



بررسی آزمایشگاهی ضریب مقاومت حرارتی در لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته و اثر نسبت پرشدگی و نسبت طول اواپراتور به کندانسور بر آن

معصومه عامریان^۱، علی خالقی^{۲*} و محمود نوروزی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آموزشی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ نویسنده مسوول، استادیار، گروه آموزشی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳ دانشیار، گروه آموزشی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

چکیده

در این مقاله، با به‌کارگیری مطالعات تجربی به بررسی تأثیر پارامترهای نسبت پرشدگی حجمی و نسبت طول اواپراتور و کندانسور بر عملکرد لوله‌ی حرارتی نوسانی، با استفاده از روش سطح پاسخ پرداخته شده است. روش سطح پاسخ به مجموعه‌ای از فن‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی باهدف کاهش آزمایش‌ها هست. پژوهش حاضر در راستای بهبود عملکرد لوله‌ی حرارتی نوسانی، مقاومت حرارتی کمینه تحت تأثیر دو پارامتر را مورد مطالعه قرار می‌دهد. لوله‌ی حرارتی نوسانی مورد بررسی به ابعاد کلی $3 \times 210 \times 200$ میلی‌متر متشکل از چهار دور لوله‌ی مسی با قطرهای داخلی و خارجی به ترتیب $2/4$ و 3 میلی‌متر است. نتایج تجربی حاکی از آن است که تغییرات مقاومت حرارتی برحسب پارامترهای نسبت پرشدگی حجمی و نسبت طول اواپراتور به کندانسور، دارای نقطه عطفی است که تا قبل از آن ارتباط مقاومت حرارتی و هریک از پارامترها به‌صورت معکوس و پس از آن مستقیم خواهد بود.

کلمات کلیدی: لوله حرارتی نوسانی؛ مقاومت حرارتی؛ نسبت طول اواپراتور به کندانسور؛ نسبت پرشدگی

Experimentally study of thermal resistance coefficient in closed loop pulsating heat pipe and the effect of filling ratio and evaporator to condenser length ratio on it

M. Amerian¹, A. Khaleghi^{2,*}, M. Norouzi³

¹ MSc. Student, Department of Mechanics, Shaheoud University of Teachnology, Shahroud, Iran

² Assistant Professor, Department of Mechanics, Shahroud University of Technology, Shahrood, Iran

³ Associate Professor, Department of Mechanics, Shahroud University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract

In this paper, using experimental studies, the effect of volumetric filling ratio and evaporator and condenser length ratio on the performance of the pulsating heat pipe has been investigated using the response surface methodology. The surface methodology is a response to a set of statistical techniques and applied mathematics to construct experimental models with the aim of reducing experiments. In order to improve the performance of the pulsating heat pipe, the present study studies the minimum thermal resistance under the influence of two parameters. The pulsating heat pipe with general dimensions of $3 \times 210 \times 200$ consists of four rounds of copper pipe with internal and external diameters of 2.4 and 3 mm, respectively. Experimental results show that the changes in thermal resistance in terms of the parameters of the volume filling ratio and the ratio of the length of the evaporator to the condenser, has a turning point before which the relationship between thermal resistance and each of the parameters will be inverted and then direct.

Keywords: Pulsating heat pipe; Thermal resistance; Evaporator to condenser length ratio; Filling ratio

۱- مقدمه

لوله حرارتی نوسانی یکی از ساده‌ترین و مؤثرترین وسایل انتقال شار بالای حرارتی بین دو منبع با اختلاف دمایی کم و بدون نیاز به نیروی خارجی است که می‌تواند در بهبود انتقال حرارت در تجهیزات الکترونیکی با ابعاد کم مورد استفاده قرار گیرد. این نوع لوله حرارتی دارای مزیت‌های اساسی و کاربردی از جمله پاسخ‌دهی بسیار سریع، مقاومت حرارتی پایین، امکان عملکرد در شیب‌های مختلف و راحتی ساخت است.

آکاچی [۱] برای اولین بار لوله‌ی حرارتی نوسانی را از نقطه نظر مهندسی اختراع و در ۲۴ شکل مختلف ارائه کرد. لوله حرارتی نوسانی با تغییر فاز و حرکت نوسانی دوفازی دائمی گرما را بین بخش اواپراتور و کندانسور انتقال می‌دهد و علاوه بر انتقال حرارت نهان، انتقال حرارت محسوس نیز سهم دارد [۲]. لوله‌های حرارتی نوسانی ابزار انتقال حرارت پیچیده‌ای هستند که عملکرد حرارتی لوله‌های حرارتی نوسانی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل هندسی و ترمودینامیکی از جمله قطر داخلی لوله‌ها، شکل عرضی لوله‌ها، طول بخش اواپراتور و کندانسور، تعداد دور لوله‌ها، سیال عامل، درصد پرشدگی، فشار تخلیه، زاویه قرارگیری نسبت به افق و توان است. با افزایش حرارت ورودی، اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور در تمام نسبت‌های پرشدگی افزایش می‌یابد [۳]. طبق مشاهدات تجربی پیشین، حداقل شار حرارتی، برای ایجاد شروع یک جریان نوسانی پایدار مورد نیاز است [۴]. ریتدایک و همکاران [۵] به بررسی اثر قطر داخلی، طول ناحیه اواپراتور، نوع سیال عامل و تعداد دور بر مقدار شار حرارتی لوله‌های حرارتی نوسانی پرداخته‌اند. نتایج مشاهدات آن‌ها حاکی از این است که با افزایش گرمای نهان تبخیر سیال عامل، حداکثر توان ورودی افزایش می‌یابد که به ناحیه اواپراتور می‌دهیم؛ همچنین با افزایش طول ناحیه اواپراتور، شار حرارتی بحرانی کاهش می‌یابد. چاروینسان و همکاران [۶] به مطالعه عملکرد حرارتی لوله‌های حرارتی حلقه بسته با قطرهای داخلی، طول بخش اواپراتور و تعداد دور مختلف پرداختند. سیال عامل در آزمایش‌های آن‌ها آب مقطر و اتانول در درصد پرشدگی‌های مختلف بود. طبق مشاهدات آن‌ها شروع عملکرد بستگی به دمای بخش اواپراتور دارد که آن نیز مربوط به تعداد دور است؛ همچنین با افزایش دمای اواپراتور و کاهش طول مؤثر آن، عملکرد حرارتی افزایش می‌یابد. یانگ و همکاران [۷] به بررسی

تجربی دو لوله حرارتی نوسانی تخت از جنس آلومینیوم و با استفاده از اتانول به‌عنوان سیال عامل تحت تأثیر پارامترهای مختلف عملیاتی از جمله نسبت پرشدگی، شار حرارتی ورودی و زاویه نسبت به افق پرداختند. طبق مشاهدات آن‌ها نسبت پرشدگی یک پارامتر حیاتی است که برای دستیابی به حداکثر عملکرد حرارتی و یا حداقل مقاومت حرارتی برای شرایط عملیاتی خاص، باید بهینه شود.

