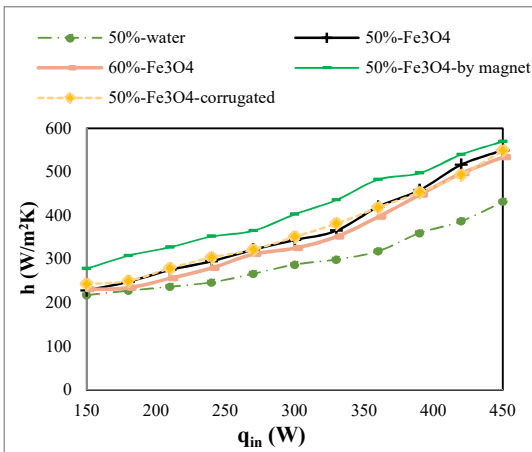
(ه)

تبخیرکن و چگالنده بر حسب کلون می‌باشد. مقدار A نیز از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

$$A = n\pi DL \quad (10)$$

که در آن D قطر لوله، n تعداد لوله و L طول مشخصه تبخیرکن است.

شکل ۹ ضرب انتقال گرما بر حسب توان ورودی را برای آزمایشات مختلف نشان می‌دهد. در ابتدا به دلیل اینکه هنوز سیال داخل تبخیرکن هیچ جنبش و نوسانی ندارد، گرمای ورودی به تبخیرکن صرفاً باعث افزایش دمای تبخیرکن و نیز چگالنده شده و انتقال گرمای محدود فقط از طریق رسانش از بدنه لوله‌های مسی از تبخیرکن به چگالنده انجام می‌شود. با گذشت زمان و افزایش دادن مرحله‌ای توان ورودی، ضرب انتقال گرما رو به کاهش رفته و سپس با نزدیک شدن به مرحله‌ای آغاز نوسانات حباب‌های بخار و قطرات مایع در داخل دستگاه، سهم انتقال گرما از طریق همرفت افزایش یافته (این اتفاق در حدود توان ۱۵۰ وات صورت می‌گیرد) و پس از آن ضرب انتقال گرمای جابجایی شروع به افزایش می‌کند. دلیل این امر این است که با افزایش تدریجی توان گرمایی، نوسانات داخل دستگاه شروع شده و باعث افزایش انتقال گرما از تبخیرکن به چگالنده می‌شود.

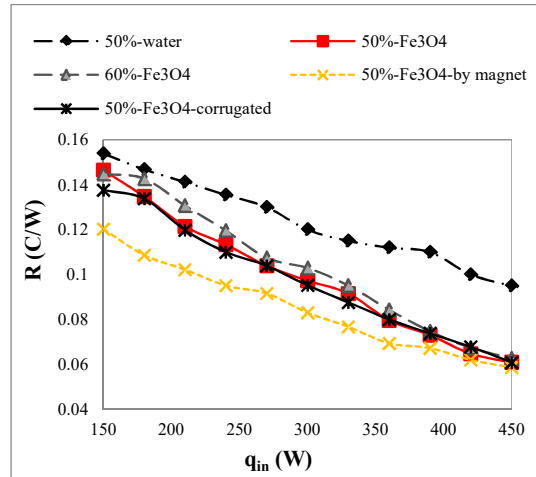


شکل ۹- ضرب انتقال گرما بر حسب بار گرمایی ورودی برای حالت‌های مختلف بر حسب توان ورودی

۴-۴- بررسی تغییرات فشار

به منظور بررسی تغییرات فشار در لوله گرمایی نوسانی، از دو عدد فشارسنج خلا با دقت ۰/۰۲ بار استفاده گردیده است که یکی در ناحیه تبخیرکن و دیگری در چگالنده نصب گردید. از آنجایی که بهترین عملکرد حرارتی مربوط به آزمایش تحت اثر میدان مغناطیسی است، لذا فشارها برای این آزمایش، توسط فشارسنج‌ها ثبت گردید. شکل ۱۰، تغییرات فشار در تبخیرکن و چگالنده را بر حسب زمان نشان می‌دهد.

عامل آب با نسبت پرشدگی ۵۰٪، نانوسیال با نسبت پرشدگی ۶۰٪، نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪، نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ و تبخیرکن انحنادار و نیز نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ تحت اثر میدان مغناطیسی نشان داده شده است.



