

به ناع حقیقت وجود...





دانشکده مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تجربی رژیم جریان دوفازی و تأثیر آن بر عملکرد

لوله‌های حرارتی نوسانی

محمد حلیمی

استاد راهنما:

دکتر علی عباس نژاد

استاد مشاور:

دکتر محمود نوروزی

شهریور ۹۴

شماره: ۲۹۴، ۱۷۷
تاریخ: ۵ / ۷ / ۹۴
ویرایش:

باسمه تعالی



فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای محمد حلیمی اسفیدان به شماره دانشجویی ۹۲۰۵۵۰۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

بررسی تجربی رژیم جریان دوفازی و تأثیر آن بر عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی

که در تاریخ ۱۳۹۴/۶/۱۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: <u>بسیار</u> امتیاز: <u>۹۸,۷۸</u>)	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
--	------------------------------------	--------------------------------

۱- عالی (۲۰-۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸-۱۸/۹۹)

۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴-۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	علی عباس نژاد	استادیار	
۲- استاد مشاور	محمود نوروزی	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	احمد مددی	مربی	
۴- استاد ممتحن	محمدحسن کیهانی	استاد	
۵- استاد ممتحن	مصطفی کاهانی	استادیار	

رئیس دانشکده: امضاء



تقدیم ہے

پدر نزر کو اور و مادر مہربانم

تقدیر و تشکر:

تقدیر خود را با نام اوینی شروع می‌کنم که به صورت آشکار و نهان حمایت خود را از بنده‌ی کوچک خود در پیغ ساخته و مرکز مرا در راه رسیدن به حقیقت وجود نا امید نکرده و این نهایت امیدواریست.

در این دوره از زندگی که در پی افزودن علم کانیک به پرونده‌ی ذهنی خود بوده‌ام سعی بر این بوده که با انجام کاری تجربی بردانسته‌های تئوری خود جامه‌ی عمل پوشانم، باشد که این کار به عنوان قطره‌ای کوچک در دریای بی‌کران علم مؤثر واقع گردد.

در این دوره افراد زیادی مرا برای رسیدن به این هدف علمی یاری نموده‌اند، ابتدا بایستی قدر دان پدر و مادری عزیزتر از جان بود که مایه‌ی دل‌گرمی اینجانب در کل دوران زندگی هستند و تشکری بسیار ویژه از استادی دلسوز و کران‌قدر، جناب آقای دکتر عباس نژاد که با راهنمایی‌های خود، راه رسیدن به این هدف علمی را برای اینجانب هموار ساخت.

در پایان نهایت سپاس خود را تقدیم می‌کنم به تمامی اساتید دانشگده‌ی کانیک شاهرود به ویژه جناب آقای دکتر نوروزی، که زحمات زیادی در طول دوره‌ی کارشناسی ارشد برای رشد علمی اینجانب داشته‌اند.

محمد حلیمی

تعهد نامه

اینجانب محمد حلیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان "بررسی تجربی رژیم جریان دوفازی و تأثیر آن بر عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی" تحت راهنمایی دکتر علی عباس نژاد و مشاوره دکتر محمود نوروزی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «University of Shahrood» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده‌است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده‌است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده‌است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

با توجه به نیاز روزافزون صنعت برای انتقال حرارت بیشتر در فضایی کم، تحقیق در زمینه‌ی سیستم‌های انتقال حرارت دوفازی در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. لوله‌ی حرارتی نوسانی^۱ یک وسیله‌ی انتقال حرارت دوفازی است که می‌تواند به‌صورت حلقه‌باز^۲ و یا حلقه- بسته^۳ باشد که در زیرمجموعه‌ی لوله‌های حرارتی مرسوم (فتیله‌ای) قرار می‌گیرد. با توجه به فعل و انفعال‌هایی که در رژیم جریان داخل PHP اتفاق می‌افتد، می‌تواند چندین برار فلزاتی از قبیل مس و آلومینیوم حرارت را در یک اختلاف دمای کم انتقال دهد و همین امر باعث شده که از PHP به عنوان یک ابررسانا یاد شود.

یک PHP از یک لوله با تعدادی دور به صورت U شکل ساخته می‌شود و متشکل از ۲ قسمت اوپراتور و کندانسور بوده که یک ناحیه‌ی آدیاباتیک نیز می‌تواند به‌صورت دلخواه بین قسمت اوپراتور و کندانسور قرار بگیرد. مقدار حرارتی را که از قسمت اوپراتور به کندانسور منتقل می‌شود کاملاً وابسته به نوع رژیم جریان حاکم بر سیال عامل موجود در PHP بوده که این رژیم جریان نیز وابسته به پارامترهای زیادی از قبیل ساختار PHP، سیال عامل و پارامترهای ترموفیزیکی مربوط به آن، حرارت ورودی به قسمت اوپراتور و ... می‌باشد.

با توجه به اهمیت بالای رژیم جریان موجود در PHP در مقدار انتقال حرارت و مقاومت حرارتی آن که نشان‌دهنده‌ی میزان کارایی سیستم می‌باشد، در این کار به‌منظور بررسی رژیم جریان دوفازی و تأثیر آن بر عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی، با ساخت دو CLPHP از جنس پیرکس با قطر داخلی^۴ و قطر خارجی ۶ میلی‌متر آزمایش‌ها با استفاده از سیال‌های عامل اتانول، آب‌دیونیزه، نانوسیال مس و استون، در نسبت‌های پرشدگی^۴ ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد و در دو حالت افقی و عمودی انجام داده شد و

^۱ Pulsating heat pipe (PHP)

^۲ Open loop pulsating heat pipe (OLPHP)

^۳ Close loop pulsating heat pipe (CLPHP)

^۴ نسبت‌پرشدگی (Filling Ratio (FR)) به نسبت حجم سیال عامل به حجم کل سیستم اطلاق می‌گردد.

تأثیر نوع سیال عامل و ویژگی‌های ترموفیزیکی مربوط به آن، نسبت‌پرشدگی، تعداد دور، جاذبه، استفاده از نانوذرات در سیال عامل و حرارت ورودی به قسمت اوپراتور مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش باتوجه به نتایج بصری، به‌طور کلی ۳ نوع رژیم جریان را شاهد بودیم که هر کدام تأثیر متفاوتی در انتقال حرارت و کارایی سیستم داشتند. استفاده از نانوذرات مس و حضور جاذبه در حالت عمودی با تغییرات مثبتی که در رژیم جریان به‌وجود آوردند از طریق افزایش انتقال حرارت و کاهش دمای قسمت اوپراتور، باعث کاهش مقاومت حرارتی سیستم شدند، در مورد سایر سیال‌های عاملی که مورد استفاده قرار گرفت نیز با توجه به نسبت‌پرشدگی، ویژگی‌های ترموفیزیکی، تعداد دورهای CLPHP و سایر شرایط آزمایشگاهی بهترین شرایط کارکردی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: رژیم جریان دوفازی، لوله‌ی حرارتی نوسانی (PHP)، لوله‌ی حرارتی نوسانی

حلقه‌بسته (CLPHP)، نسبت‌پرشدگی، ویژگی‌های ترموفیزیکی، سیال عامل، مقاومت حرارتی

فهرست مطالب

ز.....	چکیده
ط.....	فهرست مطالب
ل.....	فهرست شکلها
س.....	فهرست جداول
ف.....	فهرست علائم
۱.....	فصل اول
۲.....	۱-۱- لوله‌های حرارتی
۲.....	۱-۱-۱- ساختار کلی و نحوه‌ی عملکرد لوله‌های حرارتی
۵.....	۲-۱-۱- مزایای لوله‌های حرارتی
۵.....	۳-۱-۱- گستره‌ی کاری لوله‌های حرارتی
۶.....	۲-۱- لوله‌های حرارتی نوسانی
۸.....	۱-۲-۱- سایر مشخصه‌های لوله‌های حرارتی نوسانی
۱۱.....	فصل دوم
۱۲.....	۱-۲- مقدمه
۱۲.....	۲-۲- مطالعات تجربی
۱۵.....	۱-۲-۲- لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه‌باز
۱۶.....	۲-۲-۲- لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه‌بسته
۲۵.....	۳-۲-۲- تأثیر نانوسیال بر عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی
۲۶.....	۴-۲-۲- تأثیر مشخصه‌های ترموفیزیکی بر عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی
۲۹.....	۵-۲-۲- لوله‌های حرارتی نوسانی میکرو
۳۰.....	۶-۲-۲- لوله‌های حرارتی نوسانی فین‌دار
۳۱.....	۳-۲- مدلسازی‌های ریاضی و عددی
۳۴.....	۴-۲- نتیجه‌گیری و ضرورت انجام کار
۳۷.....	فصل سوم
۳۸.....	۱-۳- مقدمه
۳۸.....	۲-۳- وسایل و تجهیزات جانبی

۳۸	.....	۱-۲-۳- سنسور حرارتی PT-۱۰۰
۴۰	.....	۲-۲-۳- سیستم کسب داده
۴۰	.....	۳-۲-۳- دوربین سرعت بالا
۴۱	.....	۴-۲-۳- پمپ خلاء
۴۲	.....	۵-۲-۳- صفحه‌ی حرارتی
۴۲	.....	۶-۲-۳- دیمر
۴۳	.....	۳-۳-QLPHP های مورد استفاده در این پژوهش
۴۷	.....	فصل چهارم
۴۸	.....	۱-۴- مقدمه
۴۹	.....	۲-۴- چگونگی طراحی قطر داخلی QLPHP
۵۳	.....	۳-۴- بررسی رژیم جریان دوفازی در QLPHP
۵۸	.....	۴-۴- تحلیل نتایج مربوط به حالت عمودی
۵۸	.....	۱-۴-۴- تأثیر نسبت پرشدگی بر رژیم جریان و عملکرد QLPHP
۵۸	.....	۱-۱-۴-۴- اتانول
۵۹	.....	۲-۱-۴-۴- آبدیونیزه
۶۱	.....	۳-۱-۴-۴- استون
		۲-۴-۴- تأثیر نوع سیال عامل و پارامترهای ترموفیزیکی مربوط به آن بر عملکرد حرارتی
۶۲	.....	QLPHP
۶۸	.....	۳-۴-۴- تأثیر نانوذرات بر رژیم جریان و عملکرد حرارتی QLPHP
۷۱	.....	۴-۴-۴- تأثیر ساختار QLPHP (تعداد دورها) بر رژیم جریان و عملکرد حرارتی آن
۷۴	.....	۵-۴- تأثیر نیروی جاذبه بر رژیم جریان و عملکرد QLPHP
۷۵	.....	۱-۵-۴- تحلیل نتایج آزمایشگاهی در حالت افقی
۷۶	.....	۱-۱-۵-۴- آبدیونیزه
۷۷	.....	۲-۱-۵-۴- اتانول
۷۸	.....	۳-۱-۵-۴- مقایسه‌ی عملکرد حرارتی آبدیونیزه و اتانول
۷۹	.....	۲-۵-۴- مقایسه‌ی عملکرد حرارتی QLPHP بین حالت‌های عمودی و افقی
۸۵	.....	۶-۴- تأثیر حرارت ورودی بر عملکرد حرارتی QLPHP
۸۸	.....	۷-۴- هدایت حرارتی کلی QLPHP

۹۰	..... ۴-۸- صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی
۹۳	..... فصل پنجم
۹۴	..... ۵-۱- مقدمه
۹۴	..... ۵-۲- جمع‌بندی نتایج
۹۶	..... ۵-۳- پیشنهادات
۹۷	..... مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: لوله‌ی حرارتی مرسوم (فتیله‌ای) و فرآیندهای انتقال مربوط به آن [۲]..... ۴
- شکل ۱-۲: تصویر شماتیک از لوله‌های حرارتی نوسانی با طراحی‌های مختلف [۱]..... ۶
- شکل ۱-۳: حرکت اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار در لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه بسته [۴]..... ۸
- شکل ۱-۴: عکس‌العمل نیروها در یک سیستم اسلاگ-پلاگ [۲]..... ۹
- شکل ۱-۲: لوله‌های حرارتی طراحی شده توسط آکاچی در سال ۱۹۹۰ [۶]..... ۱۳
- شکل ۲-۲: لوله‌های حرارتی نوسانی توسعه یافته توسط آکاچی در سال ۱۹۹۳ [۷]..... ۱۳
- شکل ۳-۲: تصویر شماتیک از وسیله‌ی آزمایشگاهی و نتایج به‌دست‌آمده توسط مائیزاوا و همکاران [۹]..... ۱۵
- شکل ۴-۲: شماتیک حبابهای گلوب و تیلور و جوشش هسته‌ای در سطح داخلی لوله‌ی حرارتی [۱۷]..... ۱۹
- شکل ۵-۲: تولید حباب TS و رشد آن [۲۴]..... ۲۳
- شکل ۶-۲: الف) تولید حباب‌های کوچک بدون رشد ب) تولید پلاگ بخار و رشد آن [۲۴]..... ۲۳
- شکل ۷-۲: مدل جرم-فتر-دمپر چندگانه [۴۹]..... ۳۱
- شکل ۸-۲: مدل ارائه شده توسط رافلز سنجایا و تاکایاشی اینو [۴]..... ۳۳
- شکل ۱-۳: نحوه‌ی اتصال PT-۱۰۰ سه‌سیمه به پل مقاومتی..... ۳۹
- شکل ۲-۳: data acquisition مورد استفاده در این کار..... ۴۰
- شکل ۳-۳: دوربین مورد استفاده در این کار..... ۴۱
- شکل ۴-۳: پمپ خلاء مورد استفاده در این کار..... ۴۱
- شکل ۵-۳: الف) سیم نیکل-کروم مورد استفاده در ساخت صفحه‌ی حرارتی ب) قطعه‌های سرامیکی مورد استفاده در ساخت صفحه‌ی حرارتی ج) صفحه‌ی حرارتی در قسمت اوپراتور CLPHP با یک دور..... ۴۲
- شکل ۶-۳: دیمر مورد استفاده در آزمایش‌ها..... ۴۳
- شکل ۷-۳: تصویر ۱ CLPHP و تصویر ۳ بعدی شماتیک آن..... ۴۴
- شکل ۸-۳: تصویر ۲ CLPHP و تصویر ۳ بعدی شماتیک آن..... ۴۵
- شکل ۹-۳: ابعاد ۱ CLPHP و ۲ CLPHP به میلی‌متر..... ۴۵
- شکل ۱-۴: نمونه‌هایی از شکل حباب‌ها در محدوده‌ی رژیم جریان نوع اول..... ۵۳

- شکل ۲-۴: نمونه‌هایی از شکل حباب‌ها در محدوده‌ی رژیم جریان نوع دوم..... ۵۴
- شکل ۳-۴: نمونه‌هایی از شکل حباب‌ها در محدوده‌ی رژیم جریان نوع سوم..... ۵۵
- شکل ۴-۴: نمونه‌هایی از شکل حباب‌ها در رژیم‌های جریان ترکیبی..... ۵۷
- شکل ۵-۴: نمودار مقاومت حرارتی بر حسب زمان برای سیال عامل اتانول: الف) CLPHP_۱ ب) CLPHP_۲..... ۵۸
- شکل ۶-۴: نمودار مقاومت حرارتی CLPHP_۲ بر حسب زمان در نسبت‌پرشدگی ۵۰ درصد (سیال عامل اتانول)..... ۵۹
- شکل ۷-۴: نمودار مقاومت حرارتی بر حسب زمان برای سیال آب: الف) CLPHP_۱ ب) CLPHP_۲..... ۶۰
- شکل ۸-۴: نمودار مقاومت حرارتی بر حسب زمان برای سیال عامل استون: الف) CLPHP_۱ ب) CLPHP_۲..... ۶۱
- شکل ۹-۴: شماتیکی از نمودار تغییر فاز فشار بر حسب دما [۲]..... ۶۳
- شکل ۱۰-۴: مقایسه‌ی مقاومت حرارتی سیال‌های عامل اتانول، آب و استون در نسبت‌های پرشدگی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد در CLPHP_۱ (الف، ب، ج) و CLPHP_۲ (د، ه، و)..... ۶۷
- شکل ۱۱-۴: نمودار مقاومت حرارتی بر حسب زمان برای نانوسیال مس: الف) CLPHP_۱ ب) CLPHP_۲..... ۶۹
- شکل ۱۲-۴: مقایسه‌ی مقدار میانگین مقاومت حرارتی سیال عامل آب و نانوسیال مس الف) CLPHP_۱ ب) CLPHP_۲..... ۷۰
- شکل ۱۳-۴: مقایسه‌ی مقاومت حرارتی CLPHP_۱ با CLPHP_۲ (سیال عامل اتانول)..... ۷۲
- شکل ۱۴-۴: مقایسه‌ی مقاومت حرارتی CLPHP_۱ با CLPHP_۲ (سیال عامل آب)..... ۷۲
- شکل ۱۵-۴: مقایسه‌ی مقاومت حرارتی CLPHP_۱ با CLPHP_۲ (نانوسیال مس)..... ۷۳
- شکل ۱۶-۴: مقایسه‌ی مقاومت حرارتی CLPHP_۱ با CLPHP_۲ (سیال عامل استون)..... ۷۴
- شکل ۱۷-۴: مقاومت حرارتی میانگین CLPHP_۱ در نسبت‌های پرشدگی متفاوت برای حالت افقی..... ۷۵
- شکل ۱۸-۴: مقاومت حرارتی میانگین CLPHP_۲ در نسبت‌های پرشدگی متفاوت برای حالت افقی..... ۷۵
- شکل ۱۹-۴: مقایسه‌ی مقدار مقاومت حرارتی میانگین CLPHP_۱ با CLPHP_۲ در حالت افقی..... ۷۶
- شکل ۲۰-۴: مقایسه‌ی مقدار مقاومت حرارتی میانگین سیال عامل آب و اتانول در حالت افقی..... ۷۹

- شکل ۴-۲۱: مقایسه‌ی مقدار میانگین مقاومت حرارتی بین حالت افقی و عمودی (سیال عامل اتانول)..... ۸۰
- شکل ۴-۲۲: مقایسه‌ی مقدار میانگین مقاومت حرارتی بین حالت افقی و عمودی (سیال عامل آب)..... ۸۰
- شکل ۴-۲۳: نمودار تغییرات دمایی سیال عامل آب در نسبت‌پوشدگی ۵۰ درصد برای CLPHP_۱..... ۸۳
- شکل ۴-۲۴: نمودار تغییرات دمایی سیال عامل آب در نسبت‌پوشدگی ۵۰ درصد برای CLPHP_۲..... ۸۳
- شکل ۴-۲۵: نمودار تغییرات دمای قسمت اواپراتور CLPHP_۲ (سیال عامل اتانول)..... ۸۷
- شکل ۴-۲۶: نمودار تغییرات مقاومت حرارتی CLPHP_۲ برای نرخ‌های حرارتی ورودی متفاوت (سیال عامل اتانول)..... ۸۷
- شکل ۴-۲۷: نمودار تغییرات مقاومت حرارتی در نسبت‌پوشدگی ۵۰ درصد برای CLPHP_۲..... ۹۱

فهرست جداول

- جدول ۱-۴: قطر بحرانی CLPHP بر اساس معیار عدد باند برای سیال عامل آب..... ۵۲
- جدول ۲-۴: مقدار میانگین مقاومت حرارتی بین زمانهای ۶۰۰-۱۸۰۰ ثانیه برای CLPHP_۲ (سیال عامل استون)..... ۶۲
- جدول ۳-۴: ویژگی‌های ترموفیزیکی سیال‌های عامل اتانول، آب و استون در دما و فشار استاندارد [۵۹]..... ۶۲
- جدول ۴-۴: اختلاف مقاومت حرارتی میانگین آب نسبت به استون و اتانول در نسبت‌های پرشدگی متفاوت (CLPHP_۱)..... ۶۵
- جدول ۵-۴: مقادیر میانگین مقاومت حرارتی برای سیال‌های عامل اتانول، آب و استون:..... ۶۶
- جدول ۶-۴: مقدار میانگین مقاومت حرارتی بین زمان‌های ۶۰۰-۱۸۰۰ ثانیه برای CLPHP_۲ (نانوسیال مس)..... ۶۹
- جدول ۷-۴: درصد کاهش مقدار مقاومت حرارتی میانگین نسبت به سیال عامل آب در صورت استفاده از نانوسیال مس..... ۷۰
- جدول ۸-۴: مقادیر میانگین مقاومت حرارتی و اختلاف آن بین CLPHP_۱ و CLPHP_۲ برای نانو سیال مس..... ۷۳
- جدول ۹-۴: مقادیر میانگین مقاومت حرارتی برای سیال‌های عامل اتانول و آب در حالت افقی:..... ۷۶
- جدول ۱۰-۴: درصد کاهش مقدار مقاومت حرارتی میانگین حالت عمودی نسبت به حالت افقی برای سیال عامل اتانول..... ۸۱
- جدول ۱۱-۴: درصد کاهش مقدار مقاومت حرارتی میانگین حالت عمودی نسبت به حالت افقی برای سیال عامل آب..... ۸۱
- جدول ۱۲-۴: مقدار میانگین دمای اواپراتور در حالت افقی و عمودی برای سیال‌های عامل آب و اتانول (CLPHP_۱)..... ۸۴
- جدول ۱۳-۴: مقدار میانگین دمای اواپراتور در حالت افقی و عمودی برای سیال‌های عامل آب و اتانول (CLPHP_۲)..... ۸۴
- جدول ۱۴-۴: مقادیر میانگین دمای اواپراتور و مقاومت حرارتی CLPHP_۲، تحت نرخ‌های حرارت ورودی متفاوت (سیال عامل اتانول)..... ۸۷
- جدول ۱۵-۴: مقادیر میانگین هدایت حرارتی کلی برای سیال‌های عامل مورد استفاده در حالت

عمودی:	۸۸
جدول ۴-۱۶: مقادیر میانگین هدایت حرارتی کلی برای سیال‌های عامل مورد استفاده در حالت	
افقی:	۸۹
جدول ۴-۱۷: مقادیر میانگین مقاومت حرارتی کلی، انحراف معیار و درصد خطای استاندارد	
CLPHP۲ در حالت عمودی	۹۱

فهرست علائم

PHP	لوله‌ی حرارتی نوسانی
$OLPHP$	لوله‌ی حرارتی نوسانی حلقه‌باز
$CLPHP$	لوله‌ی حرارتی نوسانی حلقه‌بسته
$CLPHP1$	لوله‌ی حرارتی نوسانی حلقه‌بسته با یک دور
$CLPHP2$	لوله‌ی حرارتی نوسانی حلقه‌بسته با دو دور
R	مقاومت حرارتی کلی
K	هدایت حرارتی کلی
g	شتاب جاذبه
γ	هدایت حرارتی
ρ	چگالی
σ	کشش سطحی
$\frac{dp}{dt}_{sat}$	گرادیان فشار اشباع نسبت به دما
C_p	گرمای ویژه
v	ویسکوزیته‌ی دینامیکی
τ	تنش برشی
LHV	گرمای نهان تبخیر
T_{boil}	دمای جوش
T_e	دمای میانگین قسمت اواپراتور
T_c	دمای میانگین قسمت کندانسور
L_a	طول قسمت آدیباتیک
L_c	طول قسمت کندانسور
L_e	طول قسمت اواپراتور
L_{eff}	طول مؤثر
A_{cr}	مساحت مقطع
Bo	عدد باند
$Eö$	عدد اُتوَس
We	عدد وبر
Ga	عدد گاریملا
μ	انحراف معیار
S_e	خطای استاندارد

فصل اول

مقدمه

۱-۱- لوله‌های حرارتی^۱

لوله‌ی حرارتی یک وسیله‌ی انتقال حرارت دوفازی است که می‌تواند مقادیر بزرگی از گرما را با اختلاف دمای اندک به سرعت میان منبع گرم و منبع سرد انتقال دهد. مکانیزم‌های معمول و مرسوم انتقال حرارت در مهندسی به منظور ایجاد سرمایش و گرمایش، نیاز به توان خارجی، صرف هزینه جاری علاوه بر هزینه ساخت اولیه و در اغلب موارد دارای قطعات متحرک هستند. با این وجود، یک لوله حرارتی وسیله‌ی نسبتاً ساده‌ای است که بدون هیچ قسمت متحرکی، قابلیت انتقال مقادیر زیادی حرارت را در فواصل مختلف دارد. جذاب‌ترین مشخصه‌ی لوله حرارتی این است که در این سیستم، نیاز به انرژی خارجی به عنوان نیرو محرکه‌ی انتقال حرارت نیست و از هیچ قطعه یا وسیله‌ی مکانیکی به عنوان نیرو محرکه‌ی انتقال حرارت استفاده نشده است و لوله حرارتی فقط با اعمال گرما فعال می‌شود و در عین حال دارای ضریب رسانایی گرمایی موثر و بسیار بالایی می‌باشد و بازدهی بالای آن در انتقال حرارت بسیار برجسته است، بطوریکه یک لوله‌ی حرارتی با جداره‌ی مسی از لوله‌ی توپر مسی از همان ابعاد بسیار پربازده‌تر است. شاید به همین جهت از لوله‌ی حرارتی به عنوان ابررسانا یاد می‌شود. لوله‌های حرارتی در اشکال و ابعاد گوناگون ساخته می‌شوند و از ابزارهای دیگر انتقال حرارت، سبکتر هستند و محدودیت‌های کمتری دارند و دارای مشخصه‌های کاربردی و عملکردی بی‌نظیری هستند و همین باعث شده که در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار بگیرند.

بطور کلی لوله‌های حرارتی مرسوم با استفاده از گرمای نهان تبخیر یعنی چگالش و تبخیر پیوسته-ی یک سیال عامل مناسب برای انتقال حرارت دوفازی بهره می‌برند.

۱-۱-۱- ساختار کلی و نحوه‌ی عملکرد لوله‌های حرارتی

اساساً یک لوله‌ی حرارتی از دو جزء مهم تشکیل شده است:

- ۱- محفظه یا بدنه‌ی لوله‌ی حرارتی که می‌تواند از شیشه، سرامیک و یا فلزات ساخته شود.
- ۲- سیال عامل درون لوله‌ی حرارتی که قسمت اصلی دریافت، انتقال و دفع حرارتی یعنی عملیات

^۱ Heat Pipe's

تبخیر و تقطیر بر روی آن صورت می‌پذیرد.

لوله‌ی حرارتی یک وسیله‌ی انتقال حرارت با ضریب رسانایی گرمایی موثر بسیار بالا است که در حلال کار می‌کند و برای انتقال حرارت از یک چشمه‌ی حرارتی به یک چاه حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ساختار یک لوله حرارتی از نظر عملی به سه منطقه تقسیم می‌شود:

الف) منطقه‌ی تبخیر یا ناحیه‌ی اواپراتور که در یک انتهای لوله قرار دارد و در این منطقه گرما به محفظه وارد می‌شود.

ب) منطقه‌ی چگالش یا ناحیه‌ی کندانسور که در انتهای دیگر لوله است و گرما در این ناحیه دفع می‌گردد.

ج) ناحیه‌ی آدیاباتیک که بین دوناحیه‌ی اواپراتور و کندانسور را شامل می‌شود، که بصورت اختیاری بوده و می‌تواند حذف گردد.

عملکرد لوله‌ی حرارتی به این صورت است که، حرارت در منطقه‌ی اواپراتور به لوله‌ی حرارتی وارد شده و بدین وسیله سیال عامل داخل آن می‌جوشد، سیال عامل که در حالت مایع اشباع قرار دارد در اثر دریافت گرمای نهان تبخیر به بخار اشباع تبدیل می‌شود. بخار اشباع حاصل در اثر اختلاف فشار به انتهای دیگر لوله‌ی حرارتی یا ناحیه‌ی کندانسور منتقل می‌شود، این منطقه در ناحیه‌ی خنک‌تری قرار داشته و از این رو بخار اشباع، گرمای نهان تبخیر خود را از دست داده و تقطیر می‌شود. مایع اشباع حاصل، باتوجه به ساختار لوله‌ی حرارتی به قسمت اواپراتور بازگردانده می‌شود و سیکل مجدداً تکرار می‌شود تا گرما به طور پیوسته از ناحیه گرم به ناحیه سرد منتقل شود.

از آنجایی که فرایندهای جوشش و چگالش همراه با ضرایب انتقال حرارت بسیار بالایی بوده و عملکرد یک لوله‌ی حرارتی بر اساس جوشش و چگالش متوالی سیال عامل است می‌توان انتظار داشت که لوله‌های حرارتی وسایل بسیار موثری در انتقال حرارت می‌باشند که این انتظار در آزمایشات متعدد به واقعیتی کاربردی تبدیل شده است.

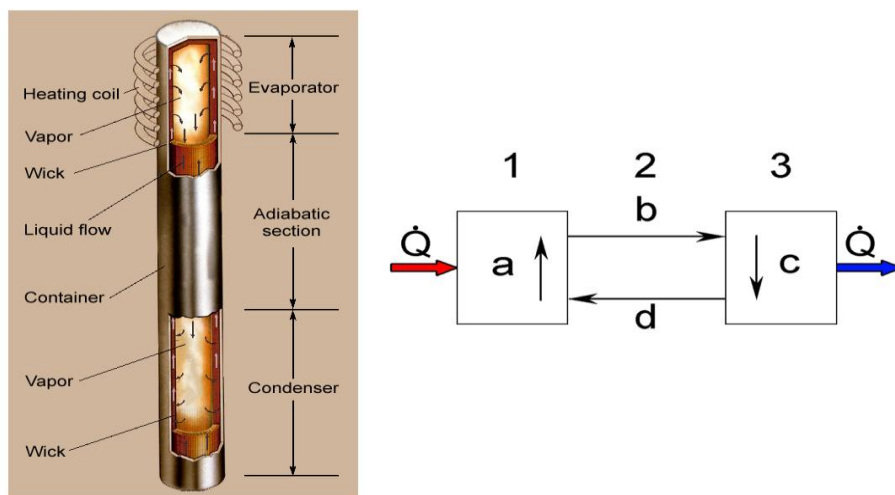
لوله‌های حرارتی مرسوم دارای فتیله بوده و از ساختار موئین فتیله و خاصیت موئینگی برای برگرداندن سیال عامل به قسمت اواپراتور بهره می‌برند.

اجزای یک لوله‌ی حرارتی مرسوم در شکل ۱-۱ داده شده است و شامل:

« یک محفظه که معمولاً از فلز، شیشه یا سرامیک ساخته می‌شود.

« سیال عاملی که با توجه به محدوده‌ی دمائی موردنظر استفاده می‌گردد.

« یک قسمت فتیله‌ای که از فلز، فایبرگلاس، شیشه و یا فیبرکربن بصورت شیارهایی با ابعاد موئین ساخته می‌شود.



شکل ۱-۱: لوله‌ی حرارتی مرسوم (فتیله‌ای) و فرآیندهای انتقال مربوط به آن [۲]

در یک لوله‌ی حرارتی همان‌طور که در شکل ۱-۱ آمده است، ابتدا گرما به قسمت اواپراتور می‌رسد و سیال عامل تبخیر شده (a) و از طریق اختلاف فشار بوجودآمده بین کندانسور و اواپراتور بخار جریان پیدا کرده و به قسمت کندانسور هدایت می‌شود (b)، در قسمت کندانسور گرمای خود را از دست داده و تقطیر شده و به مایع تبدیل می‌گردد (c) و این مایع با استفاده از پدیده‌ی موئینگی از ساختار فتیله‌ای به قسمت اواپراتور هدایت می‌شود (d) و این فرآیند مدام انجام می‌پذیرد.

۱-۱-۲- مزایای لوله‌های حرارتی

بطور کلی می‌توان خصوصیات و مزایای زیر را برای یک لوله حرارتی بیان کرد:

« توانایی فوق العاده در انتقال حرارت

« آهنگ یا نرخ سریع انتقال حرارت

« توزیع دمای یکنواخت در بدنه

« ساختار ساده با هزینه ساخت اندک

« فشردگی، ضریب اطمینان و بازدهی بالا

« اتلاف گرمای بسیار پایین

« سازگار با محیط زیست

۱-۱-۳- گستره‌ی کاری لوله‌های حرارتی

ویژگی‌های منحصربه‌فرد و بارز لوله‌های حرارتی موجب شده است که در طیف وسیعی از

کاربردهای انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرند.

لازم به‌ذکر است که ابعاد لوله‌های حرارتی مرسوم از نظر ارتفاع بین چند سانتی‌متر تا بیش از ۱۰

متر و از لحاظ قطر بین چند میلی‌متر تا مرتبه‌ی بزرگی چند سانتی‌متر، با توجه به نوع کاربرد می‌تواند

متغیر باشد. گستره‌ی کاری لوله‌های حرارتی از کاربردهای تبرید در دماهای حدود منفی ۲۷۰ درجه‌ی

سانتی‌گراد با به‌کارگیری هلیوم به عنوان سیال عامل تا بازه‌های دمایی ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه‌ی

سانتی‌گراد با به‌کارگیری فلزات مایع پراکنده می‌باشد [۳].

لوله‌های حرارتی می‌توانند برای کاربردهای زیادی از قبیل سرمایش، صرفه‌جویی و بازیابی انرژی در

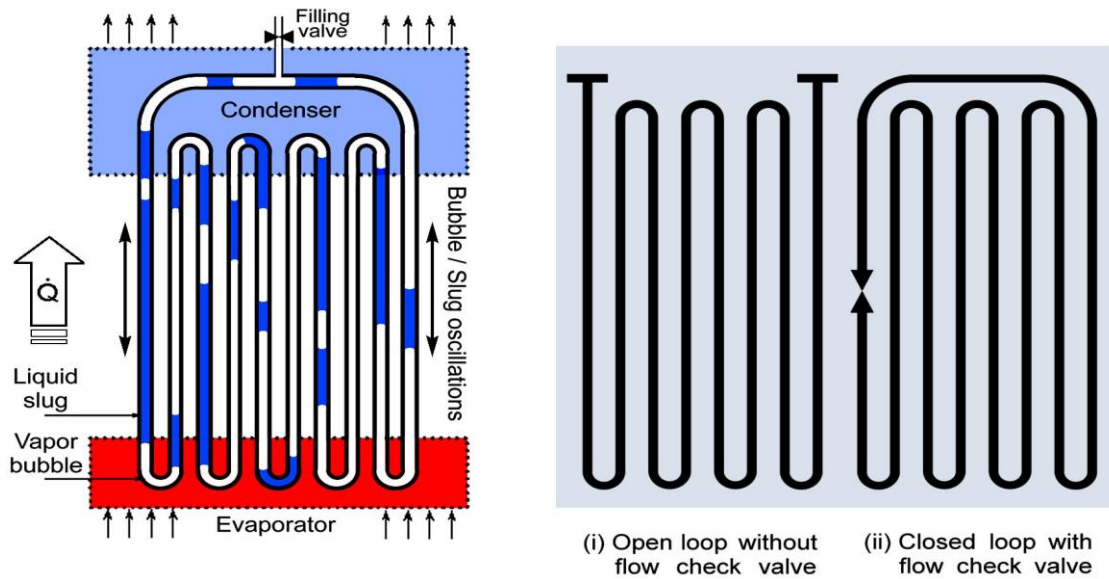
زمینه‌ی هوافضا، سرمایش تجهیزات الکترونیکی، تهویه مطبوع به‌منظور کنترل رطوبت در هواسازها،

خنک‌کاری قطعات فلزی در هنگام ماشین‌کاری، سرمایش کامپیوترهای شخصی به‌عنوان یک سیستم

با بازدهی حرارتی بالا مورد استفاده قرار بگیرند.