در راستای ارتقا عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی در تمام زاویه‌های قرارگیری، به‌خصوص در راستای افق پیشنهادهایی از جمله افزایش تعداد دور، استفاده از لوله‌های با قطرهای غیریکنواخت در هر دور، کوپل کردن چند لوله حرارتی نوسانی با سیال عامل‌های متفاوت و فتیله‌ای کردن سطح داخلی لوله حرارتی نوسانی پیشنهاد و مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. در این زمینه جیانهانگ لئو و همکاران [۸] به مطالعه تجربی افزایش ویژگی‌های انتقال حرارت با استفاده از کوپل کردن لوله‌های حرارتی نوسانی پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود اتصال دو لوله حرارتی نوسانی یکی با سیال عامل آب و دیگری با اتانول به‌عنوان سیال عامل کاری، بهره بردند. طبق مشاهدات آن‌ها در همان دمای منبع حرارت، جذب و آزادسازی گرما لوله حرارتی‌های کوپل شده از حالت منفرد بهتر رخ می‌دهد. تی سنگ و همکاران [۹] به مطالعه تجربی دو لوله حرارتی نوسانی با قطر یکنواخت و دیگری با قطرهای غیریکنواخت پرداختند. نتایج گزارش‌های آن‌ها حاکی از این است که در آرایش افقی لوله حرارتی نوسانی با قطر متغیر زودتر شروع به کار می‌کند و مقاومت حرارتی بسیار پایین‌تری دارد؛ همچنین لوله‌های حرارتی نوسانی در حالت عمودی عملکرد بهتری نسبت به حالت افقی دارند.

افزایش سطح تبادل داخلی و افزایش زمان انتقال حرارت از راهکارهای افزایش انتقال حرارت جریان‌های داخلی هست. کیو و همکاران [۱۰] به مطالعه تجربی عملکرد لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته از جنس مس در دو حالت با و بدون میکرو شیار داخلی حلقه‌ای در جهت‌های عمودی و افقی پرداختند. شیارهای داخلی باعث افزایش بازگشت سیال به قسمت اواپراتور و در نتیجه افزایش عملکرد این لوله‌ها می‌شود. هرچند باید در نظر داشت، مطابق تحقیقات تجربی بتنکار و همکاران [۱۱] با افزایش زبری سطح به‌خصوص در نسبت پرشدگی‌های بالا، افت فشار افزایش می‌یابد.

خروجی افزایش می‌یابد و تغییر مؤثری در عملکرد آن به وجود نمی‌آید.

جیان سنگ وانگ و همکاران [۱۶] به مدل‌سازی عددی لوله حرارتی نوسانی با استفاده از روش حجم سیال به منظور بررسی تأثیر نسبت طول اواپراتور به کندانسور بر مقاومت حرارتی پرداختند. طبق نتایج آن‌ها در نسبت پرشدگی و توان حرارتی ورودی ثابت، کاهش محدود طول کندانسور منجر به کاهش مقاومت حرارتی خواهد شد. هرچند در این حالت در نسبت پرشدگی‌های کم، امکان پدیده خشک‌شدگی بیشتر است. دانگ زی و همکاران [۱۷] به مطالعه تجربی تأثیر نسبت پرشدگی و زاویه شیب بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی پرداختند. مطابق نتایج آن‌ها میزان نسبت پرشدگی بر نوسانات جریان تأثیر می‌گذارد. لوله‌های حرارتی نوسانی با نسبت پرشدگی کمتر قابلیت نوسانی بالاتری حتی در توان‌های حرارتی پایین دارند. دانگوی ژانگ و همکاران [۱۸]، به منظور بهینه‌سازی عملکرد انتقال حرارت لوله‌های حرارتی نوسانی به بررسی تجربی تأثیر افزودن نانو ذرات هیبریدی با غلظت‌های مختلف پرداختند. مطابق نتایج آن‌ها افزودن غلظت بهینه‌ی نانو ذرات باعث افزایش انتقال فاز و نوسانات می‌شود و همچنین پدیده‌ی خشک شدن را به تأخیر می‌اندازد. یوسوکو یاسودا و همکاران [۱۹] به مطالعه تجربی و مشاهده رفتار سیال عامل در یک لوله حرارتی نوسانی از جنس آلیاژ آلومینیوم با استفاده از رادیوگرافی نوترونی پرداختند. طبق مشاهدات آن‌ها توزیع اولیه سیال عامل بر ویژگی‌های راه‌اندازی نوسان سیال کار تأثیر نمی‌گذارد. آر کی سارانگی و همکاران [۲۰] به مدل‌سازی حرکت نوسانی لوله حرارتی نوسانی با استفاده از مدل جرم فشر ارتعاشات اجباری و دمپر تحت تأثیر پارامترهای مختلف تعداد دور، طول مؤثر و قطر داخلی پرداختند. مشاهده شد برای یک لوله حرارتی نوسانی خاص، فرکانس نوسان ابتدا با پر شدن کاهش می‌یابد و به یک مقدار حداقلی می‌رسد، سپس با افزایش بیشتر نسبت پرشدگی، افزایش می‌یابد؛ همچنین فرکانس نوسان با افزایش تعداد دور و کاهش طول کل لوله حرارتی نوسانی، افزایش می‌یابد.

کاربرد صنعتی لوله‌های حرارتی نوسانی با محدودیت‌هایی از جمله محدودیت ابعادی بخش گرم و سرد، محدودیت فشار داخلی لوله‌ها و... است. به‌عنوان مثال در کولینگ‌های موتورهای الکتریکی طراحی شده از لوله حرارتی نوسانی، ثابت بودن ابعاد

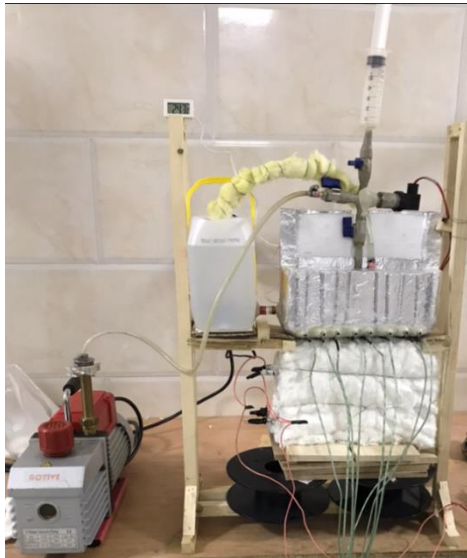
هارشال گمیت و همکاران [۱۲] به بررسی تجربی تأثیر نسبت پرشدگی و شار حرارت ورودی بر عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی با استفاده از لوله حرارتی نوسانی با قطر داخلی ۲/۱۵ میلی‌متر پرداختند. آن‌ها از آب به‌عنوان سیال عامل در نسبت پرشدگی‌های حجمی ۴۰، ۵۰ و ۶۰٪ تحت حرارت ورودی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ وات پرداختند. طبق مشاهدات آن‌ها سیستم با دمای پایین‌تر برای همان شار حرارتی ورودی، عملکرد بهتری دارد. همچنین اختلاف دمای بین حالت پایدار اواپراتور و کندانسور با افزایش شار حرارتی ورودی، افزایش می‌یابد. طبق نتایج آن‌ها برای مقادیر حرارتی ورودی یکسان، با افزایش نسبت پرشدگی مدت‌زمان رسیدن به حالت پایداری نیز افزایش می‌یابد. طبق مشاهدات آن‌ها سیستم در کمترین نسبت پرشدگی و بیش‌ترین حرارت ورودی، بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد.

طبق مشاهدات تجربی لوئیس دیاگو فونسکا و همکاران [۱۳] پس از انجام ۵۲ آزمایش مختلف در طیف وسیعی از نسبت‌های پرشدگی، توان حرارتی و زاویه نسبت به افق با سیال عامل نیتروژن در لوله حرارتی نوسانی با ۴۰ لوله موازی، گرانش تأثیر به‌سزایی در عملکرد لوله حرارتی حتی با تعداد دور زیاد، دارد.