شکل ۸- مقاومت گرمایی متوسط بر حسب توان ورودی برای حالت‌های مختلف بر حسب توان ورودی

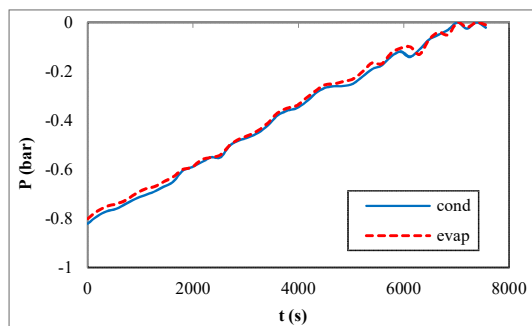
در بین پنج حالت آزمایش شده، حالت نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت، نسبت به چهار حالت دیگر مقاومت گرمایی پایین‌تری دارد در نتیجه عملکرد بهتری را دارا می‌باشد و این به دلیل وجود میدان مغناطیسی اطراف لوله‌های تبخیرکن است که باعث چسبیدن ذرات نانو در داخل نانوسیال به دیواره داخلی لوله‌ها به شکلی در راستای خطوط جریان مغناطیسی شده و در نتیجه آشفته‌گی خیلی بهتر و بیشتر و مسلماً افزایش بیشتری در ضرب انتقال گرما ایجاد نموده و مقاومت گرمایی کمتر می‌گردد. بعد از آن، حالت نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ و تبخیرکن انحنادار نسبت به سه حالت دیگر عملکرد بهتری دارد. زیرا وجود انحنا در لوله‌های قسمت تبخیرکن باعث می‌شود جریان سیال به سمت آشفته‌گی بیشتر پیش برود و در نتیجه مقاومت گرمایی کمتر و انتقال گرمایی بهتر ایجاد شود. سپس حالت نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ نسبت به دو حالت باقی مانده بهتر است و نهایتاً حالت نانوسیال با نسبت پرشدگی ۶۰٪ نسبت به حالت سیال عامل آب بهتر عمل می‌کند. در بین این حالات نامناسب‌ترین حالت مربوط به سیال عامل آب می‌باشد که مقاومت گرمایی آن از بقیه حالات بیشتر و در نتیجه عملکرد حرارتی نامناسب‌تری را دارد.

۴-۳- ضرب انتقال گرما

ضرب انتقال گرمای جابجایی از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد. [۳۰]

$$h = \frac{Q}{A \Delta T} \quad (9)$$

در این رابطه Q مقدار گرمای منتقل شده بر حسب وات، A مساحت سطح در معرض انتقال گرما بر حسب m^2 و ΔT اختلاف دمای



شکل ۱۰- تغییرات فشار در تبخیرکن و چگالنده بر حسب زمان

با شروع آزمایش، فشار در تبخیرکن و چگالنده در حال افزایش و نزدیک شدن به فشار اتمسفر می‌باشد. فشار تبخیرکن به فشار اتمسفر نزدیکتر است یعنی فشار در تبخیرکن از فشار در چگالنده بیشتر است. با گذشت زمان و افزایش توان ورودی، فشارها همچنان افزایش یافته تا در توان گرمایی ورودی ۲۱۰ وات اولین نوسانات فشار شروع می‌شود. البته نوسان فشار در تبخیرکن خودش را زودتر از چگالنده نشان می‌دهد (حدود ۷ دقیقه زودتر) و این به دلیل این است که منشأ نوسانات ابتدا در تبخیرکن آغاز شده و باعث نوسان فشار شده و سپس این تغییرات در چگالنده نیز نمایان می‌شود.

نکته قابل توجه در اینجا این است که در آزمایش تحت میدان مغناطیسی ثابت، نوسانات دما در توان گرمایی ورودی حدود ۱۲۰ وات آغاز شده در حالی که نوسانات فشار در توان گرمایی ورودی حدود ۲۱۰ وات شروع شده است. این اختلاف در شروع نوسانات دما و فشار، حدود ۳۰ دقیقه می‌باشد. یعنی در آغاز نوسانات دما، تا حدود ۳۰ دقیقه بعد، به دلیل قوی نبودن نوسانات دما، تأثیری بر فشارهای تبخیرکن و چگالنده مشاهده نمی‌شود و پس از آن با زیاد شدن شدت نوسانات، نوسان در فشارها هم آغاز می‌شود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش یک طراحی جدید برای 3D-OHP انجام شده و اثر نانوسیال Fe_3O_4 و نیز اثر میدان مغناطیسی ثابت و اثر شیاردار کردن لوله‌های تبخیرکن مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا دستگاه با سیال عامل آب و نسبت پرشدگی ۵۰٪ و سپس با نانوسیال اکسید آهن با نسبت‌های پرشدگی ۵۰٪ و ۶۰٪ و همچنین با نانوسیال اکسید آهن با پرشدگی ۵۰٪ در حالی که تبخیرکن دستگاه تحت میدان مغناطیسی ثابت قرار گرفته بود، انجام گردید. در ادامه در تعدادی از لوله‌های تبخیرکن انحنایابی ایجاد گردید و آزمایش با نانوسیال اکسید آهن با نسبت پرشدگی ۵۰٪ انجام شد. غلظت حجمی نانوسیال اکسید آهن در تمامی آزمایشات نیز ۱٪ بوده است. آزمایشات انجام شده در این پژوهش نشان داد که:

۱- نسبت پرشدگی ۵۰٪ عملکرد حرارتی بهتری نسبت به ۶۰٪ دارد.

۲- دماهای ثبت شده توسط حسگرهای مختلفی که در تبخیرکن

و چگالنده و در لایه‌های مختلف شکل سه بعدی نصب شده بود، نشان داد که در لایه‌های مختلف تبخیرکن و چگالنده، دماها یکنواخت است.

۳- در مقایسه با سیال عامل آب خالص، استفاده از نانوسیال با

نسبت پرشدگی ۵۰٪، نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ و تبخیرکن انحنادار و نیز نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ تحت اثر میدان مغناطیسی، مقاومت گرمایی را به ترتیب به میزان ۲۰، ۱۸ و ۲۵٪ کاهش داده و ضریب انتقال گرمای جابجایی را به ترتیب به میزان ۱۰، ۱۳ و ۲۲٪ افزایش می‌دهد.

۴- ایجاد انحنای در تعدادی از لوله‌های تبخیرکن، عملکرد حرارتی بهتری را نسبت به لوله ساده و بدون انحنای خود نشان می‌دهد و این به دلیل این است که انحنای ایجاد شده در داخل لوله همانند زبری عمل کرده و آشفتگی جریان را بیشتر و در نتیجه ضریب انتقال گرما را بهبود می‌بخشد.

۶- نمادها

T	دما (°C)
L	طول (m)
D	قطر (mm)
R	مقاومت گرمایی (°C/W)
h	ضریب انتقال گرمای جابجایی ($W/m^2°C$)
I	شدت جریان (A)
V	ولتاژ (V)
q	آهنگ انتقال گرمای ورودی (W)

زیرنویس‌ها

c	تبخیرکن
c	چگالنده

۷- مراجع

- [1] Nazari M. A., Ahmadi M. H., Ghasempour R., Shafii M. B., Mahian O., Kalogirou S. et al., A review on pulsating heat pipes: from solar to cryogenic applications, *Applied Energy*, Vol. 222, pp. 475-484, 2018.
- [2] Ma H., *Oscillating heat pipes*. Springer, 2015.
- [3] Nazari M. A., Ahmadi M. H., Ghasempour R., and Shafii M. B., How to improve the thermal performance of pulsating heat pipes: A review on working fluid, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, pp. 630-638, 2018.
- [4] Nazari M. A., Ahmadi M. H., Sadeghzadeh M., Shafii M. B., and Goodarzi M., A review on application of nanofluid in various types of heat pipes, *Journal of Central South University*, Vol. 26, No. 5, pp. 1021-1041, 2019.
- [5] Goharkhah M., Ashjaee M., and Shahabadi M., Experimental investigation on convective heat transfer and hydrodynamic characteristics of magnetite nanofluid under the influence of an alternating magnetic field, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 99, pp. 113-124, 2016.
- [6] Abareshi M., Goharshadi E. K., Zebarjad S. M., Fadafan H. K., and Youssefi A., Fabrication, characterization and measurement of thermal conductivity of Fe_3O_4 nanofluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No. 24, pp. 3895-3901, 2010.
- [7] Fadaei F., Shahrokhi M., Dehkordi A. M., and Abbasi Z., Heat transfer enhancement of Fe_3O_4 ferrofluids in the presence of magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 429, pp. 314-323, 2017.