۱-۲- لوله‌های حرارتی نوسانی

لوله‌های حرارتی نوسانی یک نوع جدید از وسایل انتقال حرارت دوفازی هستند که در خانواده‌ی لوله‌های حرارتی جای می‌گیرند ولی تفاوت‌هایی در ساختار و نوع عملکرد با لوله‌های حرارتی مرسوم دارند. تصویر شماتیکی از لوله‌های حرارتی نوسانی در شکل ۱-۲ آورده شده است.



شکل ۱-۲: تصویر شماتیک از لوله‌های حرارتی نوسانی با طراحی‌های مختلف [۱]

ساختار لوله‌های حرارتی نوسانی دارای چند ویژگی عمده هستند که می‌توان آنها را به صورت زیر خلاصه کرد:

« ساختمان آنها متشکل از لوله‌ای باریک با تعدادی پیچ و خم است که قطر لوله در ابعاد موئین بوده و توسط یک سیال عامل با نسبت پرشدگی مناسب پر می‌گردد و هوای باقیمانده در لوله‌ها توسط سیستم خلاء تخلیه می‌گردد.

« لوله‌های حرارتی نوسانی به دو شکل می‌توانند طراحی شوند:

۱- لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه باز

۲- لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه بسته

« ساختار فتیله‌ای موجود در لوله‌های حرارتی مرسوم در لوله‌های حرارتی نوسانی وجود ندارد. در حالت کلی لوله‌های حرارتی نوسانی نیز مانند لوله‌های حرارتی مرسوم دارای یک قسمت اوپراتور، یک قسمت کندانسور و یک قسمت آدیباتیک می‌باشند که وجود قسمت آدیباتیک اختیاری بوده و می‌تواند حذف گردد.

از لحاظ مکانیزم عملکرد نیز لوله‌های حرارتی نوسانی یک سری تفاوت با لوله‌های حرارتی مرسوم دارند، لوله‌ی حرارتی نوسانی حرارت را بوسیله‌ی حرکت نوسانی و مداوم مخلوط دو فازی بین اوپراتور و کندانسور منتقل می‌کند، در این سیستم قطرات مایع و حباب‌های بخار به دلیل نوسانات و ارتعاشات فشاری که درون سیستم بوجود می‌آید منتقل شده و حرارت را نیز به همراه خود انتقال می‌دهند، به عبارتی در لوله‌ی حرارتی نوسانی انتقال حرارت محسوس و نهان همزمان صورت می‌گیرد که به نوبه‌ی خود یک مزیت نسبت به سایر لوله‌های حرارتی متعارف است که فقط انتقال حرارت نهان دارند.

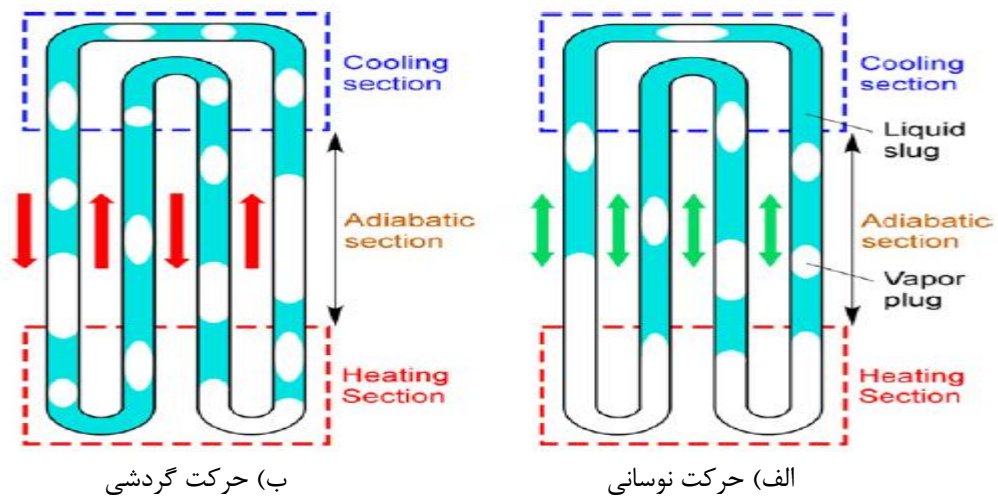
لوله‌های حرارتی نوسانی به عنوان یک وسیله‌ی انتقال حرارت دوفازی غیر تعادلی بوده که با انواع گوناگون ناپایداری‌های دوفازی کار می‌کند که برای کارکردن وسیله نیاز است که این ناپایداری‌ها به گونه‌ای حفظ و نگهداری شوند زیرا کارکرد وسیله در گام اول به ناپایداری‌های داخل سیستم بستگی دارد.

اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار^۱ به دلیل نوسانات فشار داخل سیستم که ناشی از ساختار خود سیستم و عمدتاً اختلاف دمای بین اوپراتور و کندانسور می‌باشد با حرکت نوسانی^۲ و یا گردشی^۳ خود گرما را از قسمت گرم به قسمت سرد منتقل می‌کنند (شکل ۱-۳).

^۱ Vapor plug and liquid slug

^۲ Oscillating motion

^۳ Circulation motion



شکل ۱-۳: حرکت اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار در لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه بسته [۴]

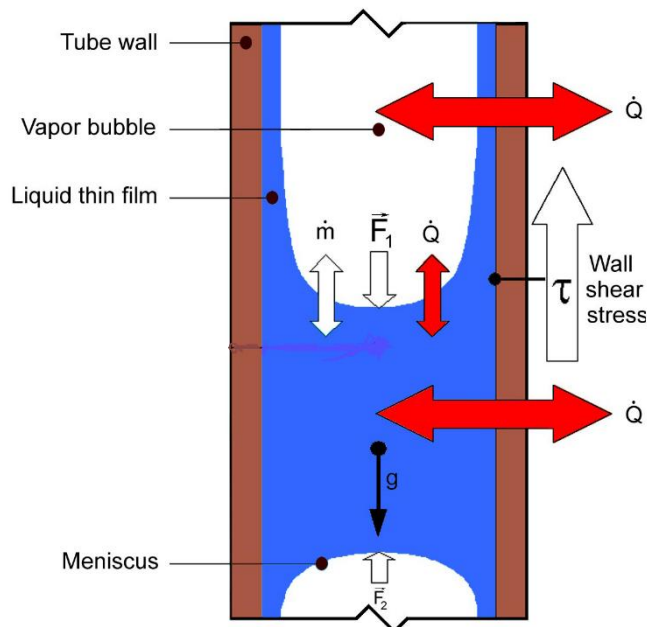
همان‌طور که ذکر شد یکی از دلایل اصلی اختلاف فشار ایجاد شده در CLPHP ناشی از اختلاف دما بین اوپراتور و کندانسور می‌باشد، البته باید به این نکته نیز توجه داشت که به دلیل نرخ‌های انتقال حرارت غیریکنواخت موضعی که اغلب در قسمت U شکل سیستم‌های واقعی مورد انتظار می‌باشد، اختلاف دما ایجاد می‌شود، که این اختلاف دما نیز به نوبه‌ی خود باعث ایجاد اختلاف فشار می‌گردد، همچنین توزیع نامتقارن اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار به خودی خود می‌تواند یکی از دلایل ایجاد اختلاف فشار باشد.

تأثیر مهمی این گرادیان‌های دمای موجود در داخل سیستم و ساختمان کلی آن باعث ایجاد اختلاف فشارهای نوسانی شده که به‌عنوان نیرو محرکه‌ی اصلی سیستم برای انتقال اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار و نهایتاً انتقال حرارت می‌گردد.

۱-۲-۱- سایر مشخصه‌های لوله‌های حرارتی نوسانی

یک سری فرآیندهای اساسی در حین کار CLPHP در مقیاس میکروسکوپی اتفاق می‌افتد و با توجه به این که هدف اصلی تحقیق پیش رو بررسی دقیق رژیم جریان دوفازی در این وسیله می‌باشد لذا لازم است که کمی جزئی‌تر به این فرآیندها پرداخته شود.

اگر ما یک حجم کنترل مطابق با شکل ۴-۱ در قسمتی از طول لوله‌ی حرارتی در نظر بگیریم که شامل فرآیندهای انتقال جرم و گرما و نیروهای مختلف می‌باشد، در این صورت می‌توان فرآیندهای فوق‌الذکر را بصورت زیر خلاصه کرد:



شکل ۴-۱: عکس‌العمل نیروها در یک سیستم اسلاگ-پلاگ [۲]

« به دلیل ابعاد موئین CLPHP، اسلاگ‌های مایع در اثر نیروی کشش سطحی بصورت هلالی-شکل در می‌آیند.

« زاویه‌ی تماس، پایداری غشای نازک مایع و ضخامت آن وابسته به ارتباط مایع با دیواره‌ی جامد سطح داخلی لوله و سایر پارامترهای مربوط به عملکرد وسیله می‌باشد که بررسی رابطه‌ی بین این پارامترها یکی از عوامل مهم انجام این تحقیق می‌باشد.

« همان‌طور که مشخص است، نیروی جاذبه یکی از عوامل اصلی در تعیین نوع حرکت می‌باشد که همین عامل باعث شده که جاذبه نقش به‌سزایی در عملکرد CLPHP داشته باشد.

« نیروهای F_1 و F_2 که بر اسلاگ مایع وارد می‌شوند ناشی از فشار پلاگ‌های بخار مجاور اسلاگ مایع می‌باشند.

«نیروهای برشی τ که در فصل مشترک دیواره‌ی داخلی لوله و سیال عامل بوجود می‌آیند و نوع

سیال عامل، ارتباط آن با جنس دیواره، صاف و یا زبری دیواره از جمله عوامل تعیین کننده‌ی این نیروها می‌باشند.

« جهت حرکت سیال وابسته به جهت نیروی خالص وارد بر اسلاگ مایع می‌باشد که از اختلاف بین نیروهای نشان داده شده در شکل ۴-۱ به دست می‌آید.

« اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار با توجه به موقعیتی که در قسمت اواپراتور، کندانسور و یا قسمت آدیاباتیک دارند، گرما را انتقال می‌دهند که این انتقال می‌تواند همراه با ورود و یا خروج حرارت باشد.

« در قسمت اواپراتور اسلاگ‌های مایع گرما را دریافت کرده و همزمان مقداری جرم (\dot{m}) را به صورت تبخیری به پلاگ‌های بخار مجاور خود انتقال می‌دهند و یا به پلاگ‌های جدید بخار تجزیه می‌گردند.

« در قسمت اواپراتور پلاگ‌های بخار گرما را از طریق غشای فیلم مایع اطراف خود نیز دریافت می‌کنند، بطوری که همزمان با انتقال جرم ناشی از تبخیر فیلم مایع همراه است.

« فرآیندهایی که برای قسمت اواپراتور شرح داده شد بصورت معکوس در قسمت کندانسور اتفاق می‌افتد.

همان‌طور که بیان شد CLPHP به هیچ عنوان به یک حالت پایدار کلاسیک نمی‌رسد و فعل و انفعال‌های بسیاری در داخل سیستم اتفاق می‌افتد که به دلیل پیچیدگی‌های موجود در انتقال حرارت دوفازی، فرآیند انتقال جرم و مکانیزم عملکرد چندمتغیره می‌باشد.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱- مقدمه

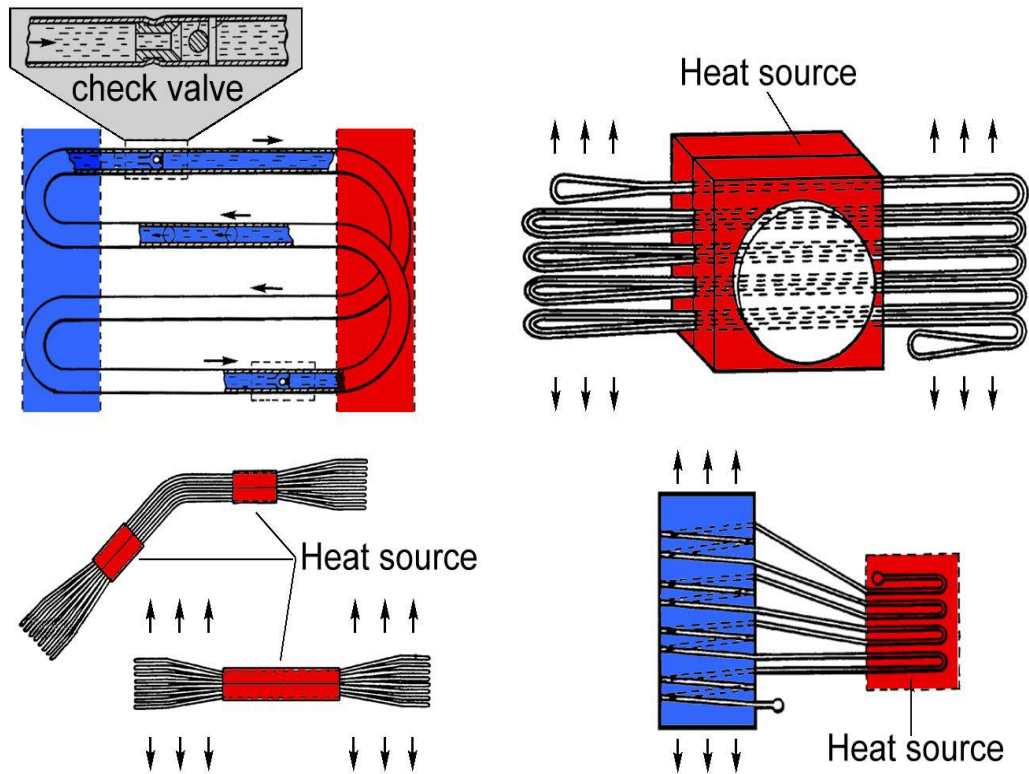
پارامترهای ترموفیزیکی با پارامترهای مربوط به آزمایش نظیر نسبت پرشدگی، شرایط سرد و گرم شدن و غیره همراه با ساختار CLPHP تأثیر خود را در عملکرد سیستم به صورت متقابل می‌گذارند و همین عامل سبب شده که ساختن هریک از شرایط متقابل فوق‌الذکر دارای پیچیدگی‌ها و سختی‌های زیادی باشد و محققان فعالیت‌های نسبتاً کمی در این زمینه داشته‌اند و نوشته‌جات و تحقیقات کمی در این زمینه موجود می‌باشد و تحقیقات تجربی و تئوری انجام شده که بطور جامع تأثیر همه‌ی پارامترها را مورد سنجش قرار داده باشند کمیاب بوده و دارای نتایج و نقطه‌نظرات متنوع و گاهاً متضاد می‌باشند، که یکی از دلایل انجام تحقیق پیش رو رسیدن به یک درک جامع در عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی می‌باشد.

در این قسمت به بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی لوله‌های حرارتی خواهیم پرداخت.

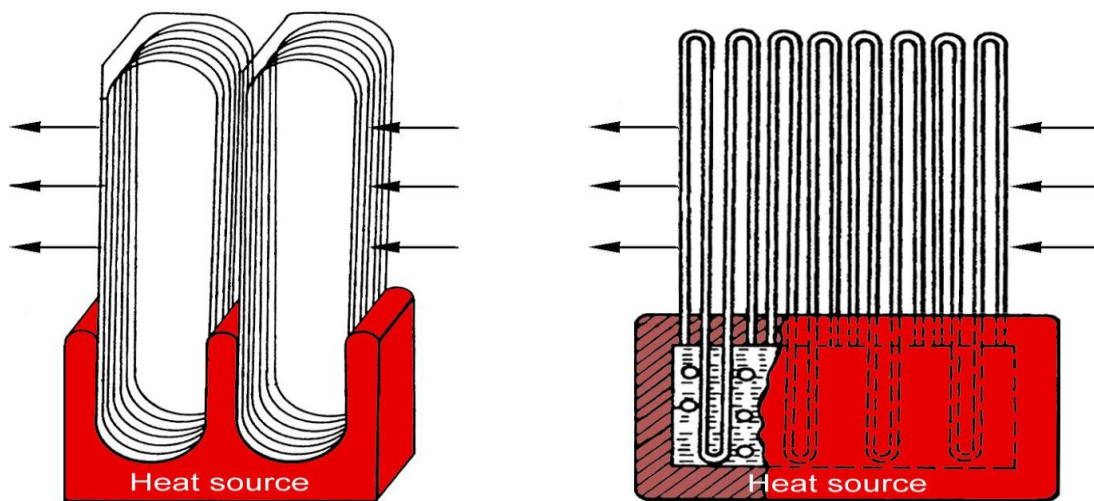
۲-۲- مطالعات تجربی

مفهوم لوله‌های حرارتی نوسانی به‌عنوان یک الگو برای اولین بار در سال ۱۹۷۱ توسط اسمیرنو و ساوچنکو [۵] مطرح شد ولی طراحی عملی این مفهوم از دیدگاه مهندسی در سال ۱۹۹۰ توسط هیستارو آکاچی [۶] انجام شد. آکاچی اولین نمونه از خانواده‌ی لوله‌های حرارتی نوسانی مدرن را معرفی کرد و ۲۴ الگو برای لوله‌های حرارتی نوسانی ارائه داد که در شکل ۲-۱ نمونه‌هایی از طراحی‌های انجام شده در طرح پیشنهادی آکاچی آورده شده است.

لازم به‌ذکر است که در همه‌ی ساختارهای ارائه شده توسط آکاچی یک شیر کنترل برای کنترل جهت جریان ترجیحی تعبیه شده بود، ولی این شیر کنترل در مدل‌های ارائه شده‌ی کوچک نتایج مطلوبی را نداشت و باعث شد لوله‌های حرارتی بدون شیر کنترل توسط آکاچی توسعه پیدا کند [۷]، ساختارهای جدید ارائه شده توسط آکاچی نشان‌دهنده‌ی لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه‌بسته و حلقه‌باز بود که نمونه‌ای از آن در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: لوله‌های حرارتی طراحی شده توسط آکاچی در سال ۱۹۹۰ [۶]



شکل ۲-۲: لوله‌های حرارتی نوسانی توسعه یافته توسط آکاچی در سال ۱۹۹۳ [۷]

در انتقال حرارت لوله‌های حرارتی نوسانی سه عامل نقش مهمی را در نوع جریان و در نتیجه عملکرد وسیله دارند:

« جریان نوسانی یا گردشی

« توزیع‌های متفاوت اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار

« فرآیندهای تغییر فاز

در لوله‌های حرارتی نوسانی حباب‌ها نقش یک پمپ را دارند و به‌عنوان عناصر اعمال نیرو به حساب می‌آیند که عملیات پمپاژ اسلاگ‌های مایع که در بین حباب‌ها قرار گرفته‌اند را انجام می‌دهند که این انتقال اسلاگ‌ها به حالت‌های مختلفی مثل انتقال و نوسان اتفاق می‌افتد که در نتیجه باعث ایجاد یک نیرو محرکه خود نگهدارنده برای انتقال حرارت با بازدهی بالا می‌گردد. در حقیقت جریان نوسانی/گردشی اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار از طریق گرمای نهان و محسوس نقش اساسی را در انتقال حرارت بازی می‌کند.

از طرفی انتقال حرارت موضعی نیز به سرعت حباب، شکل حباب، قابلیت خیسی سطح، ضخامت فیلم مایع اطراف حباب، فرکانس نوسان و تبخیر سطح تماس بستگی دارد.

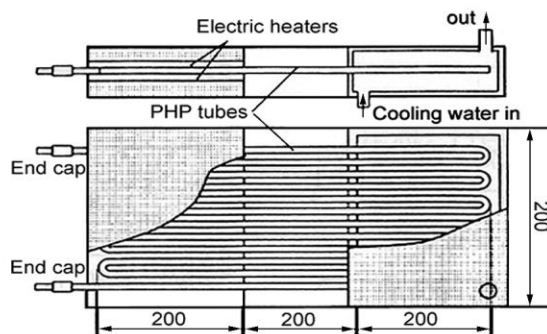
در همین زمینه مهتا و خنده‌کار [۸] به تولید و بررسی حباب‌هایی تحت فرکانس‌های متفاوت ۱ تا 3 Hz در لوله‌های حرارتی نوسانی پرداختند، که شامل جریان حباب‌های تیلور^۱ ایزوله، پیوسته و نوسانی بود. آنها در طی آزمایش‌های خود دریافتند که نسبت طول حباب‌های تولید شده نسبت به طول قسمت اوپراتور از عوامل تأثیرگذار در انتقال حرارت می‌باشد. اگر طول حباب‌ها قابل مقایسه با طول قسمت اوپراتور باشند (در این تحقیق از این نوع حباب‌ها با عنوان حباب‌های تیلور ایزوله یاد شده است) در این صورت مزیت حباب‌های تولید شده در انتقال حرارت به شدت کاهش می‌یابد. انتقال حرارت با افزایش در تولید حباب‌های تیلور، هم در حالت پیوسته و هم در حالت نوسانی، افزایش پیدا خواهد کرد. به‌طور کلی افزایش فرکانس نوسانات باعث افزایش تولید حباب و انتقال

^۱ حباب‌هایی که قطری تقریباً برابر با قطر داخلی لوله دارند.

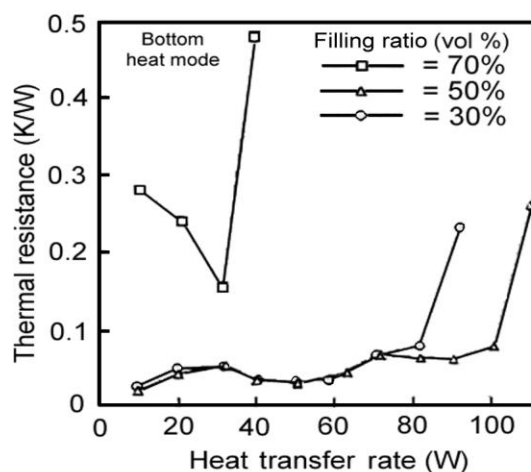
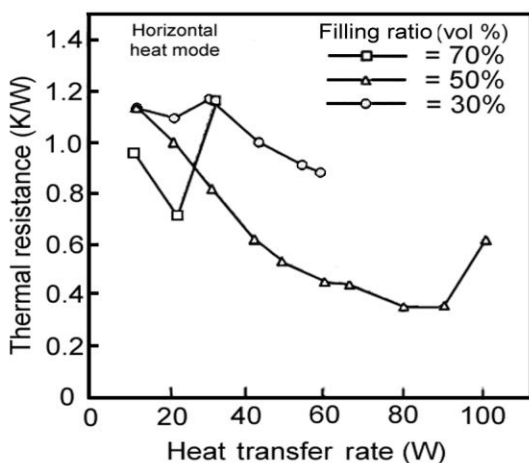
حرارت شده و در حالت نوسانی دستگاه عملکرد بهتری را نسبت به حالت پیوسته‌ی تولید حباب دارد و تأکید شد که هرچقدر طول اسلاگ‌های مایع و بخار کوچکتر باشد انتقال حرارت بهتر خواهد بود.

۱-۲-۲- لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه‌باز

مائیزاوا و همکاران [۹] به بررسی یک OLPHP که مشخصات آن در شکل ۳-۲ آورده شده است پرداختند. گرما از طریق گرم کننده‌ی الکتریکی که در اطراف قسمت اواپراتور قرار داده شده بود، تأمین می‌شد و برای خنک‌کاری در قسمت کندانسور از یک محفظه‌ی آب استفاده کرده بودند. آنها وسیله‌ی آزمایشگاهی^۱ خود را در نسبت‌پرسدگی‌های مختلف آزمایش کردند، تصویر شماتیک از وسیله‌ی آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده در شکل ۳-۲ آورده شده است.



Type: Open loop pulsating heat pipe
 Heating: electric AC heaters
 Cooling: water jacket
 ID of capillary tube: 1.0 mm
 Total number of turns: 20
 Working fluid: R-142b



شکل ۳-۲: تصویر شماتیک از وسیله‌ی آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده توسط مائیزاوا و همکاران [۹]

^۱ Experimental set-up

مائیزاوا و همکاران [۱۰] در کوشش دیگری یک OLPHP با ۴۰ دور و طول کلی ۵۲,۵ متر از جنس مس با قطرهای داخلی ۱ و ۲ میلی‌متر را در نظر گرفته و تأثیر قطر و سیال عامل را بر عملکرد وسیله مورد بررسی قرار دادند، آنها دریافتند که وسیله در حالت افقی^۱ و در حالتی که اواپراتور در قسمت بالا^۲ قرار داشت، عملکرد ضعیفی را از خود نشان می‌دهد.

۲-۲-۲- لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه‌بسته

هوسودا و همکاران [۱۱] یک CLPHP متشکل از ۱۰ دور با قطر داخلی ۲,۴ و خارجی ۴ میلی‌متر را ساخته و با سیال عامل آب مورد آزمایش قرار دادند و در طول آزمایش، دمای قسمت کندانسور را با آب ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و دمای قسمت اواپراتور را نیز با آب داغ در دمایی بین ۵۵ تا ۷۰ درجه ثابت نگه داشتند، آنها تأثیر گرمای ورودی و نسبت‌پرشدگی را با اختلاف دمای بین کندانسور و اواپراتور مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که با افزایش حرارت ورودی، اختلاف دما در همه‌ی نسب-های پرشدگی افزایش می‌یابد و وسیله در نسبت‌پرشدگی ۶۰ درصد بهترین و در نسبت‌پرشدگی ۹۰ درصد بدترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد.

تانگ و همکاران [۱۲] به منظور داشتن مطالعه‌ی بصری CLPHP، آن را از جنس پیرکس با قطر داخلی ۱,۸ میلی‌متر با ۱۰ دور ساخته و با استفاده از متانول به‌عنوان سیال عامل و نسبت‌پرشدگی ۶۰ درصد، CLPHP را تحت شار ثابت ۵۰ وات مورد آزمایش قرار دادند و دریافتند که در طول start-up^۳ سیستم سیال عامل با دامنه‌ی زیاد بین اواپراتور و کندانسور نوسان کرده و سپس یک جوشش نامتقارن در قسمت اواپراتور اتفاق می‌افتد که همراه با فرآیندهای پیچیده‌ای از قبیل جوشش هسته‌ای و پیوستگی بخار همراه با توزیع ناهمگون اسلاگ-پلاگ بوده که نقش مؤثری را در نوسان یا گردش سیال ایفا می‌کند.

کیو و ما [۱۳] آزمایشات خود را بر روی یک CLPHP با ۸ دور و لوله‌ای با قطر داخلی ۱,۸ و

^۱ Bottom heat mode

^۲ Top heat mode

^۳ از لحظه‌ای که وسیله شروع به‌کار می‌کند تا زمانی‌که به یک حالت شبه‌پایدار می‌رسد.

خارجی ۲ میلی‌متر که قسمت‌هایی از لوله بصورت شیشه‌ای کار شده بود انجام دادند، لوله‌های مسی و شیشه‌ای را به منظور بررسی نیمه‌بصری^۱ به صورت متناوب به کار گرفتند و تأثیرات حرارت ورودی و زاویه از سطح افق بر الگوی جریان و عملکرد حرارتی وسیله را بررسی کردند. آنها گزارش دادند که جریان اسلاگ نوسانی و گردشی وابسته به حرارت ورودی می‌باشد و یادآور شدند که وجود گازهای غیرچگال در سیستم بر عملکرد حرارتی سیستم تأثیر می‌گذارد.

در یک مطالعه‌ی همزمان دیگر چارئون ساوان و همکاران [۱] تحقیقات خود را بر روی دو CLPHP از جنس مس با قطرهای داخلی ۱ و ۲ میلی‌متر با ۳ سیال عامل آب، اتانول و R-123 در نسبت‌پرشدگی ۵۰ درصد انجام دادند. آنها در آزمایشات خود به جای کنترل حرارت ورودی، دمای اواپراتور و کندانسور را از طریق تغذیه‌ی آب در دمای ۸۰ و ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ثابت نگه داشتند و تأثیرات قطر داخلی، زاویه از سطح افق و تعداد دورها بر عملکرد سیستم را تعیین کردند، آنها در گزارش‌های خود از پارامتر تعداد دور بحرانی (N_{crit}) برای تشریح کار بهره بردند، به طوری‌که اگر تعداد دورها (N) بیشتر از N_{crit} باشد، CLPHP عملکرد قابل قبولی در حالت افقی از خود نشان می‌دهد ولی اگر $N < N_{crit}$ باشد بهترین عملکرد وسیله در حالت عمودی اتفاق می‌افتد و هرچقدر به حالت افقی نزدیک‌تر می‌شویم کارایی وسیله بدتر می‌شود. به طور کلی آنها دریافتند وقتی که $N > N_{crit}$ باشد می‌توان حالت‌هایی نسبت به افق یافت که وسیله عملکرد بهتری را نسبت به حالت عمودی دارد و عملکرد سیستم بعد از زاویه‌ی ۶۰ درجه تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

خنده‌کار و همکاران [۱۴] با بررسی یک CLPHP از جنس مس با ۵ دور، قطر داخلی ۲ و خارجی ۳ میلی‌متر و استفاده از سیال‌های عامل آب، اتانول و R-123 در دو حالت عمودی و افقی، تأثیر نسبت‌پرشدگی و نرخ حرارت ورودی به قسمت کندانسور را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که وسیله در حالت افقی برای هیچ کدام از سیال‌های عامل عمل نمی‌کند و بسته به نوع سیال عامل، می‌تواند در نسبت‌پرشدگی‌هایی بین ۲۵ تا ۶۵ درصد عملکرد خوبی را از خود نشان دهد و با توجه به

¹ Semi-visualization

نتایجی که ارائه دادند افزایش نرخ حرارت ورودی تقریباً در اکثر نسبت‌های پرشدگی همراه با کاهش مقاومت حرارتی همراه بود.

آنها همچنین به بررسی ترمودینامیکی یک CLPHP با یک دور، متشکل از لوله‌های متناوب مسی و شیشه‌ای با قطر داخلی ۲ میلی‌متر و سیال عامل اتانول پرداختند، در این تحقیق نشان داده شد که ترمودینامیک کلاسیک بر پایه تئوری شبه‌پایداری برای آنالیز کامل سیستم کافی نبوده و عملکرد CLPHP به‌شدت وابسته به الگوی جریان داخلی می‌باشد و تحت شرایط متغیر نرخ گرمای ورودی، ممکن است دارای حالت گردش و یا نوسان باشد، همچنین با افزایش گرمای ورودی الگوهای جریان متفاوتی نیز اتفاق می‌افتد، آنها نتیجه گرفتند که در نرخ گرمای ورودی پایین، رفتار وسیله عمدتاً ناپایدار بوده و به یک حالت شبه پایدار نمی‌رسد ولی رسیدن به یک حالت شبه پایدار در نرخ حرارتی بالا امکان پذیر می‌باشد [۱۵].

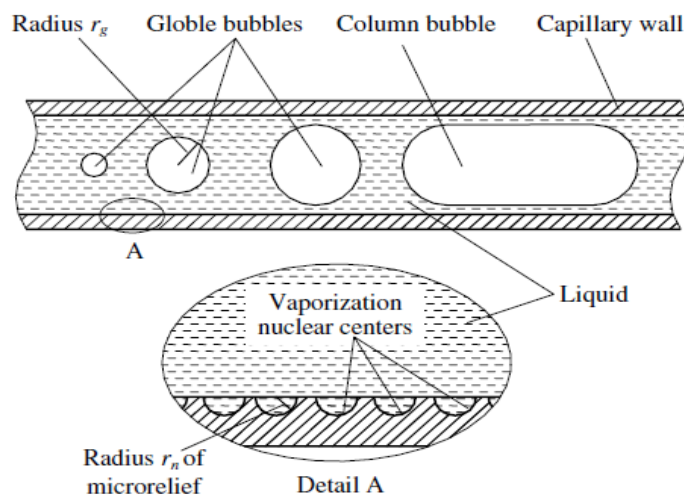
خنده‌کار و همکاران [۱۶] در تلاشی دیگر یک CLPHP با ۱ دور با نسبت پرشدگی ۶۰ درصد اتانول که قسمت آدیاباتیک آن از جنس شیشه بود، با اندازه‌گیری دما و فشار استاتیکی در مکان‌های حساس به بررسی حالت‌های شبه پایا در آن پرداختند. آنها در طی آزمایش‌های خود ۴ حالت شبه‌پایا را مشاهده کردند که هر حالت شبه‌پایا با یک الگوی جریان دوفازی منحصر به فرد توصیف می‌شد که بهترین عملکرد وسیله در حالتی اتفاق می‌افتاد که جریان گردشی یکسو و ضعیف‌ترین عملکرد وسیله مربوط به حالتی بود که جریان به‌صورت غیرهمسو و رفت‌وبرگشتی گزارش شد. نتیجه‌ی دیگری که ارائه شد مربوط به start-up سیستم بود مبنی بر اینکه اگر start-up به‌صورت تدریجی اتفاق بیافتد، رسیدن به بهترین حالت شبه‌پایا از لحاظ عملکرد بهتر سیستم امکان بیشتری دارد، درحالی‌که در start-up ناگهانی این امکان بسیار ضعیف است.

کو و ما [۱۷] در قسمتی از تحقیق خود بر روی CLPHP با ساخت آن از جنس شیشه با قطر داخلی ۳ و خارجی ۵ میلی‌متر و استفاده از سیال عامل آب دو نوع حباب بخار را مشاهده کردند:

« حباب گلوب^۱، حباب‌های گردی که قطری کوچکتر از قطر داخلی لوله را دارند.

« حباب تیلور^۲، حباب‌های ستونی شکل که توسط غشای نازکی از فیلم مایع احاطه شده و قطر آن به اندازه‌ی ضخامت فیلم مایع اطراف آن کمتر از قطر داخلی لوله می‌باشد (شکل ۲-۴).

آنها همچنین دریافتند که شرایط دیواره‌ی سطح و نرخ حرارت ورودی تأثیر زیادی در نوع start-up سیستم دارد.



شکل ۲-۴: شماتیک حباب‌های گلوب و تیلور و جوش هسته‌ای در سطح داخلی لوله‌ی حرارتی [۱۷]

یانگ و همکاران [۱۸] سعی کردند که یک محدوده‌ی عملکردی برای CLPHPها به دست بیاورند، آنها برای تحقیق در این راستا از دو CLPHP به قطرهای داخلی ۱ و ۲ میلی‌متر با ۴۰ دور از جنس مس و سیال عامل R-123 استفاده کردند و آزمایش‌های خود را تحت نرخ‌های حرارتی ۵۰ تا ۴۲۵ وات، نسبت‌های پرشدگی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد و در سه زاویه نسبت به افق شامل افقی، عمودی با اوپراتور تحتانی^۳ و عمودی با اوپراتور فوقانی^۴ انجام دادند. نتایج حاکی از این بود که بهترین عملکرد وسیله در همه‌ی حالات در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد اتفاق می‌افتد و CLPHP با قطر ۲ میلی‌متر عملکرد بهتری نسبت به CLPHP با قطر ۱ میلی‌متر دارد و سیستم در حالت عمودی با اوپراتور

¹ Globe bubble

² Taylor bubble

³ Bottom heat mode

⁴ Top heat mode

تحتانی دیرتر از دو حالت دیگر دچار خشک‌شدگی می‌گردد و کمترین مقاومت حرارتی و یا به عبارتی بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد.