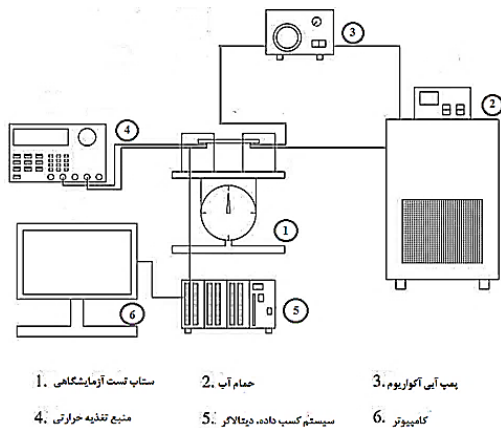
ام زوفار و همکاران [۱۴] به مطالعه عددی و تجربی عملکرد لوله حرارتی نوسانی ۴ دور پرداختند. طبق مشاهدات آن‌ها افزایش ویسکوزیته سیال عامل مانع انتقال مایعات می‌شود، بنابراین مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد.

استفاده از انرژی‌های طبیعی به‌جای سوخت‌های فسیلی امروزه توجه دانشمندان دنیا را به خود جلب کرده است. یکی از این انرژی‌های در دسترس انرژی خورشیدی است. کاربرد لوله‌های حرارتی نوسانی با توجه به ساختار ساده و ظرفیت بالای انتقال حرارت آن‌ها به‌عنوان جاذب انرژی خورشیدی توسط رونگ جی زو و همکاران ۵۸ مورد بررسی تجربی قرار گرفت. در همین راستا هادی کارگر شریف‌آباد و همکاران [۱۵] به بررسی تجربی استفاده از لوله‌های حرارتی نوسانی در مقیاس بزرگ بر عملکرد حرارتی آبگرم کن خورشیدی صفحه تخت تحت اثر پارامتر طول اواپراتور، نسبت پرشدگی، زاویه شیب و دبی پرداختند. آن‌ها اعلام کردند، علیرغم اثر منفی زیاد بودن طول اواپراتور در کاربردهای معمولی، در آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی با افزایش طول اواپراتور لوله حرارتی، دمای آب

لوله‌ها تا پایان آزمایش یک حرکت گردشی را ایجاد می‌کند. آب‌خنک کننده بخش کندانسور توسط یک پمپ در یک سیکل بسته به‌طور مداوم در حال گردش است.



شکل ۱ - دستگاه آزمایش



شکل ۲ - نمودار جریان فرآیند Process flow diagram

به‌منظور تأمین گرمای موردنیاز در بخش اوپراتور از یک کوره حرارتی القایی متشکل از سیم‌های المنت حرارتی (کروم-نیکل) عبور داده‌شده از داخل صفحات سرامیکی استفاده‌شده است. دیواره‌های کوره حرارتی القایی از جنس ورق‌های گالوانیزه باقابلیت تنظیم ارتفاع به‌منظور مهار صفحات سرامیکی داخلی و بررسی طول‌های مختلف اوپراتور ساخته شده است. به‌منظور اعمال بارهای حرارتی مختلف به بخش

محفظه موتور الکتریکی مربوطه که درواقع همان منبع حرارتی بخش اوپراتور لوله حرارتی نوسانی محسوب می‌شود، یک محدودیت ابعادی محسوب می‌شود.

تغییر ابعاد اوپراتور بر دیگر پارامترهای عملکردی لوله حرارتی نوسانی نیز تأثیر می‌گذارد. لذا در این پژوهش به بررسی تأثیر نسبت پرشدگی حجمی و نسبت طول ناحیه اوپراتور به کندانسور بر مقاومت حرارتی لوله‌ی حرارتی نوسانی باهدف شناخت رفتار حرارتی لوله حرارتی نوسانی خواهیم پرداخت.

۲- شرح سامانه و روند انجام آزمایش

۲-۱- سامانه آزمایشی

دستگاه آزمایش لوله حرارتی طراحی‌شده شامل سه بخش اساسی اوپراتور، آدیباتیک و کندانسور است. در این پژوهش، از لوله‌ی مسی با قطرهای داخلی و خارجی به ترتیب ۲/۴ و ۳ میلی‌متر به‌صورت حلقه بسته با اندازه کلی ۳×۲۱۰×۲۰۰ میلی‌متر و تعداد ۴ دور استفاده‌شده است. ارتفاع کلی دستگاه ۲۰۰ میلی‌متر است که ارتفاع بخش‌های اوپراتور، آدیباتیک و کندانسور در نسبت طول ۱، به ترتیب برابر با ۶۰، ۸۰، ۶۰ است. با افزایش نسبت طول اوپراتور به کندانسور با توجه به ثابت ماندن طول لوله‌ها در بخش کندانسور، طول لوله‌ها در بخش اوپراتور افزایش و در بخش آدیباتیک کاهش می‌یابد. دستگاه آزمایش پژوهش حاضر مطابق شکل ۱ است.

تأثیر پارامترهای نسبت پرشدگی حجمی در ۵ سطح ۰/۸، ۰/۷۰، ۰/۶۰، ۰/۵۰، ۰/۴۰ و نسبت طول لوله‌های بخش اوپراتور به لوله‌های بخش کندانسور نیز در ۵ نسبت ۱/۵، ۱/۲۵، ۱/۱، ۰/۷۵، ۰/۵ در سه نسبت توان حرارتی ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰ وات بر ضریب مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی مورد بررسی تجربی قرارگرفته است.

به‌منظور ایجاد خلأ با فشار معین در لوله حرارتی نوسانی قبل از تزریق سیال عامل، لوله حرارتی نوسانی توسط پمپ خلأ باقابلیت خلأ نهایی ۰/۸ بار به مدت ۳۰ دقیقه برای هر آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه‌گیری میزان فشار در طول آزمایش از فشارسنج استفاده می‌شود که به‌واسطه شیر سه‌راهی به لوله حرارتی نوسانی متصل شده است.

این سیستم به‌صورت یک سیکل بسته عمل می‌کند. سیال عامل در لوله‌ی حرارتی نوسانی به‌صورت پیوسته در

$$Q_{in} = VI \quad (۱)$$

در پژوهش حاضر فرض آدیباتیک کامل برابر توان مصرف شده توسط المنت است.

۳-۲- مقاومت حرارتی

برای مقایسه عملکرد حرارتی در حالات مختلف از مفهوم مقاومت حرارتی استفاده می شود که تعریف آن به صورت زیر است:

$$R = \frac{T_{evp} - T_{cond}}{Q_{in}} \quad (۲)$$

دماها از میانگین گیری دمای ترموکوپل های نصب شده در قسمت اوپراتور و کندانسور به دست می آید.