- loop oscillating heat pipe under magnetic field, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 74, pp. 265-270, 2016.
- [27] Goshayeshi H. R. and Chaer I., Experimental study and flow visualization of Fe₂O₃/kerosene in glass oscillating heat pipes, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 103, pp. 1213-1218, 2016.
- [28] Xing M., Yu J., and Wang R., Performance of a vertical closed pulsating heat pipe with hydroxylated MWNTs nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 112, pp. 81-88, 2017.
- [29] Azizian R., Doroodchi E., McKrell T., Buongiorno J., Hu L., and Moghtaderi B., Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer of magnetite nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 68, pp. 94-109, 2014.
- [30] Goshayeshi H. R., Izadi F., and Bashirmezhad K., Comparison of heat transfer performance on closed pulsating heat pipe for Fe₃O₄ and γ-Fe₂O₃ for achieving an empirical correlation, *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 89, pp. 43-49, 2017.
- [8] Odenbach S., *Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids*. Springer, 2009.
- [9] Odenbach S. and Thurm S., "Magnetoviscous effects in ferrofluids," in *Ferrofluids*: Springer, 2002, pp. 185-201.
- [10] Rosensweig R. E., *Ferrohydrodynamics*. Courier Corporation, 2013.
- [11] Yamaguchi H., Niu X.-D., Zhang X.-R., and Yoshikawa K., Experimental and numerical investigation of natural convection of magnetic fluids in a cubic cavity, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, No. 22, pp. 3665-3670, 2009.
- [12] Yamaguchi H., Zhang X.-R., Niu X.-D., and Yoshikawa K., Thermomagnetic natural convection of thermo-sensitive magnetic fluids in cubic cavity with heat generating object inside, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No. 6, pp. 698-704, 2010.
- [13] Sheikholeslami M. and Gorji-Bandpy M., Free convection of ferrofluid in a cavity heated from below in the presence of an external magnetic field, *Powder Technology*, Vol. 256, pp. 490-498, 2014.
- [14] Sheikholeslami M., Gorji-Bandpy M., and Ganji D., Lattice Boltzmann method for MHD natural convection heat transfer using nanofluid, *Powder Technology*, Vol. 254, pp. 82-93, 2014.
- [15] Sheikholeslami M., Gorji-Bandpy M., Seyyedi S., Ganji D., Rokni H. B., and Soleimani S., Application of LBM in simulation of natural convection in a nanofluid filled square cavity with curve boundaries, *Powder Technology*, Vol. 247, pp. 87-94, 2013.
- [16] Sheikholeslami M., Rashidi M., and Ganji D., Numerical investigation of magnetic nanofluid forced convective heat transfer in existence of variable magnetic field using two phase model, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 212, pp. 117-126, 2015.
- [17] Ghasemian M., Ashrafi Z. N., Goharkhah M., and Ashjaee M., Heat transfer characteristics of Fe₃O₄ ferrofluid flowing in a mini channel under constant and alternating magnetic fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 381, pp. 158-167, 2015.
- [18] Afrand M., Toghraie D., and Sina N., Experimental study on thermal conductivity of water-based Fe₃O₄ nanofluid: development of a new correlation and modeled by artificial neural network, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 75, pp. 262-269, 2016.
- [19] Smoot C. and Ma H., Experimental investigation of a three-layer oscillating heat pipe, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 136, No. 5, p. 051501, 2014.
- [20] Qu J., Zhao J., and Rao Z., Experimental investigation on the thermal performance of three-dimensional oscillating heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, pp. 589-600, 2017.
- [21] Qu J., Zhao J., and Rao Z., Experimental investigation on thermal performance of multi-layers three-dimensional oscillating heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, pp. 810-819, 2017.
- [22] Qu J., Ke Z., Zuo A., and Rao Z., Experimental investigation on thermal performance of phase change material coupled with three-dimensional oscillating heat pipe (PCM/3D-OHP) for thermal management application, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 129, pp. 773-782, 2019.
- [23] Qu J., Li X., Cui Y., and Wang Q., Design and experimental study on a hybrid flexible oscillating heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 107, pp. 640-645, 2017.
- [24] Wang J., Ma H., Zhu Q., Dong Y., and Yue K., Numerical and experimental investigation of pulsating heat pipes with corrugated configuration, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102, pp. 158-166, 2016.
- [25] Kang S.-W., Wang Y.-C., Liu Y.-C., and Lo H.-M., Visualization and thermal resistance measurements for a magnetic nanofluid pulsating heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 126, pp. 1044-1050, 2017.
- [26] Goshayeshi H. R., Goodarzi M., Safaei M. R., and Dahari M., Experimental study on the effect of inclination angle on heat transfer enhancement of a ferrofluid in a closed