چارون ساوان و تردتون [۱۹] به بررسی تأثیر قطر، سیال عامل و هندسه (طول قسمت اوپراتور و تعداد دورها) بر عملکرد CLPHP از جنس مس در حالت افقی پرداختند و سه CLPHP با دوره‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۶ را مورد آزمایش قرار دادند، آنها دریافتند که طول قسمت اوپراتور تأثیری بر عملکرد حرارتی ندارد ولی یک تعداد حداقل دور برای کارکرد وسیله در حالت افقی نیاز است که این تعداد دور حداقل به قطر داخلی لوله بستگی دارد، به عنوان مثال نتایج نشان می‌داد که برای قطر ۱ میلی-متر ۱۰ دور و برای قطر ۱،۵ و ۲ میلی‌متر ۱۵ دور نیاز است و بهترین عملکرد سه CLPHP را که مورد سنجش قرار دادند، در بیشترین دور (۲۶ دور) اتفاق می‌افتد. یکی دیگر از پارامترهایی که مورد آزمایش قرار گرفت، نسبت‌پرشدگی در درصدهای ۳۰، ۵۰ و ۸۰ بود که بهترین عملکرد تقریباً در همه‌ی حالات در نسبت‌پرشدگی ۳۰ درصد اتفاق افتاد.

ماملی و همکاران [۲۰] تحقیق خود را بر روی یک CLPHP با ۲ دور و قطر داخلی ۲ میلی‌متر و سیال عامل اتانول با نسبت‌پرشدگی ۶۵ درصد که قسمت آدیباتیک آن از جنس شیشه ساخته شده بود، انجام دادند. نتایجی که حاصل شد را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

« وسیله زمانی به یک عملکرد پایدار می‌رسد که جریان غالب از نوع گردشی باشد.

« عملکرد وسیله و الگوی جریان به شدت وابسته به حرارت ورودی و زاویه CLPHP از سطح افق

دارد.

« دو نوع الگوی جریان شامل اسلاگ-پلاگ و حلقوی^۱ در لوله‌های حرارتی مشاهده شد.

« عملکرد CLPHP ۱۰ تا ۱۵ برابر بیشتر از مس خالص است.

« به دلیل تعداد دور پایین وسیله در حالت افقی کارایی ندارد.

« سیال عامل اتانول نسبت به مخلوط همگن آب-اتانول مناسب‌تر است.

¹ Annular

« در نرخ حرارت ورودی پایین رفتار وسیله عمدتاً ناپایدار بوده و نمی‌تواند به یک حالت شبه پایدار برسد.

« آنالیز طیفی سیگنال فشار در طول رژیم عملکردی پایدار سیال، نوسانات زیادی را از خود نشان داد و امکان یک تشخیص واحد از رژیم جریان با استفاده از نوسانات فشار امکان‌پذیر نبود.

« امکان بررسی حرکت سیال از طریق نوسانات دمایی وجود دارد.

ماملی و همکاران [۲۱] در تلاشی دیگر با استفاده از یک CLPHP از جنس مس با قطر داخلی ۱٫۱ میلی‌متر و قطر خارجی ۱٫۲ میلی‌متر به بررسی اثر جاذبه و نسبت‌پرشدگی در حرارت‌های ورودی متفاوت پرداختند، آنها از FC-72 به‌عنوان سیال عامل استفاده کردند. نتایج نشان داد که وسیله نسبت به جاذبه بسیار حساس بوده و در حالت عمودی بهترین عملکرد را دارد ولی با تکرار آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که در حالت عمودی ناهماهنگی‌های زیادی در عملکرد سیستم در تکرارهای متفاوت وجود دارد. آنها نسبت‌پرشدگی ۵۰ درصد را به‌عنوان نسبت‌پرشدگی بهینه گزارش دادند.

ماملی و همکاران [۲۲] در آخرین تحقیق موجود، به‌منظور استفاده‌های فضایی از CLPHP آن را تحت شتاب جاذبه‌ی پایین^۱ و شتاب جاذبه‌ی بالا^۲ در حالت‌های افقی و عمودی در شرایط پرواز مورد آزمایش قرار دادند. نتایجی که آنها در این تحقیق ارائه دادند را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

« شتاب جاذبه‌ی بالا تأثیر کمی بر نوع حرکت سیال داشته و این توانایی را دارد که CLPHP را به رژیم حرارتی قبلی برگرداند.

« در شتاب جاذبه پایین، وسیله دستخوش افزایش ناگهانی دما در قسمت اوپراتور می‌گردد.

« در حالت افقی نرخ انتقال حرارت نسبت به حالت عمودی کاهش یافته و مقدار دمای اوپراتور بالاتر از حالت عمودی می‌باشد.

« وسیله در حالت عمودی به هنگام پرواز و همچنین در روی زمین حساسیت زیادی نسبت به نیروی جاذبه از خود نشان می‌دهد و وابستگی زیادی به حرارت ورودی داشته و برای start-up نیاز به

^۱ Micro gravity

^۲ Hyper gravity

گرمای بیشتر دارد، لذا الگوهای اسلاگ-پلاگ قبل از دادن حرارت می تواند تأثیر زیادی بر start-up سیستم در حالت عمودی داشته باشد.

« رفتار حرارتی وسیله در شتاب جاذبه‌ی پایین شباهت زیادی به حالت افقی دارد، بنابراین می-توان نتیجه گرفت آزمایش CLPHP در شتاب جاذبه پایین برای کاربردهای فضایی ضرورتی ندارد. زیهو و همکاران [۲۳] با استفاده از سیال عامل آمونیا با نسبت پرشدگی ۷۰ درصد به بررسی start-up و عملکرد CLPHP در زاویای مختلف نسبت به افق پرداختند. دلیل آنها برای استفاده از آمونیا به‌عنوان سیال عامل، اشباع بودن آن در دمای ۲۹ درجه‌ی سانتی‌گراد و در نتیجه نیاز به حرارت کم برای start-up سیستم بود. آنها در آزمایشات خود به این نتیجه رسیدند که سریع‌ترین start-up در زاویه‌ی ۶۰ درجه اتفاق می‌افتد و اگرچه start-up وسیله در حالت افقی کمی دیرتر اتفاق می‌افتد ولی در این حالت CLPHP عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد.

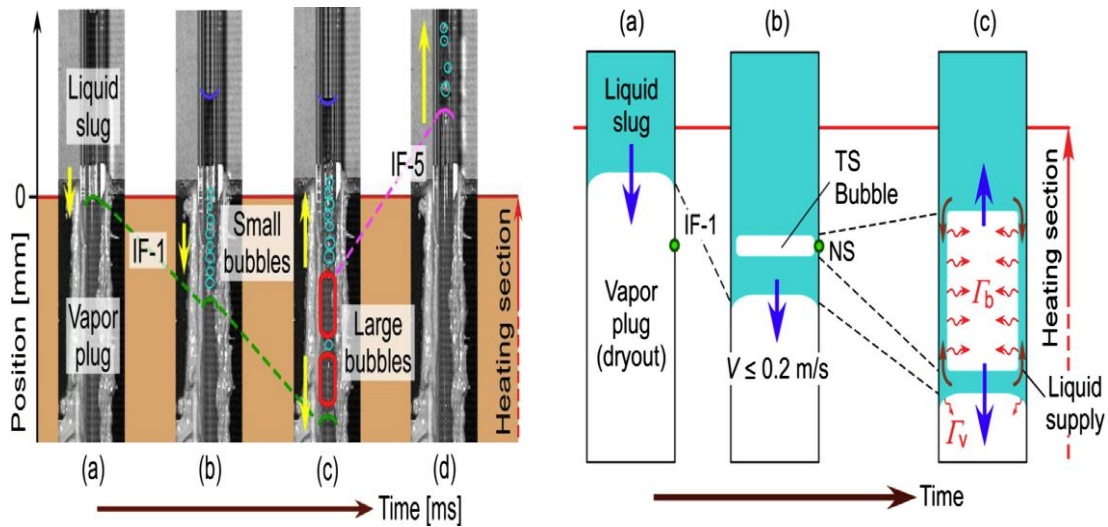
سنجایا و اینو [۲۴] با ساخت یک CLPHP از جنس پیرکس فقط شامل قسمت اوپراتور و کندانسور، با قطر داخلی ۱,۶ و خارجی ۴ میلی‌متر و با استفاده از سیال عامل اتانول با نسبت پرشدگی ۶۰ درصد به بررسی تولید حباب در CLPHP پرداختند. قسمت کندانسور از یک محفظه تشکیل شده بود که از طریق ورود آب ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خنک می‌شد و حرارت قسمت اوپراتور از طریق یک صفحه که خود بوسیله‌ی سیم‌المنت گرم می‌شد، تأمین می‌گشت. آنها پس از انجام آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که حرکت اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار بسیار تصادفی بوده و با نمونه‌های مشابه قبلی تفاوت زیادی دارد و سرعت سطح تماس بخار و مایع با تولید حباب‌های TS^1 بصورت ناگهانی افزایش پیدا می‌کند و با اندازه‌گیری سرعت تولید اسلاگ مایع دریافتند که در صورتی حباب TS تشکیل می‌شود که سرعت اسلاگ مایع کمتر از $0,2 \frac{m}{s}$ باشد.

آنها در مشاهدات خود ۳ نوع پدیده‌ی تغییر فاز را به شرح زیر گزارش کردند:

« نوع اول: مربوط به تولید حباب‌های TS و رشد آنها، که نیرومحرکه‌ی بزرگی را فراهم می‌کرد

¹ حباب‌هایی با قطری معادل با قطر داخلی لوله (Tube Size).

شکل ۲-۵).



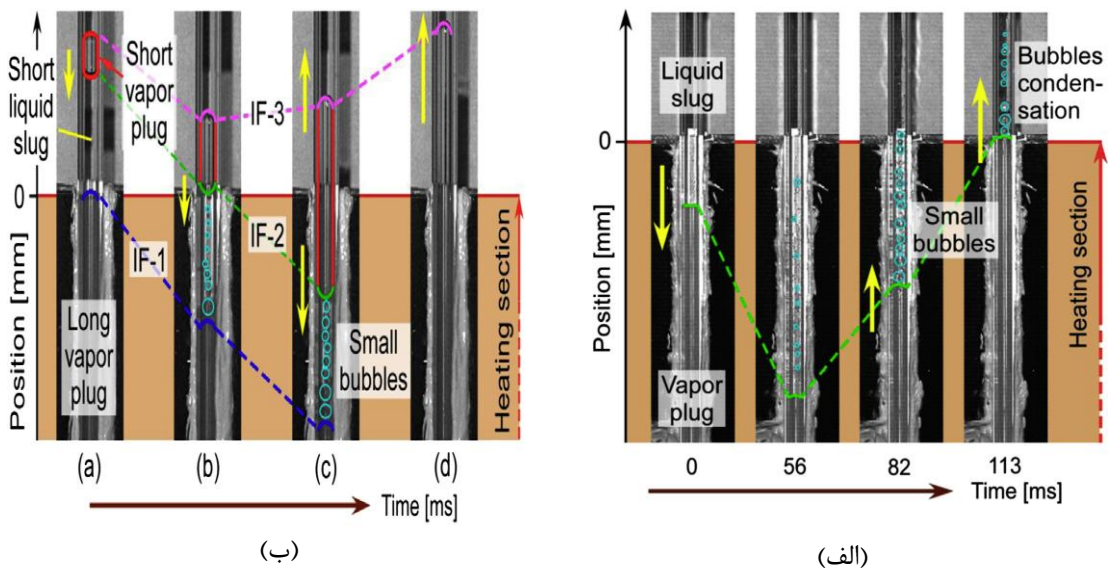
شکل ۲-۵: تولید حباب TS و رشد آن [۲۴]

« نوع دوم: تولید پلاگ‌های بخار و رشد آنها، که در این نوع هم نیرو محرکه‌ی بزرگی فراهم می‌شد

شکل ۲-۶).

« نوع سوم: تولید حباب‌های کوچک بدون رشد، که همراه با تولید نیرو محرکه کوچکی بود (شکل

۲-۶).



شکل ۲-۶: الف) تولید حباب‌های کوچک بدون رشد ب) تولید پلاگ بخار و رشد آن [۲۴]

لیو و همکاران [۲۵] تحقیقات خود را به منظور به دست آوردن بهترین پارامترها برای یک start-up خوب و سریع در CLPHP ها انجام دادند. برای این منظور از یک CLPHP با قطر داخلی ۲,۶ و خارجی ۴ میلی‌متر از جنس مس، و ۳ سیال عامل آب، اتانول و متانول استفاده کردند و به نتایج زیر دست یافتند:

« با افزایش حرارت ورودی سرعت start-up افزایش و پایداری نسبی بهتری در عملکرد سیستم مشاهده می‌شود، البته به این نکته نیز باید توجه داشت که افزایش حرارت ورودی تا یک حدی افزایش راندمان سیستم را به همراه دارد و بعد از آن به یک حالت بحرانی می‌رسیم که، با توجه به مشخصه‌های ترموفیزیکی سیال عامل می‌شود این حالت بحرانی را تا حدی پیش بینی کرد که در این تحقیق بیشترین حرارت ورودی بحرانی به ترتیب مربوط به آب، اتانول و متانول می‌باشد.

« بهترین عملکرد سیستم با افزایش زاویه از صفر به ۹۰ درجه، افزایش می‌یابد.

« بهترین نسبت پرشدگی برای start-up سریع، ۴۱ درصد برای آب، ۵۲ درصد برای اتانول، ۳۵ تا ۴۱ درصد برای متانول به دست آمد.

« بطور کلی سیال عامل با ویسکوزیته‌ی دینامیکی و گرمای ویژه پایین و بویژه گرادیان فشار اشباع بالا برای start-up و عملکرد سیستم مفید می‌باشد.

اسپیناتو و همکاران [۲۶] به بررسی مشخصه‌های CLPHP با ۱ دور و استفاده از سیال عامل R-245، با نسبت پرشدگی ۶۰ درصد تحت زاویه‌ی ۴۵ درجه پرداختند و در طی آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که بین دمای اوپراتور و شدت فرکانس رابطه مستقیمی وجود دارد و افزایش سرعت رشد و تولید حباب، در اثر تغییر رژیم جریان از حالت چرخشی به حالت نوسانی همراه با افزایش حرارت ورودی اتفاق می‌افتد.

آنها در نتایج خود وجود ۴ نوع رژیم جریان شامل نوسان با دامنه‌ی زیاد، نوسان با دامنه‌ی کم، نوسان همراه با سیرکوله شدن جریان به صورت رفت و برگشتی و سیرکوله شدن پایدار را گزارش کردند.

گامیت و همکاران [۲۷] با استفاده از یک CLPHP با ۹ دور از جنس مس و قطر داخلی ۲،۱۵ میلی‌متر به بررسی میزان تأثیر نسبت‌پرشدگی و حرارت ورودی بر عملکرد وسیله پرداختند. آن‌ها در کار خود از آب به‌عنوان سیال عامل استفاده کرده و آزمایشات خود را در نسبت‌های پرشدگی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد، تحت حرارت ورودی ۱۰ تا ۵۰ وات انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که سیستم در کم‌ترین نسبت‌پرشدگی و بیش‌ترین حرارت ورودی، بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد.

۲-۲-۳- تأثیر نانوسیال بر عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی

در سال‌های اخیر استفاده از نانوسیالات برای افزایش هدایت حرارتی و به‌منظور افزایش انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفته شده است، این ایده برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط چوی و ایستمن [۲۸] مطرح گردید، در همین راستا محققان برای بررسی این موضوع در لوله‌های حرارتی نوسانی یک سری تحقیقات انجام داده‌اند.

تیسای و همکاران [۲۹] اذعان داشتند که استفاده از نانوسیال در لوله‌های حرارتی مرسوم کاهش معناداری در مقاومت حرارتی ایجاد می‌کند آنها از مقایسه‌ی آب و نانوسیال طلا با غلظت ۱ درصد حجمی به این نتیجه رسیدند.

ما و همکاران [۳۰] آزمایش‌های خود را در نسبت‌پرشدگی ۵۰ درصد، تحت شرایط عملکردی متفاوت دما و حرارت با استفاده از مقایسه‌ی سیال عامل آب و نانوسیال الماس با غلظت ۱ درصد حجمی انجام دادند، ذرات الماس مورد استفاده بین ۵ تا ۵۰ نانومتر بود. حاصل کار دلالت بر این موضوع داشت که استفاده از ذرات نانو با ایجاد نوسانات شدید و بیشتر، در جریان، باعث افزایش انتقال حرارت می‌شوند.

لین و همکاران [۳۱] تأثیر نانوسیال نقره بر یک CLPHP با ۵ دور، قطر داخلی ۲،۴۵ و خارجی ۳ میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای این منظور از ذرات ۲۰ نانومتر نقره با غلظت‌های ۱۰۰ و ۴۵۰ ppm و مقایسه‌ی آنها با سیال عامل آب استفاده کرده و تحت حرارت و نسبت‌پرشدگی‌های متفاوت آزمایش‌های خود را انجام دادند و دریافتند که نانوسیال با غلظت ۱۰۰ ppm در نسبت-

پرشدهای ۴۰ و ۶۰ درصد بهترین کارایی سیستم را به همراه دارد.

کو و ویو [۳۲] تأثیر نانوذرات Al_2O_3 و SiO_2 با غلظت‌های جرمی متفاوت را بر عملکرد یک لوله‌ی حرارتی نوسانی با قطر داخلی ۲ و خارجی ۳ میلی‌متر با نسبت‌پرشدهی ۵۰ درصد را مورد بررسی قرار دادند. آنها از مقایسه‌ی مقاومت حرارتی سیستم با استفاده از سیال‌های عامل آب و نانوسیالات Al_2O_3 و SiO_2 به این نتیجه رسیدند که استفاده از ذرات نانو همیشه باعث افزایش کارایی سیستم نمی‌گردد و استفاده از نانوسیال Al_2O_3 در مقایسه با آب، باعث کاهش مقاومت حرارتی یعنی افزایش کارایی سیستم شده درحالی‌که نانوسیال SiO_2 کاهش کارایی سیستم را در مقایسه با آب به همراه دارد.

در تلاش دیگری که وانگ و همکاران [۳۳] نیز در راستای بررسی تأثیر نانوسیال Al_2O_3 بر عملکرد لوله‌ی حرارتی نوسانی داشتند، نتایج در اکثر مواقع کاهش مقاومت حرارتی سیستم در اثر استفاده از نانوسیال Al_2O_3 را به همراه داشت.

کاردیکیان و همکاران [۳۴] در آزمایشات خود از ترکیب ذرات نانو با آب استفاده کردند و از مقایسه‌ی عملکرد یک CLPHP (متشکل از ۵ دور و قطر داخلی ۲,۳ و خارجی ۳,۳ میلی‌متر) با سیال‌های عامل آب و نانوسیالات مس و آلومینیوم، به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانوسیالات حدود ۳۰ درصد کارایی سیستم را افزایش می‌دهد. آنها عامل اصلی افزایش انتقال حرارت و در نتیجه بهبود عملکرد سیستم در اثر استفاده از ذرات نانو را افزایش سطح انتقال حرارت در پی انباشتگی و حفره‌زایی این ذرات در قسمت اواپراتور بیان کردند.

۲-۲-۴- تأثیر مشخصه‌های ترموفیزیکی بر عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی

بسیاری از فاکتورها از قبیل نوع سیال عامل، ساختار و جنس لوله و پارامترهای مربوط به آزمایش در انتقال حرارت CLPHP تأثیر می‌گذارند که در این میان پارامترهای ترموفیزیکی سیال عامل از قبیل ویسکوزیته (ν)، ویسکوزیته دینامیکی (μ)، چگالی (ρ)، نقطه‌ی جوش (T_{boil})، گرمای ویژه (C_p)، گرمای نهان تبخیر (LHV)، گرادیان فشار اشباع ($\frac{dp}{dt_{sat}}$)، هدایت حرارتی (γ)، کشش سطحی

(σ) و غیره هر کدام به نوبه‌ی خود در انتقال حرارت، افزایش و یا کاهش عملکرد وسیله تأثیرگذار می‌باشند، لذا محققان کوشش‌هایی را برای بررسی تأثیر مشخصه‌های ترموفیزیکی بر عملکرد CLPHP انجام داده‌اند.

ریتیدیچ و همکاران [۳۵] در آزمایشات خود به این نتیجه رسیدند که انتقال حرارت در لوله‌های حرارتی نوسانی به‌طور عمده بوسیله حرارت محسوس و حرارت نهان بخار انجام می‌گیرد.

اسکنیدر و همکاران [۳۶] دریافتند که تولید و رشد بخار در بخش اواپراتور با LHV رابطه معکوس دارد. اگر LHV مربوط به سیال عامل خیلی کم باشد، تولید حباب‌های بخار، خیلی سریع خواهد بود و همه‌ی مایع را به بخش کندانسور هدایت می‌کند، که باعث می‌شود انتقال حرارت سیر نزولی را از خود نشان دهد و همچنین اگر LHV خیلی زیاد باشد، تولید آرام حباب‌های بخار، باعث کم شدن تکانه‌ی ناشی از فشار می‌شود که در نتیجه بر فرکانس و دامنه نوسان تأثیر می‌گذارد، لذا برای استفاده از سیال عامل یک LHV بهینه وجود دارد.

زانگ و همکاران [۳۷] تحقیقات خود را بر روی یک CLPHP با قطر داخلی ۱،۱۸ و سه نوع سیال عامل آب، اتانول، FC-72 و در نسبت‌های پرشدگی ۶۰ تا ۹۰ درصد انجام داده و به این نتیجه رسیدند که پریود نوسان عمدتاً به LHV و دامنه‌ی نوسان عمدتاً به کشش سطحی وابسته می‌باشد.

لیو و همکاران [۲۵] در بررسی‌های خود بر روی start-up لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه‌بسته، آزمایش‌های خود را با سیال‌های عامل آب، اتانول و متانول، تحت نسبت‌های پرشدگی و حرارت‌های ورودی مختلف انجام دادند و در پایان به این نتیجه رسیدند که داشتن ویسکوزیته‌ی دینامیکی پایین، گرمای ویژه‌ی پایین و $\frac{dp}{dt_{sat}}$ بالا برای start-up سیستم بسیار مفید می‌باشد.

نتیجه کار شفيعی و همکاران حاکی از این می‌باشد که گرمای محسوس و گرمای ویژه عوامل اصلی انتقال حرارت، LHV عامل اصلی نوسان و کشش سطحی عامل اصلی در شکل‌گیری اسلاگ‌های بخار و مایع می‌باشد که البته در شرایط پایا تأثیر آن بر انتقال حرارت، می‌تواند نادیده گرفته شود [۳۸].

خنده‌کار و همکاران [۱۶] دریافتند که دمای جوش و LHV بالا در یک سیال عامل، باعث می‌شود

که عمل تغییر فاز و تولید حباب در start-up به انرژی زیادی نیاز داشته باشد و بهتر است که $\frac{dp}{dt_{sat}}$ بالا باشد، زیرا با اندکی بالا رفتن دما، فشار به مقدار زیادی بالا می‌رود و یک نیرو محرکه بزرگتری برای حرکت سیال ایجاد می‌کند.

آنها در تحقیقات دیگر خود اذعان کردند که گرمای ویژه‌ی بالا باعث بهتر شدن انتقال حرارت محسوس می‌شود زیرا سیال عامل با یک درجه افزایش دما به انرژی بیشتری می‌رسد و LHV بالا، با وجود اینکه باعث انتقال حرارت نهان بهتری می‌شود بطوریکه می‌تواند انرژی زیادی را در هنگام تغییر فاز آزاد و یا ذخیره کند ولی تولید و رشد حباب را به تأخیر می‌اندازد که برای start-up سیستم مناسب نیست و کشش سطحی بالا نیز باعث ایجاد افت فشار اضافی می‌گردد و start-up سیستم را به تأخیر می‌اندازد [۳۹].

هان و همکاران [۴۰] به بررسی مشخصه‌ها و عملکرد انتقال حرارت CLPHP، با استفاده از سیال‌های عامل، گرمای ورودی و نسبت پرشدگی‌های متفاوت پرداختند، آنها دریافتند که در نرخ حرارتی پایین انتقال حرارت به چگونگی start-up بستگی داشته و همچنین رابطه بسیار نزدیکی با ویسکوزیته دینامیکی دارد و با افزایش گرمای ورودی نقش ویسکوزیته دینامیکی کاهش و نقش گرمای ویژه سیال عامل، گرمای نهان بخار به تدریج افزایش می‌یابد و در نسبت پرشدگی پایین سیال عامل با نقطه‌ی جوش و گرمای نهان بخار پایین باعث می‌شود که PHP زودتر به خشک شدگی برسد. بررسی‌هایی که در یک سری تحقیقات دیگر به دست آمد را نیز می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد که سیال عامل پیشنهادی برای CLPHP بایستی دارای ویژگی‌های زیر باشد:

« ویسکوزیته‌ی دینامیکی پائین

« $\frac{dp}{dt_{sat}}$ بالا

« گرمای نهان پایین

« گرمای ویژه‌ی بالا

« کشش سطحی پایین [۱۲, ۴۱, ۴۲].

با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده به نظر می‌رسد که کاهش کشش سطحی افزایش راندمان را در پی خواهد داشت، در همین راستا وانگ و همکاران [۴۳] با استفاده از سدیم استئارات به‌عنوان حلال کاهنده‌ی کشش سطحی در یک PHP با قطر داخلی ۲ میلی‌متر تأثیر کشش سطحی سیال عامل را بر عملکرد PHP مورد بررسی قرار دادند.

آنها آزمایش‌های خود را در غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ppm انجام داده و نتایج را با سیال عامل پایه (آب) مقایسه کردند و دریافتند که در صورت استفاده از حلال ۱۰ ppm سیستم عملکرد بهتری نسبت به سیال پایه داشته ولی در مورد غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ ppm فقط در نرخ‌های حرارتی بالا عملکرد سیستم بهبود می‌یابد و در نرخ‌های حرارتی پایین حتی باعث کاهش عملکرد حرارتی سیستم می‌گردد. لذا نتیجه‌ای که می‌توان از این تحقیق گرفت این است که پایین بودن کشش سطحی نیز می‌تواند دارای یک مقدار بهینه باشد و بطور قاطع نمی‌توان گفت که هرچقدر کشش سطحی سیال عامل پایین باشد، عملکرد سیستم نیز بهتر خواهد بود و بایستی محدوده‌ی حرارتی که وسیله در آن کار می‌کند نیز مدنظر قرار بگیرد.

همان‌طور که از نتایج تحقیقات استنباط می‌شود نیاز به بررسی‌های بیشتر در ویژگی‌های ترموفیزیکی احساس می‌شود و در هیچ‌کدام از تحقیقات انجام گرفته تا کنون رابطه‌ی نوع سیال عامل یا ویژگی‌های ترموفیزیکی آن با رژیم جریان مورد بررسی قرار نگرفته است، که یکی از دلایل انجام این کار پرداختن به این موضوع می‌باشد.

۲-۲-۵- لوله‌های حرارتی نوسانی میکرو^۱

در سال‌های اخیر به دلیل رشد روزافزون وسایل الکترونیکی و میل به کاهش اندازه‌ی تراشه‌های الکترونیکی، استفاده از وسایل انتقال حرارت با عملکرد بالا بیش از پیش احساس می‌شود و لوله‌های حرارتی نوسانی به دلیل ظرفیت بالایی که در انتقال حرارت دارند می‌توانند به‌عنوان یک گزینه‌ی مهم برای خنک‌کاری وسایل الکترونیکی مورد استفاده قرار بگیرند.

^۱ Micro Pulsating Heat Pipe (μ PHP)

در سال ۲۰۱۵ کای-شینگ یانگ و همکاران [۴۴] از یک μPHP با ابعاد $40 \times 35 \times 1,5 \text{ mm}^3$ و دارای ۶۴ کانال ۴ گوش از جنس سیلیکون با عمق ۰,۲۵ که فاصله‌ی کانال‌ها از هم ۰,۳ میلی‌متر و ۰,۵ میلی‌متر بود را در آزمایش‌های خود مورد استفاده قرار دادند.

آنها از آب و متانول به‌عنوان سیال عامل استفاده کردند و نتیجه گرفتند که سیال عامل اب در ایجاد جریان نوسانی دوفازی با شکست روبرو می‌شود ولی سیال عامل متانول در نسبت‌پرشدگی ۸۰ درصد عملکرد مناسبی را از خود نشان می‌دهد. آنها دلیل عمل نکردن آب برای ایجاد جریان نوسانی دوفازی را کشش سطحی بالا، گرمای نهان تبخیر بالا و عدد باند پایین ذکر کردند.

۲-۲-۶- لوله‌های حرارتی نوسانی فین‌دار

همان‌طور که ذکر شد استفاده از لوله‌های حرارتی نوسانی به‌دلیل عملکرد بالای آنها در انتقال حرارت باعث شده که در سال‌های اخیر محققان برای اثبات این موضوع تلاش بیشتری را ارائه بدهند و عملکرد این وسیله را در شرایط گوناگون مورد سنجش قرار بدهند که یکی از این شرایط استفاده از فین در PHP ها می‌باشد که این کار در سال ۲۰۱۵ توسط لوطفر رحمان و همکاران برای لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه‌باز [۴۵] و حلقه‌بسته [۴۶, ۴۷] انجام شد.

آنها برای انجام آزمایش‌های خود از یک OLPHP و دو CLPHP از جنس مس و با مشخصات زیر استفاده کردند:

OLPHP : ۸ دور، قطر داخلی ۲,۵ و خارجی ۳ میلی‌متر، سیال‌های عامل اتانول و متانول در نسبت-پرشدگی ۵۰ درصد [۴۵]

CLPHP1 : ۸ دور، قطر داخلی ۲,۵ و خارجی ۳ میلی‌متر، سیال‌های عامل اتانول و متانول در نسبت‌پرشدگی ۵۰ درصد [۴۷]

CLPHP2 : ۸ دور، قطر داخلی ۲ و خارجی ۲,۵ میلی‌متر، سیال عامل متانول در نسبت‌پرشدگی ۵۰ درصد [۴۶]

آنها در آزمایش‌های خود با اضافه کردن فین به قسمت کندانسور به مقایسه‌ی عملکرد لوله‌های

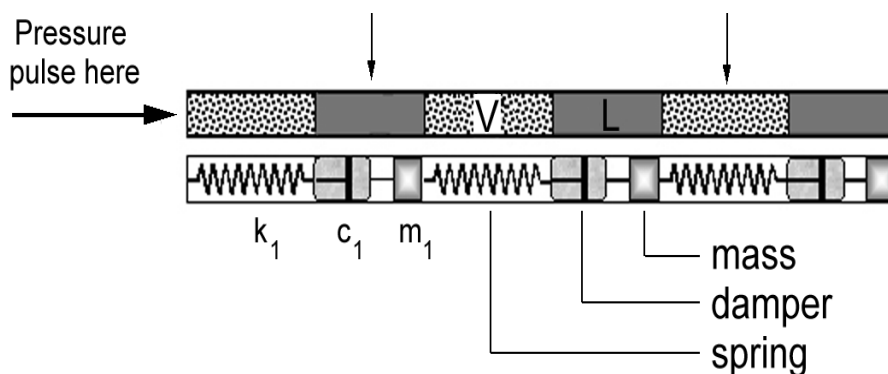
حرارتی در دو حالت با و بدون فین پرداختند و نتیجه گرفتند که در همه‌ی حالت‌های انجام آزمایش لوله‌های حرارتی فین‌دار عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند.

۲-۳- مدل‌سازی‌های ریاضی و عددی

تلاش‌های انجام شده در این زمینه، به دلیل پیچیدگی‌های زیادی که در جریان دوفازی وجود دارد، اغلب با ساده‌سازی‌های زیادی انجام شده است و به همین دلیل از اعتبار زیادی برخوردار نیست، با این وجود برای پیش‌بینی بعضی از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی مؤثر بوده و با توجه به سختی‌های موجود در تحقیقات تجربی، می‌تواند الگوی مناسبی ارائه دهد.

زو و نورث [۴۸] سعی کردند که کارکرد لوله‌های حرارتی نوسانی را به‌وسیله‌ی مقایسه با یک سیستم جرم-فنر-دمپر که توسط معادله‌ی دیفرانسیل همگن مرتبه‌ی ۲ با ثابت فنر وابسته به زمان بیان می‌شد، مدل کنند. طبیعت معادله‌ی حاصل از مدل‌سازی بر این اظهار داشت که ضریب سختی فنر با زمان افزایش پیدا می‌کند بنابراین دامنه‌ی نوسانات کاهش می‌یابد که با نتایج تجربی تناقض دارد.

وانگ و همکاران [۴۹] به مدل‌سازی سینماتیک پلاگ‌های بخار و اسلاگ‌های مایع در لوله‌های حرارتی نوسانی با در نظر گرفتن یک سیستم جرم-فنر-دمپر چندگانه و بدون در نظر گرفتن انتقال حرارت پرداختند (شکل ۷-۲).



شکل ۷-۲: مدل جرم-فنر-دمپر چندگانه [۴۹]

آنها در کار خود تأثیر نفوذ پالس‌های فشار ناشی از طول اسلاگ‌های مایع و نسبت‌پرشدهی را بر عملکرد سیستم بررسی کردند.

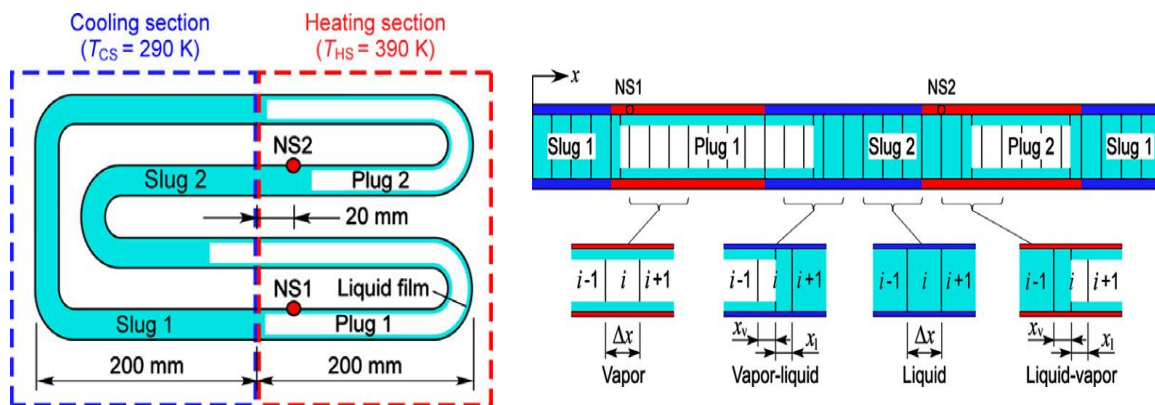
اگرچه نتایج این کار یک دید مهم در مورد کارایی سیستم در اختیار می‌گذارد ولی یکی از ساده‌سازی‌هایی که در این مدل برای راحت شدن حل مسأله انجام شده، نادیده گرفتن انتقال حرارت است درحالی‌که پالس‌های فشار عمدتاً ناشی از انتقال حرارت پیچیده‌ی موجود در PHP می‌باشد. لذا مدل ارائه شده این اجازه را به ما نمی‌دهد که با استفاده از نتایج آن به طراحی PHP بپردازیم.