۴- عدم قطعیت

عدم قطعیت ترکیبی استاندارد برای هر پارامتر، وابسته به عدم قطعیت هر متغیر مطابق با رابطه (۳) است:

$$U_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial V_1} UV_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial V_2} UV_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial V_n} UV_n\right)^2} \quad (۳)$$

برای محاسبه عدم قطعیت توان و مقاومت حرارتی از رابطه عدم قطعیت ترکیبی استاندارد استفاده شده است. عدم قطعیت استاندارد برای توان حرارتی و مقاومت حرارتی مطابق رابطه (۳) و با استفاده از روابط (۱)، (۲) به صورت زیر حاصل می شود.

$$u_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial V} u_v\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I} u_i\right)^2} = \sqrt{I^2 U_V^2 + V^2 U_I^2} \quad (۴)$$

$$= \sqrt{(0.71)^2 (1)^2 + (142)^2 (0.01)^2} = 1.58$$

$$u_{Re} = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial T_e} u_{T_e}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial T_c} u_{T_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial Q_{in}} u_Q\right)^2} \quad (۵)$$

اوپراتور، از دستگاه دیمر با قابلیت تنظیم ولتاژ با دقت ۱ وات استفاده شده است. جهت اندازه گیری میزان جریان عبوری از سیم های المنت از آمپر متر چنگکی با دقت ۰/۱ آمپر استفاده شده است. برای جلوگیری از اتلاف حرارتی از این ناحیه و همچنین ناحیه آدیباتیک، این نواحی به وسیله پشم سرامیک به خوبی عایق شده است. در این پژوهش ۱۶ ترموکوپل نوع k به منظور ثبت دما استفاده شده است که در قسمت کندانسور و اوپراتور هر کدام ۸ ترموکوپل مطابق شکل، به صورت تماسی به لوله حرارتی نوسانی متصل شده است. دماها توسط داده بردار مدل آدام با دقت اندازه گیری ۰/۱ درجه سانتی گراد در هر یک ثانیه ثبت و ذخیره می شوند. از آب مقطر به عنوان سیال عامل استفاده شده است.

۲-۲- روند انجام آزمایش ها

پس از ساخت دستگاه و تخلیه لوله حرارتی نوسانی، سیال عامل از طریق سرنگ متصل به شیر سه راهی به داخل کشیده شده، سپس ورودی های سامانه را جهت جلوگیری از نفوذ هوا می بندیم. جریان آب خنک کننده بخش کندانسور با روشن کردن پمپ آب برقرار می گردد. با کمک دیمر توان حرارتی ورودی را تنظیم و با اعمال توان حرارتی سیستم شروع به کار می کند. در هر آزمایش زمانی در نظر گرفته می شود تا دستگاه به حالت شبه پایا برسد، بعد از مدتی که دمای اوپراتور و کندانسور به حالت نوسانی نسبتاً پایدار رسید، دمای قسمت های اوپراتور و کندانسور با فرکانس مشخص برای مدت معینی ثبت می گردد. زمان رسیدن به حالت شبه پایا برای هر آزمایش بسته به شرایط حاکم بر آن متفاوت است که در شکل شماره ۵ به تفکیک ارائه شده است. در این پژوهش برای کاهش زمان و تحلیل جامع به طراحی آزمایش ها با روش سطح پاسخ پرداخته شده است. در ادامه روابط حاکم، معادلات عدم قطعیت و بررسی آن، صحت سنجی نتایج خروجی از نرم افزار دیزاین اکسپرت و نتایج پژوهش حاضر ارائه شده است.

۳- روابط حاکم

۳-۱- توان حرارتی ورودی

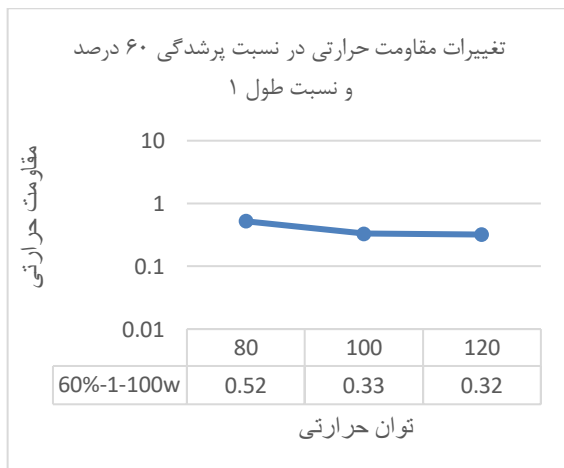
مقدار گرمای ورودی در بخش اوپراتور برابر توان اعمالی به کوره حرارتی المنتی است که با توجه به منبع الکتریکی تأمین حرارت، از رابطه زیر محاسبه می شود

به‌منظور طراحی آزمایش‌ها برای تحلیل جامع و بهینه استفاده شده است.

۵-۱- بررسی اعتبار سنجی عددی و همگرایی ضریب مقاومت حرارتی برحسب زمان

شکل ۲ تغییرات مقاومت حرارتی برحسب توان ورودی در نسبت پرشدگی ۶۰ درصد و نسبت طول ۱ را نشان می‌دهد. شکل ۳ نتایج آزمایشگاهی لوله حرارتی نوسانی مورد مطالعه پژوهش تی سنگ و همکاران [۹] با سیال عامل آب تحت توان حرارتی ۲۰-۱۴۰ وات در حالت غیریکنواخت و متناوب و با اعمال فشار خلأ کمتر از 10^{-4} تور را ارائه می‌دهد. به دلیل اختلافات موجود در اثر یکسان نبودن عوامل مؤثر همچون قطر داخلی، فشار تخلیه و شرایط آزمایشگاهی و عدم یکسان بودن دستگاه‌ها انتظار اختلاف عددی در نتایج است؛ ولی مشاهده می‌شود، تغییرات مقاومت گرمایی با افزایش توان حرارتی با روند یکسانی تغییر می‌کنند.

مطابق شکل ۵ مشاهده می‌شود که پس از گذشت زمانی معین برای هر آزمایش، بسته به شرایط حاکم بر آن؛ مقاومت حرارتی حول یک عدد نوسان می‌کند و همگرا می‌شود؛ همچنین مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت پرشدگی و نسبت طول اواپراتور به کندانسور در حین ثابت ماندن دیگر شرایط، زمان شروع نوسانات حرارتی کاهش می‌یابد.



شکل ۳- مقاومت حرارتی برحسب توان حرارتی پژوهش حاضر

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{Q}\right)^2 (u_{T_e})^2 + \left(\frac{-1}{Q}\right)^2 (u_{T_c})^2 + \left(\frac{-T_e + T_c}{Q^2}\right)^2 (u_Q)^2} = 0.0087$$

محاسبات برای آزمایش با نسبت پرشدگی ۶۰٪، توان حرارتی ۱۰۰ وات و نسبت طول یک در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- عدم قطعیت توان ورودی

عدم قطعیت				توان حرارتی	ولتاژ	شدت جریان
توان حرارتی (W)	جریان (A)	ولتاژ (V)	توان حرارتی (W)			
۱/۵۸	۰/۰۱	۰/۱	۰/۷۱	۱۴۲	۱۰۰	

جدول ۲- عدم قطعیت مقاومت گرمایی

میانگین دمای (°C)	کندانسور	۶۳/۶۰
مقاومت حرارتی (K/W)	اواپراتور	۹۶/۵۱
۰/۳۳		
توان حرارتی	۱/۵۸	
عدم قطعیت	دمای کندانسور	۰/۵
	دمای اواپراتور	۰/۵
	مقاومت حرارتی	۰/۰۰۸۷

جدول ۳- دقت تجهیزات اندازه‌گیری

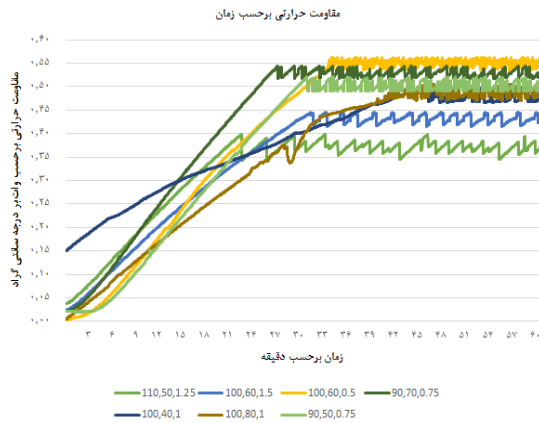
ابزار	دقت	ابزار اندازه‌گیری	دقت
دیمر-ولتاژ	±0/1 V	سرنگ تزریق	±5 cc
کلمپ متر-جریان	±0/01 A	ترموتر	±0.1 °C
ترموکوپل نوع k	±0/1 °C		