زین-شی یانگ و لوئان [۵۰] از یک مدل ریاضی ساده شده برای مدل سازی فیزیک سیستم انتقال حرارت دوفازی استفاده شده کردند. آنها این مدل ریاضی را با استفاده از نوشتن معادلات ساده‌شده‌ی حاکم بر PHP در یک بعد به دست آورده و از روش تفاضل محدود حل و با نتایج تجربی موجود مقایسه کردند. در مدل ارائه شده با این که بعضی از مشخصه‌های سیستم واقعی قابل پیش بینی بود، با وجود این هنوز یک سری اختلافات معناداری بین حل عددی و اطلاعات تجربی وجود داشت. آنها دلیل این اختلافات را ناشی از استفاده از پارامترهایی در مدل پیشنهادی خود که بازتاب‌دهنده‌ی پارامترهای واقعی مدل‌های تجربی نیستند بیان کردند. از طرفی اذعان داشتند که مدل ارائه شده همه‌ی پارامترهای فیزیکی موجود در PHP را نیز در نظر نمی‌گیرد.

یک سری تحقیقات دیگر نیز در زمینه‌ی مدلسازی‌های ریاضی بر پایه‌ی ترکیبی از طراحی‌های صریح و ضمنی انجام شده است، که دارای ساختار پیچیده همراه با فرضیات و روابط تجربی حاکم بر تبخیر و تقطیر شدن می‌باشد. با وجود نتایج مفیدی که با شواهد تجربی نیز تا حدودی همخوانی دارد ولی یک تفاوت معنادار بین ساختار فیزیکی مدل‌های ارائه شده با مشاهدات تجربی قابل لمس است. زیرا در این مدل‌ها، ارائه‌ی شرایط پیچیده‌ی دوفازی، انباشتگی حباب‌ها، الگوهای جریان چندگانه و نوسانات بی‌نظم که در شرایط عملکردی واقعی وجود دارد، امکان‌پذیر نمی‌باشد [۵۱-۵۳].

رافلز و اینو [۴] به منظور بررسی رفتار جریان اسلاگ‌های مایع، پلاگ‌های بخار، فیلم‌های مایع و مشخصه‌های انتقال حرارت به شبیه‌سازی یک‌بعدی یک CLPHP با ۲ دور، قطر داخلی ۱٫۵ میلی‌متر،

سیال عامل اتانول با نسبت پرشدگی ۵۰ درصد و بدون قسمت آدیاباتیک پرداختند (شکل ۸-۲).



شکل ۸-۲: مدل ارائه شده توسط رافلز سنجایا و تاکایاشی اینو [۴]

شبه‌سازی تحت شرایط مرزی دمای ثابت دیواره، انجام دادند و برای ساده‌سازی مدل خود فرض -

های زیر را در نظر گرفتند:

« دمای دیواره ثابت در نظر گرفته شده است.

« تأثیر جاذبه نادیده گرفته شده است.

« پلاگ‌های بخار به صورت گاز ایده‌آل رفتار می‌کنند.

« اسلاگ‌های مایع تراکم ناپذیرند.

« تأثیر پیچ‌های مسیر نادیده گرفته شده است.

« ضرایب انتقال حرارت و هدایت‌های حرارتی اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار ثابت فرض شده

است.

نتایج حاصل از این مدل‌سازی بصورت زیر گزارش شد:

« فرکانس حرکت‌های نوسانی به علت تولید حباب پیوسته افزایش می‌یابد.

« بواسطه‌ی دامنه‌ی بزرگ و فرکانس بیشتر حرکت‌های نوسانی، مقدار نرخ انتقال حرارت محسوس

و نهان از اوپراتور به قسمت کندانسور افزایش می‌یابد.

« تولید حباب باعث اختلاف فشار بین دو پلاگ بخار مجاور می‌شود و به‌عنوان نیرو محرکه باعث حرکت‌های نوسانی اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار با دامنه‌ی زیاد می‌گردد که با نتیجه‌ی خیلی از شبیه‌سازی‌های قبلی که فقط یک حرکت سینوسی با دامنه‌ی کم را پیش‌بینی می‌کردند متفاوت است.

« نرخ انتقال حرارت نهان در اثر نرخ تبخیر بیشتر فیلم مایع در طی رشد حباب افزایش می‌یابد. در شبیه‌سازی با تولید حباب، ۷۴ درصد حرارت بوسیله حرارت محسوس و ۲۶ درصد بوسیله حرارت نهان انتقال می‌یابد. از طرفی در شبیه‌سازی بدون تولید حباب انتقال حرارت عمدتاً بوسیله حرارت محسوس صورت گرفته (۹۵ درصد) و فقط ۵ درصد آن توسط حرارت نهان انجام شد که با شبیه‌سازی‌های قبلی مطابقت داشت.

رافلز و اینو [۵۴] برای تکمیل کار خود تأثیر پارامترهایی از قبیل طول اسلاگ مایع، دمای قسمت اوپراتور، تعداد اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار، آرایش مکان‌های هسته‌زایی^۱ و تعداد آنها را مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاکی از این بود که حرکت اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار در اثر تولید حباب‌های TS پیچیده‌تر می‌شود، همچنین پروفیل نرخ انتقال حرارت در اثر پیچیدگی حرکت‌ها به صورت تصادفی در می‌آید.

۲-۴ - نتیجه‌گیری و ضرورت انجام کار

لوله‌ی حرارتی نوسانی دارای پیچیدگی‌های فراوانی بوده و با انواع ناپایداری‌های جریان دوفازی کار می‌کند و عملکرد آن دارای وابستگی‌های ترمودینامیکی و ساختاری زیادی می‌باشد.

فعالیت‌های تجربی انجام شده در این زمینه اگرچه در خیلی از موارد دارای نتایج مشترک هستند ولی در بعضی موارد اختلافاتی در آنها مشاهده می‌شود، از طرفی نتیجه‌ی فعالیت‌های عددی و ریاضی انجام شده به‌دلیل فرض‌های زیادی که برای تسهیل در حل مسأله در نظر گرفته می‌شود، اختلافات

¹ Nucleation Site (NS)

زیادی با نتایج تجربی داشته و همین امر باعث می‌شود که نتایج حل‌های عددی و ریاضی اعتبار لازم و کافی را برای به کارگیری در طراحی و پیش‌بینی عملکرد حرارتی وسیله نداشته باشند.

لذا با توجه به این که فعالیت‌های انجام‌شده در این زمینه کم بوده و از طرفی یک تئوری جامع و اطلاعات موثق برای طراحی و پیش‌بینی عملکرد حرارتی لوله‌ی حرارتی نوسانی موجود نیست، نیاز به آزمایش‌های پیش‌تری در حوزه‌ی لوله‌های حرارتی نوسانی برای رسیدن به نتایج معتبر احساس می‌شود.

در این کار سعی بر آنست که با طراحی متفاوت یک CLPHP نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده و بررسی روابط بین پارامترهای مهم تأثیرگذار بر رژیم جریان دوفازی و عملکرد حرارتی سیستم، با بررسی دقیق رژیم جریان دوفازی به‌عنوان عامل اصلی انتقال حرارت در CLPHP به تبیین رابطه‌ی آن با سایر پارامترهای مؤثر بر عملکرد حرارتی وسیله پرداخته و در نهایت یک طرح جامع در زمینه‌ی لوله‌های حرارتی نوسانی حلقه‌بسته که مزیت آن نسبت به سایر لوله‌های حرارتی ملموس است ارائه گردد.

فصل سوم

توصیف وسایل و تجهیزات آزمایش

۳-۱- مقدمه

با توجه به دلایل متعددی که در فصل قبل در مورد ضرورت انجام تحقیقات تجربی بیشتر در راستای لوله‌های حرارتی نوسانی ذکر شد، در این کار سعی بر آن است که با انجام آزمایش‌های تجربی بیشتر با دو CLPHP که دارای مشخصه‌های ساختاری کاملاً جدید هستند گام مؤثری در زمینه‌ی لوله‌های حرارتی نوسانی برداشته شود.

دلایلی که در فصل قبل در مورد عملکرد بهتر CLPHP نسبت به OLPHP بیان گردید، باعث شد تا تحقیقات خود را در زمینه‌ی CLPHPها متمرکز کنیم و با توجه به اینکه عامل اصلی انتقال حرارت در لوله‌های حرارتی نوسانی، مربوط به رژیم جریان دوفازی سیال عامل موجود در آن می‌باشد، بررسی این رژیم جریان اصلی‌ترین هدف این کار بوده است و به همین دلیل برای دیدن نوع رژیم جریانی که در طی کارکرد وسیله اتفاق می‌افتد، هر دو نمونه‌ی CLPHP از جنس پیرکس ساخته شد. در این فصل به بررسی فیزیک و نوع کارکرد وسایل جانبی و فیزیک کلی^۱ set-upهای مربوط به انجام آزمایش می‌پردازیم.

۳-۲- وسایل و تجهیزات جانبی

وسایل و تجهیزات جانبی شامل همه‌ی وسایلی می‌باشد که در هر دو set-up مورد آزمایش در این کار، از آنها استفاده شده، که در این قسمت به توضیح مختصری در مورد این وسایل می‌پردازیم.

۳-۲-۱- سنسور حرارتی PT-100

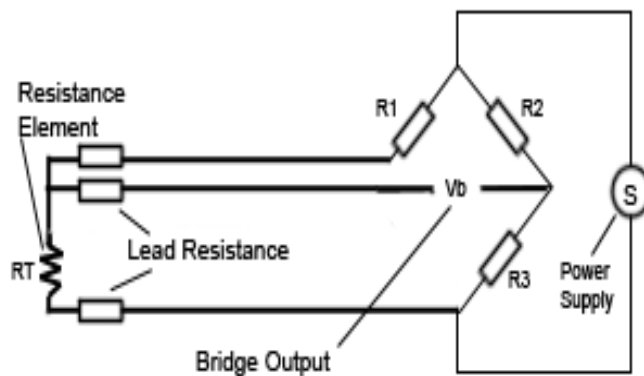
سنسور حرارتی PT-100 وسیله‌ای است که تغییرات دما را به صورت تغییرات مقاومت نشان می‌دهد و به ازای هر درجه‌ی سانتیگراد ۰,۳۸۵ اهم از مقاومتش کم یا زیاد می‌شود. طبق قانون اهم مقدار ولتاژ دو سر یک مقاومت برابر با مقدار مقاومت در مقدار جریان عبوری از آن است. لذا برای خواندن

^۱ وسیله‌ای که آزمایش‌ها بر روی آن انجام می‌گیرد.

دما برای آنکه بتوان آنرا بصورت خروجی ولتاژ درآورد، کفایت که از یک پل مقاومتی معروف به پل وتسون استفاده کنیم، سنسورهای PT-100 به صورت دو، سه و یا چهار سیمه ساخته می‌شوند، که نحوه‌ی اتصال هر کدام به پل مقاومتی متفاوت است.

سنسور PT-100 در کل محدوده‌ی اندازه‌گیری دارای عملکرد خطی بوده، دقت اندازه‌گیری بالایی نسبت به سایر سنسورهای حرارتی داشته بطوریکه در محدوده‌ی کاربرد دمایی آزمایش‌های انجام‌شده بر روی CLPHP‌های مورد استفاده در این پژوهش دقت آن ۰,۱ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد و نکته قابل توجه دیگر مربوط به سرعت بالای پاسخگویی بالای آن به تغییرات دماست و با توجه به این که سرعت پاسخگویی در این کار بسیار حائز اهمیت می‌باشد، لذا از PT-100 (سه‌سیمه) برای خواندن دما در انجام آزمایش‌ها استفاده شده است.

شکل ۱-۳ نمونه‌ای از یک پل مقاومتی به همراه اتصال یک PT-100 (در شکل با نماد RT نشان داده شده است) سه‌سیمه را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: نحوه‌ی اتصال PT-100 سه‌سیمه به پل مقاومتی

زمانی ولتاژ صفر می‌شود که مدار در حال تعادل باشد و این تعادل زمانی برقرار می‌باشد که رابطه- ی (۱-۳) برقرار باشد.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{PT-100}}{R_3} \quad (1-3)$$

استفاده از اتصال سه سیمه ی PT-100 تا حد زیادی اثر مقاومت سیم های رابط را در مقدار اندازه

گیری خنثی می کند، لازم به ذکر است که PT-100 سه سیمه بیشترین کاربرد را در صنایع دارد.

۳-۲-۲- سیستم کسب داده^۱

همان طور که در قسمت قبل شرح داده شد، برای خواندن دما از سنسور PT-100 نیاز به استفاده از

یک سری مدارها داریم، در بازار یک سری وسایل با نام تجاری data acquisition یا data logger برای

خواندن دما از سنسورهای حرارتی موجود می باشد که خروجی سنسور را به صورت اعداد قابل فهم

برای ما در می آورند.

Data acquisition مورد استفاده در این کار با نام تجاری ADAM می باشد (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲: data acquisition مورد استفاده در این کار

۳-۲-۳- دوربین سرعت بالا

با توجه به این که یکی از اهداف اصلی انجام این پژوهش مشاهده و بررسی رژیم جریان در

CLPHP می باشد، به همین دلیل از CLPHPهایی از جنس پیرکس برای انجام آزمایش ها استفاده

شده است و برای مشاهده ی هرچه دقیق تر از یک دوربین پرسرعت برای مشاهده و بررسی رژیم

¹ Data acquisition

جریانی که در حین کار CLPHP ها اتفاق می افتد بهره برده ایم.

دوربین مورد استفاده با رزولوشن بسیار بالا و توانایی تصویربرداری ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه برای ثبت تصاویر مربوط به رژیم جریان دوفازی که در CLPHP اتفاق می افتد مورد استفاده قرار گرفت. دوربین مورد استفاده دارای نام تجاری PCo high speed camera مدل S1 می باشد (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳: دوربین مورد استفاده در این کار

۳-۲-۴- پمپ خلاء

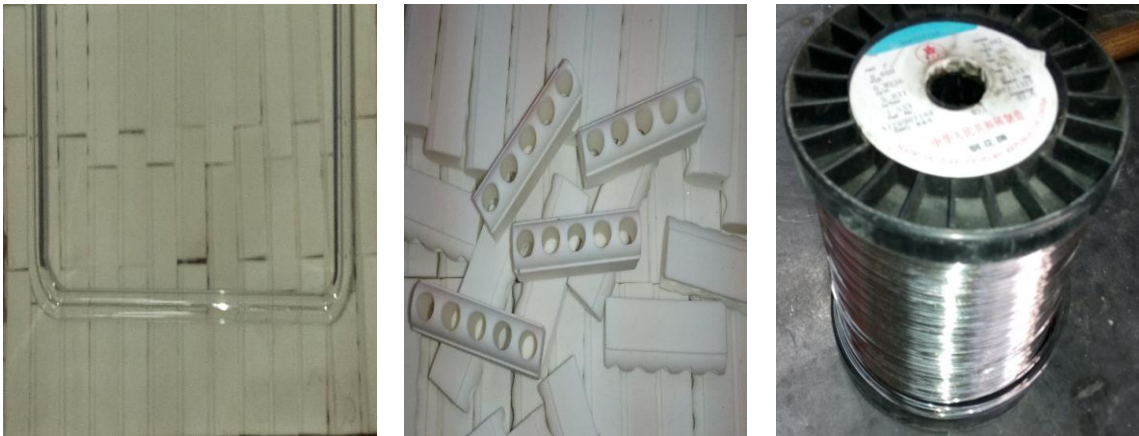
برای تخلیه‌ی هوای داخل CLPHP در انجام آزمایش‌ها از پمپ خلاء با نام تجاری EMERSON مدل C55JXHRL-4205 استفاده شد (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳: پمپ خلاء مورد استفاده در این کار

۵-۲-۳- صفحه‌ی حرارتی

حرارت ورودی به قسمت اواپراتور CLPHP در این کار از طریق یک صفحه‌ی حرارتی سرامیکی که از عبور دادن سیم‌های فنی شده از جنس نیکل-کروم با قطر ۰,۶ میلی‌متر و مقاومت $\frac{\Omega}{m}$ ۵,۰۳۱ از داخل قطعات سرامیکی و کنار هم قرار دادن این قطعات بوجود آمده، تأمین شده است (شکل ۵-۳).



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۵-۳: الف) سیم نیکل-کروم مورد استفاده در ساخت صفحه‌ی حرارتی (ب) قطعه‌های سرامیکی مورد استفاده در ساخت صفحه‌ی حرارتی (ج) صفحه‌ی حرارتی در قسمت اواپراتور CLPHP با یک دور

۵-۲-۳- دیمر

دیمر وسیله‌ای است که برای تنظیم مقدار ولتاژ ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به طوری که با دریافت ولتاژ منبع، ولتاژی معادل با صفر تا ولتاژ منبع را به عنوان خروجی ارائه می‌دهد. در این کار به منظور کنترل مقدار ولتاژ ورودی به صفحه‌ی حرارتی و در نتیجه کنترل حرارت ایجاد شده توسط صفحه‌ی حرارتی و نهایتاً کنترل حرارت ورودی به قسمت اواپراتور CLPHP از دیمر استفاده شده است. دیمر مورد استفاده در این کار یک دیمر ۵۰۰۰ وات دارای عقربه‌ی تنظیم ولتاژ می‌باشد (شکل ۶-۳).



شکل ۳-۶: دیمر مورد استفاده در آزمایش‌ها

۳-۳- CLPHP های مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی‌های CLPHP های مورد استفاده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

« همان‌طور که قبلاً هم ذکر شد، بررسی دقیق رژیم جریان دوفازی هدف اصلی این کار پژوهشی می‌باشد به همین منظور برای ساخت CLPHP های مورد استفاده از لوله‌هایی از جنس پیرکس با قطر داخلی ۴ و خارجی ۶ میلی‌متر، به منظور مشاهده‌ی نوع جریان دوفازی که در CLPHP اتفاق می‌افتد، استفاده شده است.

«CLPHP ها دارای دو قسمت اوپراتور و کندانسور می‌باشند، حرارت ورودی در قسمت اوپراتور توسط صفحه‌ی حرارتی و به صورت تشعشعی تأمین می‌گردد و دفع گرما بوسیله‌ی حمام آب سردی که در قسمت کندانسور تعبیه شده اتفاق می‌افتد.

« بین قسمت اوپراتور و کندانسور از دو لایه از جنس آلومینا به عنوان عایق حرارتی که در بازار از آن با نام پنبه‌ی نسوز یاد می‌کنند استفاده شده است که می‌توان از آن به عنوان قسمت آدیاباتیک نیز نام برد.

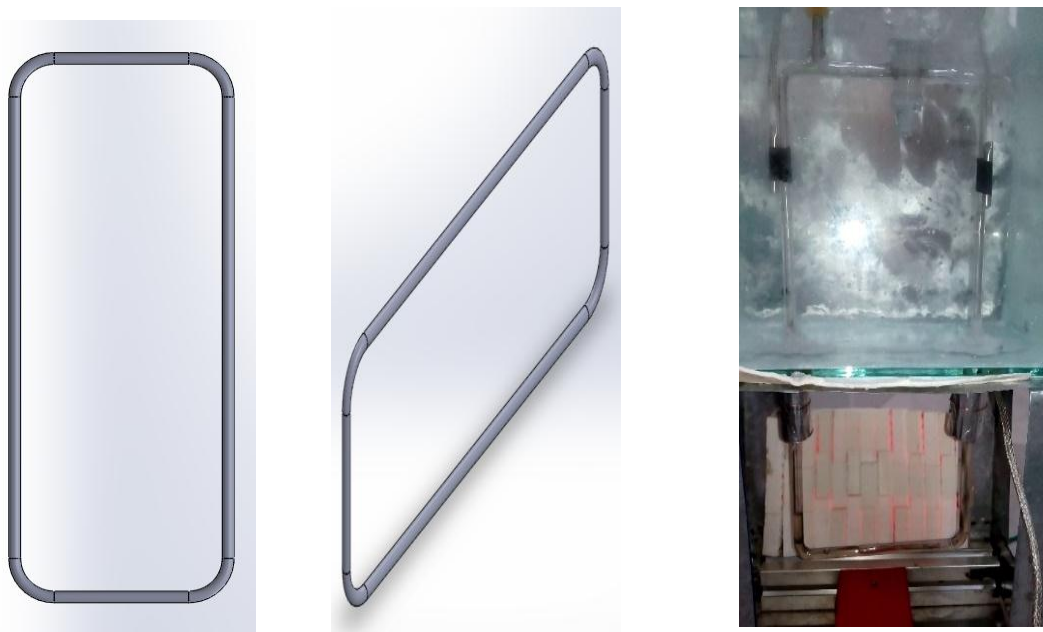
« در هر دو CLPHP از دو شیر به منظور ورود و خروج سیال عامل و تخلیه‌ی هوا استفاده شده- است.

« به منظور بررسی تأثیر تعداد دورها در عملکرد حرارتی CLPHP، دو CLPHP با ۱ و ۲ دور ساخته شد که از این به بعد به اختصار آن‌ها را CLPHP1 و CLPHP2 می‌نامیم.

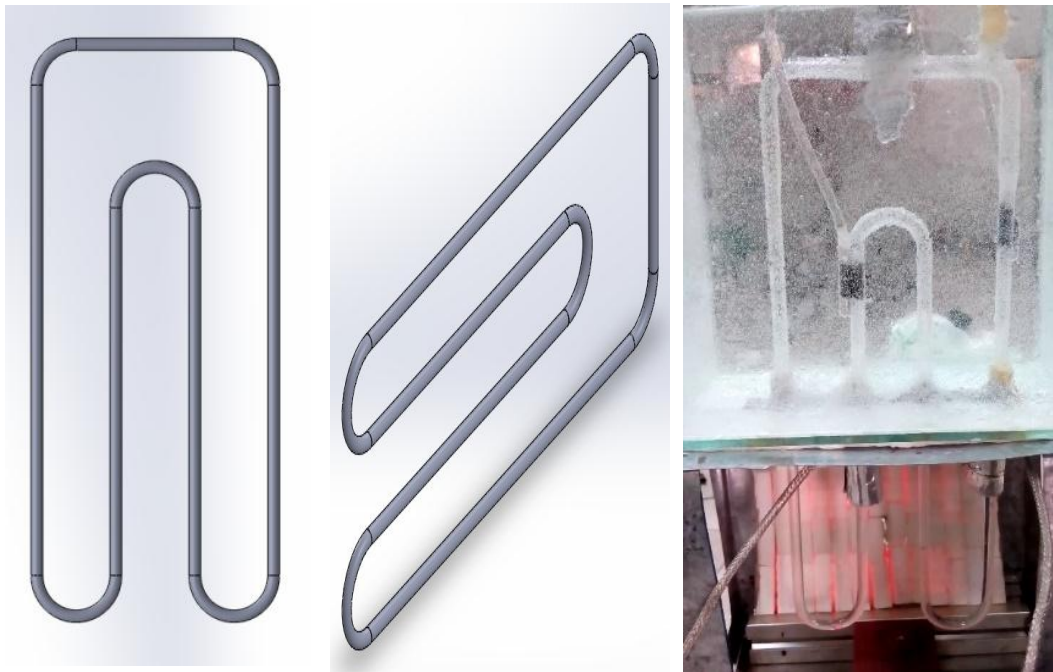
« در مجموع ۴ سنسور PT-100 برای اندازه‌گیری دمای دیواره‌ی قسمت‌های اواپراتور و کندانسور بر روی هر CLPHP نصب گردید (۲ سنسور در قسمت اواپراتور و ۲ سنسور در قسمت کندانسور).

«تصویر CLPHP‌های ساخته شده برای انجام این کار و تصویر سه‌بعدی شماتیک از آنها را در

شکل‌های زیر مشاهده می‌کنید(شکل ۳-۹، شکل ۳-۷):

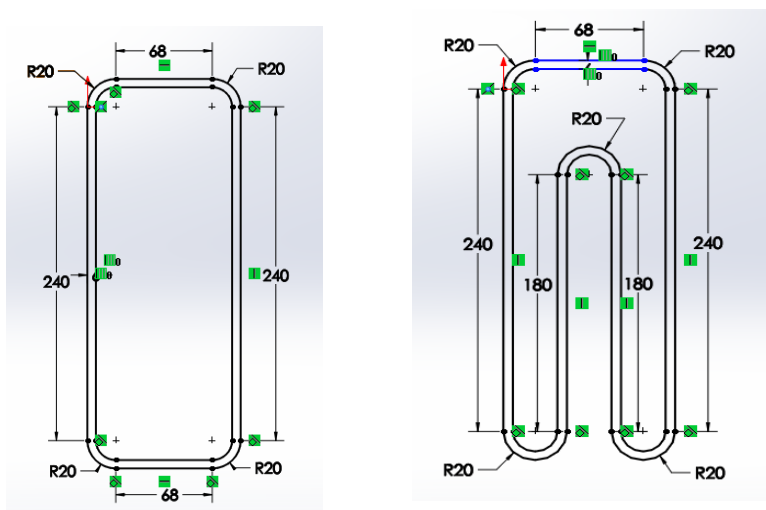


شکل ۳-۷: تصویر CLPHP1 و تصویر ۳ بعدی شماتیک آن



شکل ۳-۸: تصویر CLPHP2 و تصویر ۳ بعدی شماتیک آن

« ابعاد CLPHP های مورد استفاده در این کار در شکل ۳-۹ آورده شده است. لازم به ذکر است که طول قسمت اوپراتور و کندانسور در هر دو CLPHP به ترتیب ۱۳,۵ و ۱۵,۵ سانتی متر می باشد.



شکل ۳-۹: ابعاد CLPHP1 و CLPHP2 به میلی متر

فصل چهارم

تحليل نتايج آزمائشگاهي

۴-۱- مقدمه

در این فصل به تجزیه و تحلیل نتایج عددی و بصری حاصل از آزمایش‌های انجام شده تحت شرایط متفاوت، شامل بررسی ۴ نوع سیال عامل در نسبت‌های پرشدگی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد، در ۲ حالت عمودی و افقی بر روی دو CLPHP ساخته شده (که جزئیات آن‌ها در فصل قبل آورده شد)، می‌پردازیم.

در تجزیه و تحلیل عملکرد حرارتی CLPHP از دو پارامتر مقاومت حرارتی کلی (R) و هدایت حرارتی کلی (K) استفاده شده که لازم است چگونگی محاسبه‌ی این ۲ پارامتر مورد توجه قرار بگیرد، مقاومت حرارت کلی و هدایت حرارت کلی به‌واسطه‌ی روابط (۱-۴) و (۲-۴) [۳۴] بیان می‌شوند.

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right) \quad (1-4)$$

$$K = \frac{L_{eff}}{A_{cr}} \frac{Q}{\Delta T} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \right) \quad (2-4)$$

ΔT اختلاف دمای میانگین اواپراتور و کندانسور، Q حرارات ورودی به قسمت اواپراتور، L_{eff} طول

مؤثر، A_{cr} مساحت مقطع می‌باشد که طبق روابط (۳-۴)، (۴-۴) و (۵-۴) بیان می‌گردند:

$$\Delta T = T_e - T_c \quad (3-4)$$

$$L_{eff} = \frac{1}{2}(L_e + L_c) + L_a \quad (4-4)$$

$$A_{cr} = n \cdot \pi \frac{D^2}{4} \quad (5-4)$$

در روابط فوق T_e دمای میانگین قسمت اواپراتور و T_c دمای میانگین قسمت کندانسور بوده که از طریق گرفتن میانگین حسابی دماهای اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای تعبیه شده در این قسمت-ها به دست می‌آیند. L_e طول قسمت اواپراتور، L_c طول قسمت کندانسور، L_a طول قسمت آدیاباتیک، n تعداد کانال‌ها و D قطر خارجی لوله‌ی حرارتی می‌باشد.

۲-۴- چگونگی طراحی قطر داخلی CLPHP

لازم است قبل از تجزیه و تحلیل نتایج، نحوه‌ی طراحی یک پارامتر بنیادی در CLPHPها یعنی قطر داخلی (d)، که تأثیر به‌سزایی بر عملکرد حرارتی سیستم می‌گذارد، مورد بررسی قرار بدهیم. همان‌طور که شرح داده شد پارامترهای زیادی بر رژیم جریان دوفازی حاکم در لوله‌های حرارتی نوسانی تأثیر می‌گذارند، در همین راستا محققان یک قطر بحرانی برای تشکیل رژیم جریان اسلاگ-پلاگ در CLPHP در نظر می‌گیرند، به‌طوری‌که بعضی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد حرارتی سیستم را با قطر داخلی آن مربوط ساخته و محدوده‌ای برای قطر داخلی به‌منظور تشکیل این نوع رژیم تعریف می‌کنند.

از جمله مهم‌ترین پارامترهای تأثیر گذار بر رژیم جریان دوفازی حاکم بر CLPHP، شامل نیروی کشش سطحی، گرانش، ویسکوزیته و اینرسی می‌باشد که بواسطه‌ی یک‌سری اعداد بی‌بعد به یکدیگر مربوط می‌شوند.

عدد باند^۱ مهم‌ترین عدد بی‌بعدی است که برای تعریف یک قطر بحرانی به‌منظور تشکیل رژیم جریان اسلاگ-پلاگ در CLPHP مورد استفاده اکثر محققان در این زمینه قرار گرفته است، عدد باند جذر عدد اتوس^۲ می‌باشد که نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی بوده و توسط رابطه‌ی (۶-۴) بیان می‌گردد.

$$Bo = \sqrt{E\ddot{o}} = \sqrt{\frac{g \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot d^2}{\sigma}} \quad (6-4)$$

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این زمینه برای تشکیل رژیم جریان اسلاگ-پلاگ بایستی $E\ddot{o} \leq 4$ یا به‌عبارتی $Bo \leq 2$ باشد، لذا با توجه به رابطه‌ی (۶-۴) قطر داخلی بحرانی متناسب با عدد باند (d_{Bo}) بصورت رابطه‌ی (۷-۴) تعریف می‌گردد:

¹ Bond number

² Eötvös number

$$d_{Bo} \leq 2 \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v) \cdot g}} \quad (7-4)$$

با توجه به رابطه‌ی (7-4) در حالت افقی و حالت‌هایی که شتاب جاذبه‌ی خیلی پایین می‌باشد، تقریباً هیچ محدودیتی برای قطر داخلی CLPHP وجود ندارد، ولی در تجربه این امکان‌پذیر نیست، لذا رابطه‌ی (7-4) در حالت‌هایی که شتاب جاذبه خیلی پایین باشد، محدوده‌ی مناسبی را برای طراحی CLPHP ارائه نمی‌دهد؛ گیو و همکاران [56] برای رفع این مشکل از عدد بی‌بعد وبر¹ برای تعریف محدوده‌ی قطر CLPHP بهره جستند، عدد وبر نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی بوده و طبق رابطه‌ی (8-4) بیان می‌گردد:

$$We = \frac{\rho_l \cdot u_l^2 \cdot d}{\sigma} \quad (8-4)$$

در رابطه‌ی فوق u_l بیان‌کننده‌ی سرعت سیال در فاز مایع می‌باشد.

طبق رابطه‌ی (8-4) و با توجه به اینکه گیو و همکاران اذعان داشتند که بایستی در شتاب جاذبه‌ی

پایین $We \leq 4$ باشد، قطر بحرانی متناسب با عدد وبر طبق رابطه‌ی (9-4) بیان می‌گردد:

$$d_{We} \leq \frac{4\sigma}{\rho_l \cdot u_l^2} \quad (9-4)$$

هارچیپیان و گاریملا [57] از یک معیار نیمه-تجربی با در نظر گرفتن نیروهای اینرسی و ویسکوز برای

به‌دست آوردن محدوده‌ی قطر داخلی لوله‌های حرارتی عدد بی‌بعد جدیدی به نام عدد گاریملا² را به-

صورت حاصل ضرب جذر عدد باند در عدد رینولدز معرفی کردند و اذعان داشتند که در لوله‌های

حرارتی بایستی $Ga \leq 160$ باشد.

$$Ga = \sqrt{Bo} \times Re \quad (10-4)$$

¹ Weber number

² Garimella number

لذا طبق معیار گاریملا، محدوده‌ی قطر بحرانی به صورت رابطه‌ی (۱۱-۴) بیان می‌گردد:

$$d_{Ga} \leq \sqrt{\frac{160\mu_l}{\rho_l \cdot u_l} \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v) \cdot g}}} \quad (11-4)$$

در رابطه‌های (۹-۴) و (۱۱-۴) با توجه به این که سرعت سیال به طور کامل در CLPHPها قابل پیش بینی نبوده و محدوده‌ی نسبتاً وسیعی را در بر می‌گیرد، لذا این روابط نیز محدوده‌ی وسیعی را برای قطر داخلی PHPها در نظر می‌گیرند.

با توجه به مباحثی که در زمینه‌ی قطر بحرانی انجام داده شد، می‌توان به این نتیجه دست یافت که به طور کلی روابطی که برای تعیین قطر داخلی CLPHPها در نظر گرفته می‌شود، الزاماً دقیق نبوده ولی می‌توان از آنها به عنوان یک معیار مناسب برای تعیین قطر داخلی لوله‌های حرارتی نوسانی بهره برد.

طبق تحقیقات به دست آمده توسط محققان در زمینه‌ی قطر بحرانی لوله‌های حرارتی، در حالتی که نیروی گرانش کم باشد، قطر بحرانی کمی بیشتر از حالتی است که نیروی گرانش بالا است [۵۶-۵۸] لذا در نظر گرفتن قطر بحرانی در حالتی که نیروی گرانش بالاتر است به صورت خودکار قطر بحرانی در حالتی که نیروی گرانش کم‌تر است را نیز در بر می‌گیرد، در این کار با توجه به این که بیش‌تر آزمایش‌ها در حالت عمودی (نیروی گرانش بالا) بر روی CLPHPها انجام گرفته و جاذبه نیز نقش مهمی را در بررسی عملکرد حرارتی سیستم دارد، از معیار عدد باند برای طراحی قطر داخلی CLPHPها بهره برده شده است.

در اکثر تحقیقات سعی شده که قطر CLPHP کم‌تر از قطر بحرانی در نظر گرفته شود ولی در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر قطر بحرانی بر نوع رژیم جریان دوفازی که در CLPHP اتفاق می‌افتد،

طراحی قطر بحرانی کمی متفاوت است^۱.

در این کار قطر داخلی ۴ میلی‌متر برای CLPHP های مورد آزمایش در نظر گرفته شده است که کم‌تر از قطر بحرانی CLPHP برای سیال عامل آب بوده (جدول ۴-۱) و لذا تشکیل رژیم جریان اسلاگ-پلاگ در آن قطعی است ولی در مورد سیال عامل اتانول قطر بحرانی CLPHP کم‌تر از ۴ میلی‌متر است (تقریباً ۳,۶ میلی‌متر [۲۵]) که بر اساس معیار عدد باند تشکیل رژیم جریان اسلاگ-پلاگ در CLPHP امکان‌پذیر نمی‌باشد.

نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که حتی در صورتی که قطر CLPHP کمی از قطر بحرانی بیش‌تر باشد باز هم رژیم جریان اسلاگ-پلاگ در وسیله اتفاق می‌افتد ولی مدت زمانی را که سیال عامل درگیر این رژیم است کم‌تر می‌باشد، اگر قطر داخلی CLPHP کم‌تر از قطر بحرانی متناسب با عدد باند باشد (سیال عامل آب) وسیله مدت زمان بیش‌تری را تحت رژیم جریان اسلاگ-پلاگ کار می‌کند و در صورتی که قطر CLPHP بیش‌تر از قطر بحرانی می‌باشد با تحلیل رژیم جریان اسلاگ-پلاگ روبه‌رو می‌شویم (سیال عامل اتانول).

جدول ۴-۱: قطر بحرانی CLPHP بر اساس معیار عدد باند برای سیال عامل آب

قطر بحرانی (mm)	دما (°C)	قطر بحرانی (mm)	دما (°C)
۵,۱۸۹	۷۰	۵,۵۵۷	۰
۵,۱۳۱	۸۰	۵,۵۰۵	۱۰
۵,۰۷۲	۹۰	۵,۴۵۴	۲۰
۵,۰۱۰	۱۰۰	۵,۴۰۲	۳۰
۴,۹۴۶	۱۱۰	۵,۳۵۱	۴۰
۴,۸۸۰	۱۲۰	۵,۲۹۸	۵۰
۴,۸۱۱	۱۳۰	۵,۲۴۴	۶۰

^۱ در این پژوهش از آب و اتانول بیش‌تر از سایر سیال‌ها استفاده شده، لذا طراحی قطر بحرانی CLPHP ها بر پایه‌ی سیال عامل آب و اتانول انجام شده است.

۴-۳- بررسی رژیم جریان دوفازی در CLPHP

استفاده از CLPHP از جنس پیرکس باعث شد تا در این کار با بهره‌گیری از مشاهدات، به تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی، بررسی عملکرد حرارتی سیستم و رابطه‌ی آن با چگونگی حرکت سیال و تغییرات فازی که از طریق تولید و رشد حباب قابل رؤیت بود، بپردازیم.

در این قسمت سعی شده تا با استفاده از نتایج بصری به بررسی نوع حباب‌های تولیدی در CLPHP که نشان‌دهنده‌ی رژیم جریان دوفازی در آن می‌باشد، بپردازیم.

رژیم جریان داخل CLPHP به قطر آن، مشخصه‌های ترموفیزیکی سیال عامل مورد استفاده و دمای قسمت‌های کندانسور و اواپراتور بستگی دارد.

در این کار به‌طور کلی ۳ نوع رژیم جریان در CLPHPها اتفاق می‌افتد:

« نوع اول شامل حباب‌های گردی است که قطر آن‌ها از چند میکرومتر تا قطر داخلی CLPHP

متغیر می‌باشد (شکل ۴-۱).



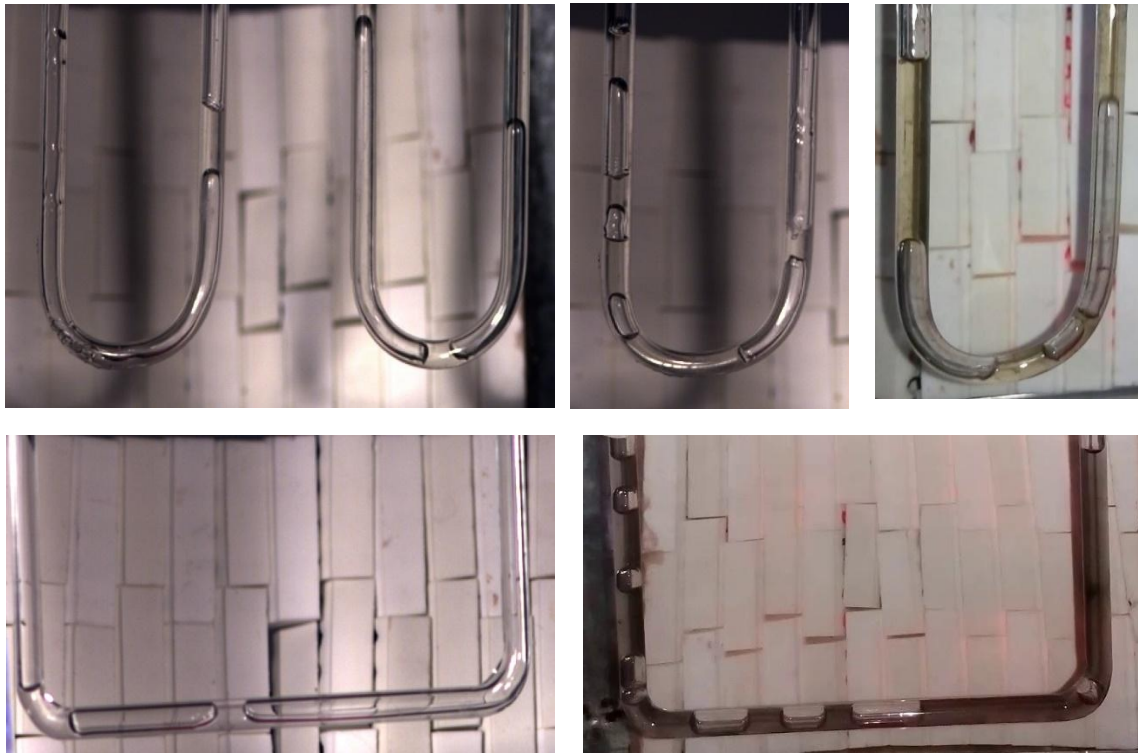
شکل ۴-۱: نمونه‌هایی از شکل حباب‌ها در محدوده‌ی رژیم جریان نوع اول

رژیم جریان نوع اول معمولاً در حرارت ورودی پایین اتفاق می‌افتد و حباب‌های گردی که در این رژیم تولید می‌شوند به صورت دنباله‌دار هستند، لازم به‌ذکر است که حباب‌های گرد صرفاً در رژیم نوع اول تولید نمی‌شوند و معمولاً با گرفتن حرارت رشد کرده و اساس تشکیل رژیم‌های جریان بعدی را به‌وجود می‌آورند.

در رژیم جریان نوع اول، مخصوصاً زمانی که حبابها قطر کمی دارند حرارت کمی از قسمت اوپراتور به قسمت کندانسور انتقال می‌یابد.

« نوع دوم همان‌طور که در شکل ۲-۴ آورده شده شامل حبابهای ستونی شکلی است که قطر آنها معادل با قطر داخلی لوله بوده و طول آنها در کم‌ترین مقدار کمی بیش‌تر از قطر داخلی CLPHP و در بیش‌ترین مقدار، قابل مقایسه با طول CLPHP می‌باشد، این نوع رژیم جریان، رژیم غالب حرکت سیال در داخل CLPHPها را تشکیل می‌دهد و رژیم جریان اسلاگ-پلاگ در زیرمجموعه‌ی آن قرار می‌گیرد.

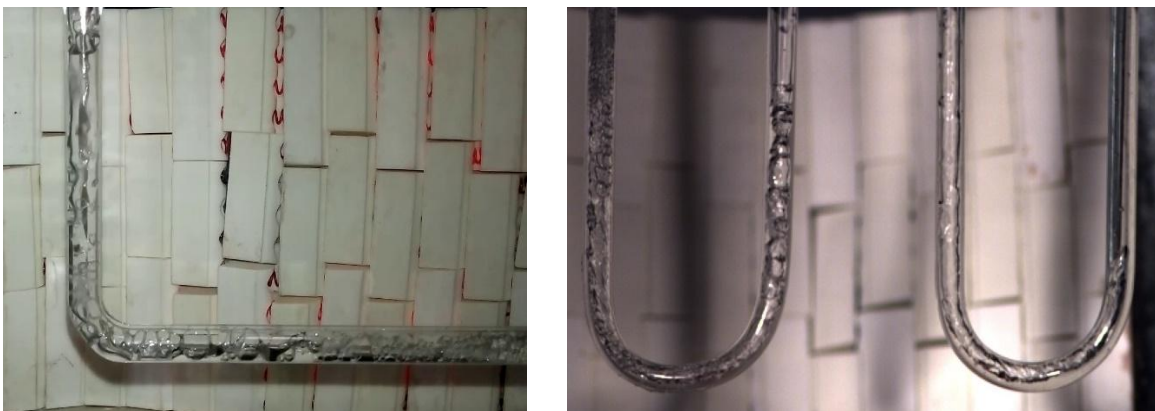
رژیم جریان اسلاگ-پلاگ شامل دنباله‌ای از اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار بوده که طول آنها کمی بیش‌تر از قطر داخلی CLPHP و کم‌تر از طول قسمت اوپراتور می‌باشد و همین امر سبب می‌شود که گرما تحت این رژیم جریان، با ثبات بیش‌تری از قسمت اوپراتور به قسمت کندانسور منتقل شود و رسیدن به یک حالت شبه‌پایدار را میسر می‌سازد.



شکل ۲-۴: نمونه‌هایی از شکل حبابها در محدوده‌ی رژیم جریان نوع دوم

در رژیم جریان نوع دوم بسته به نوع حرکت سیال (نوسانی یا گردشی)، سرعت حرکت سیال، دامنه‌ی نوسانات، سرعت تولید و رشد حباب انتقال حرارت می‌تواند کم و یا زیاد باشد.

« نوع سوم شامل یک رژیم جریان کاملاً متلاطم بوده که حباب‌هایی با شکل‌های نامتقارن آنرا تشکیل می‌دهند (شکل ۳-۴). مدت زمانی را که وسیله دچار این نوع از رژیم جریان است، در حد ثانیه بوده که در همین زمان اندک حرارت بسیار زیادی انتقال می‌یابد.



شکل ۳-۴: نمونه‌هایی از شکل حباب‌ها در محدوده‌ی رژیم جریان نوع سوم

رژیم جریان نوع سوم معمولاً در start-up سیستم تحت شار حرارتی ورودی بالا اتفاق می‌افتد، البته باید به این نکته توجه داشت که در این کار start-up صرفاً مربوط به اولین حرکت سیال پس از دادن حرارت اطلاق نمی‌گردد.

سیال عامل زمانی شروع به حرکت می‌کند که اختلاف دمای بین کندانسور و اواپراتور با توجه به شرایط آزمایش از یک مقدار معین بیش‌تر می‌شود، لذا سیال عامل با حرکت خود تحت هر رژیمی باعث کاهش این اختلاف دما می‌گردد.

نتایج بصری حاکی از این است در هر آزمایش، start-up وسیله زمانی اتفاق می‌افتد که اختلاف دمای بین اواپراتور و کندانسور (ΔT) به یک مقدار معین برسد، پس از هر start-up اگر ΔT و در

نتیجه مقاومت حرارتی سیستم (R) از آن مقدار معین کم‌تر شود، وسیله به حالت ایستا^۱ در آمده و دوباره با افزایش ΔT که افزایش R را به دنبال دارد وسیله شروع به کار می‌کند. این سیکل در حین کار CLPHP ممکن است چندین بار تکرار شود و در هر بار تکرار، سیستم start-up جدیدی را تجربه می‌کند.

در تجزیه و تحلیل عملکرد حرارتی وسیله تحت شرایط متفاوت، نمودار مقاومت حرارتی CLPHP و گاهاً نمودار تغییرات دمای قسمت اواپراتور و کندانسور بر حسب زمان آورده شده است که این نمودارها با توجه به شرایط متفاوت آزمایشگاهی دچار عکس‌العمل‌های متفاوتی نیز می‌شوند که البته خود این عکس‌العمل‌ها از رژیم جریان داخل CLPHP ناشی می‌گردند و به‌طور کلی دارای یک‌سری نوسانات با دامنه‌های کم و زیاد می‌باشند:

« نوسانات با دامنه‌ی کم معمولاً ناشی از سرعت گردش و دامنه‌ی نوسانات سیال عامل، سرعت تولید و رشد حباب در قسمت اواپراتور و سرعت کاهش اندازه و یا متلاشی شدن حباب‌ها در قسمت کندانسور می‌باشند. در این حالت معمولاً ترکیبی از رژیم جریان نوع اول و دوم بر CLPHP حاکم است.

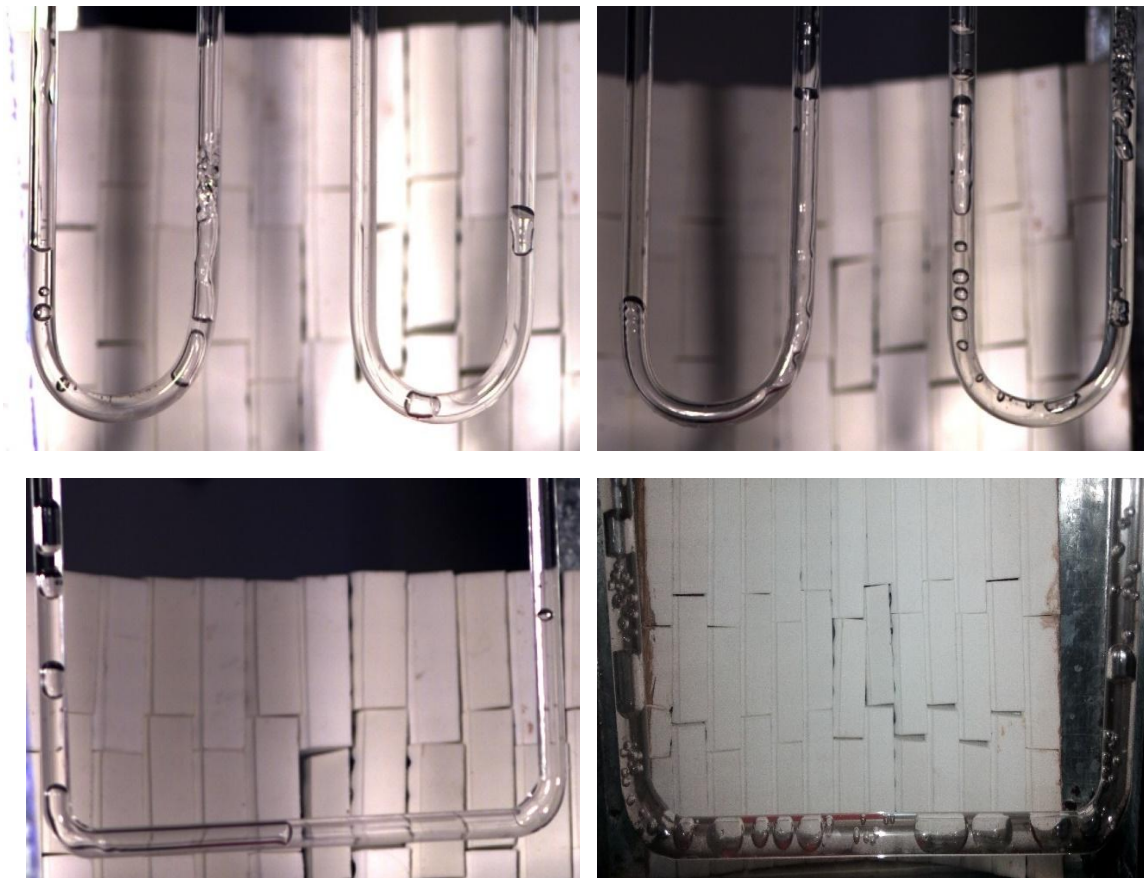
« در طی حالت‌های سکون سیال عامل و start-up سیستم بعد از حالت ایستا، که معمولاً رژیم جریان نوع سوم را شامل می‌شود، نمودارهای دما مخصوصاً در قسمت اواپراتور و مقاومت حرارتی CLPHP دچار نوسانات با دامنه‌ی زیاد می‌گردند.

در اکثر آزمایش‌ها نوسانات R در CLPHP2 کمتر اتفاق می‌افتد و دلیل اصلی آن را نتایج بصری به خوبی توجیح می‌کند که در CLPHP2 معمولاً وقتی یکی از دورها به حالت ایستا در می‌آید دور دیگر پویا^۲ بوده و با توجه به مکان قرارگیری سنسورها و این موضوع که میانگین دمای اواپراتور و کندانسور جهت محاسبه‌ی مقاومت حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نوسانات دمائی در مقاومت حرارتی

^۱ حالت ایستا در این کار به حالتی از کارکرد وسیله اطلاق می‌گردد که سیال عامل در قسمت اواپراتور دچار انباشتگی می‌گردد، که این انباشتگی در مورد CLPHP2 ممکن است فقط در یکی از دورها اتفاق بیفتد.
^۲ حالت پویا در این کار به حالتی از کارکرد وسیله اطلاق می‌گردد که سیال عامل در حال نوسان و با گردش می‌باشد.

CLPHP2 کم تر نمود پیدا می کنند.

در یک جمع بندی کلی از نتایج بصری می توان دریافت، در طی کارکرد وسیله رژیم جریان دوفازی که در CLPHP اتفاق می افتد بسیار وابسته به اختلاف دمای بین اواپراتور و کندانسور می باشد ولی عامل دیگری که نوع رژیم جریان دوفازی را تعیین می کند دمای موضعی دیواره ی CLPHP، مخصوصاً در قسمت اواپراتور است که پیش بینی نوع رژیم جریان را با پیچیدگی های بیش تری روبه رو می کند. رژیم جریانی که در CLPHP ها اتفاق می افتد، به طور مطلق نمی توان در یکی از ۳ نوع رژیمی که به آن اشاره شد جای داد، زیرا در بسیاری از مواقع همان طور که در شکل شکل ۴-۴ نشان داده شده است ترکیبی از انواع این رژیم ها در هر کدام از دوره های CLPHP وجود دارد. لازم به ذکر است که هر قدر تعداد دوره ها بیش تر باشد این ترکیب نیز بیش تر اتفاق می افتد.



شکل ۴-۴: نمونه هایی از شکل حباب ها در رژیم های جریان ترکیبی

۴-۴- تحلیل نتایج مربوط به حالت عمودی

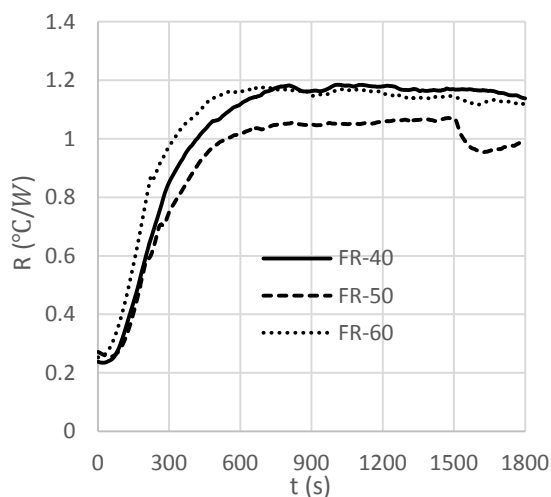
در این قسمت با توجه به اهمیت بیش‌تر آزمایش‌ها در حالت عمودی، کمی جزئی‌تر نتایج را مورد بررسی و تحلیل قرار می‌دهیم.

۴-۴-۱- تأثیر نسبت پرشدگی بر رژیم جریان و عملکرد CLPHP

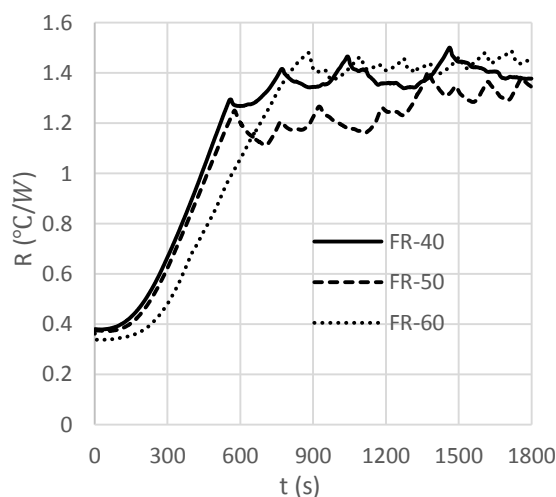
با توجه به نتایج تحصیل شده از آزمایش‌ها در ۳ نسبت پرشدگی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد با استفاده از ۳ سیال عامل اتانول، آب دیونیزه و استون، به بررسی و مقایسه‌ی عملکرد حرارتی و رژیم جریان CLPHPها می‌پردازیم.

۴-۴-۱-۱- اتانول

همان‌طور که از شکل ۴-۵ مشخص است، در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد هر دو CLPHP مقاومت حرارتی کم‌تر و یا به عبارتی عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند و در CLPHP2 مقاومت حرارتی در حالت شبه‌پایا نوسانات کمتری داشته و در نسبت‌های پرشدگی ۴۰ و ۶۰ درصد این نوسانات به حداقل مقدار خود می‌رسند.



(ب)

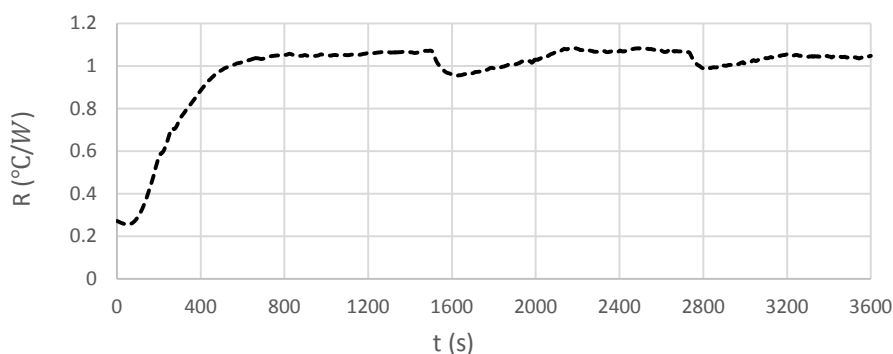


(الف)

شکل ۴-۵: نمودار مقاومت حرارتی بر حسب زمان برای سیال عامل اتانول: الف) CLPHP1 ب) CLPHP2

رژیم جریان CLPHP1 در اکثر اوقات از نوع دوم بوده و نوسانات دما که باعث ایجاد نوسانات مقاومت حرارتی سیستم می‌شوند (شکل ۴-۵-الف) ناشی از تکرار مداوم حالت ایستا و پویای سیال عامل در قسمت اواپراتور می‌باشند.

شکل ۴-۵-ب یک افت نسبتاً شدید در مقاومت حرارتی وسیله در نسبت‌پرشدگی ۵۰ درصد، بعد از زمان ۱۵۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد، که این افت ناشی از start-up یکی از دورها پس از حالت ایستا می‌باشد که در لحظات فوق‌الذکر سیال عامل در هر دو دور به‌صورت همزمان دارای نوسان و یا گردش می‌باشد و همین امر باعث بهتر شدن عملکرد حرارتی وسیله شده است ولی پس از مدت کوتاهی دوباره یکی از دورها به حالت ایستا در آمده و مقاومت حرارتی سیستم بالا می‌رود و این امر در این نسبت‌پرشدگی مدام تکرار می‌شود که در شکل ۴-۶ مشهود است.



شکل ۴-۶: نمودار مقاومت حرارتی CLPHP2 برحسب زمان در نسبت‌پرشدگی ۵۰ درصد (سیال عامل اتانول)

۴-۴-۱-۲- آب‌دیونیزه

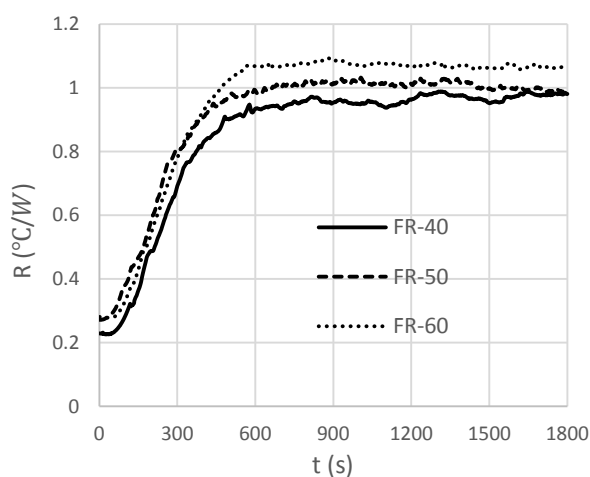
شکل ۴-۷ به وضوح نشان می‌دهد که هر دو CLPHP در نسبت‌پرشدگی ۴۰ درصد بهترین عملکرد را از خود نشان داده و با افزایش نسبت‌پرشدگی کارایی وسیله نیز کاهش یافته است، البته باید به این نکته توجه کرد که این کاهش در CLPHP1 محسوس‌تر می‌باشد.

نتایج بصری نشان می‌دهد که سیال عامل در نسبت‌پرشدگی ۴۰ درصد دارای نوسان و گردش بیشتری بوده و این عملکرد با افزایش نسبت‌پرشدگی کاهش می‌یابد، همچنین وسیله با افزایش نسبت‌پرشدگی زمان بیش‌تری را در حالت ایستا سپری می‌کند.

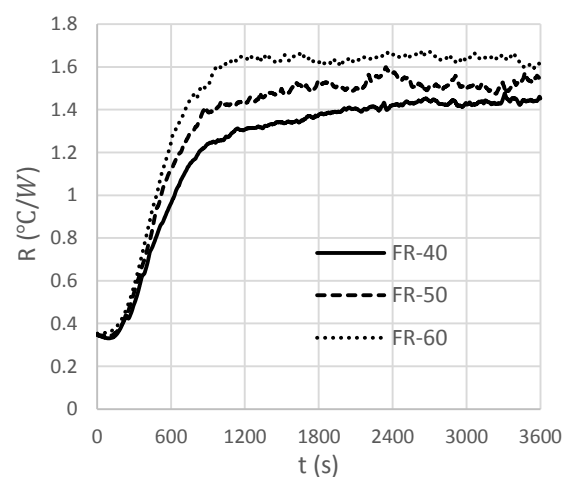
نکته‌ی قابل توجه در مورد استفاده از آب در CLPHP کم شدن نوسانات دما و به تبع آن کم شدن نوسانات مقاومت حرارتی نسبت به سیال عامل اتانول می‌باشد، که دلیل آن می‌تواند ناشی از دو عامل ذیل باشد:

« یکی از عوامل تأثیرگذار در کاهش نوسانات را می‌توان ویژگی‌های متفاوت ترموفیزیکی آب نسبت به اتانول مثل بالا بودن گرمای ویژه عنوان کرد، بالا بودن گرمای ویژه باعث می‌شود که تغییرات دما به‌ازای حرارت ورودی بالاتری اتفاق بیافتد لذا تحت حرارت ورودی پایین نوسانات دما محسوس نمی‌باشد؛ که البته در قسمت دیگری (۴-۴-۲) به‌صورت جزئی‌تر در مورد رابطه‌ی بین ویژگی‌های ترموفیزیکی با عملکرد حرارتی CLPHP بحث خواهیم کرد.

« عامل دوم مربوط به رژیم جریان اسلاگ-پلاگ می‌باشد، زیرا مدت زمانی را که سیال عامل آب درگیر این رژیم جریان است بیش‌تر از اتانول بوده و با توجه به این‌که در رژیم جریان اسلاگ-پلاگ، اسلاگ‌های مایع و پلاگ‌های بخار به‌صورت دنباله‌دار حرکت می‌کنند، لذا می‌توانند گرما را با ثبات بیش‌تری انتقال داده و باعث کم شدن نوسانات دمایی گردند.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۷: نمودار مقاومت حرارتی بر حسب زمان برای سیال آب: (الف) CLPHP1 (ب) CLPHP2

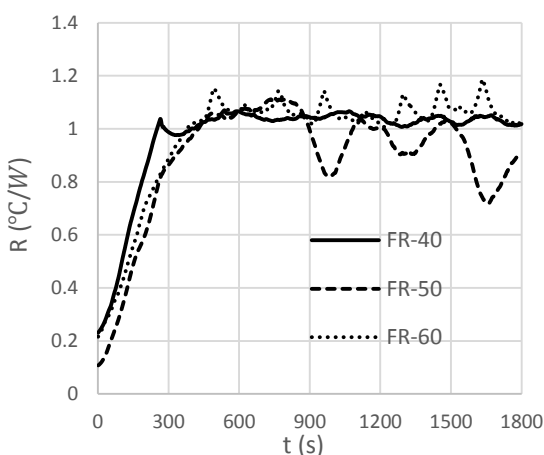
۴-۱-۳- استون

با توجه به شکل ۴-۸-الف بهترین عملکرد CLPHP1 به ترتیب مربوط به نسبت پرشدگی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد بوده و افزایش نسبت پرشدگی افزایش مقاومت حرارتی را به دنبال دارد.

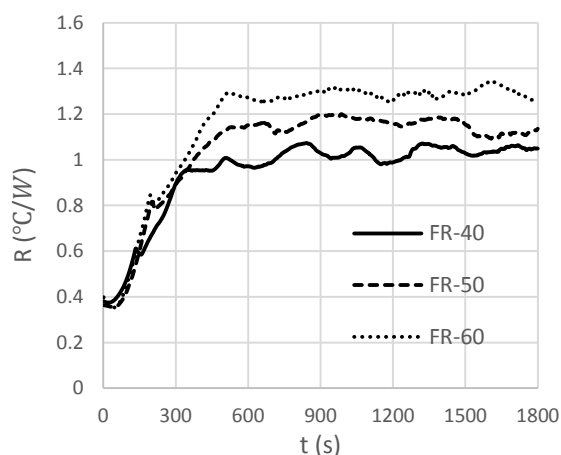
با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، در اکثر اوقات رژیم جریان اسلاگ-پلاگ در CLPHP1 حاکم است و جریان به صورت رفت و برگشتی سیرکوله می‌گردد.

در CLPHP2 با توجه به نوسانات مقاومت حرارتی، در زمان‌های متفاوت (شکل ۴-۸-ب) هریک از نسبت‌های پرشدگی را می‌توان به‌عنوان بهترین نسبت پرشدگی انتخاب کرد ولی با مقایسه‌ی میانگین مقاومت حرارتی نسبت‌های پرشدگی متفاوت، مطابق با جدول ۴-۲ می‌توان نتیجه گرفت که بهترین عملکرد وسیله در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد اتفاق می‌افتد و دور شدن از این نسبت پرشدگی باعث افزایش مقاومت حرارتی میانگین شده که کاهش عملکرد حرارتی وسیله را به دنبال خواهد داشت.

در CLPHP2 رژیم جریان نوع دوم حاکم بوده و حرکت سیال عامل به صورت نوسانی می‌باشد و نوسانات شدید مقاومت حرارتی مانند موارد قبل مربوط به حالت start-up سیستم پس از ساکن شدن سیال عامل در قسمت اواپراتور می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۸: نمودار مقاومت حرارتی بر حسب زمان برای سیال عامل استون: الف) CLPHP1 ب) CLPHP2

جدول ۴-۲: مقدار میانگین مقاومت حرارتی بین زمان‌های ۶۰۰-۱۸۰۰ ثانیه برای CLPHP2 (سیال عامل استون)

FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰
۱,۰۶۶۱۴۷	۰,۹۵۹۱۹۵	۱,۰۳۷۹۸۶

۴-۲- تأثیر نوع سیال عامل و پارامترهای ترموفیزیکی مربوط به آن بر عملکرد حرارتی CLPHP

در این کار به منظور بررسی پارامترهای ترموفیزیکی بر عملکرد CLPHP از سیال‌های عامل مختلف شامل اتانول، آب‌دیونیزه و استون استفاده شده و سعی بر این است که با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌ها بهترین ویژگی‌های یک سیال عامل برای استفاده در CLPHP در محدوده‌ای از دما که آزمایش‌ها در آن انجام شد، ارائه گردد.

برای داشتن یک درک کلی از پارامترهای ترموفیزیکی سیال‌های عامل مورد استفاده، مقادیر این پارامترها در جدول ۴-۳ گردآوری شده است. در این جدول در مورد هر یک از پارامترها، کمترین و بیشترین مقدار که اختلاف معناداری نسبت به سایر مقادیر دارد مشخص شده است.^۱

جدول ۴-۳: ویژگی‌های ترموفیزیکی سیال‌های عامل اتانول، آب و استون در دما و فشار استاندارد [۵۹]^۲

سیال عامل	$T_{boil} (^{\circ}C)$	$\rho_l (\frac{kg}{m^3})$	$C_{pl} (\frac{kJ}{kg^{\circ}C})$	$\gamma_l (\frac{W}{m^{\circ}C})$	$LHV (\frac{kJ}{kg})$	$(\frac{pa}{^{\circ}C})^3$	$\frac{dp}{dT_{sat}}$	$v_l (Pa.s).10^3$	$\sigma (\frac{N}{m}).10^3$
اتانول	۷۸,۳	۷۸۹	۲,۳۹	۰,۱۷۲	۸۴۶	۴,۲۳	۱,۱۵	۲۲,۸	
استون	۵۶,۲	۷۹۲	۲,۳۵	۰,۱۷	۵۲۳	۶,۲۷	۰,۳۲	۲۳,۷	
آب	۱۰۰	۹۹۸	۴,۱۸	۰,۵۹۹	۲۲۵۷	۱,۹۲	۱,۰۱	۷۲,۸	

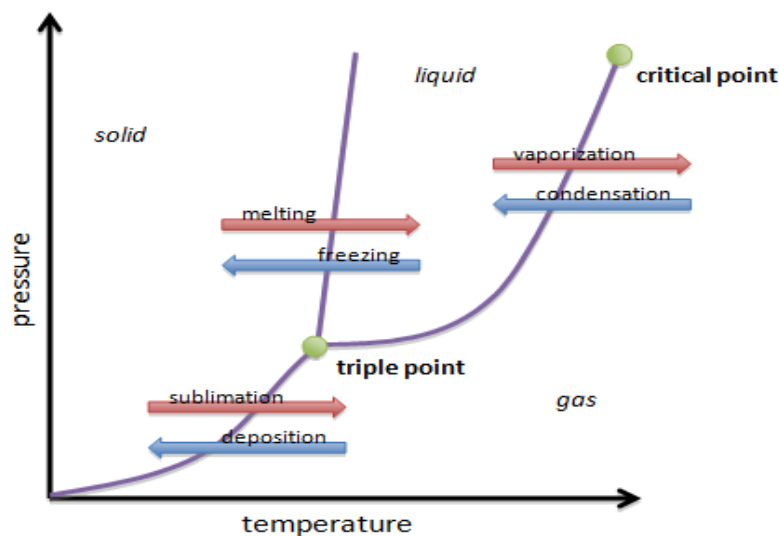
^۱ کمترین مقادیر پررنگ‌تر و بیشترین مقادیر به‌وسیله‌ی خطی که در زیر آن‌ها کشیده شده نسبت به سایر مقادیر قابل تشخیص است.

^۲ زیرنویس l مربوط به ویژگی ترموفیزیکی سیال عامل در فاز مایع می‌باشد.

^۳ مقادیر $\frac{dp}{dT_{sat}}$ در دمای ۸۰°C آورده شده است.

دمای جوش، گرمای نهان تبخیر و کشش سطحی بالا باعث تأخیر در start-up سیستم می‌شوند که البته دلایل روشنی نیز دارد. هرچقدر دمای جوش بالاتر باشد برای تشکیل رژیم جریان دوفازی، دمای اوپراتور نیز به همان نسبت بالا می‌رود و این در مورد گرمای نهان تبخیر هم صادق است زیرا مقدار حرارت بیش‌تری برای تبخیر سیال و ایجاد رژیم جریان دوفازی نیاز است و اما در مورد کشش سطحی هم مشخص است که هرچقدر مقدار آن بیش‌تر باشد، شروع حرکت سیال را از قسمت اوپراتور به قسمت کندانسور به تأخیر می‌اندازد.