دقت تجهیزات اندازه‌گیری نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

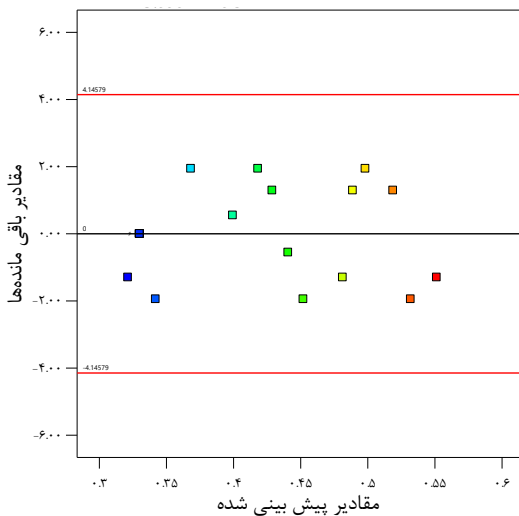
۵- نتایج و بحث

در این پژوهش از دماهای ۸ نقطه در کندانسور، ۸ نقطه در اواپراتور که توسط ترمومترها در زمان ۳۶۰۰ ثانیه به فاصله هر یک ثانیه ثبت شده، جهت محاسبه مقاومت حرارتی هر حالت استفاده شده است. در این پژوهش از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت

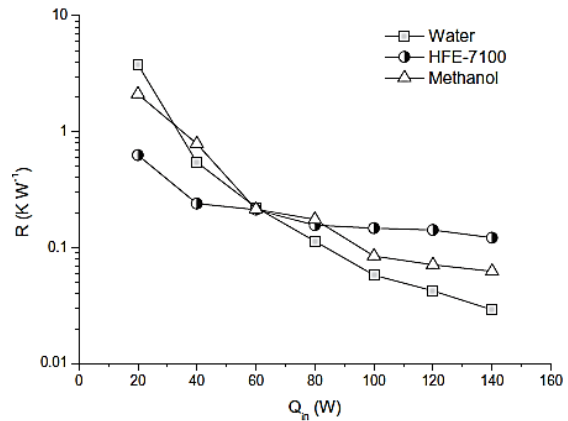
شود، شیب نمودار نسبت به توان حرارتی تندتر است؛ در واقع مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی نسبت به این پارامتر حساس تر است. در نمودار مربوط به دو پارامتر نسبت پرشدگی حجمی و نسبت طول اوپراتور به کندانسور، نقطه عطف مشاهده می شود که تا قبل از آن رابطه مقاومت حرارتی با پارامتر مذکور به صورت معکوس و پس از آن مستقیم خواهد بود.



شکل ۵ - مقاومت حرارتی بر حسب زمان به ازای آزمایش های صورت گرفته



شکل ۶ - مقادیر باقی مانده در برابر مقادیر پیش بینی شده



شکل ۴ - مقاومت حرارتی بر حسب توان حرارتی پژوهش تی سنگ و همکاران [۹]

۲-۵-۲- تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت

۲-۵-۱- صحت سنجی مدل پیشنهادی نرم افزار دیزاین اکسپرت

برای حصول اطمینان از کفایت داده های آماری و اطمینان از صحت نتایج خروجی نرم افزار دیزاین اکسپرت به اختصار دو نمودار مقادیر باقی مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده که فرض واریانس کفایت را مورد سنجش قرار می دهد. مطابق شکل ۶، نمودار مانده مقادیر بیرونی به شماره آزمایش که در واقع مبین میزان انحراف انحراف معیار از مقدار پیش بینی شده، پس از حذف یک نقطه است، در شکل ۷ مشاهده می شود. در دو نمودار برای شناسایی بهتر نقاط غیرطبیعی حدود کنترل به شکل دو خط آورده شده است.

۲-۲-۵- نمودار پرشیدگی

نمودار پرشیدگی^۱ یا اغتشاشی مدل در نقطه مرجع در شکل ۸ نیز ارائه شده است. این نمودار مقایسه اثر همه پارامترها در یک نقطه خاص از فضای طراحی را امکان پذیر می کند. شیب یا انحنای تند یک پارامتر نشان می دهد که پاسخ به این پارامتر حساس است. خط نسبتاً صاف، غیرحساس بودن پاسخ را به تغییر در آن عامل را نشان می دهد. در این نمودار اثر برهم کنش ها قابل مشاهده نیست. همان طور که ملاحظه می

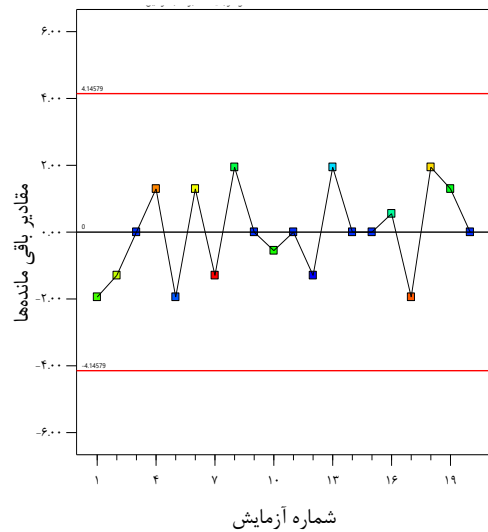
^۱ Perturbation

رابطه پیشنهادی درجه ۲ به ازای مقادیر در فرم کد در بازه‌ی (۲ و -۲) و به ازای مقادیر حالت حقیقی ارائه شده است.

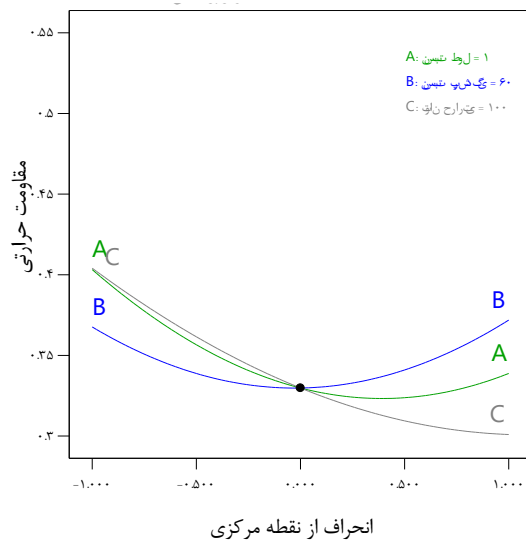
جدول ۴- مطلوبیت مدل درجه ۲ برای برازش داده‌ها

ردیف	جمع مربعات آزاد	درج ه میانگین مربعات	مقادیر F	مقادیر p
مدل	۱۲۱۵	۹	۴۳۲/۷۳	۰/۰۰۰۱
A	۱۵۰	۱	۴۸۰/۰۰	۰/۰۰۰۱
B	۱۰۰۰۱	۱	۱۸/۰۰	۰/۰۰۱۷
C	۰۳۹۰	۱	۱۲۴/۰۰	۰/۰۰۰۱
AB	۱۰۰۱۰	۱	۳۲۴/۰۰	۰/۰۰۰۱
AC	۱۰۰۰۱	۱	۳۶/۰۰	۰/۰۰۰۱
BC	۱۰۰۰۱	۱	۳۶/۰۰	۰/۰۰۰۱
A ²	۰۴۰۲	۱	۱۲۸/۱۴	۰/۰۰۰۱
B ²	۰۳۷۸	۱	۱۲۰/۱۴	۰/۰۰۰۱
C ²	۰۱۲۷	۱	۴۰۷/۱۴	۰/۰۰۰۱
باقیما	۱۰۰۰۰	۱۰	۰/۵	۰/۰۰۰۰۳۱۲
نده	۰	۵	۰/۰	۰/۰۰۰۰۶۲۵
عدم تطابق	۰	۵	۰/۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰
خطای خالص	۰	۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰

مطابق نتایج و نمودارها مدل پیشنهادی برای برازش داده‌ها از مطلوبیت خوبی برخوردار است. مطابق نتایج اثرگذارترین جملات در مدل ارائه شده به ترتیب A², C, B² و A می‌باشند. مطالعه تجربی ۳ پارامتر ذکر شده مؤثر بر مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی به روش طراحی آزمایش‌ها با استفاده از



شکل ۷ - نمودار مقادیر باقی مانده برحسب آزمایش‌های صورت گرفته



شکل ۸ - نمودار پَرشیدگی مدل

۵-۲-۳-مدل پیشنهادی

مطابق نتایج و نمودارهای ارائه شده مدل مطلوبیت خوب و کافی برای برازش مقادیر را دارا است. در ادامه مطلوبیت مدل درجه ۲ برای برازش داده‌ها در جدول و مدل‌های پیشنهادی برحسب درجه اهمیت پارامترها بر تابع هدف که همان مقاومت حرارتی است، ارائه شده است.

مقاومت حرارتی کاهش و سپس با افزایش بیشتر نسبت طول و درصد پرشدگی، مقدار مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد.

با افزایش درصد پرشدگی بیش‌تر از میزان بهینه، فضای خالی لوله به حدی می‌رسد که حرکت نوسانی سیال را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نوسانات آزاد مختل می‌شود.

همچنین با افزایش نسبت طول اواپراتور به کندانسور، درواقع با افزایش طول اواپراتور در حین ثابت ماندن طول کل، طول آدیاباتیک کاهش می‌یابد. در این حالت نیز حالت حدی زمانی به وجود می‌آید که طول آدیاباتیک به حدی کم شود که زمان یکنواختی دما و گذر از ناحیه اواپراتور به کندانسور را تحت تأثیر قرار دهد.

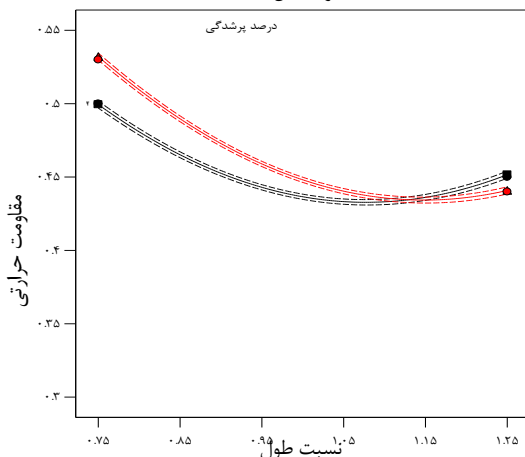
توان حرارتی ۱۰۰ وات

مطابق شکل ۱۰ در این حالت روند تغییرات مانند حالت قبل است. بهترین عملکرد حرارتی درواقع کمترین مقدار مقاومت حرارتی در نسبت طول ۱/۱۵ و درصد پرشدگی ۷۰٪ اتفاق می‌افتد.

توان حرارتی ۱۱۰ وات

مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش توان به ۱۱۰ وات، تأثیر عوامل نسبت طول و درصد پرشدگی کم‌تر شده و شیب هردو نمودار کم‌تر می‌شود همچنین با توجه به شکل‌های ۹ تا ۱۱ نیز می‌توان مشاهده کرد که مقدار مقاومت حرارتی با افزایش توان حرارتی به‌طور کلی کاهش پیدا کرده است. علت این امر آن است که باکم بودن درصد پرشدگی با افزایش توان حرارتی، سیال اجازه حرکت آزادتری دارد.

اثر متقابل



شکل ۹- تغییرات ضریب مقاومت حرارتی برحسب نسبت طول و پرشدگی در توان حرارتی ۹۰ وات

روش سطح پاسخ مرکزی و ارائه مدل با برازش بالای داده‌های تجربی نوآوری اصلی این پژوهش است.

جدول ۵- مدل پیشنهادی درجه ۲ برای مقاومت حرارتی لوله نوسانی آزمایشگاهی برحسب پارامترهای مورد مطالعه

R ^{1.23} =		Resistance ^{1.23} =	
+0/2555		+4/85148	
-0/0315	A	-1/32366	Length
+0/0021	B	-0/037782	Filling
-0/0499	C	-0/049891	Power
			Length
-0/0114	AB	-0/004550	*
			Filling
			Length
+0/0046	AC	+0/001858	*
			Power
			Filling
-0/0038	BC	-0/000038	*
			Power
+0/0402	A ²	+0/642407	Length ²
+0/0386	B ²	+0/000386	Filling ²
+0/0227	C ²	+0/000227	Power ²

۵-۲-۴- تغییرات ضریب مقاومت حرارتی در سه سطح ثابت توان حرارتی برحسب نسبت پرشدگی و نسبت طول اواپراتور به کندانسور

در این قسمت تغییرات مقاومت حرارتی برحسب دو پارامتر نسبت طول و درصد پرشدگی لوله در توان‌های اعمالی مختلف ارائه شد. مطابق شکل‌های ۹ تا ۱۱ نیز مشاهده می‌شود که مقاومت حرارتی با دو پارامتر نسبت طول و درصد پرشدگی ابتدا نسبت عکس دارد و پس از گذر از نقطه بحرانی نسبت مستقیم دارد.

همچنین با توجه به مقایسه‌ی محدوده‌ی مقدار مقاومت حرارتی دیده می‌شود که با افزایش توان حرارتی، مقدار مقاومت حرارتی به‌طور کلی کاهش می‌یابد. درواقع با افزایش توان حرارتی تأثیر منفی پارامترهای دیگر تضعیف می‌شود. توان حرارتی ۹۰ وات

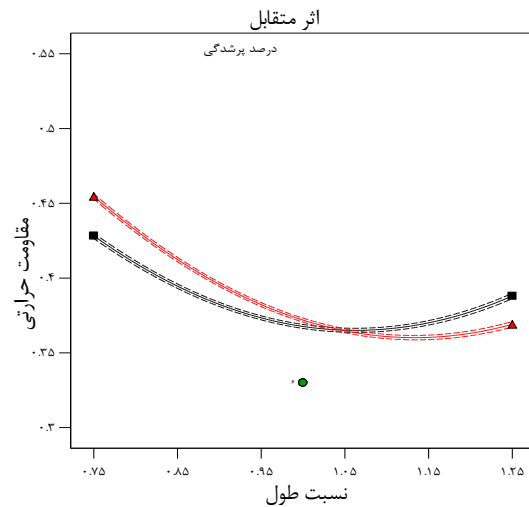
همان‌طور که در توان ثابت ۹۰ وات در شکل ۹ مشاهده می‌شود، ابتدا با افزایش نسبت طول و درصد پرشدگی، مقدار

گردش مایع در لوله‌ها به کمک نیروی شناوری انتقال حرارت محسوس انجام می‌شود. در این حالت به علت عدم وجود ذرات بخار، انتقال حرارت نهان به واسطه تبدیل فاز بخار مایع صورت نمی‌گیرد.

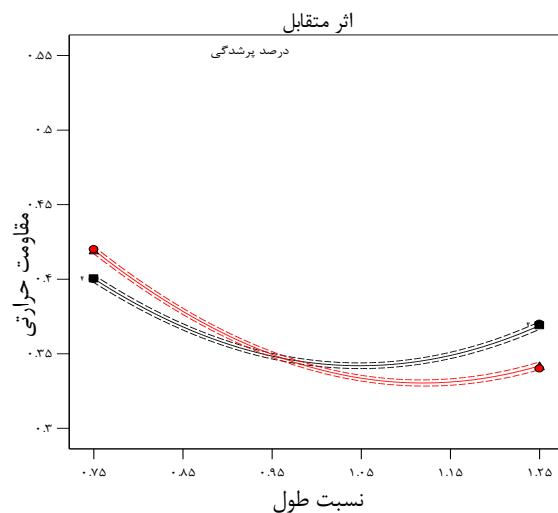
طبق پژوهش‌های پیشین [۲۰]، یک درصد پرشدگی بهینه برای هر سیستم با توجه به ویژگی‌های آن وجود دارد. همان‌طور که مشاهده شد در نسبت پرشدگی‌های پایین، افزایش توان حرارتی با شیب کمتری باعث کاهش مقاومت حرارتی می‌شود. در واقع در پرشدگی‌های پایین میزان حباب‌های فاز بخار به قدری کم است که افزایش توان حرارتی نمی‌تواند جبران کاهش نوسانات به علت کمی تعداد حباب‌ها را انجام دهد. با افزایش پرشدگی تا میزان حدی، میزان حباب‌ها افزایش یافته در این حالت با افزایش توان حرارتی شاهد کاهش چشمگیر مقاومت حرارتی هستیم. در این حالت تأثیر مثبت پرشدگی و توان حرارتی هم‌راستا است. با افزایش بیشتر پرشدگی فاز مایع در سامانه غالب می‌شود و منجر به تضعیف نوسان لازم برای شروع گردش می‌شود. فضای کوچک بخار باعث تلاطم کمتری می‌شود، در نتیجه باعث کاهش محرکه لازم برای پمپاژ سیال عامل منتج می‌شود. مطابق نتایج تحقیقات ناندان ساها و همکاران [۲۱] به وضوح دیده می‌شود که یک درصد پرشدگی بهینه برای هر سامانه وجود دارد که حداقل مقاومت حرارتی را می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود، اگرچه مقاومت حرارتی با افزایش توان حرارتی کاهش می‌یابد، نرخ کاهش به تدریج کمتر می‌شود.

۵-۲-۶- تغییرات ضریب مقاومت حرارتی تحت تأثیر نسبت طول اواپراتور به کندانسور

شناخت و توصیف کامل شرایط حاکم بر ویژگی‌های لوله‌های حرارتی نوسانی به دلیل پارامترهای زیادی که بر عملکرد آن‌ها تأثیر می‌گذارد، بسیار دشوار است. طول مسیر جریان می‌تواند یکی از مشخصه‌های تأثیرگذار بر انتقال حرارت و حرکت نوسانی بخار و مایع درون لوله حرارتی نوسانی باشد. لازم به ذکر است که برای حجم‌های مساوی از مایع اشباع و بخار، جرم مایع اشباع به‌طور قابل توجهی بیشتر است. در مقیاس حجم برابر، آنتالپی خالص حمل شده توسط بخار با



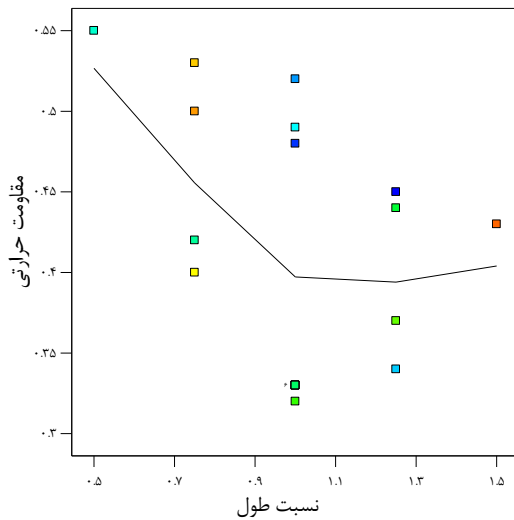
شکل ۱۰- تغییرات ضریب مقاومت حرارتی بر حسب نسبت طول و پرشدگی در توان حرارتی ۱۰۰ وات



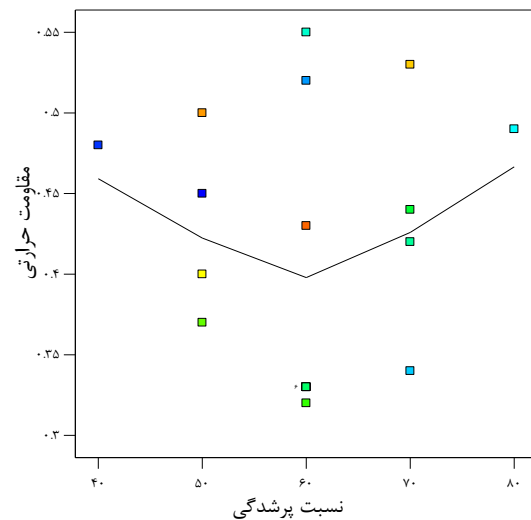
شکل ۱۱- تغییرات ضریب مقاومت حرارتی بر حسب نسبت طول و پرشدگی در توان حرارتی ۱۱۰ وات

۵-۲-۵- تغییرات ضریب مقاومت حرارتی تحت تأثیر نسبت پرشدگی

بدیهی است که یک لوله حرارتی نوسانی دارای دو انتهای عملیاتی نسبت به پرشدگی است. در نقطه‌ی پرشدگی ۰٪ یک ساختار لوله حرارتی نوسانی با لوله‌های خالی و بدون سیال عامل است. در این حالت انتقال حرارت تنها هدایت خالص از طریق لوله‌ها است و انتظار می‌رود مقاومت حرارتی بالا باشد. یک لوله‌ی حرارتی نوسانی با ۱۰٪ پرشدگی مشابه یک ترموسیفون تک فاز عمل می‌کند. در این حالت به واسطه



شکل ۱۳- تغییرات ضریب مقاومت حرارتی آزمایش‌های انجام‌شده بر حسب نسبت طول



شکل ۱۴- تغییرات ضریب مقاومت حرارتی آزمایش‌های انجام‌شده بر حسب نسبت پرشدگی

۶- نتیجه‌گیری

مطالعه تجربی به روش طراحی آزمایش‌ها با روش سطح پاسخ مرکزی به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت با هدف بررسی تأثیر پنج سطح از پارامترهای نسبت پرشدگی حجمی و نسبت طول اواپراتور به کندانسور در سه سطح توان حرارتی بر عملکرد حرارتی لوله حرارتی نوسانی صورت گرفته است.

نتایج حاکی از آن است که:

مقاومت حرارتی در ابتدا با پارامتر نسبت پرشدگی و نسبت طول اواپراتور به کندانسور نسبت معکوس دارد و پس از گذر از نقطه عطف نسبت مستقیم دارد.

افزایش توان حرارتی در تمام سطوح نسبت پرشدگی و نسبت طول اواپراتور به کندانسور، عملکرد کلی سیستم را بهبود بخشیده و تأثیر منفی نسبت پرشدگی و نسبت طول را کاهش می‌دهد.

در حالت میزان پرشدگی ۶۰٪ مشاهده می‌شود که در توان های حرارتی پایین نیز لوله حرارتی عملکرد مطلوبی دارد.