پر واضح است که بالا بودن $\frac{dp}{dT_{sat}}$ باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم می‌گردد، با توجه به محدوده‌ی کارکرد وسیله بین دو فاز مایع و گاز که در شکل ۴-۹ مشخص است، با اندکی افزایش دما، فشار به مقدار زیادی افزایش یافته و نیرومحرکه‌ی بزرگ‌تری برای حرکت سیال ایجاد می‌گردد.



شکل ۴-۹: شماتیکی از نمودار تغییر فاز فشار بر حسب دما [۲]

بالا بودن گرمای ویژه انتقال حرارت محسوس را در CLPHP افزایش می‌دهد، زیرا هرچقدر سیال گرمای ویژه‌ی بالاتری داشته باشد، افزایش دما باعث افزایش بیش‌تر انرژی سیال می‌گردد. بالابودن هدایت حرارتی نیز مطمئناً افزایش عملکرد حرارتی را در پی دارد، زیرا هرچقدر هدایت حرارتی سیال بیش‌تر باشد، با افزایش دما حرارت بیش‌تری را انتقال می‌دهد.

نهایتاً در مورد مقدار اثرگذاری هرکدام از پارامترهای ترموفیزیکی نیاز است که به تحلیل نتایج آزمایشگاهی بپردازیم، لذا با بهره‌گیری از مقادیر و مفاهیم پارامترهای ترموفیزیکی سیال‌های عامل مورد استفاده در این کار و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی که در شکل ۴-۱۰ آمده است، به بررسی روابط پارامترهای ترموفیزیکی با عملکرد حرارتی CLPHP می‌پردازیم.

با توجه به نوسانات زیاد مقاومت حرارتی وسیله، درمورد بعضی از سیال‌های عامل در نسبت‌های پرشدگی متفاوت، به‌منظور قضاوت صحیح‌تر مقادیر میانگین مقاومت حرارتی CLPHPها پس رسیدن به حالت شبه‌پایا در جدول ۴-۵ آورده شده است.

درمورد CLPHP1 :

« با توجه به شکل ۴-۱۰-الف، ب و ج) در همه‌ی نسبت‌های پرشدگی استون سریع‌ترین start-up را دارد که می‌تواند ناشی از دمای جوش، ویسکوزیته‌ی دینامیکی و گرمای نهان تبخیر پایین و $\frac{dp}{dT_{sat}}$ بالا باشد.

« نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد بهترین عملکرد حرارتی در همه‌ی نسبت‌های پرشدگی، زمانی اتفاق می‌افتد که از استون به‌عنوان سیال عامل استفاده شده است. در مورد آب و اتانول نیز غیر از نسبت‌پرشدگی ۴۰ درصد، در باقی موارد استفاده از اتانول عملکرد حرارتی بهتری را برای CLPHP1 فراهم می‌کند.

« با توجه به مقادیر پارامترهای ترموفیزیکی که در جدول ۴-۳ آمده است که نشان می‌دهد مقدار $\frac{dp}{dT_{sat}}$ استون بیش‌تر از اتانول و اتانول بیش‌تر از آب است و از طرفی کم‌ترین مقدار گرمای نهان تبخیر و دمای جوش نیز به ترتیب مربوط به استون، اتانول و آب می‌باشد و این نتایج حاکی از این است که داشتن $\frac{dp}{dT_{sat}}$ بالا و گرمای نهان بخیر و دمای جوش پایین باعث بهتر شدن عملکرد حرارتی CLPHP1 شده است.

« یکی دیگر از مواردی که بایستی به آن توجه کرد مربوط به ویسکوزیته‌ی دینامیکی می‌باشد که به ترتیب کم‌ترین مقدار آن مربوط به استون، آب و اتانول می‌باشد. با استفاده از نتایج می‌توان دریافت

که با بالا رفتن نسبت پرشدگی، تأثیر پایین بودن ویسکوزیته‌ی دینامیکی بر بهبود عملکرد حرارتی وسیله کاهش می‌یابد، به‌عنوان مثال اگرچه در مورد CLPHP1 در نسبت پرشدگی ۴۰ درصد مقاومت حرارتی آب کم‌تر از اتانول می‌باشد ولی با بیش‌تر شدن نسبت پرشدگی مقاومت حرارتی اتانول کم‌تر از آب می‌شود که می‌تواند دلیل مناسبی بر چگونگی تأثیر ویسکوزیته‌ی دینامیکی بر بهبود عملکرد حرارتی وسیله می‌باشد.

« در یک جمع‌بندی می‌توان دریافت که با افزایش نسبت پرشدگی تأثیر بالا بودن $\frac{dp}{dT_{sat}}$ و پایین بودن گرمای نهان بخیر و دمای جوش در بهبود عملکرد حرارتی سیستم افزایش یافته در حالی که تأثیر پایین بودن ویسکوزیته‌ی دینامیکی در بهبود عملکرد حرارتی CLPHP1 کاهش یافته است. برای درک بهتر این موضوع اختلاف مقاومت حرارتی میانگین آب نسبت به استون و اتانول در نسبت‌های پرشدگی متفاوت در جدول ۴-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۴: اختلاف مقاومت حرارتی میانگین آب نسبت به استون و اتانول در نسبت‌های پرشدگی متفاوت (CLPHP1)

FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	
۰,۳۳۴۲۶۴	۰,۳۰۵۸۴۸	۰,۲۸۳۶۱۲	اختلاف مقاومت حرارتی آب نسبت به استون
۰,۱۹۹۲۳۷	۰,۱۸۲۳۰۸	-۰,۰۷۷۵۷۳	اختلاف مقاومت حرارتی آب نسبت به اتانول

در CLPHP2 اختلاف مقاومت حرارتی سیال‌های عامل در نسبت‌های پرشدگی متفاوت، کمتر از CLPHP1 می‌باشد و این امر یک نتیجه‌ی بسیار مهم مبنی بر کم‌تر شدن تأثیر نوع سیال عامل بر عملکرد حرارتی سیستم در CLPHPهایی با تعداد دور بیش‌تر می‌باشد، لذا در می‌یابیم که ساختار فیزیکی خود CLPHP جزء مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد آن می‌باشد که در بخش دیگری (۴-۴) به بررسی دقیق‌تر این موضوع خواهیم پرداخت.

در مورد CLPHP2 نتایج کمی متفاوت از CLPHP1 می‌باشد و نقش سایر پارامترهای ترموفیزیکی نیز در نسبت‌های پرشدگی متفاوت بیشتر آشکار می‌گردد که به بررسی آن می‌پردازیم:

« در همه‌ی نسبت‌های پرشدگی، اتانول بیش‌ترین مقاومت حرارتی را دارد و با توجه به این که در

میان پارامترهای ترموفیزیکی بیشترین ویسکوزیته‌ی دینامیکی نیز مربوط به آن می‌باشد، لذا می‌توان دریافت که با افزایش تعداد دور نقش ویسکوزیته‌ی دینامیکی بیشتر نمود پیدا کرده و هرچقدر مقدار آن کم‌تر باشد، عملکرد حرارتی وسیله بهتر خواهد بود.

« در نسبت‌پرشدگی ۴۰ درصد بهترین عملکرد حرارتی به‌ترتیب مربوط به آب، استون و اتانول می‌باشد که می‌تواند ناشی از بیش‌تر بودن چگالی و کشش سطحی آب نسبت‌به استون و استون نسبت‌به اتانول باشد، البته اختلاف معناداری بین مقاومت حرارتی اتانول و دو سیال عامل دیگر وجود دارد که دلیل آن را می‌توان ناشی از بالا بودن ویسکوزیته‌ی دینامیکی نسبت‌به دوسیال عامل دیگر عنوان کرد.

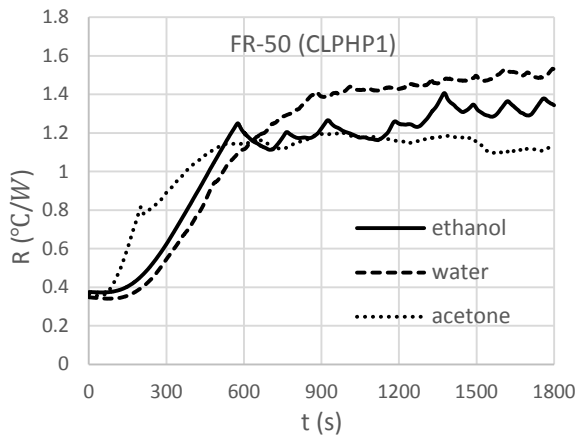
« در نسبت‌پرشدگی ۵۰ و ۶۰ درصد بهترین عملکرد حرارتی به‌ترتیب مربوط به استون، آب و اتانول می‌باشد که بارزترین دلیل آن می‌تواند ناشی از کم‌تر بودن ویسکوزیته‌ی دینامیکی باشد.

« نکته‌ی برجسته‌ای که می‌توان از نتایج دریافت، کاهش معنادار مقاومت حرارتی CLPHP2 نسبت به CLPHP1 درمورد استفاده از آب به‌عنوان سیال عامل می‌باشد که دلیل آن را می‌توان بالابودن گرمای ویژه و هدایت حرارتی نسبت‌به دوسیال عامل دیگر عنوان کرد.

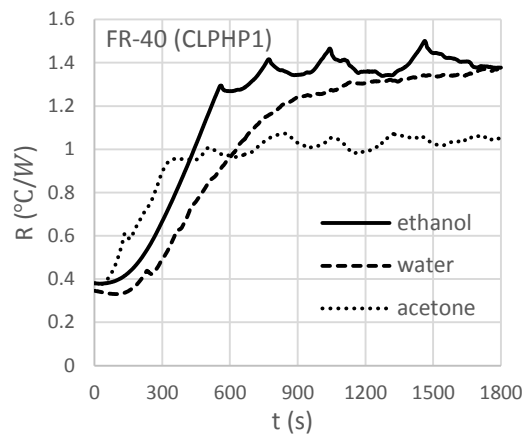
پررنگ شدن نقش گرمای ویژه در CLPHP2 نشان‌دهنده‌ی این است که در دوره‌های بالاتر انتقال حرارت محسوس افزایش یافته است.

جدول ۴-۵: مقادیر میانگین مقاومت حرارتی برای سیال‌های عامل اتانول، آب و استون:

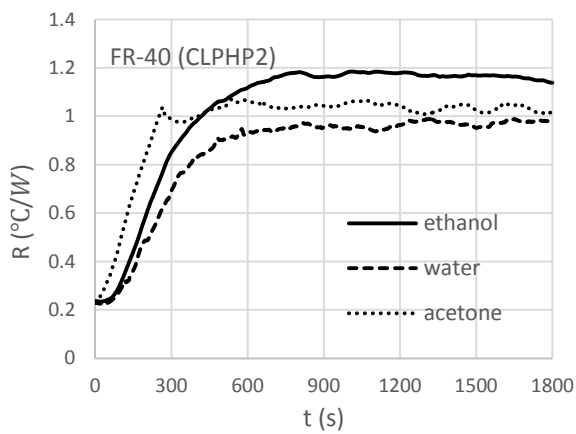
CLPHP2 (ب)				CLPHP1 (الف)			
FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	WF	FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	WF
۱,۱۴۹۹۷۲	۱,۰۳۴۳۴۳	۱,۱۶۶۶۷۶	اتانول	۱,۴۲۹۶۹۶	۱,۲۷۸۵۶۸	۱,۳۹۴۶۳۲	اتانول
۱,۰۷۱۲۹۳	۱,۰۰۷۹۳۰	۰,۹۶۲۷۳۱	آب	۱,۶۲۸۹۳۳	۱,۴۶۰۸۷۶	۱,۳۱۷۰۵۰	آب
۱,۰۶۶۱۴۷	۰,۹۵۹۱۹۵	۱,۰۳۷۹۸۶	استون	۱,۲۹۴۶۶۹	۱,۱۵۵۰۲۸	۱,۰۳۳۴۴۷	استون



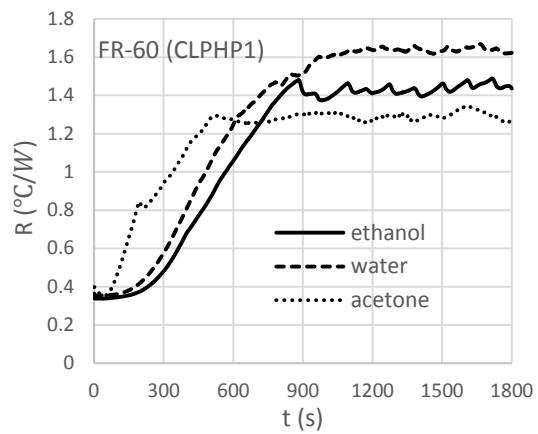
(ب)



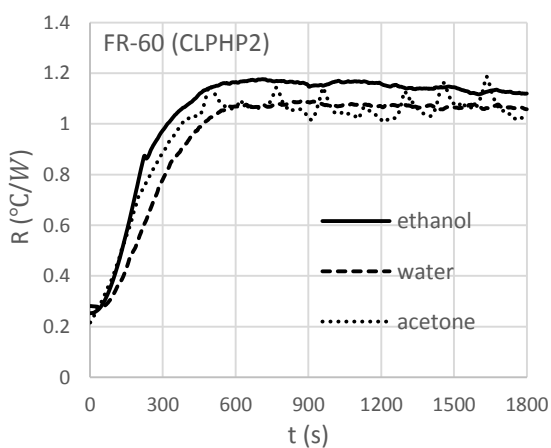
(الف)



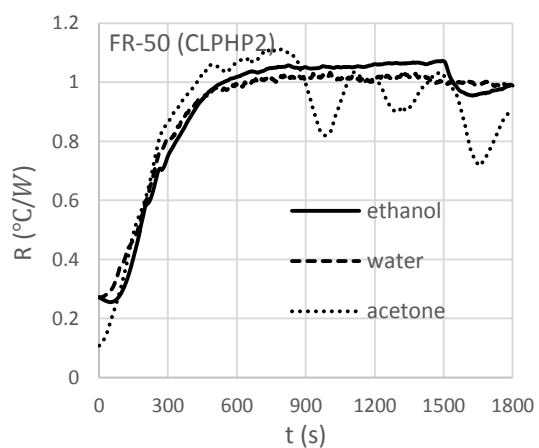
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۴-۱۰: مقایسه‌ی مقاومت حرارتی سیال‌های عامل اتانول، آب و استون در نسبت‌های پرشدگی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد در (الف، ب، ج) CLPHP1 و (د، ه، و) CLPHP2

۴-۳- تأثیر نانوذرات بر رژیم جریان و عملکرد حرارتی CLPHP

با توجه به تحقیقات انجام شده، استفاده از نانوذرات با افزایش هدایت حرارتی و ظرفیت انتقال حرارت متناسب با نوع نانوذرات و کاهش مقاومت حرارتی باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم می‌گردد [۶۰، ۶۱]، لذا نیاز است رژیم جریان دوفازی حاکم بر CLPHP و چگونگی تأثیر آن بر عملکرد حرارتی سیستم در صورت استفاده از نانوذرات مورد بررسی قرار بگیرد. در همین راستا با استفاده از نانوسیال مس^۱ به عنوان سیال عامل، عملکرد حرارتی CLPHP را در این حالت با حالتی که از آب (سیال پایه بدون نانوذره) به عنوان سیال عامل استفاده شده است، مورد مقایسه قرار می‌دهیم.

با توجه به نتایج بصری، استفاده از نانوسیال در CLPHP میل به سیرکوله شدن سیال عامل در لوله‌ی حرارتی را افزایش می‌دهد، که البته در مورد CLPHP1 این امر به طور کامل اتفاق می‌افتد و غالب حرکت سیال از نوع گردشی و رژیم جریان از نوع اسلاگ-پلاگ می‌باشد. حرکت سیال در CLPHP2 در اکثر اوقات نوسانی یک‌سو بوده که میل به سیرکوله شدن داشته و در مواردی نیز این اتفاق می‌افتد.

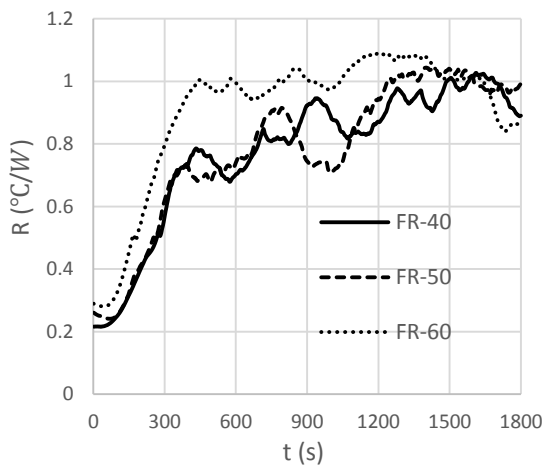
با توجه به شکل ۴-۱۱-الف، CLPHP1 در نسبت پرشدگی ۶۰ درصد بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد، در مورد نسبت‌های پرشدگی ۴۰ و ۵۰ درصد نیز در اکثر اوقات نسبت پرشدگی ۵۰ درصد عملکرد بهتری نسبت به ۴۰ درصد دارد و در یک جمع بندی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش نسبت پرشدگی در این حالت با بهبود عملکرد وسیله همراه بوده است.

افت و خیزهای شدیدی که در مورد مقاومت حرارتی CLPHP2 اتفاق می‌افتد (شکل ۴-۱۱-ب)، مربوط به زمان‌هایی است که با کاهش ΔT از یک حد معین، وسیله بصورت ایستا در آمده و با افزایش آن پویایی وسیله از طریق رژیم جریان نوع سوم، برمی‌گردد. البته باید به این نکته توجه داشت که نوسانات مقاومت حرارتی معمولاً زمان‌هایی که هر دو دور دچار حالت ایستا و یا پایا می‌گردند، شدیدتر است.

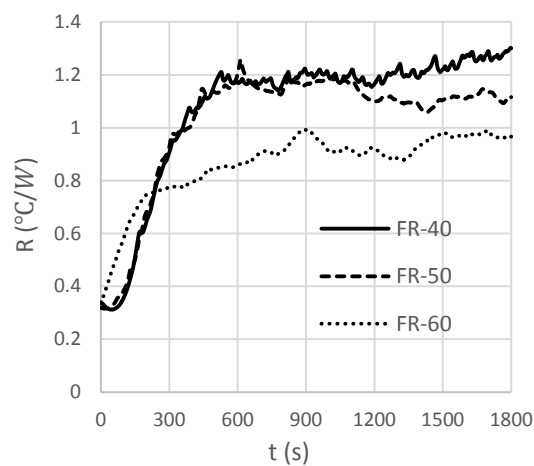
^۱ نانوسیال مس مورد استفاده دارای غلظت ۰،۱ درصد با سیال پایه‌ی آب می‌باشد.

نوسانات شدید مقاومت حرارتی در CLPHP2 تصمیم‌گیری درمورد بهترین نسبت پرشدگی را کمی دشوار می‌کند ولی برای داشتن یک دید کلی، از مقادیر میانگین مقاومت حرارتی که در جدول ۴-۶ آورده شده است استفاده می‌کنیم، با توجه به این جدول کم‌ترین مقاومت حرارتی در نسبت پرشدگی ۴۰ درصد اتفاق می‌افتد.

با مقایسه‌ی شکل ۴-۷ و شکل ۴-۱۱ در می‌یابیم که استفاده از نانوذرات مس اگرچه کاهش مقاومت حرارتی را در پی داشته ولی باعث تشدید نوسانات مقاومت حرارتی سیستم شده است که دلیل آن ناشی از تغییرات ویژگی‌های ترموفیزیکی از قبیل هدایت حرارتی و در پی آن تغییرات رژیم جریان می‌باشد.



(ب)



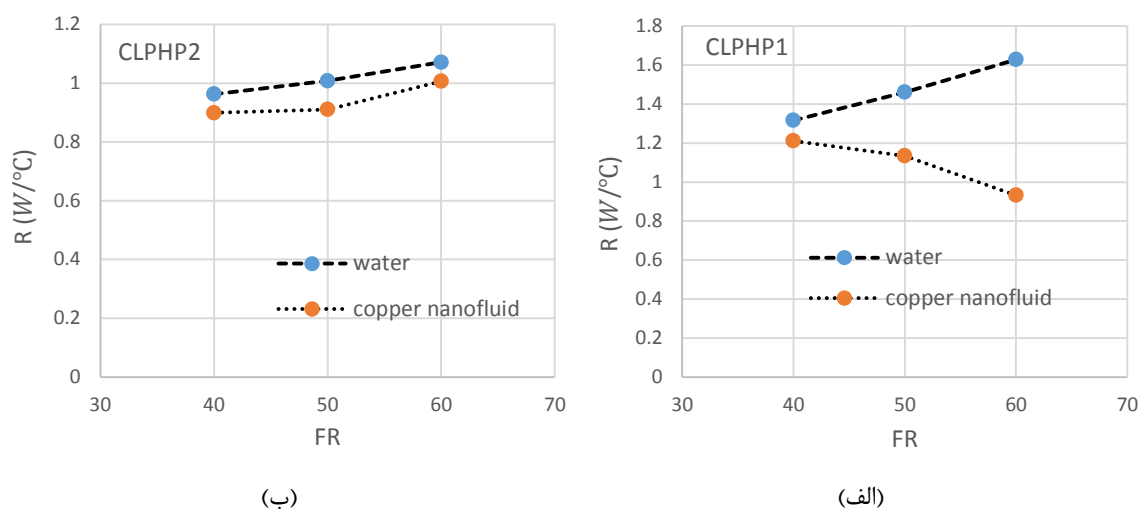
(الف)

شکل ۴-۱۱: نمودار مقاومت حرارتی بر حسب زمان برای نانوسیال مس: (الف) CLPHP1 (ب) CLPHP2

جدول ۴-۶: مقدار میانگین مقاومت حرارتی بین زمان‌های ۶۰۰-۱۸۰۰ ثانیه برای CLPHP2 (نانوسیال مس)

FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰
۱,۰۰۶۳۸۷	۱,۰۱۲۹۵۸	۰,۸۹۸۸۲۴

با توجه به شکل ۴-۱۲ استفاده از نانوسیال در هر دو CLPHP باعث کاهش مقاومت حرارتی شده است و این کاهش در مورد CLPHP1 با افزایش نسبت پرشدگی به صورت قابل ملاحظه افزایش پیدا کرده است ولی در مورد CLPHP2 در همه‌ی نسبت‌های پرشدگی کاهش تقریباً یکسانی را شاهد هستیم. برای داشتن یک درک کلی درصد کاهش مقاومت حرارتی CLPHPها در صورت استفاده از نانوسیال مس نسبت به سیال عامل آب در جدول ۴-۷ آورده شده است.



شکل ۴-۱۲: مقایسه‌ی مقدار میانگین مقاومت حرارتی سیال عامل آب و نانوسیال مس (الف) CLPHP1 (ب) CLPHP2

جدول ۴-۷: درصد کاهش مقدار مقاومت حرارتی میانگین نسبت به سیال عامل آب در صورت استفاده از نانوسیال مس

FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	
۴۲,۷۶	۲۲,۳۳	۷,۹۹	درصد کاهش CLPHP1
۶,۰۶	۹,۶۸	۶,۶۴	درصد کاهش CLPHP2

عامل اصلی کاهش معنادار مقدار مقاومت حرارتی میانگین CLPHP1 با افزایش نسبت پرشدگی، می‌تواند ناشی از افزایش سرعت گردش سیال در حالت استفاده از نانوسیال مس که بهبود عملکرد حرارتی وسیله را در پی دارد و افزایش زمان ایستایی وسیله در حالتی که از آب به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌شود، باشد.

در مورد CLPHP2 اگرچه بیشترین کاهش مقاومت حرارتی در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد اتفاق می‌افتد ولی اختلاف معناداری با سایر نسبت‌های پرشدگی ندارد و نشان می‌دهد که افزایش دور علاوه بر کاهش مقاومت حرارتی که در قسمت قبل در مورد آن بحث کردیم، در رسیدن به یک جمع‌بندی کلی و با ثبات برای ابراز رأی در مورد درصد بهبود عملکرد حرارتی سیستم بسیار مؤثر می‌باشد. در یک جمع‌بندی با توجه به نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی در مورد استفاده از نانوسیال و مقایسه‌ی آن با سیال پایه در CLPHP می‌توان دریافت:

« تأثیر نسبت پرشدگی در کاهش درصد مقاومت حرارتی با افزایش دور، کاهش می‌یابد. »

« استفاده از نانوذرات مس با ایجاد تغییر در ویژگی‌های ترموفیزیکی سیال پایه و در نتیجه تغییرات مثبتی که در رژیم جریان به وجود می‌آورد، باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم شده است. یکی از مهم‌ترین تغییرات در اثر افزودن نانوذرات مس در سیال پایه، افزایش هدایت حرارتی سیال پایه بر اثر هدایت حرارتی بالای نانوذرات می‌باشد. »

« استفاده از نانوسیال مقدار میانگین مقاومت حرارتی را ۶,۰۶ تا ۴۲,۷۶ درصد بسته به شرایط آزمایش، کاهش می‌دهد. »

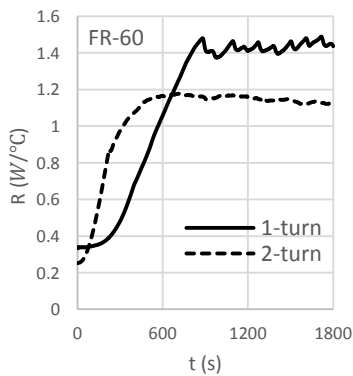
۴-۴-۴- تأثیر ساختار CLPHP (تعداد دورها) بر رژیم جریان و عملکرد حرارتی آن

همان‌طور که در قسمت‌های قبل هم اشاره شد، ساختار CLPHP تأثیر به‌سزایی بر عملکرد حرارتی آن دارد، در همین راستا برای تفهیم بهتر موضوع به مقایسه‌ی عملکرد حرارتی CLPHP1 و CLPHP2 می‌پردازیم.

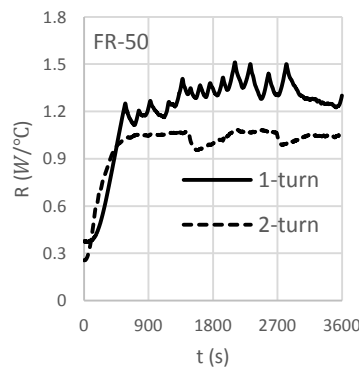
همان‌طور که در شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ مشخص است، در مورد سیال‌های عامل اتانول و آب با افزایش دور علاوه بر بهبود عملکرد حرارتی سیستم، نوسانات آن مخصوصاً در مورد اتانول به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است که دلیل کاهش نوسانات را نتایج بصری به‌خوبی توجیه می‌کند.

CLPHP1 در زمان‌هایی که تنها دور آن به حالت ایستا در می‌آید بر عملکرد حرارتی کل سیستم تأثیر می‌گذارد، این درحالی است که در CLPHP2 ساکن بودن سیال عامل در یکی از دورها به معنای این نیست که کل سیستم به حالت ایستا در آمده است زیرا دور دیگر پویا بوده و در حال انتقال حرارت می‌باشد به همین دلیل نوسانات کم‌تری را در مقاومت حرارتی سیستم شاهد هستیم.

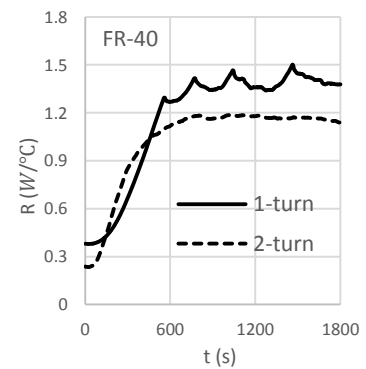
بالا بودن نوسانات مقاومت حرارتی در CLPHP1 در شکل ۴-۱۳ ناشی از ازدیاد نوسان سیال عامل اتانول در لوله‌ی حرارتی بوده که به ازدیاد نوسانات دمایی و نهایتاً نوسانات مقاومت حرارتی منجر شده است.



(ج)

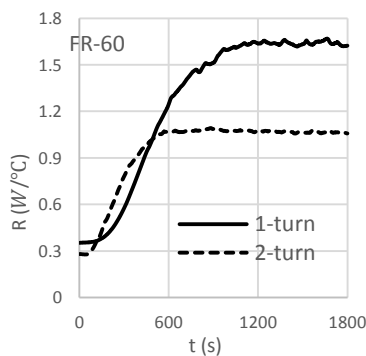


(ب)

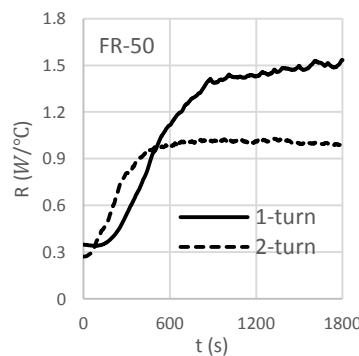


(الف)

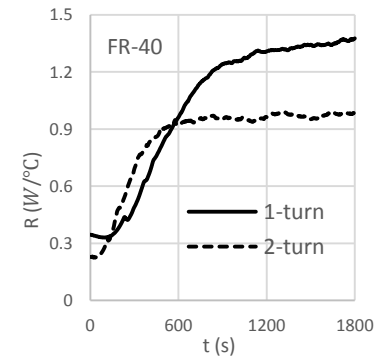
شکل ۴-۱۳: مقایسه‌ی مقاومت حرارتی CLPHP1 با CLPHP2 (سیال عامل اتانول)



(ج)



(ب)

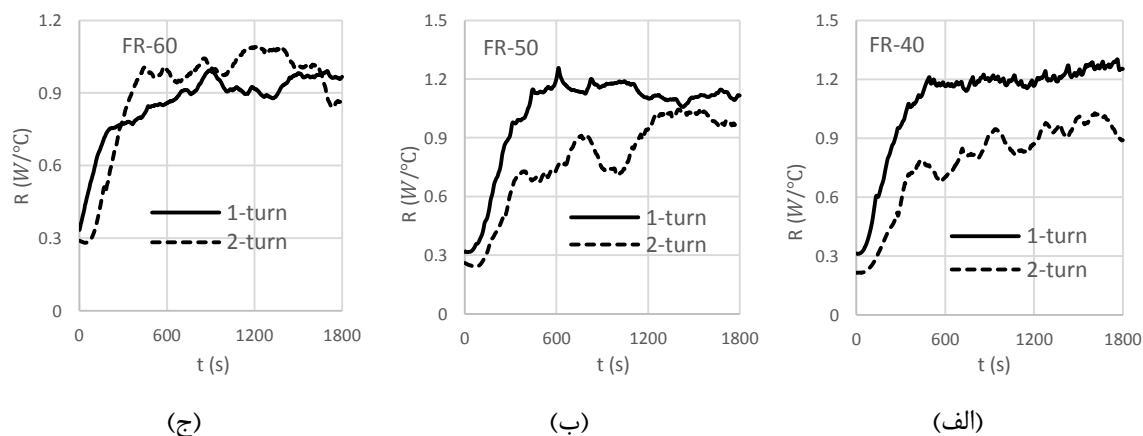


(الف)

شکل ۴-۱۴: مقایسه‌ی مقاومت حرارتی CLPHP1 با CLPHP2 (سیال عامل آب)

در شکل ۴-۱۵ مقاومت حرارتی سیستم در ۱ و ۲ دور، زمانی که از نانوسیال مس به عنوان سیال عامل استفاده شده مورد مقایسه قرار گرفته است.

وقتی از نانوسیال مس در CLPHP1 استفاده می شود شاهد گردش سیال عامل در بیش تر زمان-های کارکرد وسیله هستیم، نوسانات مقاومت حرارتی با دامنه‌ی زیاد مربوط به زمانی است که وسیله به حالت ایستا در می آید و نوساناتی که دامنه‌ی خیلی کمی دارند و به کثرت شاهد آن هستیم ناشی از کم و زیاد شدن سرعت گردش سیال عامل و طول حباب‌ها در رژیم جریان نوع دوم می باشد. با توجه به جدول ۴-۸ استفاده از نانوسیال مس در CLPHP2 در نسبت‌های پرشدگی ۴۰ و ۵۰ درصد باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم شده ولی با افزایش نسبت پرشدگی اختلاف مقاومت حرارتی CLPHP1 و CLPHP2 کاهش یافته و نهایتاً در نسبت پرشدگی ۶۰ درصد تأثیر افزایش دور در بهبود عملکرد حرارتی سیستم از بین رفته است.

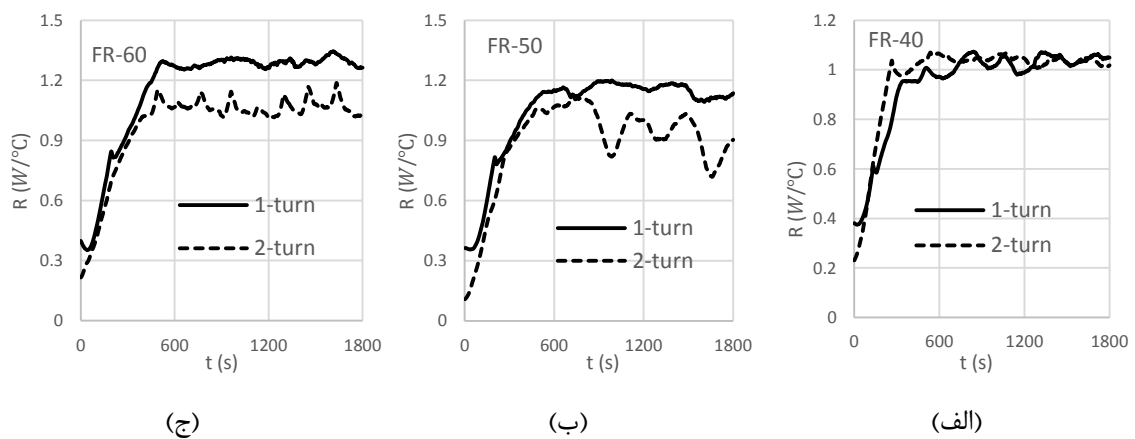


شکل ۴-۱۵: مقایسه‌ی مقاومت حرارتی CLPHP1 با CLPHP2 (نانوسیال مس)

جدول ۴-۸: مقادیر میانگین مقاومت حرارتی و اختلاف آن بین CLPHP1 و CLPHP2 برای نانو سیال مس

FR-60	FR-50	FR-۴۰	
۰٫۹۳۲۳۷۲	۱٫۱۳۴۷۱۲	۱٫۲۱۱۸۲۵	CLPHP1
۱٫۰۰۶۳۸۷	۰٫۹۱۰۲۴۳	۰٫۸۹۸۸۲۴	CLPHP2
-۰٫۰۷۴۰۱۵	۰٫۲۲۴۴۶۹	۰٫۳۱۳۰۰۱	اختلاف مقاومت حرارتی CLPHP1 و CLPHP2

استفاده از استون به عنوان سیال عامل نیز در مورد نوسانات مقاومت حرارتی نتیجه‌ای مشابه با نانوسیال مس دارد و ریشه‌ی آن را می‌توان تشابه نوع حرکت سیال در سیستم دانست. با توجه به شکل ۴-۱۶ بجز نسبت‌پرشدگی ۴۰ درصد که عملکرد حرارتی وسیله در آن واکنش زیادی به افزایش دور نشان نداده است، در سایر نسبت‌های پرشدگی با افزایش دور عملکرد حرارتی وسیله بهبود پیدا کرده ولی با توجه به اینکه CLPHP2 نسبت به CLPHP1 زمان‌های بیشتری را در حالت ایستا سپری می‌کند، مقاومت حرارتی وسیله دچار نوسانات بیش‌تر و شدیدتری شده است.