با افزایش اثرات منفی افزایش توان نسبت پرشدگی و نسبت طول اواپراتور به کندانسور، تأثیر مثبت توان حرارتی کاهش می‌یابد.

کوتاه‌ترین زمان شروع نوسانات مربوط به حالتی است که در آن توان حرارتی، نسبت پرشدگی و نسبت طول اواپراتور به

در نظر گرفتن گرمای نهان به‌طور قابل توجهی کمتر از آنتالپی خالص محسوس حمل شده توسط مایع است. بنا بر تفسیر فوق برای ابعاد لوله حرارتی نوسانی بسته به شرایط کاری آن، حالت بهینه‌ای وجود دارد که بتواند الزامات زیر را برآورده کند:

حباب‌های بخار باید فرصت کافی برای انتقال تمام گرمای نهان خود را در بخش کندانسور داشته باشند.

مقدار کافی سیال در فاز مایع برای رسیدن به انتقال حرارت محسوس وجود داشته باشد. درواقع طول کندانسور کوتاه‌تر به سیال عامل داغ اجازه بیشتری برای حرکت از اواپراتور به سمت کندانسور را می‌دهد.

از طرفی طول اواپراتور بزرگ در توان حرارتی و پرشدگی بالا، مقدار زیادی بخار تولید می‌شود که با توجه به کوتاه‌تر بودن کندانسور، سیال عامل خنک‌کننده کافی وجود نداشته باشد و بخارات محبوس در بخش اواپراتور باعث افزایش مقاومت حرارتی شود.

در این تحقیق طول کل لوله حرارتی نوسانی ثابت بوده و با افزایش طول اواپراتور، طول آدیاباتیک کمتر می‌شود که درواقع مسیر حرکت سیال کوتاه‌تر شده و تأثیر مثبت افزایش طول اواپراتور با تأثیر مثبت کاهش طول آدیاباتیک هم‌راستا است.

- [7] Yang H, Khandekar S, Groll, M (2019) Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders. *Int J Therm Sci.* 48(4):815-824
- [8] Liu J, Shang F, Liu D (2012) Experimental Study on Enhanced Heat Transfer Characteristics of Synergistic Coupling between the Pulsating Heat Pipes. *Energy Procedia.* 16:1510-1516
- [9] Tseng CY, Yang KS, Chien KH, Jeng MS, Wang CC (2014) Investigation of the performance of pulsating heat pipe subject to uniform/alternating tube diameters. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 54:85-92
- [10] Qu J, Li X, Cui Y, Wang Q (2017) Design and experimental study on a hybrid flexible oscillating heat pipe. *Int J Heat Mass Trans.* 107:640-645
- [11] Betancur-Arboleda LA, Flórez Mera JP, Mantelli M (2020) Experimental study of channel roughness effect in diffusion bonded pulsating heat pipes. *Appl. Therm. Eng.* 166.
- [12] Gamit H, More V, Mukund B, Mehta HB (2015) Experimental Investigations on Pulsating Heat Pipe. *Energy Procedia.* 75:3186-3191.
- [13] Fonseca LD, Miller F, Pfothenauer J (2018) Experimental heat transfer analysis of a cryogenic nitrogen pulsating heat Pipe at various liquid fill ratios. *Appl. Therm. Eng.* 130:343-353.
- [14] Zufar M, Gunnasegaran P, Kumar HM, Ng CK (2020) Numerical and experimental investigations of hybrid nanofluids on pulsating heat pipe performance. *Int J Heat Mass Trans.* 146.
- [۱۵] کارگر شریف آباد ه، شفیع م ب، طیبی رهنی م، عباسپور م (۲۰۱۳) بررسی تجربی استفاده از لوله‌های حرارتی نوسانی در مقیاس بزرگ بر عملکرد حرارتی آبگرمکن خورشیدی صفحه تخت مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، ۲(۱): ۵۷-۶۶.
- [16] Wang J, Ma H, Zhu Q (2015) Effects of the evaporator and condenser length on the performance of pulsating heat pipes. *Appl. Therm. Eng.* 91:1018-1025.
- [17] Xu D, Li L, Liu H (2015) Experimental investigation on the thermal performance of helium based cryogenic pulsating heat pipe. *Exp Therm Fluid Sci.* 70.
- [18] Zhang D, He Z, Guan J, Tang S, Shen C (2022) Heat transfer and flow visualization of pulsating heat pipe with silica nanofluid. *Exp Std Inter J Heat Mass Trans.* 183:122100.
- [19] Yasuda Y, Nabeshima F, Horiuchi K, Nagai H (2022) Visualization of the working fluid in a flat-plate pulsating heat pipe by neutron radiography. *Int J Heat Mass Trans.* 185:122336.
- کندانسور به ترتیب برابر با ۹۰ وات، ۷۰٪ و ۷۵٪ باشد که پس از حدود ۲۷ دقیقه از شروع گرمایش نوسانات آغاز می‌شود.
- ترتیب بیشترین اثرگذاری پارامترهای مورد مطالعه بر مقاومت حرارتی به ترتیب به توان حرارتی، نسبت طول و درصد پرشدگی متعلق است.
- ۷- فهرست علائم**
- | | |
|---|------------|
| توان حرارتی ورودی، Watt | Q_{in} |
| ولتاژ، Volt | V |
| جریان، Ampere | I |
| مقاومت حرارتی، $\frac{^{\circ}C}{watt}$ | R |
| دمای اواپراتور، $^{\circ}C$ | T_{evp} |
| دمای کندانسور، $^{\circ}C$ | T_{cond} |
| عدم قطعیت | U_p |
| عدم قطعیت توان حرارتی | u_p |
| عدم قطعیت مقاومت حرارتی | u_{Re} |
- مراجع**
- [1] Alammr AA, Al-Dadah RK, Mahmoud SM (2019) Numerical investigation of effect of fill ratio and inclination angle on a thermosiphon heat pipe thermal performance. *Appl. Therm. Eng.* 108: 1055-1065.
- [2] Mehrali M, Sadeghinezhad E, Azizian R, Akhiani AR, Latibari ST, Metselaar HSC (2020) Effect of nitrogen-doped graphene nanofluid on the thermal performance of the grooved copper heat pipe. *Energy Convers. Manag.* 118:459-473
- [3] Aly WI, Elbalsouny MA, El-Hameed HA, Fatouh M (2020) Thermal performance evaluation of a helically-micro-grooved heat pipe working with water and aqueous-Al₂O₃ nanofluid at different inclination angle and filling ratio. *Appl. Therm. Eng.* 110:1294-1304
- [4] Sadeghinezhad E, Mehrali M, Rosen MA, Akhiani AR, Latibari ST, Metselaar HSC (2019) Experimental investigation of the effect of graphene nanofluids on heat pipe thermal performance. *Appl. Therm. Eng.* 100:775-787
- [5] Xu Z, Zhang Y, Li B, Wang Y, Li Y (2018) The influences of the inclination angle and evaporator wettability on the heat performance of a thermosiphon by simulation and experiment. *Int J Heat Mass Trans.* 116:675-684
- [6] Charoensawan P, Terdtoon P (2018) Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes. *Appl. Therm. Eng.* 28(5-6):460-466

- [20] Sarangi RK, Swain A, Kar SP, Sekhar PC (2022) Modeling for liquid plug oscillation frequency and amplitude of Pulsating heat pipe. *Materials Today: Proceedings*. 49:372-377.
- [21] Saha N, Das P.K, Sharma P.K (2014) Influence of process variables on the hydrodynamics and performance of a single loop pulsating heat pipe. *Int J Heat Mass Trans*. 74:238-250.