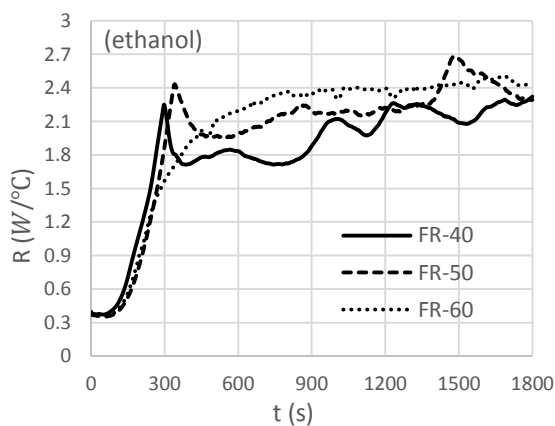
شکل ۴-۱۶: مقایسه‌ی مقاومت حرارتی CLPHP1 با CLPHP2 (سیال عامل استون)

۴-۵- تأثیر نیروی جاذبه بر رژیم جریان و عملکرد CLPHP

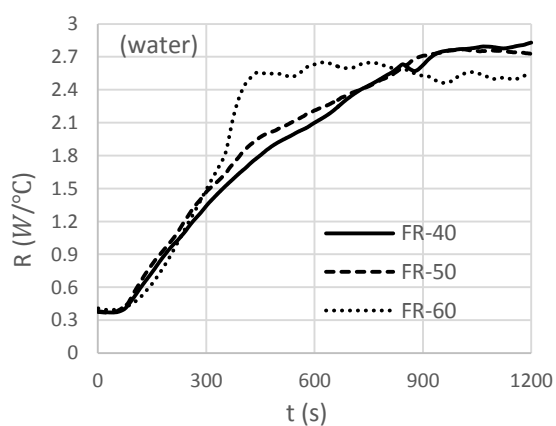
نتایج تحقیقاتی که در زمینه‌ی نقش نیروی جاذبه در عملکرد حرارتی CLPHP انجام شده حاکی از کاهش مقاومت حرارتی در اثر حضور جاذبه می‌باشد [۳۵، ۶۲]، لذا در همین راستا برای بررسی نوع تغییرات رژیم جریان دوفازی در اثر حضور جاذبه، ابتدا به تحلیل نتایج آزمایش‌ها در حالت افقی و سپس به مقایسه‌ی آن با حالت عمودی می‌پردازیم.

۴-۵-۱- تحلیل نتایج آزمایشگاهی در حالت افقی

آزمایش‌ها در حالت افقی با استفاده از سیال‌های عامل آب و اتانول در نسبت‌های پرشدگی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد انجام شده است. شکل ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۸ به ترتیب تغییرات مقاومت حرارتی CLPHP1 و CLPHP2 را نشان می‌دهند. برای بررسی صحیح‌تر عملکرد حرارتی، مقادیر میانگین مقاومت حرارتی (جدول ۴-۹) در شکل ۴-۱۹ با هم مقایسه شده است.



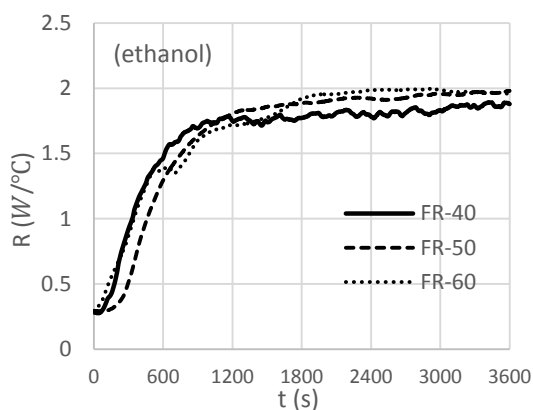
(ب)



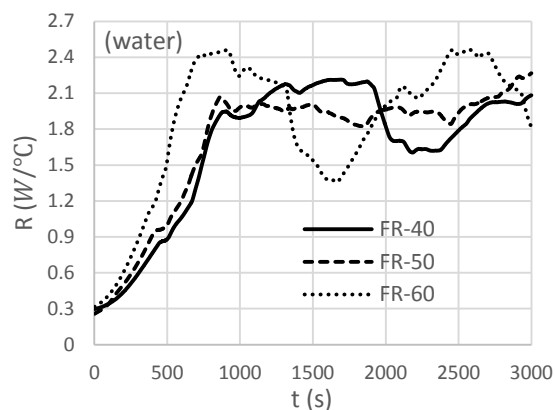
(الف)

شکل ۴-۱۷: مقاومت حرارتی میانگین CLPHP1 در نسبت‌های پرشدگی متفاوت برای حالت افقی

(الف) سیال عامل آب (ب) سیال عامل اتانول



(ب)



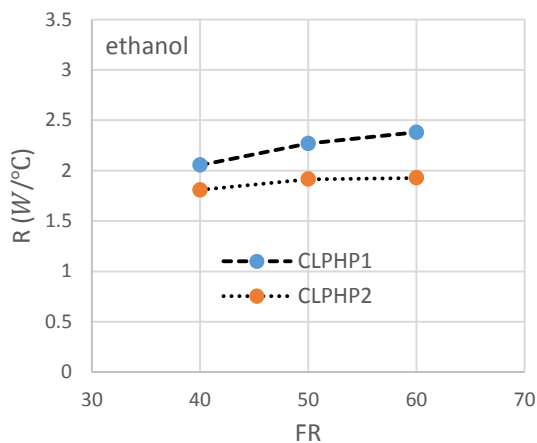
(الف)

شکل ۴-۱۸: مقاومت حرارتی میانگین CLPHP2 در نسبت‌های پرشدگی متفاوت برای حالت افقی

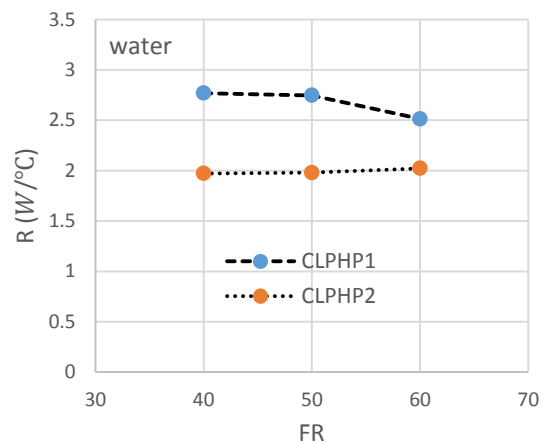
(الف) سیال عامل آب (ب) سیال عامل اتانول

جدول ۴-۹: مقادیر میانگین مقاومت حرارتی برای سیال‌های عامل اتانول و آب در حالت افقی:

CLPHP2 (ب)				CLPHP1 (الف)			
FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	WF	FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	WF
۱,۹۲۷۲۱۶	۱,۹۱۳۸۵۳	۱,۸۰۸۶۱۵	اتانول	۲,۳۸۰۶۱۲	۲,۲۶۸۴۵۸	۲,۰۵۵۰۰۹	اتانول
۲,۰۲۲۶۸۷	۱,۹۷۹۴۱۵	۱,۹۷۱۳۵۹	آب	۲,۵۱۳۹۰۵	۲,۷۴۷۲۴۹	۲,۷۶۸۷۰۲	آب



(ب)



(الف)

شکل ۴-۱۹: مقایسه‌ی مقدار مقاومت حرارتی میانگین CLPHP1 با CLPHP2 در حالت افقی

(الف) سیال عامل آب (ب) سیال عامل اتانول

۴-۵-۱-۱- آب دیونیزه

استفاده از سیال عامل آب در حالت افقی نتایج زیر را به دنبال دارد:

« در مورد CLPHP1 و در نسبت‌های پرشدگی ۴۰ و ۵۰ درصد، پس از start-up سیستم تمام سیال عامل به قسمت کندانسور رانده شده و قسمت اواپراتور دچار خشک‌شدگی کامل می‌گردد و در نسبت پرشدگی ۶۰ درصد یک سری تولید و رشد حباب را در قسمت بالای اواپراتور که مقداری سیال عامل در آن قسمت وجود دارد، شاهد هستیم و همین عامل سبب شده تا مقاومت حرارتی وسیله در این نسبت پرشدگی کمی کم‌تر از نسبت‌های پرشدگی ۴۰ و ۵۰ درصد گردد.

« با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی نوسانات شدیدی که در مقاومت حرارتی CLPHP2 اتفاق می افتد مربوط به زمان‌هایی از کارکرد وسیله است که هر دو دور پس از خشک‌شدگی دوباره به طور همزمان شروع به کار می‌کنند. در زمان‌هایی از کارکرد وسیله که در آن یکی از دورها دچار خشک‌شدگی خفیف می‌گردد و دور دیگر با تولید و رشد حباب پویایی وسیله را حفظ می‌کند از شدت نوسانات کاسته می‌شود و وسیله در یک حالت شبه‌پایا به کار خود ادامه می‌دهد، این نوع از کارکرد وسیله در نسبت‌پرشدگی ۵۰ درصد بیش‌ترین سهم را دارا می‌باشد و در نسبت‌های پرشدگی ۴۰ و ۶۰ درصد نیز به غیر از زمان‌هایی که وسیله درگیر حالت ایستا و start-up بعد از آن می‌باشد، غالب نوع حرکت سیال را تشکیل می‌دهد.

« در همه‌ی نسبت‌های پرشدگی افزایش دور باعث کاهش مقاومت حرارتی شده است (شکل ۴-۱۹-الف) و با اینکه در اکثر اوقات قسمت اواپراتور CLPHP1 دچار خشک‌شدگی می‌گردد ولی با افزایش دور این حالت خیلی کم‌تر اتفاق می‌افتد و در صورتی که یکی از دورها دچار خشک‌شدگی گردد همان‌طور که ذکر شد دور دیگر با تولید و رشد حباب پویایی وسیله را حفظ می‌کند.

۴-۵-۱-۲- اتانول

استفاده از سیال عامل اتانول در حالت افقی نتایج زیر را به دنبال دارد:

« در هر دو CLPHP افزایش نسبت‌پرشدگی باعث افزایش مقاومت حرارتی شده که در مورد CLPHP2 این افزایش خفیف می‌باشد.

« نوسانات شدیدی که در مقاومت حرارتی CLPHP1 اتفاق می‌افتد ناشی از نوع رژیم جریان دو فازی می‌باشد، با توجه به مشاهدات در بیشتر اوقات حجم بسیار کمی از اواپراتور را سیال عامل تشکیل می‌دهد و قسمت اواپراتور تا مرز خشک‌شدگی کامل پیش می‌رود که در این زمان دمای آن و در نتیجه مقاومت حرارتی نیز به شدت بالا رفته و فشار بخار موجود در قسمت اواپراتور نیز افزایش می‌یابد و این افزایش فشار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که بتواند سیال عاملی را که در قسمت کندانسور انباشته شده است را به حرکت درآورد، لذا با حرکت سیال به قسمت اواپراتور، دمای قسمت

اوپراتور و در نتیجه مقاومت حرارتی سیستم کاهش می‌یابد.

در طی کارکرد CLPHP1 به خصوص در نسبت‌های پرشدگی ۴۰ و ۵۰ درصد این عمل مدام تکرار می‌شود که نتیجه‌ی آن ایجاد نوسانات در مقاومت حرارتی وسیله می‌باشد. در مورد نسبت پرشدگی ۶۰ درصد در CLPHP1 این عمل خفیف‌تر اتفاق می‌افتد و سیال عامل در اکثر اوقات با دامنه‌ی بسیار کم نوسان می‌کند و همین امر سبب شده که مقاومت حرارتی دچار نوسانات کم‌تری گردد.

« با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، در همه‌ی نسبت‌های پرشدگی پس از start-up سیستم (CLPHP2)، مقدار زیادی از سیال عامل به قسمت کندانسور هدایت می‌شود و حجم بسیار کمی از آن در قسمت اوپراتور وجود داشته و در هر دو دور به محض ورود کم‌ترین مقدار سیال به قسمت اوپراتور، به دلیل فشار زیادی که در اثر افزایش دما در قسمت اوپراتور ایجاد می‌شود دوباره به قسمت کندانسور هدایت می‌گردد و این عمل مدام در حال تکرار شدن بوده و اختلاف اندکی که در مقاومت حرارتی نسبت پرشدگی‌های متفاوت وجود دارد، می‌تواند ناشی از سرعت این تکرارها باشد.

« افزایش دور در همه‌ی نسبت‌های پرشدگی باعث کاهش مقاومت حرارتی CLPHP شده (شکل ۴-۱۹-ب) و به‌طور قابل ملاحظه‌ای نوسانات آن را نیز کاهش داده است که دلیل آن ناشی از پویایی وسیله در اکثر زمان‌های کارکرد وسیله است.

۴-۵-۱-۳- مقایسه‌ی عملکرد حرارتی آب دیونیزه و اتانول

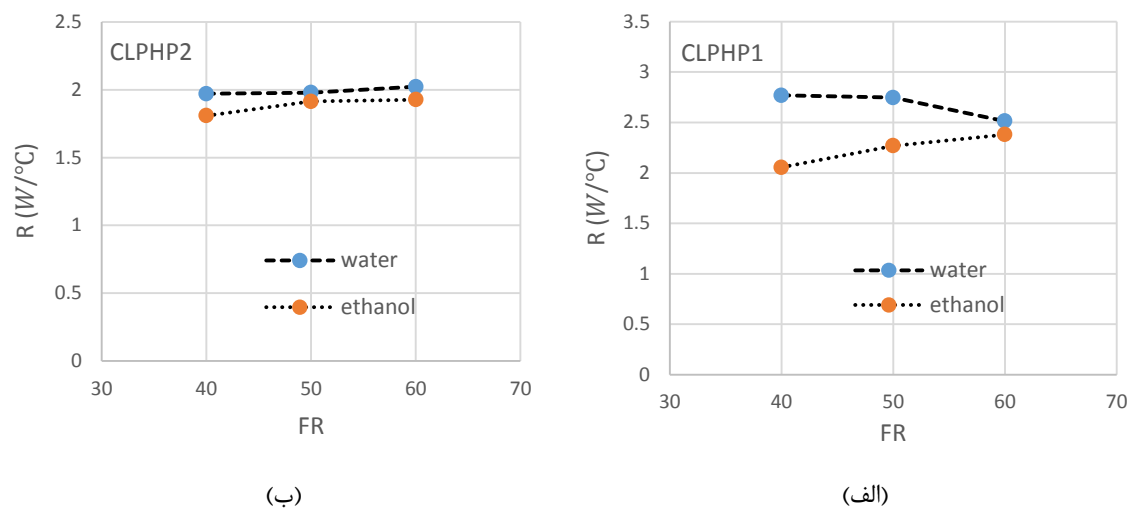
به منظور تسهیل در مقایسه‌ی عملکرد حرارتی آب و اتانول مقادیر میانگین مقاومت حرارتی آن‌ها در شکل ۴-۲۰ آورده شده است که با توجه به آن می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

« در همه‌ی نسبت‌های پرشدگی مقاومت حرارتی CLPHP زمانی که از اتانول به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌شود کم‌تر از آب بوده و عملکرد حرارتی بهتری را از خود نشان می‌دهد.

« در CLPHP1 با افزایش نسبت پرشدگی حساسیت وسیله نسبت به سیال عامل مورد استفاده کاهش و مقاومت حرارتی وسیله به مقدار معینی تمایل پیدا می‌کند (شکل ۴-۲۰-الف).

« در CLPHP2 مقاومت حرارتی آب و اتانول خیلی به هم نزدیک بوده که نشان می‌دهد افزایش

دور باعث کاهش حساسیت وسیله نسبت به سیال عامل شده است، همچنین در CLPHP2 مانند CLPHP1 با افزایش نسبت پرشدگی مقاومت حرارتی وسیله فارغ از نوع سیال به مقدار معینی میل می‌کند.



شکل ۴-۲۰: مقایسه‌ی مقدار مقاومت حرارتی میانگین سیال عامل آب و اتانول در حالت افقی

الف) CLPHP1 ب) CLPHP2

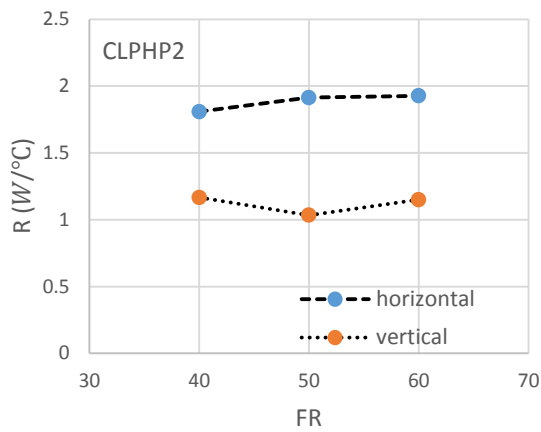
۴-۵-۲- مقایسه‌ی عملکرد حرارتی CLPHP بین حالت‌های عمودی و افقی

جاذبه در عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی مخصوصاً CLPHPها می‌تواند نقش بسیار مهمی را ایفا کند. در این کار سعی بر این است که با بررسی و مقایسه‌ی عملکرد حرارتی وسیله با و بدون حضور جاذبه (حالت افقی و عمودی)، میزان اثرگذاری آن بر عملکرد حرارتی CLPHP مورد مطالعه قرار گیرد.

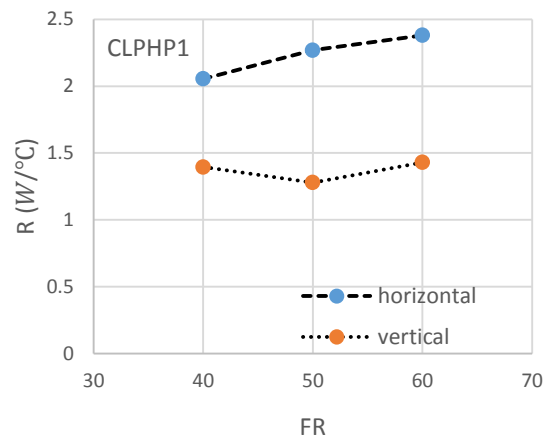
با توجه به این که عملکرد حرارتی CLPHPهای مورد استفاده در این کار در حالت‌های عمودی و افقی در قسمت‌های قبل به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفت، در این قسمت صرفاً به مقایسه‌ی عملکرد حرارتی CLPHPها با استفاده از مقادیر میانگین مقاومت حرارتی می‌پردازیم.

به منظور تسهیل در مقایسه، نتایج مربوط به مقدار مقاومت حرارتی میانگین CLPHPها برای سیال عامل اتانول و آب به ترتیب در شکل ۴-۲۱ و شکل ۴-۲۲ و برای داشتن یک درک کلی از

میزان بهبود عملکرد حرارتی CLPHPها در حالت عمودی، درصد کاهش مقاومت حرارتی وسیله در این حالت نسبت به حالت افقی برای سیال عامل اتانول و آب به ترتیب در جدول ۴-۱۰ و جدول ۴-۱۱ آورده شده است.



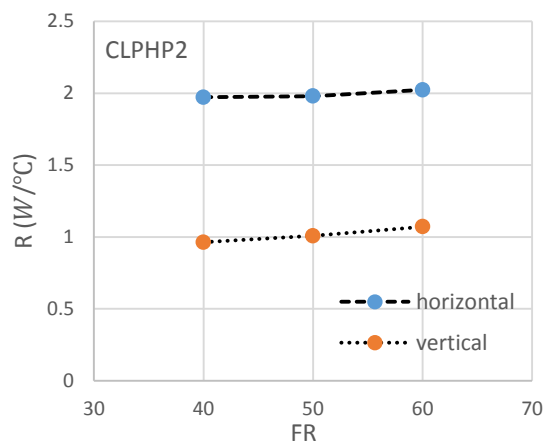
(ب)



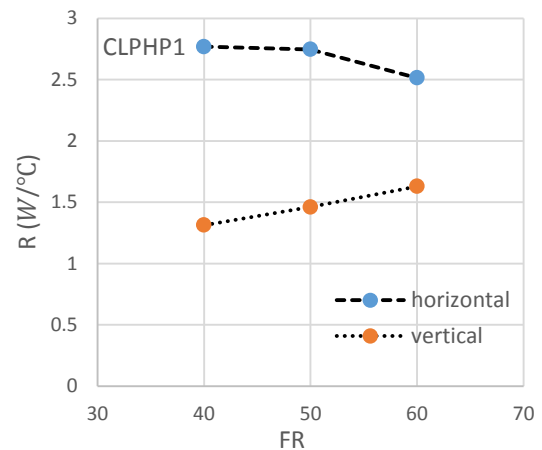
(الف)

شکل ۴-۲۱: مقایسه‌ی مقدار میانگین مقاومت حرارتی بین حالت افقی و عمودی (سیال عامل اتانول)

CLPHP2 (ب) CLPHP1 (الف)



(ب)



(الف)

شکل ۴-۲۲: مقایسه‌ی مقدار میانگین مقاومت حرارتی بین حالت افقی و عمودی (سیال عامل آب)

CLPHP2 (ب) CLPHP1 (الف)

جدول ۴-۱۰: درصد کاهش مقدار مقاومت حرارتی میانگین حالت عمودی نسبت به حالت افقی برای سیال عامل اتانول

FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	
۳۹,۹۴	۴۳,۶۴	۳۲,۱۳	درصد کاهش CLPHP1
۴۰,۳۳	۴۵,۹۵	۳۵,۴۶	درصد کاهش CLPHP2

جدول ۴-۱۱: درصد کاهش مقدار مقاومت حرارتی میانگین حالت عمودی نسبت به حالت افقی برای سیال عامل آب

FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	
۳۵,۲۰	۴۶,۸۲	۵۲,۵۸	درصد کاهش CLPHP1
۴۷,۰۴	۴۹,۰۸	۵۱,۱۶	درصد کاهش CLPHP2

با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی جاذبه با تأثیری که در حرکت سیال می‌گذارد باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم می‌شود. وقتی CLPHP تحت نیروی جاذبه کار می‌کند وسیله به ندرت دچار خشک شدگی می‌گردد، زیرا سیال عاملی که در اثر افزایش دمای اواپراتور و در نتیجه بالا بودن فشار در این قسمت به قسمت کندانسور هدایت شده، به واسطه‌ی نیروی جاذبه با غلبه بر نیروی کشش سطحی، نیروی برشی دیواره و نیروی حاصل از فشار موجود در قسمت اواپراتور دوباره به قسمت اواپراتور برگردانده شده و تکرار مداوم این عمل موجب افزایش چشم‌گیر انتقال حرارت در حضور جاذبه می‌گردد.

یکی دیگر از عواملی که در حضور جاذبه باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم می‌گردد افزایش چشم‌گیر در سرعت تشکیل و رشد حباب و افزایش سرعت نوسانات است که مشخصاً افزایش انتقال حرارت را در پی دارد.

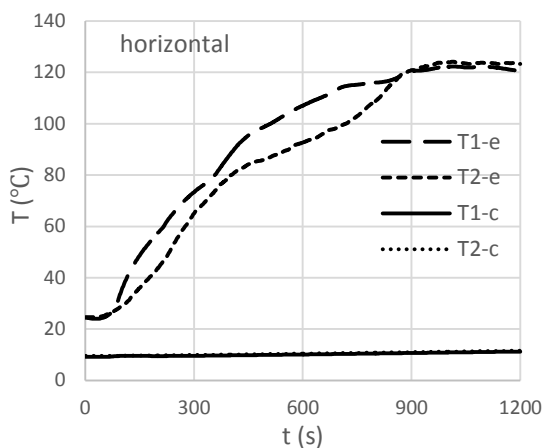
نتایج حاکی از این است که در همه‌ی نسبت‌های پرشدگی وجود جاذبه باعث بهبود عملکرد حرارتی هر دو CLPHP شده است. زمانی که از اتانول به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌شود، مقدار مقاومت حرارتی سیستم بین ۳۲,۱۳ تا ۴۵,۹۵ درصد کاهش داشته است، و در مورد آب این کاهش بین ۳۵,۲ تا ۵۲,۵۸ درصد بوده است و این نتایج نقش بسیار مهم جاذبه در بهبود عملکرد حرارتی

CLPHP را نشان می‌دهد.

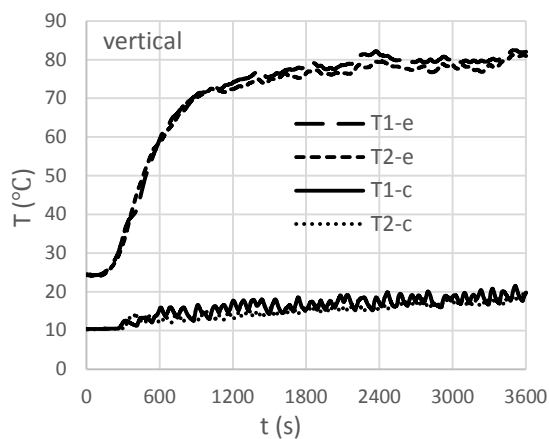
نتیجه‌ی قابل ملاحظه‌ای که از آزمایشات استنباط می‌شود این است که اگرچه در نبود جاذبه کارایی CLPHP کاهش یافته است ولی حتی در صورت نبود نیروی جاذبه هم سیستم می‌تواند پویایی خود را در بسیاری از مواقع کارکرد وسیله حفظ کند و این نشان می‌دهد بسته به محیط کارکرد CLPHP، حتی در صورت میسر نبودن محیط برای قراردادن آن به صورت کاملاً عمودی، در زوایای دیگر و حتی در حالت افقی هم می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار بگیرد.

طبق شرایطی که ذکر شد با توجه به تغییرات مثبتی که جاذبه در فعل و انفعال داخلی سیستم به وجود می‌آورد که باعث انتقال حرارت بهتر سیستم می‌گردد، دمای سطح قسمت اواپراتور را نیز به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد و همین امر سبب می‌شود که سیستم در حالت عمودی تحت حرارت ورودی بالاتری دچار خشک‌شدگی گردد و به عبارتی وسیله در حضور جاذبه می‌تواند در محدوده‌ی وسیع‌تری از حرارت ورودی کارایی داشته باشد که این یک مزیت در زمینه‌ی انتقال حرارت است که بایستی مورد توجه قرار گیرد.

برای داشتن یک درک کلی از مقدار و چگونگی تغییرات دمای اواپراتور و کندانسور، نمودار تغییرات دما در نسبت‌پرشدگی ۵۰ درصد برای سیال عامل آب (به عنوان نمونه) برای CLPHP1 و CLPHP2 به ترتیب در شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۲۴ آورده شده است. همان‌طور که از نمودارهای تغییرات دما مشخص است، تغییرات دما با تغییرات مقاومت حرارتی CLPHP رابطه‌ی مستقیم دارد، لذا کاهش دمای اواپراتور در اثر حضور جاذبه کاهش مقاومت حرارتی را در پی دارد که نشان‌دهنده‌ی بهبود عملکرد حرارتی سیستم می‌باشد.



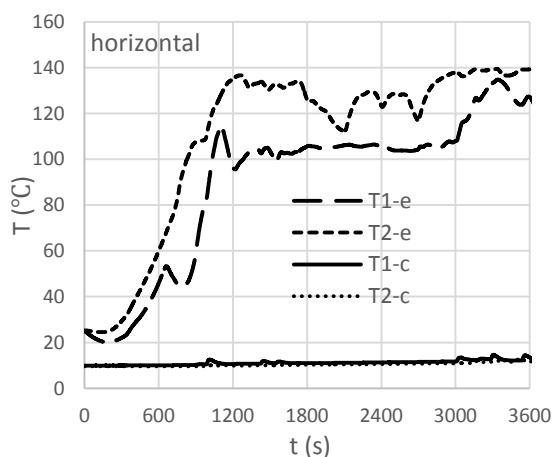
(ب)



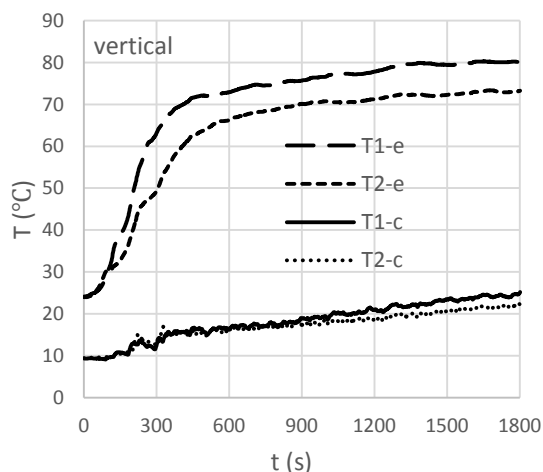
(الف)

شکل ۴-۲۳: نمودار تغییرات دمایی سیال عامل آب در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد برای CLPHP1

(الف) حالت عمودی (ب) حالت افقی



(ب)



(الف)

شکل ۴-۲۴: نمودار تغییرات دمایی سیال عامل آب در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد برای CLPHP2

(الف) حالت عمودی (ب) حالت افقی

با توجه به این که در مورد سایر نسبت‌های پرشدگی سیال عامل آب و همچنین سیال عامل اتانول نیز تغییرات دما رابطه‌ی مستقیمی با تغییرات مقاومت حرارتی دارد، لذا از آوردن نمودارهای تغییرات دما برای آن‌ها صرف نظر شده و فقط مقادیر میانگین دمای اواپراتور CLPHP1 و CLPHP2 به ترتیب

در جدول ۱۲-۴ و جدول ۱۳-۴ به منظور مقایسه‌ی حالت‌های افقی و عمودی آورده شده است تا نقش جاذبه در پایین آمدن دمای اواپراتور ملموس گردد.

جدول ۱۲-۴: مقدار میانگین دمای اواپراتور در حالت افقی و عمودی برای سیال‌های عامل آب و اتانول (CLPHP1)

FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	
۱۱۷,۴۶	۱۲۰,۹۶	۱۲۳,۴۳	آب (حالت افقی)
۸۲,۲۴	۷۸,۱۱	۷۳,۱۰	آب (حالت عمودی)
۱۰۹,۴۱	۱۰۵,۹۸	۹۶,۵۸	اتانول (حالت افقی)
۷۳,۶۲	۶۸,۲۹	۷۲,۴۳	اتانول (حالت عمودی)

جدول ۱۳-۴: مقدار میانگین دمای اواپراتور در حالت افقی و عمودی برای سیال‌های عامل آب و اتانول (CLPHP2)

FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	
۱۲۲,۱۰	۱۲۰,۱۷	۱۱۷,۹۰	آب (حالت افقی)
۷۶,۵۷	۷۴,۳۳	۷۲,۳۶	آب (حالت عمودی)
۱۱۷,۸۲	۱۱۵,۷۵	۱۱۰,۲۵	اتانول (حالت افقی)
۷۹,۳۲	۷۳,۰۲	۷۹,۵۲	اتانول (حالت عمودی)

با توجه به جدول ۱۲-۴ و جدول ۱۳-۴ در همه‌ی نسبت‌های پرشدگی مربوط به هر دو CLPHP، جاذبه باعث کاهش شدید دمای اواپراتور شده و همچنین با توجه به رابطه‌ی مستقیم دمای اواپراتور با مقاومت حرارتی، کاهش مقاومت حرارتی را نیز در پی داشته است و بایستی به این نکته دقت کرد که این بهبود عملکرد از تغییرات مثبت فعل و انفعال‌های داخلی سیال عامل، در اثر حضور جاذبه نشأت می‌گیرد.

۴-۶- تأثیر حرارت ورودی بر عملکرد حرارتی CLPHP

در این قسمت سعی بر این است تا با بررسی میزان تأثیرگذاری نرخ حرارت ورودی بر عملکرد حرارتی CLPHP، در کامل تر کردن کار پیش رو گام برداریم. در این راستا از CLPHP2، تحت شار حرارتی متفاوت و با استفاده از سیال عامل اتانول در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد، در حالت عمودی استفاده شده است. لازم به ذکر است که تمام آزمایش‌ها تا به این‌جا برای CLPHP1 و CLPHP2 به ترتیب تحت شار حرارتی ۴۰،۵ و ۵۴ وات انجام شده است.

شکل ۴-۲۵ تغییرات دمای اواپراتور تحت نرخ‌های حرارتی ۲۷،۵۰۴ (صفر تا ۱۴۰۰ ثانیه)، ۶۱،۸۸۴ (۱۴۰۰ تا ۲۸۰۰ ثانیه) و ۱۱۰،۰۱۶ (۲۸۰۰ تا ۴۲۰۰ ثانیه) که بر قسمت اواپراتور وارد می‌شود را نشان می‌دهد که با توجه به آن، افزایش حرارت ورودی باعث افزایش دمای اواپراتور شده است ولی این افزایش دما تا زمانی که باعث خشک‌شدگی قسمت اواپراتور نگردد، به معنای تضعیف عملکرد حرارتی CLPHP نمی‌باشد و حتی ممکن است باعث بهبود کارایی وسیله نیز گردد که به بررسی آن خواهیم پرداخت.

با توجه به شکل ۴-۲۵، شکل ۴-۲۶ و جدول ۴-۱۴، افزایش نرخ حرارت ورودی از ۲۷،۵۰۴ به ۶۱،۸۸۴ وات، باعث شده تا مقاومت حرارتی میانگین ۰،۲۸۴۸۸ کاهش یابد (که البته با افزایش ۲۳،۲۴ درجه‌ای مقدار دمای میانگین اواپراتور نیز همراه بوده است)، که این نشان می‌دهد عملکرد حرارتی CLPHP با افزایش نرخ حرارت ورودی، بهبود یافته است ولی وقتی نرخ حرارت ورودی از ۶۱،۸۸۴ به ۱۱۰،۰۱۶ وات می‌رسد، اگرچه وسیله حرارت بیش‌تری را انتقال می‌دهد ولی تغییر محسوسی در مقاومت حرارتی وسیله مشاهده نمی‌شود که ناشی از افزایش ۴۲،۹۴ درجه‌ای دمای قسمت اواپراتور می‌باشد.

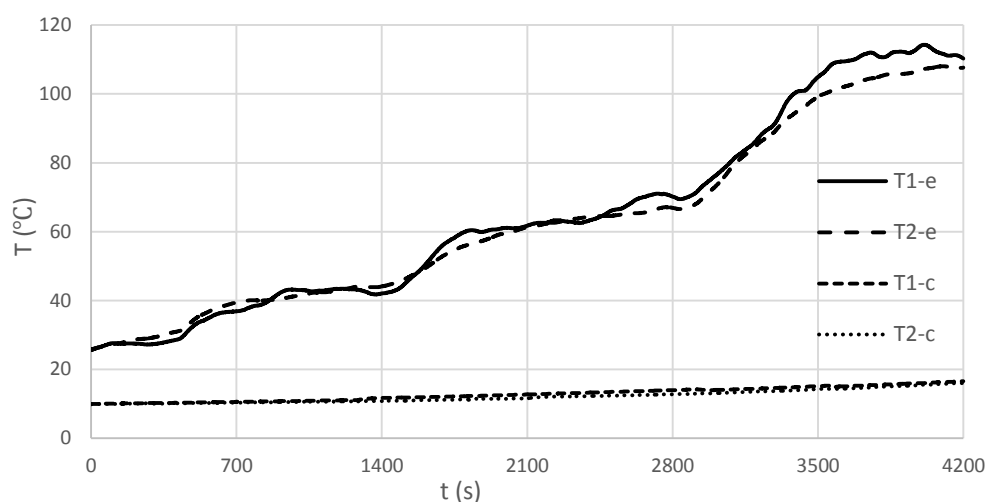
با توجه به نکاتی که ذکر شد در بررسی عملکرد حرارتی وسیله بایستی دو عامل دما و نرخ حرارت ورودی به قسمت اواپراتور به‌طور همزمان مورد توجه قرار بگیرد و با استفاده از ترکیب این دو پارامتر درباره‌ی عملکرد حرارتی CLPHP بحث شود. به همین منظور در این کار برای تعیین وضعیت

عملکرد حرارتی CLPHP، پارامتری به نام مقاومت حرارتی کلی که ترکیبی از دما و نرخ حرارت ورودی می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است.

نکته‌ی دیگری که در استفاده از CLPHPها بایستی مورد توجه قرار بگیرد، مربوط به محدوده‌ی دمایی است که وسیله در آن کار می‌کند. با توجه به نتایج اگرچه با افزایش حرارت ورودی از ۶۱,۸۸۴ به ۱۱۰,۰۱۶، مقدار مقاومت حرارتی میانگین CLPHP2 تغییر محسوسی نداشته است که نشان می‌دهد وسیله در نرخ حرارت ورودی بالاتر کارایی خود را از دست نداده است و این یک نکته‌ی مثبت در انتقال حرارت تلقی می‌شود ولی بایستی به این نکته‌ی اساسی توجه کرد که دمای میانگین قسمت اواپراتور ۴۲,۹۴ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش داشته است.

در انجام این آزمایش نکته‌ی قابل تأملی که با توجه به نتایج آزمایشگاهی به آن دست می‌یابیم این است که CLPHP در یک اختلاف دمای کم بین قسمت اواپراتور و کندانسور (حدود ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد)، می‌تواند گرمای قابل ملاحظه‌ای را انتقال دهد. البته بایستی به این نکته توجه کرد، اختلاف دمایی که باعث start-up سیستم می‌گردد وابسته به ویژگی‌های ترموفیزیکی سیال عامل مورد استفاده در CLPHP بوده و بسته به سیال عاملی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند کم‌تر و یا بیش‌تر باشد. لذا با فهم این موضوع بسته به محدوده‌ی دمایی که قرار است CLPHP در آن مورد استفاده قرار بگیرد، سیال عامل مناسب را برمی‌گزینیم.

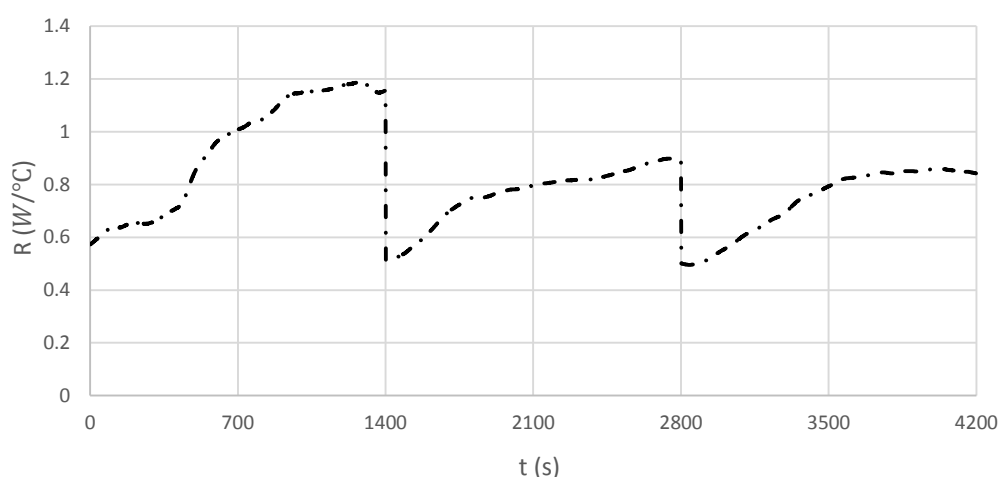
در یک جمع‌بندی بایستی به این نکته اشاره کرد، تا زمانی که CLPHP این توانایی را داشته باشد که حرارت بیش‌تری را انتقال بدهد از نظر کارایی مورد قبول بوده و در بحث انتقال حرارت نیز این یک ویژگی مثبت در عملکرد حرارتی CLPHP به حساب می‌آید ولی باید توجه داشت که افزایش انتقال حرارت سیستم با افزایش دمای اواپراتور همراه است، لذا بایستی محدوده‌ی دمایی موردنظر و همچنین مقدار حرارتی که قرار است توسط CLPHP انتقال داده شود مورد توجه طراحی این وسیله قرار بگیرد، تا با توجه به ویژگی‌ها و پارامترهای تأثیرگذار که در این کار به آن پرداخته شد با طراحی CLPHP متناسب با شرایط کاری و انتخاب سیال عامل مناسب، مورد بهره‌گیری مهندسی واقع گردد.



شکل ۴-۲۵: نمودار تغییرات دمای قسمت اواپراتور CLPHP2 (سیال عامل اتانول)

جدول ۴-۱۴: مقادیر میانگین دمای اواپراتور و مقاومت حرارتی CLPHP2، تحت نرخ‌های حرارت ورودی متفاوت (سیال عامل اتانول)

۳۵۰۰-۴۲۰۰ ثانیه	۲۱۰۰-۲۸۰۰ ثانیه	۷۰۰-۱۴۰۰ ثانیه	
۱۰۷,۹۸	۶۵,۰۴	۴۱,۸۰	مقدار دمای میانگین قسمت اواپراتور
۰,۸۴۱۴۹۸	۰,۸۴۳۳۶۰	۱,۱۲۷۸۲۰	مقدار مقاومت حرارتی کلی میانگین



شکل ۴-۲۶: نمودار تغییرات مقاومت حرارتی CLPHP2 برای نرخ‌های حرارتی ورودی متفاوت (سیال عامل اتانول)

۷-۴- هدایت حرارتی کلی CLPHP

در این قسمت به بررسی پارامتر هدایت حرارتی کلی که می‌تواند نماینده‌ی عملکرد حرارتی CLPHP باشد می‌پردازیم.

هدایت حرارتی کلی برای CLPHPها همان‌طور که در مقدمه‌ی این فصل نیز ذکر شد طبق رابطه‌ی $K = \frac{L_{eff}}{A_{cr}} \frac{Q}{\Delta T} \left(\frac{W}{m^2C} \right)$ بیان می‌شود، مطابق با رابطه‌ی مذکور هدایت حرارتی کلی علاوه بر حرارت ورودی به قسمت اواپراتور و اختلاف دمای میانگین بین اواپراتور و کندانسور، به طول و مساحت مقطع CLPHP نیز بستگی دارد. با توجه به مقادیر میانگین هدایت حرارتی که در جدول ۴-۱۵ و جدول ۴-۱۶ آورده شده است^۱، می‌توان دریافت نتایجی که تحت شرایط متفاوت آزمایشگاهی از مقاومت حرارتی استنباط شد، از طریق هدایت حرارتی نیز بیان می‌گردد، لذا پارامتر هدایت حرارتی کلی می‌تواند در کنار مقاومت حرارتی کلی برای تعیین عملکرد حرارتی CLPHP مورد استفاده قرار بگیرد. به‌عنوان مثال با بهره‌گیری از پارامتر مقاومت حرارتی دریافیم که استفاده از نانوذرات مس با کاهش مقاومت حرارتی باعث بهبود عملکرد حرارتی CLPHP می‌گردد، همین نتیجه‌گیری را می‌توان از بالارفتن هدایت حرارتی در اثر استفاده از نانوذرات مس استنباط کرد.

جدول ۴-۱۵: مقادیر میانگین هدایت حرارتی کلی برای سیال‌های عامل مورد استفاده در حالت عمودی:

CLPHP2 (ب)				CLPHP1 (الف)			
FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	WF	FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	WF
۱۰۷۶,۶۴۸	۱۱۹۸,۲۳۵	۱۰۶۱,۱۳۵	اتانول	۱۷۵۱,۲۴۷	۱۹۱۹,۲۲۸	۱۸۰۲,۹۲۳	اتانول
۱۱۵۵,۵۱۷	۱۲۲۸,۲۵۲	۱۲۸۶,۰۶۳	آب	۱۵۱۰,۲۱۱	۱۶۴۱,۸۵۰	۱۷۷۲,۲۴۰	آب
۱۱۶۲,۳۹۷	۱۳۰۷,۳۸۶	۱۱۹۲,۷۷۶	استون	۱۹۰۶,۰۳۵	۲۱۴۷,۱۱۳	۲۳۹۸,۹۷۵	استون
۱۲۳۵,۱۱۸	۱۳۸۰,۷۹۹	۱۳۸۸,۷۲۷	نانوسیال مس	۲۶۵۹,۴۵۰	۲۱۸۹,۸۲۱	۲۰۴۴,۷۴۰	نانوسیال مس

^۱ تمامی مقادیر مربوط به میانگین هدایت حرارتی کلی تحت شار حرارتی ۴۰,۵ وات برای CLPHP1 و ۵۴ وات برای CLPHP2 محاسبه شده است.

جدول ۴-۱۶: مقادیر میانگین هدایت حرارتی کلی برای سیال‌های عامل مورد استفاده در حالت افقی :

CLPHP2 (ب)				CLPHP1 (الف)			
FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	WF	FR-۶۰	FR-۵۰	FR-۴۰	WF
۶۵۰,۳۷۷	۶۵۱,۵۴۶	۶۸۶,۲۷۹	اتانول	۱۰۳۹,۴۵۴	۱۰۹۵,۴۵۴	۱۲۱۳,۸۸۸	اتانول
۶۳۱,۲۸۲	۶۲۶,۶۵۴	۶۳۴,۹۰۸	آب	۹۶۶,۷۷۳	۹۵۸,۵۹۱	۹۶۲,۷۰۱	آب

با توجه به مقادیر هدایت حرارتی کلی، بیش‌ترین مقدار هدایت حرارتی مربوط به حالتی است که از نانوسیال مس در CLPHP1، با نسبت‌پرشدهی ۶۰ درصد و در حالت عمودی استفاده شده است. تحت شرایط مذکور هدایت حرارتی میانگین CLPHP به $۲۶۵۹,۴۵۰ \frac{W}{m^{\circ}C}$ رسیده است که چند برابر هدایت حرارتی فلزاتی از قبیل مس و آلومینیوم^۱ که جزء بهترین هادی‌های فلزی هستند، می‌باشد. با توجه به مقادیر هدایت حرارتی، در بدترین حالت عملکردی CLPHP‌های مورد استفاده در این کار، بازهم هدایت حرارتی سیستم بالاتر از هدایت حرارتی فلزاتی از قبیل مس و آلومینیوم بوده و این نشان‌دهنده‌ی قدرت بالای CLPHP در انتقال حرارت می‌باشد.

باید به این نکته توجه کرد که هدف اصلی این پژوهش افزایش عملکرد حرارتی CLPHP نبوده و CLPHP‌های مورد استفاده در این کار در راستای اهداف مورد نظر به صورت کاملاً شیشه‌ای ساخته شده است. لذا باید در نظر داشت که اگر جنس CLPHP از فلزاتی با هدایت حرارتی بالا، نظیر مس و آلومینیوم ساخته شود، مطمئناً هدایت حرارتی و عملکرد سیستم افزایش قابل‌ملاحظه‌ای خواهد داشت که در این صورت می‌توان از CLPHP به‌عنوان یک ابررسانا در صنایع مختلف بهره برد.

۱ هدایت حرارتی مس و آلومینیوم به‌ترتیب $۴۰۱ \frac{W}{m^{\circ}C}$ و $۴۲۹ \frac{W}{m^{\circ}C}$ می‌باشد.

۴-۸- صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی

در هر پژوهش آزمایشگاهی نیاز است داده‌هایی که تحت شرایط مختلف برداشت می‌شود مورد صحت‌سنجی قرار گیرد، لذا در همین راستا برای بررسی میزان انحراف در بسیاری از حالات آزمایش، آزمایش موردنظر تحت شرایط یکسان، دو یا سه بار انجام گردید تا از این طریق میزان انحراف در هر آزمایش مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به اینکه در انجام این پژوهش از آب و اتانول نسبت به سایر سیال‌های عامل، بیش‌تر استفاده شده است، برای داشتن یک دید کلی از مقدار و چگونگی تغییرات مقاومت حرارتی کلی و در نتیجه عملکرد حرارت سیستم در تست‌هایی با شرایط آزمایشگاهی یکسان، نمودار مقاومت حرارتی کلی برای سیال عامل آب و اتانول در نسبت‌پوشدگی ۵۰ درصد در حالت عمودی برای CLPHP2 در شکل ۴-۲۷ و مقادیر میانگین مقاومت حرارتی کلی^۱، انحراف معیار (μ) و خطای استاندارد (S_e) سیستم تحت شرایط مذکور در جدول ۴-۱۷ آورده شده است.

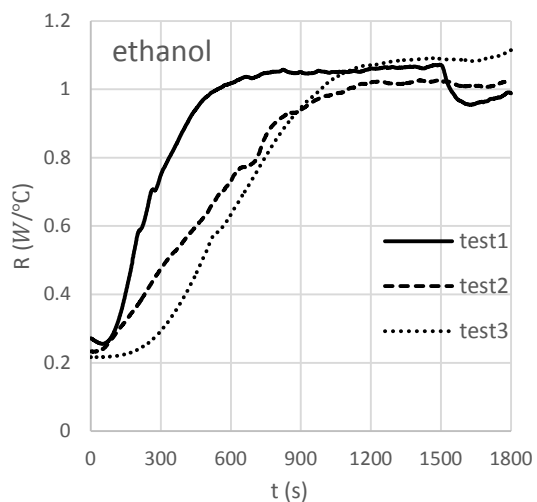
لازم به ذکر است که مقادیر انحراف معیار و درصد خطای استاندارد به ترتیب طبق رابطه‌ی (۴-۱۲) و (۴-۱۳) بیان می‌گردد.

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (۴-۱۲)$$

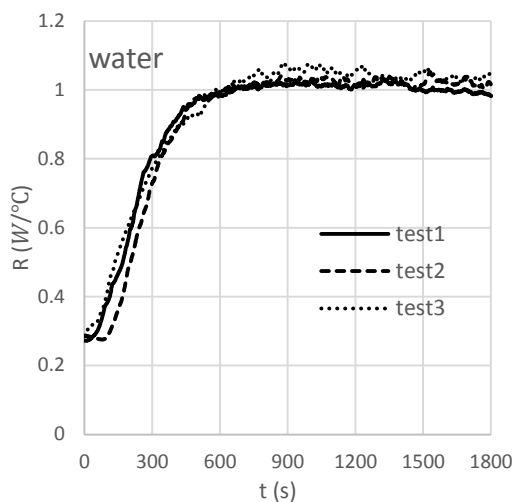
$$S_e = \frac{\mu}{\sqrt{N}} \quad (۴-۱۳)$$

در رابطه‌ی (۴-۱۲)، \bar{x} مقدار میانگین مقادیر مقاومت حرارتی کلی و N تعداد تکرار هر آزمایش می‌باشد.

^۱ مقادیر میانگین مقاومت حرارتی برای سیال عامل آب در بازه‌ی زمانی ۶۰۰-۱۲۰۰ و برای سیال عامل اتانول در بازه‌ی زمانی ۱۲۰۰-۱۸۰۰ ثانیه محاسبه شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۲۷: نمودار تغییرات مقاومت حرارتی در نسبت پرشدگی ۵۰ درصد برای CLPHP2

(الف) سیال عامل آب (ب) سیال عامل اتانول

جدول ۴-۱۷: مقادیر میانگین مقاومت حرارتی کلی، انحراف معیار و درصد خطای استاندارد CLPHP2 در حالت عمودی

درصد خطای استاندارد	انحراف معیار	میانگین	آزمایش ۳	آزمایش ۲	آزمایش ۱	
۰,۸۰۳	۰,۰۱۳۹۱۰	۱,۰۲۳۴۲۶	۱,۰۴۱۶۶۸	۱,۰۲۰۶۸۰	۱,۰۰۷۹۳۰	سیال عامل آب
۱,۸۳۹	۰,۰۳۱۸۴۹	۱,۰۴۲۲۷۲	۱,۰۸۷۲۴۲	۱,۰۱۷۵۹۷	۱,۰۲۱۹۷۶	سیال عامل اتانول

فصل پنجم

جمع بندی نتایج و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این فصل سعی بر آن است که با جمع بندی نتایج حاصل از آزمایش‌ها، پس از بازگ کردن نتایج مهمی که در این پژوهش به آن دست یافته شد با ارائه‌ی پیشنهاداتی مبنی بر کامل‌تر کردن کار پیش‌رو، یک طرح جامع برای طراحی CLPHP ارائه گردد.

۵-۲- جمع‌بندی نتایج

چکیده‌ای از مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

« با توجه به نتایج بصری به‌طور کلی شاهد ۳ نوع رژیم جریان در CLPHP ها می‌باشیم:

- نوع اول شامل حباب‌های گردی است که قطر آنها از چند میکرومتر تا قطر داخلی CLPHP متغیر می‌باشد.

- نوع دوم شامل حباب‌های ستونی شکلی است که قطر آنها معادل با قطر داخلی CLPHP بوده و طول آنها در کم‌ترین مقدار کمی بیش‌تر از قطر داخلی CLPHP و در بیش‌ترین مقدار قابل مقایسه با طول CLPHP می‌باشد.

- نوع سوم شامل یک رژیم جریان کاملاً متلاطم بوده که حباب‌هایی با شکل نامتقارن آن را تشکیل می‌دهند.

« رژیم جریان سیستم با توجه به ویژگی‌های ترموفیزیکی سیال عاملی که در یک CLPHP با ساختار معین مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعیین می‌گردد و خوب یا بد بودن عملکرد حرارتی سیستم به نوع این رژیم بستگی دارد.

« ویسکوزیته‌ی دینامیکی و گرادیان فشار اشباع نسبت به دما ($\frac{dp}{dT_{sat}}$) بیش‌ترین تأثیر را بر عملکرد حرارتی CLPHP می‌گذارند و برای بهبود آن بایستی از سیال عاملی استفاده شود که دارای ویسکوزیته‌ی دینامیکی پایین و $\frac{dp}{dT_{sat}}$ بالا باشد.

در مورد سایر پارامترهای ترموفیزیکی نیز به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که بالا بودن گرمای ویژه و هدایت حرارتی و پایین بودن دمای جوش، گرمای نهان تبخیر و کشش سطحی باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم می‌گردند.

« تعیین بهترین نسبت پرشدگی برای رسیدن به بهترین کارایی CLPHP متناسب با نوع سیال عامل مورد استفاده تعیین می‌گردد و برای هر سیال عامل یک نسبت پرشدگی بهینه وجود دارد. « افزایش تعداد دورهای CLPHP به‌طور کلی باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم می‌گردد و تأثیر نوع سیال عامل بر عملکرد حرارتی سیستم را کاهش می‌دهد.

« استفاده از نانوذرات مس در سیال عامل بسته به شرایط آزمایش مقاومت حرارتی سیستم را بین ۶,۰۶ تا ۴۲,۷۶ درصد کاهش و هدایت حرارتی آن را بین ۶,۸۹ تا ۷۵,۵ درصد افزایش داده و به‌طور کلی باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم شده است.

« حضور جاذبه در حالت عمودی با تغییرات مثبتی که در رژیم جریان CLPHP به‌وجود می‌آورد با کاهش چشم‌گیر دمای قسمت اواپراتور و در نتیجه کاهش مقاومت حرارتی باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم می‌شود. در این کار مقاومت حرارتی سیستم در حالت عمودی نسبت به حالت افقی بین ۳۲,۱۳ تا ۵۲,۵۸ درصد کاهش یافته است.

« در طراحی CLPHP، نرخ حرارت ورودی به قسمت اواپراتور و دمای قسمت اواپراتور و کندانسور بایستی به‌صورت هم‌زمان مورد توجه قرار بگیرد و با توجه به محدوده‌ی دمایی مورد نظر و همچنین مقدار حرارتی که قرار است توسط CLPHP انتقال داده شود و با در نظر گرفتن ویژگی‌ها و پارامترهای تأثیرگذار که در این کار به آن پرداخته شد، با انتخاب سیال عامل مناسب، مورد بهره‌گیری مهندسی واقع گردد.

۵-۳- پیشنهادات

در این کار آزمایش‌ها بر روی دو CLPHP از جنس پیرکس که جزئیات آن‌ها در شکل ۳-۹ آورده شده است، انجام گرفت. برای تکمیل کار پیش رو موارد ذیل قابل اجرا می‌باشد:

« با ساختن CLPHP‌هایی از جنس فلزاتی از قبیل مس و آلومینیوم که دارای هدایت حرارتی بالایی هستند و دارای ابعاد CLPHP‌های مورد استفاده در این کار می‌باشند، تأثیر جنس CLPHP بر عملکرد حرارتی آن مورد بررسی قرار بگیرد.

« برای به دست آوردن قطر داخلی بهینه، آزمایشات با ساختن CLPHP‌هایی که صرفاً قطر داخلی آن‌ها با قطر داخلی CLPHP‌های مورد استفاده در این کار تفاوت دارد، تکرار شود.

« با ساختن CLPHP‌هایی با سطح داخلی زبر (که البته باعث افزایش سطح انتقال حرارت نیز می‌شود)، تأثیر آن بر رژیم جریان و عملکرد حرارتی سیستم مورد بررسی واقع گردد.

« کارایی سیستم تحت شار حرارتی بسیار پایین و یا بسیار بالا، با انتخاب سیال عاملی که دارای ویژگی‌های ترموفیزیکی متناسب با شرایط مذکور است، مورد بررسی شود.

« با تغییر در قسمت کندانسور و اواپراتور، تأثیر نوع دادن حرارت به قسمت اواپراتور و چگونگی دفع گرما در قسمت کندانسور در عملکرد حرارتی سیستم مورد بررسی قرار بگیرد.

1. Charoensawan, P., et al. (2003), "Closed loop pulsating heat pipes: Part A: parametric experimental investigations". *Applied Thermal Engineering*. **23**(16): p. 2009-2020.
2. Khandekar, S. (2004), "Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes".
3. <https://www.wikipedia.org>.
4. Senjaya, R. and T. Inoue (2013), "Oscillating heat pipe simulation considering bubble generation Part I: Presentation of the model and effects of a bubble generation". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **60**: p. 816-824.
5. G.F. Smyrnov, (1971), G.A.S., USSR patent 504065.
6. Akachi, H. (1990), "Structure of a heat pipe". Google Patents.
7. Akachi, H. (1993), "Structure of micro-heat pipe". Google Patents.
8. Mehta, B. and S. Khandekar (2014), "Taylor bubble-train flows and heat transfer in the context of Pulsating Heat Pipes". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **79**: p. 279-290.
9. Maezawa, S., et al. (1995), "Thermal performance of capillary tube thermosyphon". in *Proc. 9th Int. Heat Pipe Conf.*
10. Maezawa, S., T. Izumi, and K. Gi. (1997), "Experimental chaos in oscillating capillary tube heat pipes". in *10th International Heat Pipe Conference, Stuttgart, German*. 1997.
11. Hosoda, M., S. Nishio, and R. Shirakashi (1999), "Study of Meandering Closed-Loop Heat-Transport Device". *Vapor-Plug Propagation Phenomena. JSME International Journal Series B*. **42**(4): p. 737-744.
12. Tong, B., T. Wong, and K. Ooi (2001), "Closed-loop pulsating heat pipe". *Applied thermal engineering*. **21**(18): p. 1845-1862.
13. Qu, W. and T.-Z. Ma (2002), "Experimental Investigation on flow and heat transfer of pulsating heat pipe". *Journal of Engineering Thermophysics*. **23**(5): p. 596-598.
14. Khandekar, S., N. Dollinger, and M. Groll (2003), "Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study". *Applied Thermal Engineering*. **23**(6): p. 707-719.
15. Khandekar, S. and M. Groll (2004), "An insight into thermo-hydrodynamic coupling in closed loop pulsating heat pipes". *International Journal of Thermal Sciences*. **43**(1): p. 13-20.
16. Khandekar, S., A.P. Gautam, and P.K. Sharma (2009), "Multiple quasi-steady states in a closed loop pulsating heat pipe". *International Journal of Thermal Sciences*. **48**: p. 535-546.
17. Qu, W. and H. Ma (2007), "Theoretical analysis of startup of a pulsating heat pipe". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **50**(11): p. 2309-2316.
18. Yang, H., S. Khandekar, and M. Groll (2008), "Operational limit of closed loop pulsating heat pipes". *Applied Thermal Engineering*. **28**(1): p. 49-59.
19. Charoensawan, P. and P. Terdtoon (2008), "Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes". *Applied Thermal Engineering*. **28**(5): p. 460-466.

20. Mauro Mameli , M.M., Sameer Khandekar (2013), "Local heat transfer measurement and thermo-fluid characterization of a pulsating heat pipe". *International Journal of Thermal Sciences*. **75**: p. 140-152.
21. Mauro Mameli , V.M., Sauro Filippeschi , Marco Marengo (2014), "Thermal instability of a Closed Loop Pulsating Heat Pipe: Combined effect of orientation and filling ratio". *Experimental Thermal and Fluid Science*.
22. Mameli, M., et al. (2014), "Thermal response of a closed loop pulsating heat pipe under a varying gravity force". *International Journal of Thermal Sciences*. **80**: p. 11-22.
23. Zhihu Xue, W., MinghuiXie (2013), "Full visualization and startup performance of an ammonia pulsating heat pipe". *Propulsion and Power Research*. **2(4)**: p. 263–268.
24. Raffles Senjaya, T.I. (2013), "Bubble generation in oscillating heat pipe". *Applied Thermal Engineering*. **60**: p. 251-255.
25. Liu, X., Y. Chen, and M. Shi (2013), "Dynamic performance analysis on start-up of closed-loop pulsating heat pipes (CLPHPs)". *International Journal of Thermal Sciences*, 2013. **65**: p. 224-233.
26. Spinato, G., et al. (2014), "Time-Strip Visualization and Thermo-Hydrodynamics in a Closed Loop Pulsating Heat Pipe". *Applied Thermal Engineering*.
27. Gamit, H., et al. (2015), "Experimental investigations on pulsating heat pipe".
28. Chol, S. (1995), "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles". *ASME-Publications-Fed*. **231**: p. 99-106.
29. Tsai, C., et al. (2004), "Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance". *Materials Letters*. **58(9)**: p. 1461-1465.
30. Ma, H., et al. (2006), "An experimental investigation of heat transport capability in a nanofluid oscillating heat pipe". *Journal of Heat Transfer*. **128(11)**: p. 1213-1216.
31. Lin, Y.-H., S.-W. Kang, and H.-L. Chen (2008), "Effect of silver nano-fluid on pulsating heat pipe thermal performance". *Applied Thermal Engineering*. **28(11)**: p. 1312-1317.
32. Qu, J. and H. Wu (2011), "Thermal performance comparison of oscillating heat pipes with SiO₂/water and Al₂O₃/water nanofluids". *International Journal of Thermal Sciences*. **50(10)**: p. 1954-1962.
33. Wang, S., et al. (2009), "Experimental study on pulsating heat pipe with functional thermal fluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **52(21)**: p. 5276-5279.
34. V.K. Karthikeyan , K.R., B.C. Pillai , A. Brusly Solomon (2014), "Effect of nanofluids on thermal performance of closed loop pulsating heat pipe". *Biological Cybernetics*: p. 171-178.
35. Rittidech, S., et al.(2000), "Effect of inclination angles, evaporator section lengths and working fluid properties on heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe". in *Proceedings of the sixth international heat-pipe symposium, Chiang Mai, Thailand*.

36. Schneider, M., et al. (2000), "Visualisation of Thermofluid-dynamic Phenomena in Flat Plate Closed Loop Pulsating Heat Pipes". in *Proceedings of the 6th International Heat Pipe Symposium, Chiang Mai, Thailand*.
37. Zhang, X. (2004), "Experimental study of a pulsating heat pipe using FC-72, ethanol, and water as working fluids". *Experimental Heat Transfer*. **17**(1): p. 47-67.
38. Shafii, M., A. Faghri, and Y. Zhang (2002), "Analysis of heat transfer in unlooped and looped pulsating heat pipes". *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. **12**(5): p. 585-609.
39. Khandekar, S., et al. (2002), "Thermofluid dynamic study of flat-plate closed-loop pulsating heat pipes". *Microscale Thermophysical Engineering*. **6**(4): p. 303-317.
40. Hua Han, X.C., Yue Zhu, Shende Sun (2014), "A comparative study of the behavior of working fluids and their properties on the performance of pulsating heat pipes (PHP)". *International Journal of Thermal Sciences*. **82**: p. 138-147.
41. Groll, M. and S. Khandekar (2002), "Pulsating heat pipes: a challenge and still unsolved problem in heat pipe science". *Archives of Thermodynamics*. **23**(4): p. 17-28.
42. Duminy, S. (1998), "Experimental investigation of pulsating heat pipes". Diploma thesis, Institute of Nuclear Engineering and Energy Systems (IKE), University of Stuttgart, Germany.
43. Wang, X., et al. (2015), "Experimental investigation of the influence of surfactant on the heat transfer performance of pulsating heat pipe". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **83**: p. 586-590.
44. Yang, K.-S., et al. (2015), "Micro pulsating heat pipes with alternate microchannel widths". *Applied Thermal Engineering*. **83**: p. 131-138.
45. M Lutfor Rahmana , F.M., Sumaiya Nawrina, R A Sultana, and Mohammad Alib (2015), "Effect of fin and insert on the performance characteristics of Open Loop Pulsating Heat Pipe (OLPHP)". *Procedia Engineering*. **105**: p. 105-112.
46. M Lutfor Rahman1, R.A.S., *, T Islam1, Noor M Hasan1, Mohammad Ali2 (2015), "An experimental investigation on the effect of fin in the performance of closed loop pulsating heat pipe (CLPHP)". *Procedia Engineering*. **105**: p. 137-144.
47. M Lutfor Rahmana , F.M., Sumaiya Nawrina, R A Sultana, and Mohammad Alib (2015), "Effect of fin and insert on the performance characteristics of Close Loop Pulsating Heat Pipe (CLPHP)". *Procedia Engineering*. **105**: p. 129-136.
48. Zuo, Z. and M. North (2000), "Miniature high heat flux heat pipes for cooling electronics". Proc. of SEE, 2000: p. 573-579.
49. Wong, T., et al. (1999), "Theoretical modeling of pulsating heat pipe. in Proceedings of the 11th International Heat Pipe Conference".
50. Yang, X.-S. and T. Luan (2012), "Modelling of a pulsating heat pipe and startup asymptotics". *Procedia Computer Science*, 2012. **9**: p. 784-791.
51. Shafii, M.B., A. Faghri, and Y. Zhang (2001), "Thermal modeling of unlooped and looped pulsating heat pipes". *Journal of Heat Transfer*. **123**(6): p. 1159-1172.
52. Zhang, Y. and A. Faghri (2002), "Heat transfer in a pulsating heat pipe with open end". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **45**(4): p. 755-764.

53. Dilawar, M. and A. Pattamatta (2013), "A parametric study of oscillatory two-phase flows in a single turn Pulsating Heat Pipe using a non-isothermal vapor model". *Applied Thermal Engineering*. **51**(1): p. 1328-1338.
54. Senjaya, R. and T. Inoue (2013), "Oscillating heat pipe simulation considering bubble generation Part II: Effects of fitting and design parameters". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **60**: p. 825-835.
55. Burban, G., et al. (2013), "Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications". *Applied Thermal Engineering*. **50**(1): p. 94-103.
56. Gu, J., M. Kawaji, and R. Futamata (2004), "Effects of gravity on the performance of pulsating heat pipes". *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. **18**(3): p. 370-378.
57. Harirchian, T. and S.V. Garimella (2010), "A comprehensive flow regime map for microchannel flow boiling with quantitative transition criteria". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **53**(13): p. 2694-2702.
58. Gu, J., M. Kawaji, and R. Futamata (2005), "Microgravity performance of micro pulsating heat pipes". *Microgravity-Science and Technology*. **16**(1-4): p. 181-185.
59. <http://webbook.nist.gov/>.
60. Alawi, O.A., et al. (2014), "Fluid flow and heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: a review". *International Communications in Heat and Mass Transfe*. **56**: p. 50-62.
61. Mohammadi, N., M. Mohammadi, and M.B. Shafii (2013), "A Review of Nanofluidic Pulsating Heat Pipes: Suitable Choices for Thermal Management of Electronics". *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*. **3**(3).
62. Jahan, S.A., M. Ali, and M.Q. Islam (2013), "Effect of inclination angles on heat transfer characteristics of a closed loop pulsating heat pipe (CLPHP)". *Procedia Engineering*. **56**: p. 82-87.

Abstract

According to industry demand for heat transfer in less space, research in the field of two-phase heat transfer systems have been attractive for researchers in recent years. Pulsating heat pipe (PHP) is a two-phase heat transfer device that can be opened or closed loop which be placed in subset of conventional heat pipe's. PHP is a U-shaped tube with several rounds and consists of two parts of the evaporator and condenser which also can exist an adiabatic zone between the evaporator and condenser. The amount of heat that is transferred from the evaporator to the condenser depends on the flow regime of the fluid is existing in PHP that this regime depends on many parameters such as structure of PHP, working fluid and thermo-physical parameters related to it, heat input to the evaporator and etc.

Considering importance of the flow regime in PHP in heat transfer, at this work to verify the two-phase flow regime and its impact on the performance of PHP by making two close loop pulsating heat pipe (CLPHP) of Pyrex whit internal diameter 4mm and outer diameter 6mm, experiments were done by using of working fluids of ethanol, water, copper nano-fluid and acetone at filling ratios of 40, 50 and 60 percent and in two cases of vertical and horizontal mode and the effect of working fluid and thermo-physical characteristics related to it, filling ratio, number of rounds, the gravity, the use of nanoparticles in the working fluid and heat input to the evaporator were investigated.

In this research according to the visual results, in general was observed 3 types of flow regime that each of them had a different impact on heat transfer and performance of CLPHP. The use of copper nanoparticles and the gravity with creating positive changes in flow regime and therefore with increasing the heat transfer and decreasing the temperature of the evaporator causes reducing the thermal resistance of the system. In the case of other working fluids that were used with respect to filling ratio, thermo-physical characteristics, the number of rounds CLPHP and other experimental conditions, best system performance was evaluated.

Keywords: Two-phase flow regime, Pulsating heat pipe (PHP), Close loop pulsating heat pipe (CLPHP), Filling Ratio (FR), Thermo-physical characteristics, Working fluid, Thermal resistance



University of Shahrood

Faculty of Mechanic

**Experimental Investigation of Two Phase Flow Regime and its Effect
on the Performance of Pulsating Heat Pipes**

Mohammad Halimi

Supervisor:
Dr. Ali Abbasnejhad

Advisor
Dr. Mahmood Noruzi

September 2015